



**XXVI Международная конференция
Математическое и компьютерное моделирование
в механике деформируемых сред и конструкций**
*28 сентября – 30 сентября 2015
Санкт-Петербург, Россия*

ТЕЗИСЫ – ABSTRACTS

**XXVI International Conference
Mathematical and Computer Simulation
in Mechanics of Solids and Structures**
*September 28 - September 30, 2015
Saint Petersburg, Russia*

MCM 2015

**XXVI Международная конференция
Математическое и компьютерное моделирование
в механике деформируемых сред и конструкций**

**28 сентября – 30 сентября 2015
Санкт-Петербург, Россия**

**Труды. Том 1
(Тезисы докладов)**

Proceedings. Vol 1

**XXVI International Conference
Mathematical and Computer Simulation
in Mechanics of Solids and Structures
September 28 - September 30, 2015
Saint Petersburg, Russia**

УДК 539.3
ISBN 978-5-91753-107-6

Математическое и компьютерное моделирование в механике деформируемых сред и конструкций. Тезисы докладов XXVI Международной конференции. Санкт–Петербург 28–30 сентября 2015г.

От редакции

В сборнике представлены тезисы докладов XXVI Международной конференции по математическому и компьютерному моделированию в механике деформируемых сред и конструкций. Конференции по данной тематике проводятся по нечетным годам в соответствии с планом работы секции строительной механики и надежности сооружений им. профессора Н.К. Снитко Санкт-Петербургского Дома ученых Российской Академии наук.

Конференция посвящается рассмотрению перспективных направлений математического моделирования задач механики деформируемого твердого тела, жидкости и газа с позиций их фундаментальной и прикладной значимости, моделированию сложных физических процессов, имеющих место при создании современных материалов и конструкций.

Принят алфавитный порядок расположения тезисов по фамилии первого из авторов доклада.

Тематика выносимых на конференцию докладов соответствует основным направлениям работы конференции:

- Численные и аналитические методы решения задач строительной механики и механики сплошной среды (наука, практика и образование)
- Динамика и прочность машин и конструкций. Методы оптимизации и идентификации. Динамические и статические задачи теории устойчивости
- Наномеханика, вязкоупругопластичность, повреждаемость и разрушение материалов и конструкций. Механика композитных материалов
- Компьютерные технологии и программное обеспечение в моделировании конструкций. Механика сплошных и сыпучих сред. Физико-технические проблемы освоения Арктики

Редакционная коллегия:

Проф. Ю.В. Петров, проф. С.А. Атрошенко, проф. Ю.Л. Рутман, проф. В.В. Улитин, проф. В.И. Смирнов (отв. редактор).

Тезисы подготовлены и изданы на средства Российского Фонда фундаментальных исследований (грант № 15-01-20290) и ФАНО России и на средства спонсорской помощи компаний ООО «ТЕХСОФТ» и ООО «ИнжПроектСтрой».

ОРГАНИЗАТОРЫ КОНФЕРЕНЦИИ

Институт проблем машиноведения Российской академии наук,
Санкт-Петербургский научный центр Российской академии наук,
Российский фонд фундаментальных исследований,
Федеральное агентство научных организаций России,
Научный совет Российской академии наук по
механике деформируемого твердого тела,
Научный совет Российской академии наук по строительной механике,
Северо-Западное отделение научного совета РАН по горению и взрыву,
Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербургский государственный университет,
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет,
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Петра Великого,
Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I,
ООО «ТЕХСОФТ»,
Группа компаний «Геореконструкция»,
ООО «ИнжПроектСтрой»,
Международная академия холода,
Секция строительной механики и надежности конструкций
Санкт-Петербургского Дома ученых РАН им. А.М. Горького.



ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

Сопредседатели комитета:

чл.-корр. РАН, проф. Петров Ю.В.,
проф. Смирнов Е.Б.

Зам. председателя:

проф. Галилеев С.М, проф. Рутман Ю.Л.

Члены комитета:

проф. Баженов В.Г, проф. Боровков А.И,
проф. Брагов А.М., к.ф.м.н. Братов В.А.,
проф. Голоскоков Д.П., проф. Игумнов Л.А.,
доц. Каган-Розенцвейг Л.М., проф. Karlunov J.
(Британия), проф. Кипиани Г.О. (Грузия), проф.
Кондратьева Л.Н, проф. Лалин В.В., проф.
Мельников Б.Е, проф. Парамонов В.Н., prof.
Prkazchikov D. (Британия), проф. Присяжнюк
В.К. (Украина), проф. Сарыгулов А.И.,
проф. Сахаров И.И., prof. Tabakov P. (ЮАР),
проф. Улитин В.В, проф. Уздин А.М.,
к.т.н. Федоровский Г.Д, проф. Фрумен А.И.,
проф. Шашкин А.Г.

СЕКРЕТАРИАТ КОНФЕРЕНЦИИ

Ученый секретарь:

проф. Атрошенко С.А.

Члены:

Ведерникова А., доц. Гурьева Ю.А.,
Мелешко В.А., асп. Назаров Р.А.,
асп. Орлов О.А.

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

Председатель комитета:

академик РАН, проф. Морозов Н.Ф.

Зам. председателя:

чл.-корр. РАН, проф. Индейцев Д.А.,
проф. Семенов В.А.

Члены комитета:

prof. Bogdanovich A. (USA), prof. Metrikine A.
(Holland), prof. Rajashekhar (India), prof.
Roubakhi A. (Algeria), prof. Wen Zhu Shao
(China), проф. Арутюнян Р.А., проф. Беляев
А.К., проф. Бакулин В.Н., проф. Белкин А.Е.,
проф. Белостоцкий А.М., проф. Ватин Н.И.,
проф. Гаврюшин С.С., проф. Гольдштейн Ю.Б.,
проф. Груздков А.А., проф. Даль Ю.М., проф.
Кадисов Г.М., проф. Кашеварова Г.Г., проф.
Каюмов Р.А, проф. Клованич С.Ф, (Украина),
проф. Косицын С.Б., проф. Кривцов А.М.,
чл.-корр. РАН, проф. Ломакин Е.В., проф.
Масленников А.М., проф. Матросов А.В., проф.
Овидько И.А., проф. Паймушин В.Н., проф.
Пальмов В.А., проф. Перельмутер А.В.
(Украина), проф. Петинов С.В., проф. Пискунов
В.Г. (Украина), проф. Победря Б.Е., проф.
Потапов А.Н., проф. Прозорова Э.В., проф.
Рассказов А.О. (Украина), проф. Родионов А.А.,
проф. Розин Л.А., проф. Семенов А.С., проф.
Смирнов В.И., проф. Тарануха Н.А., проф.
Травуш В.И., проф. Улицкий В.И., проф.
Харлаб В.Д., проф. Цой А.П. (Казахстан), проф.
Чирков В.П., проф. Шклярчук Ф.И.

PROPERTIES OF OPERATORS AND OPERATOR-VALUED FUNCTIONS IN THE ANALYSIS OF INHOMOGENEOUS LAYERED ELASTIC SYSTEMS

Galileev S.M.¹, Tabakov P.Y.², Jaghmaidze A.³

1 - St.-Petersburg State University of Economics, Russia

2 - Durban University of Technology, South Africa

3 - Georgian Technical University, Georgia

pashat@dut.ac.za

The theory and application of the Method of Initial Functions in the field of solid mechanics is based on a symbolic method of the building the solution of the partial differential equations. This theory is also justified in the theory of pseudo-differential operators and can be considered among other things as operational calculus, which is a further development and generalisation of the classical Fourier calculus and its variants. Such operator-valued functions are power series with the coefficients which are various combinations of the differential operators accompanied by a constant.

1. Operator valued functions. In the classical and non-classical elasticity problems, in particular, in the analysis of inhomogeneous and laminated plates and shells there are used various differential operators and functions [1,2,3]. Research in the properties of these objects is a nontrivial and useful task, which enables us to construct convenient analytical and numerical algorithms. The properties of the operator-functions of the method of initial functions [4] have been considered. These functions are represented in the form of operator power series

$$L_k = \sum_{m=0}^{\infty} l_{km} x_1^m / m!$$

where the coefficients l_{km} are differential operators which include derivatives ∂_k , ($k=2,3,...m$) of various orders, exclusive of x_1 , with some constant coefficients, and for $k=m$, and $k=m$, $l_{km} \equiv 1$ if $m < k$, $l_{km} \equiv 0$. Their convergence in various classes of functions has been also studied. The validity of the application of the Cauchy problem for a various differential equations of the theory of elasticity in partial derivatives reduces to the question of closing operators L_k in a certain functional space. The Cauchy problem is valid in the sense of Adamar-Petrovsky, if this closure is possible. Otherwise the problem is incorrect. As this takes place, the closing of operators is possible if there is the smallest closed extension of these operators. In turn, the conditions that allow the extension of the operator, provide an effective way to establish the correctness of the Cauchy problem. The aforementioned operator-valued functions are infinite operator series, having in some cases a closed symbolic form of representation. They form an informal operator algebra, isomorphic algebra of analytic functions in some region G . It is shown that the operators L_k form a ring under the operations of addition and multiplication, which allows us to treat the operator-valued functions as algebraic quantities. In operators with variable coefficients l_{km} such actions are not

valid.

2. Concluding remarks. The use of operator-valued functions for the analysis of heterogeneous elastic systems is given. The method can be used in order to obtain an exact or accurate solution for a number of engineering structures, particularly orthotropic, transversely-isotropic and isotropic plates.

References

1. Galileev SM, The method of operator power series. *Abstract of the II International Conference*. September 15-19, 2011, Batumi, Georgia, pp. 96-97
2. Giorgashvili L, Jaghmaidze A, Meladze R. Stationary oscillation boundary value problems of two-temperature elastic mixture for the ball. *Georgian International Journal of Science and Technology*. Nova Science Publishers, Inc., 2013, pp. 173-187.
3. Tabakov PY. Big Bang - Big Crunch lay-up optimization in design of thick anisotropic pressure vessels based on an exact elasticity solution. *Scientific Journal: Bulletin of St. Petersburg State University of Engineering and Economics*, **51**(8), 2011, pp. 150-172.
4. Galileev SM. The method of initial functions in the mechanics of anisotropic plates. St. Petersburg:SPbGUVK, Russia, 2007, 212p. [in Russian]

RARE MESH SCHEME FOR SOLVING THREE-DIMENSIONAL PROBLEMS OF ELASTICITY THEORY ON THE BASIS OF 10-NODE FINITE ELEMENT

Spirin S.V., Chekmarev D.T.
NNSU Lobachevsky, Nizhny Novgorod, Russia
ingral@rambler.ru

1. Introduction.

In [1- 3] the principles of rare schemes FEM and their implementation on the basis of 4-node linear elements for the solution of dynamic and static problems in the theory of elasticity and plasticity. Testing and verification of these schemes showed their high efficiency as compared with conventional circuits based on linear 4-node and 8-node polylinear finite elements. In this paper the development of the rare schemes to the ideology of the elements of a higher order. We consider the implementation of the scheme for three-dimensional rare static elasticity problems on the basis of 10-node element with quadratic displacement approximation.

2. Description of the scheme

At the heart of the circuit is conventional 10-node tetrahedral element in the form with nodes at the vertices and midpoints of the edges. Following [3], we assume the original FE mesh composed of a hexahedron, and the elements - inscribed in the center of each hexahedron as shown in Fig. 1. Thus, each hexahedron base grid is a calculated 10-node element. Ullage hexahedron, it contains plenty of other extensive parameters of the problem are connected to the calculated member. Consider the element inscribed in the unit cube. The coordinates of the nodes in a given order have the following meanings: (0,0,0), (1,1,0), (1,0,1), (0,1,1), (0.5,0.5,0), (0.5,0,0.5), (0,0.5,0.5), (1,0.5,0.5), (0.5,1,0.5), (0.5,0.5,1). The basis functions in the cell

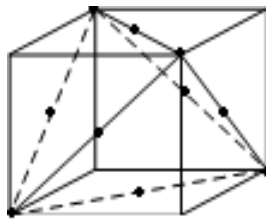


Fig. 1: Location rare mesh element

take a:

$$\begin{aligned}
\varphi_1(x_1, x_2, x_3) &= \frac{1}{2}(x_1 + x_2 + x_3 - 2)(x_1 + x_2 + x_3 - 1) \\
\varphi_2(x_1, x_2, x_3) &= \frac{1}{2}(-x_1 - x_2 + x_3)(-x_1 - x_2 + x_3 + 1) \\
\varphi_3(x_1, x_2, x_3) &= \frac{1}{2}(-x_1 + x_2 - x_3)(-x_1 + x_2 - x_3 + 1) \\
\varphi_4(x_1, x_2, x_3) &= \frac{1}{2}(x_1 - x_2 - x_3)(x_1 - x_2 - x_3 + 1) \\
\varphi_5(x_1, x_2, x_3) &= (x_1 + x_2 + x_3 - 2)(-x_1 - x_2 + x_3) \\
\varphi_6(x_1, x_2, x_3) &= (x_1 + x_2 + x_3 - 2)(-x_1 + x_2 - x_3) \\
\varphi_7(x_1, x_2, x_3) &= (x_1 + x_2 + x_3 - 2)(x_1 - x_2 - x_3) \\
\varphi_8(x_1, x_2, x_3) &= (-x_1 - x_2 + x_3)(-x_1 + x_2 - x_3) \\
\varphi_9(x_1, x_2, x_3) &= (-x_1 - x_2 + x_3)(x_1 - x_2 - x_3) \\
\varphi_{10}(x_1, x_2, x_3) &= (-x_1 + x_2 - x_3)(x_1 - x_2 - x_3)
\end{aligned}$$

At the same time the continuity of the displacement field is stored only on the edges of the elements.

Elasticity problem is formulated as a variational equation (principle of virtual work)

$$\int_V \sigma_{ij} \delta \varepsilon_{ij} dV = \int_V \rho F_i \delta u_i dV + \int_{S_p} P_i \delta u_i dS, \quad (1)$$

where V – the volume of an isotropic elastic body, a part of the boundary S_p which are given surface load; σ_{ij} – the components of the stress tensor; ε_{ij} – linear components of the strain tensor; u_i – the components of the displacement vector; F_i and P_i – components, respectively, mass and surface loads ρ – density. Movements, the angles of rotation, deformation considered small

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}), \quad (2)$$

strain associated with stress by Hooke's law

$$\sigma_{ij} = \lambda \delta_{ij} \varepsilon_{kk} + 2\mu \varepsilon_{ij}, \quad (3)$$

where λ and μ – Lamé parameters.

As is customary in the FEM [4], we use the matrix-vector notation relations. Vector finite element nodal displacements denoted

$$u^T = (u_1^1, u_1^2, u_1^3, \dots, u_{10}^1, u_{10}^2, u_{10}^3), \quad (4)$$

Vectors linear component of the strain tensor and the stress (because of the symmetry considered only six components), respectively

$$(\varepsilon)^T = (\varepsilon_{11}, \varepsilon_{22}, \varepsilon_{33}, \gamma_{12}, \gamma_{23}, \gamma_{31}), \quad (5)$$

$$(\sigma)^T = (\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}, \sigma_{12}, \sigma_{23}, \sigma_{31}), \quad (6)$$

In matrix form the Cauchy relation (2), Hooke's law (3) and the total potential energy of a single element can be written as

$$(\varepsilon) = (B)(u), \quad (7)$$

$$(\sigma) = (C)(\varepsilon) = (C)(B)(u), \quad (8)$$

$$\Pi = \frac{1}{2}(u)^T(K)(u) - (u)^T(q), \quad (9)$$

where (B) – matrix differential operator, (C) – matrix of elastic constants, (K) – stiffness matrix element $(K) = \int_{V_i} (B)^T (C) (B) dV$, (q) – vector of nodal forces, statically equivalent effect to the element distribution of the mass and surface forces.

The stationarity condition (1) the energy functional leads to a system of linear algebraic equations of equilibrium of the body, which is modified with regard to the boundary conditions of displacement. Solving the resulting system of relative movements direct or iterative method, defined nodal displacements across the computational domain and the formulas (7) and (8) are calculated tensor components of the strain and stress.

This scheme appears to be very promising. Compared with the conventional scheme 10-node of a finite element it has 2 times smaller knots and is 5 times smaller elements. Drawing an analogy with the delicate circuits on the basis of the linear element, there is also every reason to believe that its convergence should not be worse than that of the conventional scheme.

References

1. DT Chekmarev Numerical finite element method to the "fishnet" grids // Problems of Atomic Science and Technology, Ser. Mathematical modeling of physical processes. 2009. Vol. 2, pp 49-54.
2. Zhidkov AV Zefirov SV Kastalskaya KA Spirin SV, DT Chekmarev Rare scheme of numerical solution of three-dimensional dynamic problems of the theory of elasticity and plasticity // Herald of UNN. Nizhny Novgorod: Publishing House of the Nizhny Novgorod State University. 2011. № 4, part 4, pp 1480-1482.
3. Zhidkov AV, Spirin SV, DT Chekmarev Rare scheme finite element method of solving the static problems of the theory of elasticity // scientists. Rec. Kasane. Univ. Ser. Physics and Mathematics. science. 2012.- T. 154 kN. 4.- pp 26-32.
4. Golovanov AI, Berezhnaya DV Finite Element Method in Solid Mechanics tel.- Kazan: Publishing house "DAS", 2001. - 301 p.

AN APPLICATION OF EVOLUTIONARY ALGORITHMS FOR THE DESIGN OPTIMISATION OF COMPLEX ENGINEERING STRUCTURES

Tabakov P.Y.¹, Galileev S.M.²

1 - Durban University of Technology, South Africa

2 - St.-Petersburg State University of Economics, Russia

pashat@dut.ac.za

The increased use of composite materials and structures in many engineering applications led to the need for a more accurate analysis and design optimization. While methods of stress-strain analysis developed faster, optimization techniques have been lagging behind. As a result, many designed structures do not fulfill their full potential. The present study demonstrates major achievements in recent years in an application of evolutionary algorithms to the design optimization of fibre-reinforced laminated composite structures. Such structures are of much interest due to high structural design sensitivity to fibre orientations as well as complex multidimensional discrete optimization problems. Using an anisotropic multilayered cylindrical pressure vessel and an exact elasticity solution as an example, we show how the optimum, or near-optimum, solution can be found in a more efficient way.

1. Evolutionary algorithms. The evolutionary algorithms are population based and make use of numerical optimization. They do not require any gradient information and do not make any assumptions about the functional landscape. Another significant advantage is the ability to solve complex multi-variable problems since there is no direct link between algorithm complexity and problem complexity. Contrary to classical optimization methods the evolutionary algorithms are well suited for discrete (integer) optimization. Although such algorithms can become “stagnate” and inefficient after a large number of iterations, they rarely crash and are remarkably robust. Among the drawbacks are poor constraint handling, sensitivity and, at times, high computational cost.

Among the most popular evolutionary algorithms are the genetic algorithms, the particle swarm optimization and the Big Bang - Big Crunch optimization algorithm. The genetic algorithms are the most popular type of the evolutionary algorithms. It is difficult to name a branch of science where it is not used. It is not surprising that with an advent of GA the situation with the design optimization of composites has radically changed.

2. Multilayered structures. Even a slight change of a fiber orientation in laminated composites can result in a considerable change of the stress-strain state in the structure. This is especially true for composites having more or less complex geometry.

As an example we consider a complex objective function, the critical pressure in a laminated anisotropic thick cylindrical pressure vessel [1]. This function occupies about 700 lines of the computer code.

First we employ the genetic algorithms. The performance of the algorithm is excellent, fast and efficient for 1, 2, 3, 4 and 5 design parameters. However, its performance changes with the increase in the number of design parameters to 10 and 20. The length of the chromosome becomes too long to efficiently exchange

the genetic material. The fitness function quickly reaches 90% of its maximum value and slows down after that. With a careful tuning of the algorithm, the final result is achieved after about a couple of hours.

Taking into account the fact that in the case of 20 design parameters there are 91^{20} , which is approximately 1.52×10^{39} different combinations (and remembering the complexity of the objective function), this is not bad at all.

The emergence of particle swarm optimization methodology in 1995 broke the GA dominance of many years. This methodology was designed for the optimization of non-linear functions by using a number of particles that constitute a swarm moving around in the search space looking for the best solution. It is a robust stochastic optimization technique based on the movement and intelligence of swarms, which applies the concept of social interaction to problem solving

The main advantages of PSO over the GA is its much better ability of handling multidimensional spaces and, of course, simplicity. However, the performance of PSO is very sensitive to the control parameters, which is the main disadvantage of the algorithm. It might take some time to tune these parameters in order to avoid the partial optimization ("wandering" locally) or the other way around, "flying over" the optimum point or region. Despite the above, it is well justified to spend a bit of time adjusting the control its parameters. The result proves to be outstanding. In our case, instead of a couple hours, the same problem can be solved within a couple of minutes. Moreover, the results obtained are even better than those obtained with GA.

The Big Bang – Big Crunch optimization method relies on one of the evolution theories of the universe, namely the Big Bang - Big Crunch theory. In the Big Bang phase the population of feature vectors randomly fills the space, while in the Big Crunch phase these points are drawn into a dense cluster with the centre of gravity being the optimum solution of the optimization problem. The algorithm is a heuristic population-based evolutionary optimization method.

The performance of the algorithm is amazing, even in the most complex case of a 20-D problem the near-optimum solution is already achieved after only 50 generations. Thus, within one minute we managed to crunch a 20-D problem (1.52×10^{39} variants of the solution) and the final result is even more accurate than in the other two methods.

3. Concluding remarks. The present study demonstrates how progress in modern evolutionary algorithms has revolutionized the design optimization of composite structures. The performance of such algorithms is shown by the example of the fibre-reinforced composite laminated pressure vessel.

References

1. Tabakov PY, Summers EB. Lay-up optimization of multilayered anisotropic cylinders based on a 3-D elasticity solution. *Computers and Structures*, 84, 2006, pp. 374-384.

DIGITAL IMAGE CORRELATION

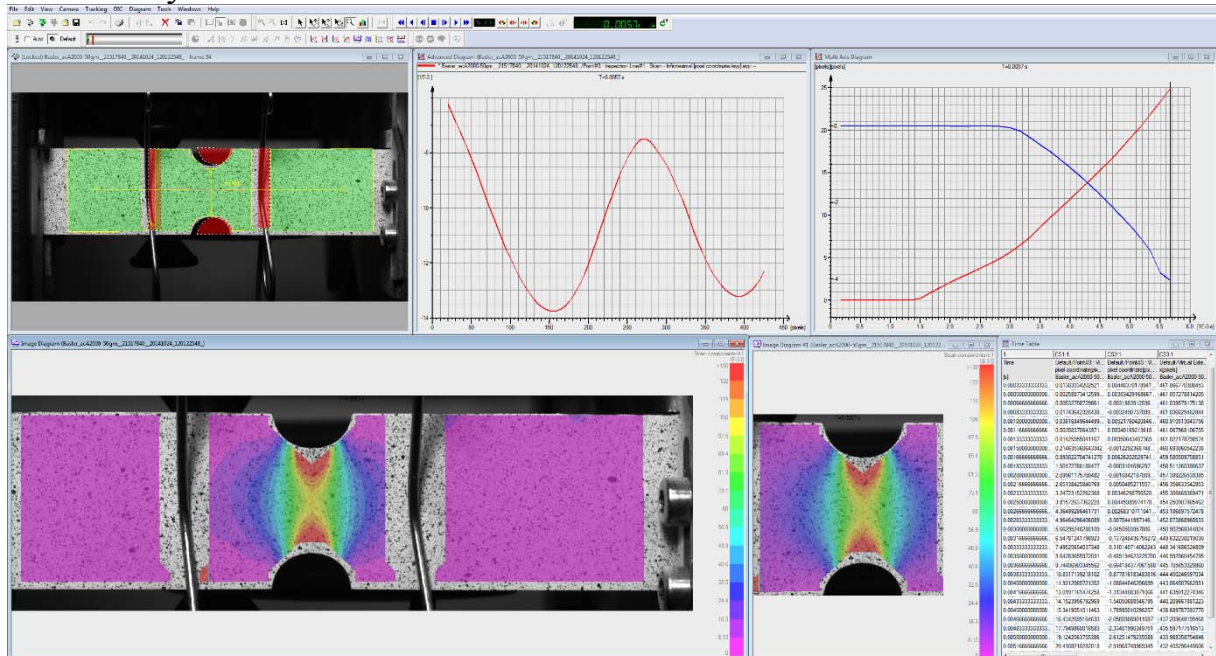
Zangi O.

IMAGE SYSTEMS AB, Sweden

ohad.zangi@imagesystems.se

Digital image correlation (DIC) and tracking is an optical method that employs tracking and image registration techniques for accurate 2D and 3D measurements of changes in images. This is often used to measure deformation (engineering), displacement, strain, and optical flow, but it is widely applied in many areas of science and engineering.

TEMATM – the market leader in point tracking techniques, is now equipped with an integrated brand new DIC module to seamlessly swap between point tracking and DIC tracking techniques when doing non-contact measuring of events recorded by a camera.



Pic. 1. Tensile test using TEMA DIC module for calculation of strain, stress and displacement of an object with an accuracy going beyond a 1/100 of a pixel

TEMA also includes a module to successfully control the settings and image capture of cameras. A wide range of different brands can be connected to the software enabling the user to simultaneously use different camera models when setting up the test.

TEMA unique capability is to calculate and calibrate different motion plans orientation in order to correct the camera misalignment position relative to the specimen, we call it 2.5D calibration.

Image Systems offers non-contact measuring software for a wide range of applications with propriety developed algorithms for 2D, 3D and 6DoF calculations.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ ТРЕХМЕРНЫХ ТЕЛ ИЗ
НЕСЖИМАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ**

*Абдрахманова А.И., Султанов Л.У., Харжавина В.С., Фахрутдинов Л.Р.
Казанский Федеральный Университет, Россия
A061093@mail.ru*

**INVESTIGATION OF STRAIN OF SOLIDS FOR INCOMPRESSIBLE
MATERIALS**

*Abdrakhmanova A.I., Harzhavina V.S., Sultanov L.U., Fahrutdinov L.R.
Kazan Federal University, Russia*

Построена модель исследования конечных деформаций трехмерных тел из несжимаемых упругих материалов. Используется метод последовательных нагружений. Получено разрешающее уравнение в актуальном состоянии, которое с помощью линеаризации и метода конечных элементов сводится к системе линейных алгебраических уравнений.

The model of investigation of large deformations of solids for incompressible elastic materials is considered. The incremental method is used. The resolved equation at actual state is defined. After linearization and using a finite element method the system of linear algebraic equations is received.

Работа посвящена разработке методики исследования конечных упругих деформаций несжимаемых материалов. Кинематика описывается левым тензором Коши–Грина (мера деформации Фингера), тензором пространственного градиента скорости и тензором деформации скорости [1]. Вводится удельная потенциальная энергия деформации, которая зависит от левого тензора Коши–Грина.

Напряженное состояние описывается тензором истинных напряжений Коши–Эйлера, который определяется в актуальном состоянии. Далее приводится описание процедуры получения линеаризованных определяющих соотношений [2].

Алгоритм исследования основан на методе шагового нагружения (инкрементального метода). В качестве базового уравнения принимается вариационное уравнение мощностей в актуальном состоянии. После линеаризации получена разрешающая система линейных алгебраических уравнений, где неизвестным является приращение перемещений в текущем времени [3]. Для учета несжимаемости применяется метод штрафных функций [4].

В качестве примера рассматривается задача растяжения прямоугольной пластины с круговым вырезом, для которой выбрано соответствующее выражение потенциала упругих деформаций.

Таким образом, в работе построена методика численного исследования трехмерных тел, для которых физические соотношения задаются с помощью упругого потенциала. Получены линеаризованные определяющие

соотношения и разрешающее уравнение. Численная реализация основана на методе конечных элементов на базе восьмиузлового полилинейного элемента [3].

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 15-31-20602, 15-41-02557.

Литература

1. Голованов А.И., Коноплев Ю.Г., Султанов Л.У. Численное исследование конечных деформаций гиперупругих тел. I. Кинематика и вариационные уравнения //Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. физ.-матем. науки. Т.150, кн.1 – 2008. — 29-37 с.
2. Голованов А.И., Коноплев Ю.Г., Султанов Л.У. Численное исследование конечных деформаций гиперупругих тел. II. Физические соотношения //Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. физ.-матем. науки. Т.150, кн.3 – 2008. — 122-132 с.
3. Голованов А.И., Коноплев Ю.Г., Султанов Л.У. Численное исследование конечных деформаций гиперупругих тел. IV. Конечноеэлементная реализация. Примеры решения задач //Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. физ.-матем. науки. Т.152, кн.4 – 2010. – 115-126 с.
4. Bonet J., Wood R.D. Nonlinear continuum mechanics for finite element analysis. – USA, 1997. – 283 с.

ЗАКОНОМЕРНОСТЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НАБУХАНИЯ ГРУНТА ПОД ФУНДАМЕНТАМИ И ПОДЗЕМНЫМИ СООРУЖЕНИЯМИ

Абжалимов Р.Ш.

ОАО ТПИ «Омскгражданпроект», г. Омск, Россия

abjr@omgp.ru

THE PATTERN OF DISTRIBUTION OF VERTICAL STRESS OF SWELLING SOIL UNDER THE FOUNDATIONS AND UNDERGROUND STRUCTURES

Abzhalimov R.Sh.

TPI "Omskgrazhdanproekt", Omsk, Russia

Рассматривается закономерность распределения вертикальных напряжений набухания грунта под фундаментами и подземными сооружениями, напряженно-деформированное состояние (НДС) системы «набухающее грунтовое основание-фундамент - сооружение» для ленточного фундамента и НДС для квадратного фундамента при неравномерном увлажнении грунта основания. Приводятся рекомендации по выбору типа фундаментов на набухающих грунтах.

We consider the regularity of the distribution of vertical stress of swelling soil under the foundations and underground structures, the stress-strain state (SSS) of the "swelling subsoil - foundation - structure" for the tape base and VAT for a square foundation with uneven foundation soil moisture. We give advice on choosing the type of foundation on swelling soil.

Выводы:

1. Учитывая, что механизм деформирования грунтов: набухание, пучение, осадка при сжатии имеет общую природу, связанную с изменением влажности при изменении давления на грунт, можно утверждать, что закономерность распределения вертикальных напряжений набухания грунта под фундаментами и подземными сооружениями будет аналогичной закономерности распределения напряжений морозного пучения под ними согласно [7,8].
2. НДС сооружения не зависит от скорости набухания грунта и величины перемещения основания, а зависит только от значений внешних нагрузок и формой увлажнения.
3. На набухающих грунтах наиболее предпочтительны из фундаментов на естественном основании - ленточные фундаменты, а из столбчатых фундаментов – круглые фундаменты с круглыми колоннами.
4. При использовании квадратных и прямоугольных столбчатых фундаментов следует учитывать возможность поворота их в перпендикулярном к диагоналям направлении и уменьшении изгибной жесткости колонн в 1,41 раза.
5. Для исключения появления крутящих моментов в фундаментах, по возможности, следует принять шарнирное опирание колонн на

- фундаменты.
6. Для исключения утечки воды с водонесущих коммуникаций их следует прокладывать, в пределах контура здания (до первых колодцев), в чехлах с герметизацией их торцов.
 7. В набухающих грунтах, а также в глинистых грунтах при воздействии серной кислоты и других химических растворов следует учесть возможность появления дополнительных крутящих моментов при внецентренном нагружении фундаментов.

Литература

1. Е.А.Сорочан. Строительство сооружений на набухающих грунтах. М. Стройиздат, 1974г., 224 с.
2. А.Л.Невзоров. Обеспечение устойчивого функционирования системы «основание-техногенная среда» в сложных инженерно-геологических условиях: Автореферат, диссертация д.т.н./ Санкт-Петербургский Государственный Политехнический Университет, г. Санкт-Петербург, 2004, -41 с.
3. О.Р. Голли. Интегральные закономерности морозного пучения грунтов и их использование при решении инженерных задач в строительстве. Автореферат на соискание ученой степени д.т.н./ ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. – Санкт – Петербург, 2000-45с.
4. К.Терцаги. Строительная механика грунтов. М.-Л.: Госстройиздат, 1933, 392с.
5. Жиленков В.Н. Проницаемость экранов из глинистых грунтов (опыт исследований) // Филтрационные исследования и расчеты при проектировании гидротехнических сооружений: Мат. Всесоюз. Научно-техн. совещания, 18-20 мая 1982 г., Нарва; Л., 1983, 119-127 с.
6. Сологаев В.И. Филтрационные расчеты и компьютерное моделирование при защите от подтопления в городском строительстве. Омск: Издательство СибАДИ, 2002, 416 с.
7. Р.Ш.Абжалимов. Закономерность распределения напряжений морозного пучения грунта под фундаментами и подземными сооружениями / Р.Ш. Абжалимов – Новосибирск: Издательство СО РАН, 2008, 77с.
8. Р.Ш. Абжалимов. Использование сезонно промерзающих пучинистых грунтов в качестве оснований для фундаментов малоэтажных зданий и подземных сооружений в инженерной практике.
9. И.А. Симвулиди. Расчет инженерных конструкций на упругом основании. М. Высшая школа, 1978-480 с.
10. О.Р. Голли. Использование закономерностей набухания глинистых грунтов в строительстве. Санкт-Петербург: Реконструкция городов и геотехническое строительство, №8, 2004 с.132-141.
11. СП 22.13330.2011. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция. СНиП 2.02.01-83*. М:2011, 161 с.
12. Н.А. Цытович. Механика грунтов. – М.: высшая школа, 1983-288 с.
13. А.В. Филатов, А.С. Жакулин, Л.А. Галинская, А.А. Жакулина. Причины подъема фундаментов и строительных конструкций склада серной кислот. // Превентивные геотехнические меры по уменьшению природных и техногенных бедствий. Сборник трудов IV Международного геотехнического симпозиума 26-29 июля 2011 г. г. Хабаровск, издательство ДВГУПС, 388-391 с.

**МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ СОУДАРЕНИЙ МЕДНЫХ И
АЛЮМИНИЕВЫХ НАНОЧАСТИЦ С ПОВЕРХНОСТЯМИ МЕДНЫХ И
АЛЮМИНИЕВЫХ ПОДЛОЖЕК**

*Авдеева А.В., Погорелко В.В., Майер А.Е.
Челябинский государственный университет, Россия
awdeewaanya@yandex.ru*

**MOLECULAR DYNAMICS SIMULATION OF THE ALUMINUM AND
COPPER NANOPARTICLES HIGH-SPEED COLLISIONS WITH THE
SURFACES OF THE ALUMINUM AND COPPER SUBSTRATES**

*Avdeeva A.V., Pogorelko V.V., Mayer A.E.
Chelyabinsk State University, Russia*

В работе при помощи метода классической молекулярной динамики проведено моделирование процесса высокоскоростного соударения наночастиц с поверхностью металлической подложки. Исследованы физические явления, происходящих при данном процессе. Выявлены качественные и количественные зависимости получаемых результатов от размера и скорости наночастиц.

Modeling of a high-speed collision of nanoparticles with a metal surface is performed in this work using the molecular dynamics. Physical phenomena accompanying this process are investigated. Qualitative and quantitative dependences of the obtained results on size and velocity of nanoparticles are identified.

В настоящее время активно развиваются методы модификации поверхностного слоя металлов для изменения его физических и химических свойств. Одним из перспективных методов является электромагнитная инжекторная нанотехнология, так как металлы с многослойными композитными нанопокрывтиями могут обладать уникальными эксплуатационными и прочностными свойствами. Поэтому интерес состоит в моделировании процесса напыления частиц на поверхность металла и исследовании полученного нанокompозита.

В работе с использованием пакета LAMMPS [1] и потенциалов межатомного взаимодействия [2,3] проведено молекулярно-динамическое исследование соударения медных и алюминиевых наночастиц с поверхностями медной и алюминиевой подложек. Основное внимание уделяется столкновениям наночастиц, ведущим либо к модификации поверхности мишени, либо к имплантации вещества наночастиц. При скоростях порядка 1000 м/с наблюдается интенсивная пластическая деформация и плавление материала бомбардирующих наночастиц и прилегающих к месту соударения частей мишени, что приводит к эффективному прилипанию материала наночастиц. В работе определены оптимальные параметры соударения, обеспечивающие прилипание материала наночастиц к поверхности металлов, формирование точечных дефектов и

дислокаций. Выявлены зависимости количества и общей длины дислокаций от параметров напыляемых частиц. Вычислены глубина проникновения наночастиц в материал и толщина образуемых плёнок, составляющие несколько атомных слоёв. Основные расчёты проведены при начальной температуре налетающих наночастиц и обрабатываемой поверхности, равной 300 К, использовалось условие сохранения энергии ансамбля частиц. Пример результатов расчетов для соударения медной частицы с поверхностью меди приведен на Рис. 1.

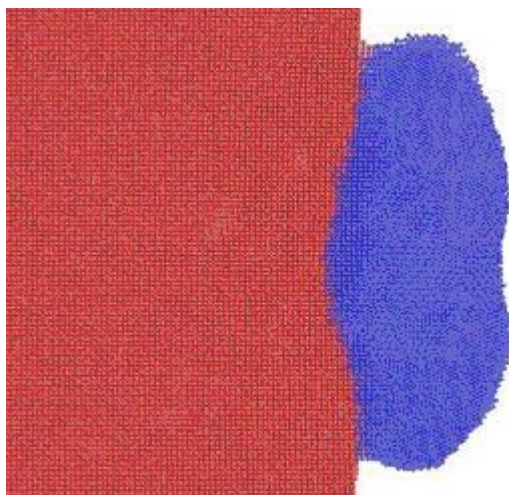


Рис. 1. Результат взаимодействия медной наночастицы из 60000 атомов с медной поверхностью при скорости соударения 1000 м/с, начальная температура 150 К, 50 пкс с момента удара.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках проектной части государственного задания (3.1334.2014/К).

Литература

1. LAMMPS Molecular Dynamics Simulator. URL: <http://lammps.sandia.gov>
2. Cai J., Ye Y.Y. Simple analytical embedded-atom-potential model including a long-range force for fcc metals and their alloys. Physical review B., 1996, V.54, P. 8398-8410.
3. Mishin Y., et al. Structural stability and lattice defects in copper: Ab initio, tight-binding, and embedded-atom calculations. Physical review B., 2001, V.63, P. 224106.

УДК 624.04, 539.3

ДИСКРЕТНЫЕ И ДИСКРЕТНО-КОНТИНУАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ МНОГОУРОВНЕВОГО РАСЧЕТА СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АППАРАТА ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА

Акимов П.А.^{1,2,3}, Мозгалева М.Л.¹

1 - Московский государственный строительный университет, Россия

2 - Российская академия архитектуры и строительных наук, Россия

3 - ЗАО «Научно-исследовательский центр «СтаДиО», Россия

pavel.akimov@gmail.com

WAVELET-BASED DISCRETE AND DISCRETE-CONTINUAL METHODS OF MULTILEVEL STRUCTURAL ANALYSIS

Akimov P.A.^{1,2,3}, Mozgaleva M.L.¹

1 - Moscow State University of Civil Engineering, Russia

2 - Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Russia

3 - StaDyO Ltd, Russia

Рассматриваются корректные дискретные и дискретно-континуальные методы многоуровневого (в том числе локального) расчета строительных конструкций на основе использования аппарата кратномасштабного вейвлет-анализа. Излагаются теоретические основы указанных методов, приводятся краткие сведения о реализующем программно-алгоритмическом обеспечении, демонстрируются примеры решенных задач.

The distinctive paper is devoted to wavelet-based discrete and discrete-continual methods of multilevel structural analysis (including local structural analysis). Theoretical foundations of methods, corresponding program implementations and verification samples are under consideration.

Разработка, исследование, совершенствование, развитие, верификация и апробация методов многоуровневого (в том числе локального) расчета строительных конструкций являются исключительно актуальными задачами. Современный этап развития строительной механики связан с широким использованием численных (дискретных) методов (прежде всего, метода конечных элементов (МКЭ)), реализованных в российских и зарубежных универсальных и специализированных программно-алгоритмических комплексах промышленного типа с развитым пользовательским интерфейсом (ANSYS, ABAQUS, NASTRAN, MicroFE, SCAD, Лира, СТАДИО и др.), доминирующих в расчетной практике, что объясняется целым рядом объективных причин (высокоточные решения многих практически важных многомерных задач могут быть получены исключительно численным путем; экспериментальные исследования являются, как правило, дорогостоящими и зачастую неполными). Вместе с тем, в последние десятилетия появился некоторый потенциал для развития численно-аналитических (дискретно-континуальных, полуаналитических) методов, связанный со стремительным ростом производительности и доступности парка компьютеров (в том числе с кластерной организацией масштабируемой (наращиваемой) мощности) и

наработками в области вычислительной математики, среди которых, в частности, следует особо отметить появление вейвлет-анализа (теории всплесков). Дискретно-континуальные методы позволяют получать решения в корректной аналитической форме, способствующей повышению качества исследования строительных объектов (в том числе в части определения напряженно-деформированного состояния (НДС)), развивают интуицию расчетчика, понимание им работы конструкций, дают возможность качественно и количественно оценить влияние разного рода локальных и глобальных факторов [1]. Эти методы наиболее эффективны в зонах краевого эффекта (эффекта малого параметра), где часть составляющих решения являются быстроизменяющимися функциями, скорость изменения которых не всегда может быть адекватно учтена в рамках численных методов.

История развития дискретных и дискретно-континуальных методов показывает, что основной тенденцией является построение алгоритмов, позволяющих рассчитывать сложные конструкции в целом, что приводит к вычислительным схемам большой размерности. Вместе с тем, наиболее опасной с позиции прочности является НДС в относительно небольшом количестве локальных зон, как правило, известных заранее. Это, прежде всего, места концентраций (углы, щели, трещины, места стыковок элементов конструкций и т.д.), локальных изменений в строительном объекте, например, при его реконструкции (пробивка новых проходов, снос опор и т.д.) или конструкции локальных усилений (различные стойки, связи, подкрепляющие балки, металлические стяжки и т.д.). Локальное численное моделирование может привести к значительному сокращению количества неизвестных, что позволяет проводить расчеты с большой точностью даже на персональных компьютерах. Современным, высокоэффективным, динамично развивающимся инструментарием для проведения соответствующих исследований является вейвлет-анализ. При многоуровневом вейвлет-анализе решение представляется в виде композиции локальных и глобальных компонент, что позволяет оценить влияние различных (с точки зрения локализации) факторов [2]. При этом нередко появляются возможности построения более высококачественных расчетных моделей и внесения обоснованных конструктивных изменений.

Исследования проводились в рамках Плана фундаментальных научных исследований Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации и Российской академии архитектуры и строительных наук на 2015 год (темы 7.1.7 и 7.1.8).

Литература

1. Акимов П.А., Мозгалева М.Л. Многоуровневые дискретные и дискретно-континуальные методы локального расчета строительных конструкций. Монография. – М.: МГСУ, 2014. – 632 с.
2. Akimov P.A., Mozgaleva M.L. Correct Multilevel Wavelet-based Numerical and Semianalytical Methods of Local Structural Analysis. // Abstract Volume, 14th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering (14th ICCBE), Moscow, 27-29 June 2012, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Publishing House ASV”, pp. 150-151.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА ФЛАНЦЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Аллахвердов Б.М.

Петербургский государственный университет путей сообщения

Императора Александра I, Россия

aborism@mail.ru

COMPARATIVE ANALYSIS OF RESULTS CALCULATION OF FLANGE JOININGS

Allakhverdov B.M.

Petersburg State Transport University, Russia

В результате анализа результатов, полученных при расчете основных силовых факторов фланцевых соединений с использованием МКЭ и с применением полуаналитического решения в рамках технической теории, показано, что последняя методика дает вполне удовлетворительные значения наиболее важных для расчета величин – усилий в болтах и напряжений в околофланцевой зоне.

Рассматриваются и сравниваются результаты расчета плотно прилегающих фланцевых соединений труб прямоугольного сечения, полученные и с использованием МКЭ. Фланцы подобного вида находят широкое применение в крано- и мостостроении.

Целью расчета соединений подобного вида является получение картины распределения усилий в соединительных болтах, а также исследования напряженного состояния самих фланцев и соединяемых коробчатых элементов в зоне их примыкания к фланцам.

Существующие и рекомендованные сегодня методики расчета [1, 2] недостаточно правильно отражают работу таких соединений,

В конце 70-х годов прошлого века авторами было получено полуаналитический метод расчета фланцев (техническая теория), нагруженных продольными силами и изгибающими моментами. Решение сводилось к системе уравнений типа метода сил относительно усилий в болтах, где коэффициенты податливостей определялись суммированием податливостей самого болта, прилегающих участков фланцевого листа, а также участков пластин коробки трубы фланца [3, 4].

С появлением метода конечных элементов, реализованного в вычислительных комплексах типа ЛИРА или SCAD, стало возможным решать представленную выше задачу более точно и отобразить в расчетной схеме особенности расчета, которые ранее невозможно было исследовать. В основном это нелинейность расчетной схемы, связанная с работой болтов как односторонних связей – они работают только на растяжение, а при появлении в них сжатия болты выключаются из работы и передают сжимающие усилия на фланцевые листы.

В рамках описанного выше аналитического решения была создана

компьютерная модель соединения и произведен ее расчет с применением программного комплекса ЛИРА-9.6, сертифицированного Госстроем РФ.

В процессе итераций участки листов фланцев, работающих на сжатие, принимались лежащими на упругом основании, имитировавшим смятие листов. Тем самым исключалась работа болтов на сжатие, что соответствовало односторонней их работе.

Результаты расчетов с использованием МКЭ сравнивались с соответствующими данными, полученными с использованием технической теории расчёта, предложенной в свое время авторами, а также с рекомендуемой методикой расчета фланцев, представленной в [2]. На рис.1 видно, что расчет усилий в болтах по МКЭ и по данным авторам дают близкую картину распределения усилий в болтах. Также коррелируют между собой результаты расчета напряжений в околофланцевой зоне пластин. В то же время результаты вычислений по методике [2] дают завышенные значения усилий в болтах во фронтальной части их расстановки, и практически их нулевые значения в боковой.

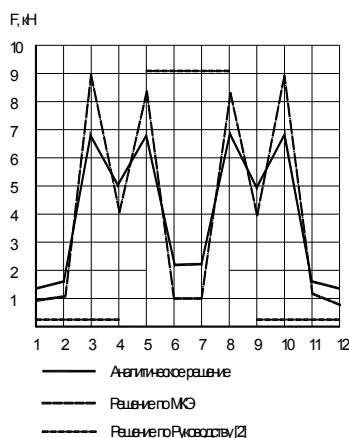


Рис.1. Усилия в болтах по результатам расчетов.

Сравнительный анализ результатов показывает, что созданная ранее авторами техническая теория расчёта фланцевых соединений достаточно объективно отражает работу фланцевых узлов и может быть использована и в настоящее время.

Литература

1. ГОСТ Р 52875.4-2007. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета. Расчет на прочность и герметичность фланцевых соединений. Госстрой РФ. 2007.
2. Руководство по проектированию, изготовлению и сборке фланцевых соединений стропильных ферм с поясами из широкополочных двутавров. Госстрой СССР. ЦНИИпроект сталь конструкция. М., 1982.
3. Аллахвердов Б.М., Шафеев Р.А. Расчет фланцевых соединений. Сб. трудов ЛИИЖТа, вып.388. Л.,1975.
4. Шафеев Р.А. Определение напряжений в околофланцевых зонах сборных металлоконструкций. «Транспортное строительство» №3, 1979.

УДК 624.139; 624.15; 624.953

СИСТЕМЫ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИИ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ И ГОРНЫХ ПОРОД

Ананьев В.В.

ООО "РИВСМАШ", Россия

vvanord@yandex.ru

THE SYSTEM OF LOW-TEMPERATURE THERMAL STABILIZATION OF FROZEN SOILS AND ROCKS

Ananiev V.V.

LLC «RIVSMASH», Russia

Представлены результаты обобщения опыта строительства объектов ГКНМ Ямала и Таймыра по первому способу строительства и применения СОУ с холодильными агрегатами различного типа. Отмечена тенденция перехода заполнения систем охлаждения и замораживания с фреонов на природные хладагенты.

Presents the results of the lessons learned unit construction objects Yamal and Taimyr GKNM on the first construction method and application of SOW with refrigerating units of various types. A trend of moving fill systems for cooling and freezing with freon on natural refrigerants.

Обобщены результаты по обустройству фундаментов и оснований объектов строительства (1 способ) сооружений промышленного и гражданского строительства на газоконденсатных и нефтяных месторождениях Ямала и Таймыра.

В настоящее время термостабилизация грунтов оснований сооружений при первом способе строительства в криолитозоне Арктического побережья РФ осуществляется по схемным решениям систем термостабилизации с использованием хладопотенциала атмосферного воздуха в зимний период на базе сезонных охлаждающих парожидкостных устройств (СОУ) термосифонного принципа действия вертикального и планарного (горизонтального) типа естественной циркуляции [1,2]. Такие схемные решения в неполной мере обеспечивают безусловную круглогодичную надежность обеспечения несущей способности грунтовых оснований и экономичность эксплуатации сооружений объектов топливоэнергетического комплекса СПГ Крайнего Севера.

Тепловое взаимодействие грунтов с инженерными сооружениями в районах распространения многолетнемерзлых пород приводит к уменьшению несущей способности грунтовых оснований за счет перехода грунтов в пластично-мерзлое состояние. Существенное негативное влияние на этот процесс оказывает засоленность грунтов, характерная для приморских равнин (п-ов Ямал и др.), районов шельфа северных морей, которые могут вмещать криопэги.

Отмечены основные направления совершенствования систем термостабилизации: агрегатирование СОУ: горизонтальных прямо- точных и

коллекторных с вертикальными охлаждающими трубами систем естественной циркуляции с холодильными парокомпрессионными машинами и установками с промежуточным теплоносителем и термоэлектрическими охладителями.

Перспективным решением проблемы повышения надежности круглогодичного функционирования оснований сооружений на пластично-мерзлых и засоленных грунтах, вмещающих линзы криопэгов, может являться потенциальная возможность частичного использования хладоресурса целевого продукта топливоэнергетического комплекса СПГ Крайнего Севера - сжиженного природного газа и продуктов его ректификации (этан, пропан).

Литература

1. Васильев Л.Л., Вааз С.Л. Замораживание и нагрев грунта с помощью охлаждающих устройств / Под ред. Л.И. Колыхана. – Мн.: Наука и техника, 1986, 192 с.
2. Макаров В.И. Термосифоны в северном строительстве. – Новосибирск: Наука. 1985. 167с.

ПРИЛОЖЕНИЕ КОНЦЕПЦИИ РАЗРЫХЛЕНИЯ К ПРОБЛЕМЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПОЛЗУЧЕСТИ И ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ МЕТАЛЛОВ

Арутюнян Р.А.

Санкт-Петербургский государственный университет, Россия

Robert.Arutyunyan@paloma.spbu.ru

THE APPLICATION OF THE LOOSENING CONCEPT TO THE PROBLEM OF HIGH-TEMPERATURE CREEP AND CREEP RUPTURE OF METALLS

Arutyunyan R.A.

St.-Petersburg State University, Russia

Для учета эффекта тепловой хрупкости и разрушения Качановым [1] и Работновым [2] были разработаны критерии длительной прочности. В работе параметр сплошности (разрыхления согласно Новожилову [3]) определяется как $\psi = \rho / \rho_0$ (ρ_0 – начальная, ρ – текущая плотность среды) [4].

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 14-01-00823, 15-01-03159).

To take into account the effect of thermal embrittlement and fracture the criteria of long-term strength were developed by Kachanov [1] and Rabotnov [2]. In the paper the parameter of continuity (loosening according Novozhilov [3]) is determined as $\psi = \rho / \rho_0$ (ρ_0 is initial and ρ is current density of the medium) [4].

Financial support of the Russian Foundation for Basic Research (Grants N 14-01-00823, 15-01-03159) is gratefully acknowledged.

Опыты указывают на определяющую роль разрыхления в процессах охрупчивания и длительного разрушения металлических материалов. С учетом этих результатов и закона сохранения массы $\rho_0 l_0 F_0 = \rho l F$ рассмотрим следующую систему уравнений

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = B \sigma_0^m \psi^{m-\beta} e^{m\varepsilon} \quad (1)$$

$$\frac{d\psi}{dt} = -A \sigma_0^n \psi^{n-\alpha} e^{n\varepsilon}, \quad (2)$$

где B, α, β, A, n – постоянные, $\sigma = \sigma_0 F_0 / F$ – истинное напряжение.

Система уравнений (1)-(2) при $\alpha = \beta = 0$ рассматривалась в работе [5].

В случае малых деформаций можно считать $e^{n\varepsilon} \approx 1$, и из (2) при начальном условии $t = 0, \psi = 1$, следует

$$\psi = \left[1 - (\alpha - n + 1) A \sigma_0^n t \right]^{\frac{1}{\alpha - n + 1}} \quad (3)$$

На рис. 1 представлены теоретические кривые ψ согласно формуле (3).

При $t = t_f$, $\psi = 0$, из (3) следует критерий длительной прочности

$$t_f^b = \frac{1}{(\alpha - n + 1) \cdot A \sigma_0^n}, \quad (4)$$

При $\alpha = 2n$ критерий (4) совпадает с критерием Качанова-Работнова.

Принимая условие $e^{m\varepsilon} \approx 1$ и учитывая (3) и начальные условия $t = 0$, $\varepsilon = 0$, из (1) получим соотношение для деформации ползучести

$$\varepsilon = \frac{B \sigma_0^{m-n}}{A(m - \beta + \alpha - n + 1)} \left\{ 1 - \left[1 - (\alpha - n + 1) A \sigma_0^n t \right]^{\frac{m - \beta + \alpha - n + 1}{\alpha - n + 1}} \right\}, \quad (5)$$

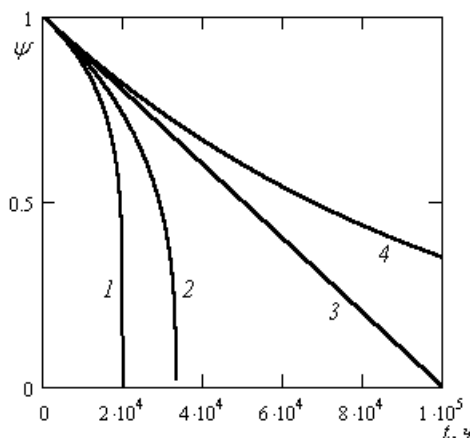


Рис. 1. Кривые изменения параметра сплошности ψ согласно формуле (3): $\alpha = 6$ – кривая 1, $\alpha = 4$ – кривая 2, $\alpha = 2$ – кривая 3 и $\alpha = 1, 1$ – кривая 4.

Литература

1. Качанов Л.М. О времени разрушения в условиях ползучести // Изв. АН СССР. ОТН. 1958. № 8. С. 26-31.
2. Работнов Ю.Н. О механизме длительного разрушения // Вопросы прочности материалов и конструкций. М.: Изд-во АН СССР. 1959. С. 5-7.
3. Новожилов В.В. О пластическом разрыхлении // Прикладная математика и механика. 1965. № 4. С. 681-689.
4. Арутюнян Р.А. Проблема деформационного старения и длительного разрушения в механике материалов. СПб.: Изд-во С.-Петербург. ун-та. 2004. 252с.
5. Арутюнян Р.А. Высокотемпературное охрупчивание и длительная прочность металлических материалов // Механика твердого тела. 2015. № 2. С. 96-104.

УСЛОВИЕ ПЕРЕХОДА В НЕСТАБИЛЬНОЕ СОСТОЯНИЕ (ШЕЙКООБРАЗОВАНИЕ) СЖИМАЕМОЙ УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКОЙ СРЕДЫ

Арутюнян А.Р., Арутюнян Р.А.

Санкт-Петербургский государственный университет, Россия

Robert.Arutyunyan@paloma.spbu.ru

CONDITION FOR THE TRANSITION TO AN UNSTABLE STATE (NECKING) OF COMPRESSIBLE ELASTIC-PLASTIC MEDIA

Arutyunyan A.R., Arutyunyan R.A.

St.-Petersburg State University, Russia

В теории пластичности определены условия перехода в неустойчивое состояние для несжимаемого материала. В области шейки возникают многочисленные повреждения и материал становится сжимаемым. Сформулировано условие перехода в неустойчивое состояние сжимаемой упруго-пластической среды.

In the theory of plasticity the condition of transition to instability for the incompressible material is determined. In the necking region there are numerous damages and material should be considered as compressible. The condition for the transition to the unstable state of a compressible elastic-plastic medium is formulated.

На экспериментальных кривых условное напряжение-деформация $(\sigma - \varepsilon)$ напряжение достигает максимума, возникает шейка и процесс становится неустойчивым. В литературе [1, 2] условие достижения максимума для несжимаемого материала определяется как

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \sigma, \quad (1)$$

Согласно (1) на диаграмме $\sigma - \varepsilon$ имеется фиксированная точка максимума. В реальных металлических материалах в области неустойчивости точка максимума может смещаться из-за возникновения многочисленных дефектов, т. е. материал становится сжимаемым. Условие сжимаемости определим с помощью текущего коэффициента поперечной деформации ν : $\nu = -\varepsilon_y / \varepsilon_x = -\varepsilon_z / \varepsilon_x$ (ε_x – продольная, ε_y , ε_z – поперечные деформации).

Тогда, учитывая геометрическое соотношение $F_0 / F = (l / l_0)^{2\nu}$ [3], будем иметь

$$P = \sigma F = \sigma F_0 e^{-2\nu\varepsilon}, \quad (2)$$

где P – сила, l_0 , F_0 – начальные, l , F – текущие длина и площадь поперечного сечения образца.

Принимая приближенно, что коэффициент поперечной деформации не зависит от напряжения, т. е. считая $\nu(\sigma) = \text{const}$ и дифференцируя (2) по ε , получим следующее соотношение

$$\frac{dP}{d\varepsilon} = F_0 e^{-2\nu\varepsilon} \left(\frac{d\sigma}{d\varepsilon} - 2\nu\sigma \right), \quad (3)$$

из которого следует условие достижения максимума на кривой напряжение-деформация

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = 2\nu\sigma \quad (4)$$

Для несжимаемого материала $\nu = 1/2$ и соотношение (4) совпадает с (1). Согласно формуле (4) положение точки максимума на кривой напряжение-деформация будет меняться в зависимости от состояния материала. Продемонстрируем этот эффект на примере жестко-пластической среды Людвига с нелинейным упрочнением

$$\sigma_0 = (\sigma_T + b\varepsilon^m) e^{-2\nu\varepsilon}, \quad (5)$$

где σ_T – предел текучести, b , m – постоянные, $\sigma_0 = P/F_0$.

Теоретические кривые (5) показаны на рис. 1.

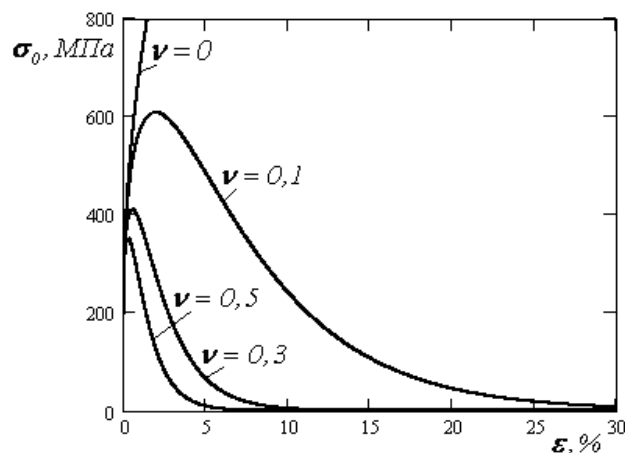


Рис. 1. Теоретические кривые согласно формуле (5).

Литература

1. Хилл Р. Математическая теория пластичности. М.: Гостехиздат. 1956. 408с.
2. Качанов Л.М. Основы механики разрушения. М.: Наука. 1974. 311с.
3. Арутюнян Р.А. Проблема деформационного старения и длительного разрушения в механике материалов. С.-Петербург: Изд-во СПбГУ. 2004. 254с.

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ПРИЛОЖЕНИЯ
МНОГОУРОВНЕВЫХ ДИСКРЕТНЫХ И ДИСКРЕТНО-
КОНТИНУАЛЬНЫХ ПОДХОДОВ К ЛОКАЛЬНОМУ РАСЧЕТУ
СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

Акимов П.А.^{1,2,3}, Аслами М.¹

1 - Московский государственный строительный университет, Россия

2 - Российская академия архитектуры и строительных наук, Россия

3 - ЗАО «Научно-исследовательский центр «СтаДуО», Россия

aslami.mojtaba@gmail.com

**THEORETICAL FOUNDATIONS AND APPLICATIONS
OF MULTILEVEL DISCRETE AND DISCRETE-CONTINUAL METHODS
OF LOCAL STRUCTURAL ANALYSIS**

Akimov P.A.^{1,2,3}, Aslami M.¹

1 - Moscow State University of Civil Engineering, Russia

2 - Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Russia

3 - StaDyO Ltd, Russia

Рассматриваются дискретные (численные) и дискретно-континуальные (численно-аналитические) методы локального расчета строительных конструкций. Излагаются теоретические основы указанных методов, приводятся краткие сведения о реализующем программно-алгоритмическом обеспечении, демонстрируются примеры решенных одномерных и двумерных краевых задач строительной механики.

The distinctive paper is devoted to wavelet-based discrete and discrete-continual methods of local structural analysis. Theoretical foundations of methods, corresponding program implementations, one-dimensional and two-dimensional verification samples are under consideration.

Разработка, исследование, развитие и верификация методов расчета строительных конструкций, зданий, сооружений и комплексов остаются исключительно актуальными задачами ввиду того, что в этом существует постоянная практическая необходимость. В частности, значимой характерной особенностью последних десятилетий в строительной отрасли является возрастающий объем работ, связанный с реконструкцией и перedelкой старых зданий, в том числе по итогам мониторинга строительных объектов. В таких ситуациях, разумеется, существует опасность, что непроверенные корректным расчетом конструктивные изменения приведут к возникновению аварийной ситуации. Разумеется, имеются и иные тенденции, например, существенное увеличение числа домов, возводимых по индивидуальным проектам с использованием нестандартных строительных материалов и оригинальных конструктивных решений, обусловленных реальными условиями и пожеланиями заказчика. Еще одним важнейшим фактором, стимулирующим все развитие численных (дискретных) и численно-

аналитических методов, являются особенности современного этапа развития вычислительной техники. Здесь в первую очередь имеется в виду резкое увеличение парка высокопроизводительных персональных компьютеров с развитым программным обеспечением, возрастающая доступность высокопроизводительных вычислительных кластеров. Третьим фактором является совершенствование и развитие математических средств, что даже в большей степени обеспечивает повышение эффективности методов, чем даже непосредственно техническое развитие компьютерной техники. Вся известная многолетняя история развития численных методов показывает, что основной тенденцией является построение алгоритмов, позволяющих рассчитывать сложные конструкции в целом, что приводит к громадным вычислительным схемам. Тем не менее, наиболее опасной с позиции прочности является состояние в относительно небольшом количестве локальных зон, при этом, как правило, заранее известных [1, 2, 3]. Это, прежде всего, места концентраций (углы, щели, трещины, места стыковок элементов конструкций и т.д.), локальных изменений в строительном объекте при его реконструкции (пробивка новых проходов, снос опор, мешающих обновленному функциональному назначению сооружения и т.д.) или конструкции локальных усилений (разного рода стойки, связи, подкрепляющие балки, металлические стяжки и т.д.). Во всех указанных случаях требуется адекватное расчетное обоснование, связанное именно с вышеперечисленными локальными изменениями. Сам по себе локальный расчет при правильном выборе реализующих численных и численно-аналитических методов может привести к вычислительным схемам, характеризующимся относительно небольшим количеством неизвестных, что дает возможность проводить локальные расчеты с большой точностью без применения сверхмощных компьютеров. Современным, высокоэффективным, динамично развивающимся инструментарием для проведения таких исследований является вейвлет-анализ. При многоуровневом вейвлет-анализе решение представляется в виде композиции локальных и глобальных компонент, что позволяет оценить влияние различных (с точки зрения локализации) факторов. При этом зачастую появляется возможность построить не только более высококачественную расчетную модель, но и внести некоторые обоснованные конструктивные изменения. Настоящая работа ориентирована, в частности, на дальнейшее развитие дискретно-континуального метода конечных элементов, предложенного и развитого в работах А.Б. Золотова, П.А. Акимова и М.Л. Мозгалевой [1, 2].

Исследования проводились в рамках Плана фундаментальных научных исследований Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации и Российской академии архитектуры и строительных наук на 2015 год (темы 7.1.7 и 7.1.8).

Литература

1. Akimov P.A., Mozgaleva M.L., Mojtaba Aslami, Negrozov O.A. Modified Wavelet-based Multilevel Discrete-Continual Finite Element Method. Part 1: Continual and Discrete-Continual Formulations of the Problems Method for Local Structural Analysis. // Applied Mechanics and Materials, Vols. 670-671 (2014) pp. 720-723.
2. Akimov P.A., Mozgaleva M.L., Mojtaba Aslami, Negrozov O.A. Modified Wavelet-based Multilevel Discrete-Continual Finite Element Method. Part 2: Reduced Formulations of the Problems in Haar Basis Method for Local Structural Analysis. // Applied Mechanics and Materials, Vols. 670-671 (2014) pp. 724-727.
3. Akimov P.A., Mojtaba Aslami. Theoretical Foundations of Correct Wavelet-Based Approach to Local Static Analysis of Bernoulli Beam. // Applied Mechanics and Materials, Vols. 580-583 (2014) pp. 2924-2927.

УДК 658.56

МЕТОДИКА КВАЛИМЕТРИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ СОПРОТИВЛЕНИЯ РАЗРУШЕНИЮ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ УДАРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Атрошенко С.А.¹, Грибанов Д.А.²

1 - ИПМаш РАН, Россия

2 - СПбГЭУ, Россия

satroshe@mail.ru

QUALIMETRIC EVALUATION TECHNIQUE OF METAL MATERIALS FRACTURE RESISTANCE UNDER SHOCK LOADING

Atroshenko S.A.¹, Gribanov D.A.²

1 - IPME RAS, Russia

2 - St.-Petersburg State Economical University, Russia

Проведено исследование качества алюминиевых кольцевых образцов, испытанных при различных режимах высокоскоростного нагружения магнитно-импульсным методом. Оценка качества динамически нагруженных металлических материалов проведена с помощью методики квалитметрической оценки сопротивления разрушению металлических материалов, испытанных магнитно-импульсным методом.

1. Введение. Оценка металлических материалов для труб и изделий (конструкций), изготовленных из них, эксплуатация которых предполагается в условиях возникновения высокоскоростного нагружения, представляет особый интерес, т.к. они применяются в аэрокосмической промышленности, для криогенных резервуаров, трубопроводов систем ракет-носителей однократного и многократного применения, космических кораблей и других космических аппаратов, в изделиях авиационной промышленности, машиностроения, работающих в условиях возникновения высокоскоростного ударного воздействия. Именно поэтому исследования, направленные на совершенствование технологии оценки качества металлических материалов (кольцевых образцов), испытанных при коротком времени нагружения ($T = 1$ мкс) с помощью высокоскоростного расширения магнитно-импульсным методом, являются актуальными. Для выбора металлического материала изделия, наиболее подходящего по своим эксплуатационным характеристикам для работы в экстремальных условиях, проведена оценка качественных характеристик кольцевых образцов, полученных по разным режимам испытания, с применением методики квалитметрической оценки сопротивления разрушению металлических материалов, испытанных магнитно-импульсным методом.

2. Материалы исследования. Магнитно-импульсное нагружение кольцевых образцов проводилось по методике, описанной в работе [1].

Поверхности разрушения образцов в виде колец из алюминиевой фольги для конденсаторов после испытаний исследовались на оптическом

микроскопе Axio-Observer-Z1-M в темном поле. Количество вязкой составляющей в изломе, (В, %) определялось по формуле, приведённой в ГОСТ 30456-97. Площадь хрупкой составляющей определялась измерением площади хрупкого излома по фотографии.

Микротвердость определялась на микротвердомере SHIMADZU серии НМV-G по методу восстановленного отпечатка четырехгранной алмазной пирамиды с углом 136° между гранями и квадратным основанием (по методу Виккерса).

Проведены экспериментальные исследования алюминиевых кольцевых образцов, испытанных магнитно-импульсным методом, характеристики сопротивления разрушению которых приведены в таблице 1.

Табл. 1. Характеристики сопротивления разрушению исследованных образцов из алюминия

№ п/п	Наименование показателя качества	Базовые значения №1	Значение показателя качества образца								
			№2	№3	№4	№5	№6	№7	№8	№9	
		при испытании с длительностью импульса T , мкс:									
		38	7,5	5,5	7,5	1	1	1	0,1	0,08	
1.	Размер зерна D_z , мкм	4,6	8,2	0,45	1,2	3	1,2	1,95	0,72	1,05	
2.	Количество пор на площади 400 мкм^2 n , шт	53	91	64	121	70	-	-	56	36	
3.	Твердость по Виккерсу HV , МПа	1175	1461	992	1098	1202	288,9	240,6	2745	303,3	
4.	Растягивающее напряжение σ , МПа	100	104	150	-	230	162	-	-	-	
5.	Количество вязкой составляющей в изломе B , %	80	98,2	92,3	96,5	91,5	91,1	88	92,62		
6.	Время до разрушения t , мкс	13,4	13,4	4,5	13,4	2,65	4,17	-	0,3	-	

Современные квалиметрические инструменты качества адаптированы к задаче оценивания сопротивления разрушению металлических материалов, эксплуатация которых предполагается в условиях возникновения ударного воздействия, а именно: функция желательности Харрингтона, диаграммы сравнения показателей качества, планирование эксперимента, корреляционный анализ по диаграмме разброса, секторные диаграммы, горизонтальные гистограммы, регрессионный анализ.

В соответствии с разработанной методикой проведена оценка сопротивления разрушению алюминиевых кольцевых образцов, испытанных магнитно-импульсным методом.

Литература

1. Морозов В.А., Петров Ю.В., Лукин А.А., Атрошенко С.А., Грибанов Д.А. Разрыв металлических колец при ударном нагружении магнитно-импульсным методом // Журнал технической физики. – 2014. – №9. – С. 78–85.

МАСШТАБНЫЕ УРОВНИ МЕХАНИЗМОВ ДИНАМИЧЕСКОГО ТРАНСЛЯЦИОННОГО РАЗРУШЕНИЯ

Атрошенко С.А.^{1,2}

1 - ИПМаш РАН, Россия

2 - СПбГУ, Россия

satroshe@mail.ru

SCALE LEVELS OF MECHANISMS FOR DYNAMIC TRANSLATION FRACTURE

Atroshenko S.A.^{1,2}

1 - IPME RAS, Russia

2 – SpbSU, Russia

Проведено экспериментальное исследование морфологии откольной щели перлитных сталей. Показано распределение элементов структуры откольной щели по масштабу для продольных и поперечных компонентов.

В процессе выполнения работы были проведены эксперименты по откольному разрушению ряда перлитных сталей [1]. Все образцы после ударного нагружения разрезали по одной из плоскостей вдоль направления распространения волны и исследовали морфологию откольной щели.

Таблица 1. Характеристика микроразрушений в сталях в откольной зоне

Сталь	Скорость соударения, V, м/с	Характеристика микроразрушений			
		d	h	D	H
35ХН2МФА	245	15			
	320	20	15	175	220
	470	40	48	200	
	480	20	27	85	65
30Х2Н2МФА	300	11	10		
	340	25	12	190	
	400	11	9	180	165
45ХНМФА	278	10	20		
	352	10			
	408	11	5	75	280
030ХН4М	320	48	16	145	
	330	24	16	300	310
	350	115	32		450

Как видно из таблицы, имеется отчетливое распределение элементов

структуры откольной щели по масштабу, как для продольных компонент откольной щели, так и для поперечных. В откольной щели имеются не только участки нормального разрыва, параллельные фронту волны, но и участки продольного локализованного сдвига по краям нормальных разрывов. Некоторые продольные сдвиговые участки откольной щели имеют характерные признаки «адиабатических полос сдвига» - узкие, порядка 1 μm полосы, направленные вдоль вектора скорости частиц. В сталях и сплавах титана эти полосы после травления имеют белый цвет и представляют собой области фазового превращения.

Металлографические исследования образцов свидетельствуют о том, что откольное разрушение осуществляется одновременно на нескольких масштабных уровнях. Для определения пространственных масштабов продольной и поперечной локализации разрушения при отколе в работе была проведена статистическая обработка геометрических размеров микроразрушений в зоне откола для сталей 30ХН4М, 35Х2Н2МФА, 45ХНМФА и др. С этой целью были выполнены детальные обмеры всех продольных и поперечных микроразрушений на образцах, нагруженных с различной скоростью. Было проведено 4000-5000 замеров продольных и такое же количество поперечных полос локализации. Результаты статистической обработки выявили группировку микротрещин на четыре масштабных уровня – два для продольных сдвигов и два для нормальных разрывов, они приведены в таблице 1.

Из данных таблицы 1 видно, что в зависимости от скорости нагружения размеры продольных элементов откольной щели ведут себя немонотонно — при определенной скорости нагружения продольные микротрещины достигают некоторого максимального размера, а затем снова уменьшаются.

На основе проведенных экспериментов можно сделать следующие выводы:

- Масштабные уровни разрушения в зоне тыльного откола стали 30ХН4М как для продольного сдвига, так и для нормального разрыва различаются на 1-1,5 порядка внутри каждого типа локализации как продольной, так и поперечной.
- По мере увеличения скорости нагружения уменьшается спектр пространственных размеров локализации и увеличивается средний размер как продольных сдвигов, так и нормальных микроразрывов.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 13-01-00335.

Литература

1. С.А. Агрошенко С.А., О.Я. Бейлина, С.А. Гладышев, А.К. Диваков, Ю.И. Мещеряков, Ю.А. Петров. О локализации деформации и разрушения // Физика горения и взрыва. – 1990. – №3. – С. 65–72.

ОЦЕНКА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ ВЫСОКОХРОМИСТЫХ СТАЛЕЙ МОДИФИЦИРОВАННЫМ МЕТОДОМ ХАРРИНГТОНА

Атрошенко С.А.^{1,2}, Королёв И.А.^{1,2}, Диденко Н.И.³

1 - ИПМаш РАН, Россия

*2 - Санкт-Петербургский государственный экономический университет,
Россия*

*3 - Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Россия*

satroshe@mail.ru

EVALUATION PHYSICAL AND MECHANICAL CHARACTERISTICS HIGH-CHROMIUM STEELS BY MODIFIED METHOD HARRINGTON

Atroshenko S.A.^{1,2}, Korolev I.A.^{1,2}, Didenko N.I.³

1 - IPME RAS, Russia

2 - St.-Petersburg State Economic University, Russia

3 - Peter the Great St.-Petersburg Polytechnic University, Russia

В статье содержится квалиметрическая оценка инструментальных высокохромистых сталей с использованием модифицированной функции желательности (метод Харрингтона). Показано, что более высокими показателями качества обладают стали с пониженным содержанием углерода и дополнительным легированием редкоземельными металлами, а также стали, термически обработанные по оптимальному режиму. Предложены методики оценки экономических характеристик инструментальных высокохромистых сталей. Первая методика - это оценка себестоимости производства инструментальных высокохромистых сталей на ранних стадиях. Вторая методика – это функционально-стоимостной анализ технологической оснастки, при изготовлении которой используются инструментальные высокохромистые стали.

The article contains qualimetric assessment of high-chromium steels with modified desirability function (method Harrington). It is shown that the higher levels of quality have become depleted of carbon and additional doping rare earth metals, as well as steel, heat treated at an optimum mode. Two methods of assessment of the economic characteristics of high-chromium steels was offered. The first method provides an assessment of the cost of production of high-chromium steels instrumental in the early stages. Two methods of assessment of the economic characteristics of high-chromium steels tool offered. The first method provides an assessment of the cost of production of high-chromium steels instrumental in the early stages. The second technique involves value analysis of tooling, which are used in the manufacture of high-chromium steel.

1. Введение. Важнейшим аспектом в вопросах, связанных с развитием процессов холодной штамповки, является инструмент и технологическая оснастка, а соответственно и материалы, из которых они изготовлены, ведь именно они формируют основу, которая закладывает качество на первоначальных стадиях изготовления любого изделия. Материалом исследования являются высокохромистые инструментальные стали полученные в результате оптимизации легирования и термической обработки [1]. Качество этих сталей оценивалось модифицированным методом

Харрингтона и методом горизонтальных гистограмм.

2. Модификация метода Харрингтона: Для построения функции желательности [3] в качестве показателей желательности материала были выбраны характеристики работоспособности: твердость, стойкость инструмента и карбидный балл стали. Для перевода значений твердости, стойкости инструмента и карбидного балла стали в безразмерную шкалу решаются следующие системы уравнений:

$$\text{Твердость} \quad - \quad \begin{cases} 4,5 = a_0 + 63a_1, \\ 1 = a_0 + 59a_1. \end{cases}$$

$$\text{Стойкость инструмента} \quad - \quad \begin{cases} 4,5 = a_0 + 368a_1, \\ 1 = a_0 + 83a_1. \end{cases}$$

$$\text{Карбидный балл стали} \quad - \quad \begin{cases} 4,5 = a_0 + 1a_1, \\ 1 = a_0 + 4a_1. \end{cases}$$

Рассчитанные данные функции желательности приведены в таблице 1, а в таблице 2 - единичные и комплексные показатели желательности для исследуемых сталей.

Таблица 1. Показатели желательности и безразмерные вспомогательные показатели

Марка стали	Твердость		Стойкость инструмента		Карбидный балл стали	
	y	Q	y	Q	y	Q
Согласно экспериментальным данным						
70X12ФБЧЦ	4,5	0,80	2,453	0,67	4,5	0,80
110X12ФБЧЦ	4,5	0,80	3,029	0,72	3,33	0,74
60X9M2ВФЦЧ	1	0,37	4,5	0,8	4,5	0,80
Согласно нормативным документам						
X12Ф1	2,75	0,70	1	0,37	1	0,37

Модификация метода: использование высокохромистой инструментальной стали на предприятии должно быть обоснованно не только

прочностными, техническими или эксплуатационными свойствами стали, но и должно быть экономически оправданным. Поэтому для увеличения объективности и полноты оценки новых инструментальных высокохромистых сталей была модифицирована формула расчета комплексного показателя желательности, путем введения коэффициентов экономической целесообразности свойств исследуемого материала. Формула расчета комплексного показателя желательности имеет следующий вид:

$$Q = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n q_i k_i} \quad (1)$$

где n – число частных желательностей; q – показатель частной желательности; k_i – коэффициент экономической целесообразности данного свойства материала [2].

В результате внедрения коэффициентов экономической целесообразности в формулу расчета комплексного показателя желательности была получена формула модифицированного комплексного показателя желательности, и на примере механических свойств высокохромистых инструментальных сталей (стойкость инструмента, твердость, карбидный балл) и соответствующих коэффициентов экономической целесообразности этих свойств, были получены следующие результаты:

Таблица 2. Единичные и комплексные показатели желательности исследуемых сталей

Марка стали	Единичные показатели желательности по отдельным характеристикам материала			Комплексный показатель желательности
	Стойкость инструмента	Твердость	Карбидный балл	
70X12ФБЧЦ	0,67 (хорошо)	0,80 (отл.)	0,80 (отл.)	1,55
110X12ФБЧЦ	0,72 (хорошо)	0,80 (отл.)	0,74 (хор.)	1,3
60X9М2ВФЦЧ	0,80 (отлично)	0,37(удовл.)	0,80 (отл.)	1,36
X12Ф1	0,37 (удовл.)	0,70 (хор.)	0,37(удовл.)	0,46

3. Оценка экономических характеристик инструментальных высокохромистых сталей. Оценка экономических характеристик инструментальных высокохромистых сталей, наряду с физико-механическими характеристиками, является важнейшим этапом выполнения и анализа характеристик инструментальных высокохромистых сталей. Оценка экономических характеристик инструментальных высокохромистых сталей включает в себя две методики:

(А) Оценка себестоимости производства инструментальных высокохромистых сталей на ранних стадиях, что, по сути, является прогнозированием себестоимости производства инструментальных высокохромистых сталей.

(В) Экономическая оценка инструментов и технологической оснастки,

для которых предназначены инструментальные высокохромистые стали. Оценка инструментов и технологической оснастки выполняется с использованием функционально-стоимостного анализа.

Вывод: из рис. 1 номограммы желательности видно, что по механической характеристике «твердость» самым высоким результатом обладает сталь 70X12ФБЧЦ и сталь 110X12ФБЧЦ, падающие на отрезок «отлично», сталь X12Ф1 демонстрирует результат, попадающий в отрезок «хорошо», и лишь сталь 60X9М2ВФЦЧ показывает результат в отрезке «удовлетворительно». Но по механической характеристике «средняя стойкость» сталь 60X9М2ВФЦЧ попадает на границу отрезка «отлично» и «превосходно». Стали 70X12ФБЧЦ и 110X12ФБЧЦ также попали на отрезок «отлично», а сталь X12Ф1 демонстрирует низкий результат, тем самым попадая на отрезок «удовлетворительно». По механической характеристике «карбидный балл» стали 60X9М2ВФЦЧ и 70X12ФБЧЦ попадают на отрезок «отлично», сталь 110X12ФБЧЦ также попадает на отрезок «отлично», а сталь X12Ф1 демонстрирует низкий результат, попадает на отрезок «удовлетворительно». Модифицированный комплексный показатель желательности показывает, что наилучшим сочетанием характеристик обладают стали 70X12ФБЧЦ и 110X12ФБЧЦ, т.к. значение обобщенной функции желательности имеет максимальное значение 1,55 и 1,3, соответственно, у стали 60X9М2ВФЦЧ этот показатель составляет 1,36, что свидетельствует о хорошем сочетании характеристик. Значительно худшие результаты демонстрирует сталь X12Ф1, комплексный показатель желательности составляет 0,46.

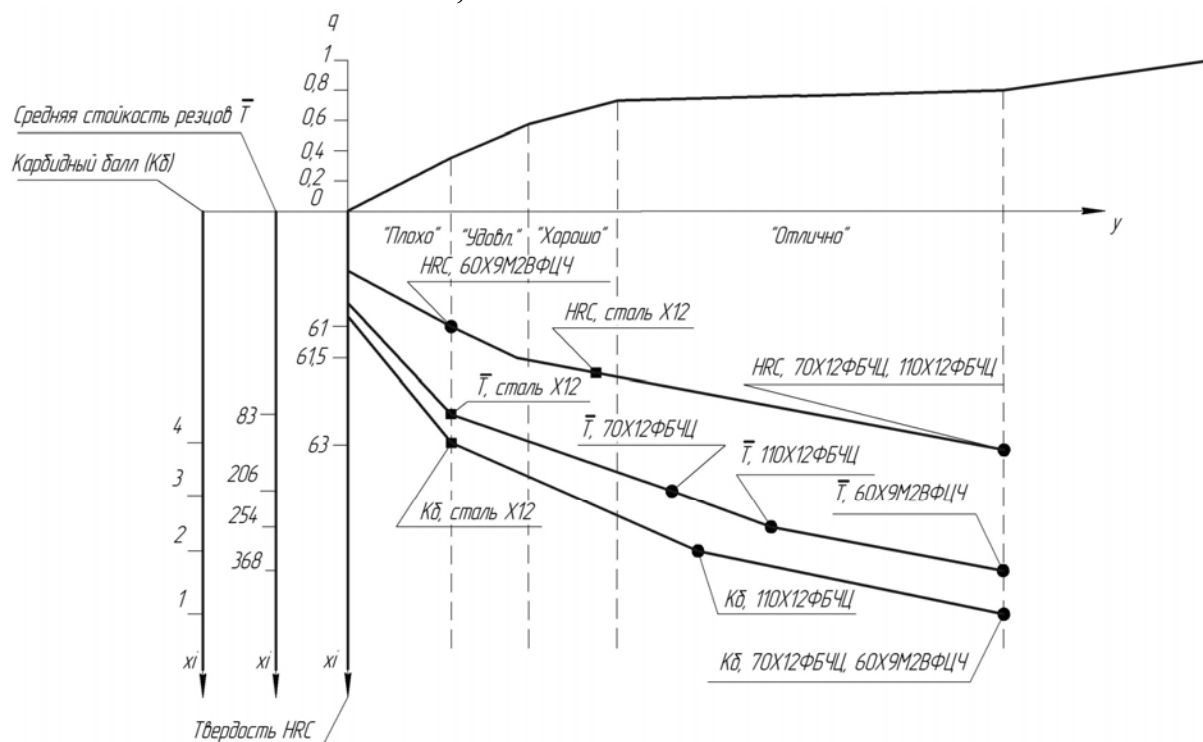


Рис.1. Номограмма показателей желательности

На основании полученных данных можно сделать вывод, что в

результате модификации формулы расчета комплексного показателя желательности значительно повысилась объективность и достаточность квалитетической оценки метода функции желательности.

Литература

- [1] Атрошенко С.А. Усовершенствование высокохромистых штамповых сталей легированием. Вестник инжэкона. Серия: технические науки. 2005. Вып. 3 (8). 116-125с.
- [2] Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. Материаловедение. – М.: Машиностроение, 1980. – 493с.

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ РЕЗЕРВУАРА С
ЖИДКОСТЬЮ ПРИ СЕЙСМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ.
ГИДРОУПРУГАЯ ПОСТАНОВКА**

*Белостоцкий А.М.^{1,2}, Акимов П.А.^{1,2}, Афанасьева И.Н.^{1,2}, Вершинин В.В.¹,
Щербина С.В.¹, Усманов А.Р.¹*

1 - НИУ МГСУ, Россия

2 - ЗАО НИЦ СтаДуО, Россия

niccm@mgsu.ru

**NUMERICAL SIMULATION OF OIL TANK BEHAVIOR UNDER SEISMIC
EXCITATION. FLUID – STRUCTURE INTERACTION PROBLEM
SOLUTION**

*Belostotsky A.M.^{1,2}, Akimov P.A.^{1,2}, Afanasyeva I.N.^{1,2}, Vershinin V.V.¹,
Scherbina S.V.¹, Usmanov A.R.¹*

1 – Moscow State University of Civil Engineering, Russia

2 – StaDyO Ltd, Moscow, Russia

The present paper is devoted to numerical simulation of sloshing inside a partially filled cylindrical thin-wall tank induced by seismic loads. During the calculations fluid structure interaction (FSI) problems are taken into account. The numerical simulations are performed for both linear (Lagrangian formulation – ANSYS Mechanical) and nonlinear (arbitrary Lagrangian-Eulerian formulation – ABAQUS/Explicit) conditions. Problem formulation, finite element discretization, simultaneous and partitioned solution procedures are discussed. As an example designed and/or already erected oil tank are considered. The results obtained are compared with an analytical solution and domestic code technique.

Coupled three-dimensional dynamical problems of aerohydroelasticity is very far from being complete solved and require scientific-methodical, software and algorithmic development and research. Analysis of existing engineering methodic and domestic design codes and procedures showed that they require significant improvements and development.

In order to solve the practical knowledge-intensive problems the numerical simulation is basic and, in fact, no alternative approach. Existing mathematical models and numerical methods allow to study dynamic behavior of complex three-dimensional aerohydroelasticity coupled systems directly [1, 2]. For the purposes of this research the universal software application packages for numerical simulation of continuum mechanics (ANSYS Mechanical, ANSYS CFD, Abaqus/Explicit) were used.

Lagrangian formulation of basic momentum equations is normally employed to model the behavior of solid structure. The dynamic behavior of a liquid/gas is described by the classical Navier-Stokes equations. It is assumed that both laminar and turbulent flows obey these equations. To model multiphase flow the Euler formulation with free surface technique is used. Interaction between different

phases (liquid and gas) is taken into account by inserting additional variable – volume fraction. When the interaction of the viscous liquid flow with a solid medium occurs, equilibrium and compatibility equations must be performed on the contact surface.

Numerical approximation of the basic equations typically is performed by finite element method (for structures and fluid) and finite volumes method (for liquid). To solve the above problem depending on its nature direct or iterative algorithms are used. Calculation of the coupled systems "structure – liquid" reduces to direct integration over time of momentum equations. Implicit or explicit schemes with options of different termination condition are used.

Numerical modeling technique of fluid tank behavior under seismic excitation was developed, verified and approved. Multivariate verification computational studies of static and dynamic behavior of liquid in the tank (different levels of water were tested) taking into account the interaction with the thin-walled experimental model of tank on a movable frame were carried out. Static loads (own weight and hydrostatics) and the different pulse duration impact were applied. The main results showed that the dynamic response of the hydroelastic system occurs at a system-wide low frequency determined by the spring constant and the mass installation. Complex dynamic forms of wave into the tank were identified for different levels of liquid. At the same time good quality (wave form of liquid) and quantitative (wave height) matching of numerical results with experimental data (error is less than 5%) were achieved.

Practically important and complex real hydroelastic system "thin-walled tank with floating roof - oil" capacity of 50 000 m³ located in seismic zone was chosen for approval of the developed numerical technique. Dynamic stress-strain state of the tank structures and wave formation on the surface of the liquid were simulated under seismic impact given the earthquake accelerograms. For solving this coupled problem alternative numerical approaches (Lagrangian formulation – ANSYS Mechanical and ALE – ABAQUS/Explicit) were used. At the validation stage of the developed detailed finite element models of the hydroelastic system modal and static analysis were conducted.

Based on the results obtained the verification and approval computational research showed practical importance and efficiency of the developed technique of numerical simulation of oil tank behavior under seismic excitation.

References

1. Alexander M. Belostosky, Pavel A. Akimov, Taymuraz B. Kaytukov, Irina N. Afanasyeva, Anton R. Usmanov, Sergey V. Scherbina, Vladislav V. Vershinin, About Finite Element Analysis of Fluid – Structure Interaction Problems.// Procedia Engineering, Volume 91, 2014, pp 37–42.
2. Afanasyeva I.N., Adaptive technique of numerical simulation of three-dimensional dynamic problems of civil aerohydroelasticity.// PhD thesis, Moscow State University of Civil Engineering, 2014.

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАДАЧ СТРОИТЕЛЬНОЙ
АЭРОГИДРОУПРУГОСТИ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ**

*Афанасьева И.Н.^{1,2}, Белостоцкий А.М.^{1,2}, Вершинин В.В.¹, Щербина С.В.¹,
Ланцова И.Ю.¹, Бозняков Е.И.¹, Усманов А.Р.¹*

1 - НИУ МГСУ, Россия

2 - ЗАО НИЦ СтаДуО, Россия

niccm@mgsu.ru

**NUMERICAL SIMULATION OF FLUID-STRUCTURE INTERACTION
PROBLEMS IN CIVIL ENGINEERING**

*Afanasyeva I.N.^{1,2}, Belostotsky A.M.^{1,2}, Vershinin V.V.¹, Scherbina S.V.¹,
Lancova I.Y.¹, Boznyakov E.I.¹, Usmanov A.R.¹*

1 – Moscow State University of Civil Engineering, Russia

2 – StaDyO Ltd, Moscow, Russia

Разработана адаптивная методика численного моделирования трехмерных динамических задач строительной аэрогидроупругости. Проведена верификация методики на представительных тестовых примерах, имеющих достоверное теоретическое или экспериментальное подтверждение. Представлены результаты апробации, проведенной на практически важной и конструктивно сложной реальной системе «тонкостенный резервуар с понтоном – нефтепродукты» при воздействии сейсмических нагрузок.

Разработанная адаптивная методика численного моделирования трехмерных динамических задач строительной аэрогидроупругости гибко настраивается на объект и задачи исследования [1]. Предлагаемая классификация значимых задач строительной аэрогидроупругости с позиции физики явлений позволяет выбирать наиболее эффективные и альтернативные современные математические модели, численные методы и их реализацию. Для осуществления расчета сформулированы рекомендации по назначению-заданию особых параметров. Методика верифицирована на серии представительных тестовых задач, имеющих достоверное расчетное, теоретическое или экспериментальное подтверждение.

На верификационной задаче (известный в «общемировой» исследовательской практике – "BARC") показано, что при весьма точном определении средних составляющих реализация даже наиболее продвинутых альтернативных моделей турбулентности (LES-WALE, DES-SST) при самой подробной дискретизации приводит к значимому разбросу в определении пульсационной составляющей аэродинамического давления и пространственно-временных характеристик потока. [1]

На связанной динамической верификационной задаче аэрогидроупругости (известный в мировой практике тест – большие колебания гибкой упругой балки в спутном следе за жестким неподвижным цилиндром) показано не только влияние потока на деформированное

состояние гибкой конструкции, расположенной в вихревом следе, но и влияние деформированного состояния гибкой конструкции на саму структуру потока и его пространственно-временные характеристики [1].

Для верификации и отладки методики численного моделирования турбулентных течений около сооружений цилиндрической формы в несвязанной и в связанной (аэроупругой) постановке решена задача обтекания ветровым потоком тонкостенной алюминиевой цилиндрической оболочки – одиночного силоса из группы в порту Антверпен [2]. Результаты расчета в аэроупругой постановке показали значимое влияние деформирования конструкции в процессе обтекания на аэродинамические силы.

На серии верификационных задач гидроупругости, имеющих теоретическое и экспериментальное эталонные решения, показано соответствие и обоснованы диапазоны применимости альтернативных численных подходов моделирования жидкости со свободной поверхностью при кинематических динамических воздействиях. Получено качественное (форма волны) и количественное (высота и частота колебаний волны) соответствие численных результатов с "эталонными" данными [1].

Для практически важной и конструктивно сложной реальной системы «тонкостенный резервуар с понтоном – нефтепродукты» емкостью 50000 м³ по разработанной адаптивной методике впервые смоделированы и проанализированы в связанной гидроупругой постановке динамическое НДС конструкции резервуара и волнообразование на поверхности жидкости при 8-балльном сейсмическом воздействии, заданном акселерограммой землетрясения с использованием альтернативных численных подходов (постановка Лагранжа в ПК ANSYS и смешанная постановка ALE в ПК ABAQUS Explicit) [1].

На основе полученных результатов верификационных и апробационных расчетных исследований показана работоспособность и эффективность разработанной методики, которая обеспечивает новый, востребованный современной практикой уровень расчетного анализа связанных динамических аэрогидроупругих инженерных систем в важных строительных приложениях.

Литература

1. *Афанасьева И.Н.* Адаптивная методика численного моделирования трехмерных динамических задач строительной аэрогидроупругости. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – М: МГСУ, 2014.
2. *Dooms D.* Fluid structure interaction applied to flexible silo constructions, PhD thesis, Belgium, Leuven, 2009.

ПРИМЕНЕНИЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВПУСКНОЙ СИСТЕМЫ ДВИГАТЕЛЯ

Гришин Ю.А.¹, Зенкин В.А.¹, Дорожнинский Р.К.¹, Бакулин В.Н.²

1 - Московский государственный технический университет им. Н.Э.

Баумана, Россия

2 - Институт прикладной механики РАН, Россия

vbak@yandex.ru

NUMERICAL SIMULATION APPLICATION FOR IMPROVEMENT OF GAS-DYNAMIC CHARACTERISTICS OF ENGINE INTAKE SYSTEM

Grishin Yu.A.¹, Zenkin V.A.¹, Doroginsky R.K.¹, Bakuli V.N.²

1- Bauman Moscow State Technical University,

2 - Institute of applied mechanics of the Russian Academy of Sciences, Russia

С помощью авторского программного кода осуществляется трехмерное моделирование течения через клапаны поршневого двигателя. Выполняется поэтапная доводка формы каналов и предлагается новая конфигурация, обеспечивающая увеличение расходных характеристик на 23 %.

With the in-house CFD code is performed three-dimensional simulation of flow through the valves of the piston engine. Carried out in stages and finishing the form of channels, offered new configuration provides increased flow performance by 23 %.

От геометрических параметров впускной клапанной системы поршневого двигателя, зависит пропускная способность системы, т.е. ее газодинамическая характеристика. Улучшение газодинамической характеристики обеспечивает увеличение поступления свежего заряда в цилиндры. Как следствие, это снижает работу насосных ходов, увеличивает коэффициент наполнения и в итоге улучшает мощностные, экономические и экологические показатели двигателя. Таким образом, работа по профилированию системы, направленная на увеличение ее пропускной способности, является весьма актуальной и необходимой для каждого разрабатываемого или доводимого двигателя.

С использованием разработанного на кафедре «Поршневые двигатели» МГТУ им. Баумана программного комплекса вычислительной газодинамики *NSF-3* [1] были выполнены численные расчеты пространственного течения через систему с получением полей скоростей и интегрального расхода. Объектом исследования являлась клапанная система тепловозного дизеля Д500 (ЧН 26,5/31). В процессе исследований последовательно варьировались основные параметры, образующие расчетную область: диаметр горловины клапанного канала, радиус скругления и угол наклона образующей тарелки клапана, величина фаски под седлом со стороны полости цилиндра.

В результате расчетов показано, что увеличение диаметра горловины канала с 74 до 78 мм повышает расход на 5,4 %, уменьшение радиуса тарелки с 50 до 20 мм повышает расход на 12,5 %. Но наибольший эффект

вносит увеличение фаски под седлом с 1 до 4 мм – 11 %. Суммарное улучшение пропускной способности с использованием всех перечисленных конструктивных мероприятий составляет 23 %, что весьма существенно для улучшения характеристик двигателя.

На рис.1 показана геометрия базовой и новой, рекомендованной заводу-изготовителю клапанной системы. На рис.2 показаны поля скоростей при течении через клапанную щель с исполнением фасок 1 и 4 мм. Из рисунка видно, что меньший размер фаски своей нижней частью изменяет направление истекающего потока, уменьшает его живое сечение, уменьшает величину векторов скоростей, что в итоге сокращает расход поступающего заряда в случае базового исполнения фаски.

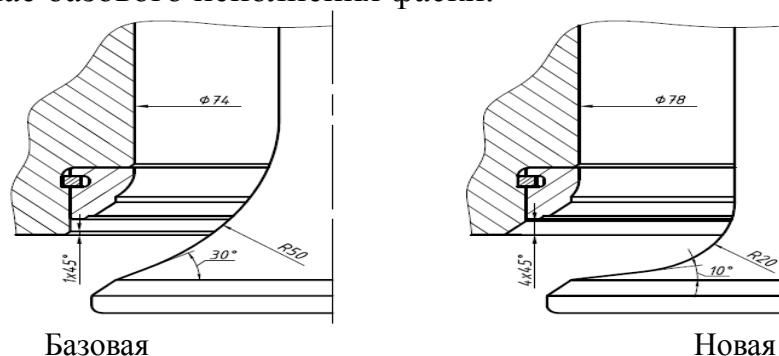


Рис .1. Конструктивные исполнения базовой и новой впускных клапанных систем

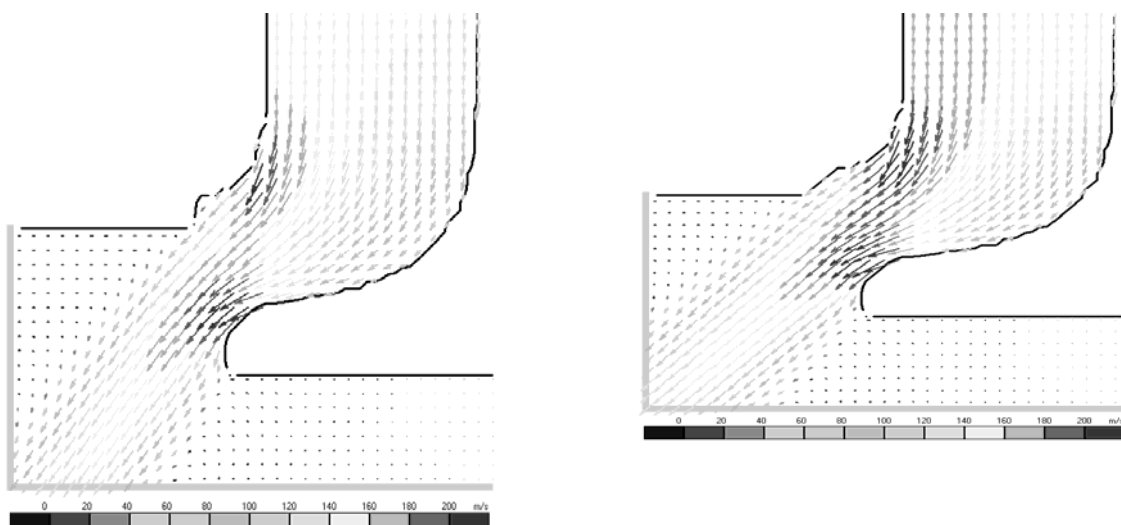


Рис. 2. Поля скоростей при исполнении фаски 1 (слева) и 4 (справа) мм

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 14-08-01030).

Литература

1. Гришин Ю.А. Новые схемы метода крупных частиц и их использование для оптимизации газоздушных трактов двигателей. Математическое моделирование.- 2002.- т.14.- N 8.- с.51-55.

УДК 539.3

**ТРЕХМЕРНАЯ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ АНАЛИЗА
НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СЛОЯ
ЗАПОЛНИТЕЛЯ СЛОИСТО-НЕОДНОРОДНЫХ НЕРЕГУЛЯРНЫХ
ОБОЛОЧЕК ВРАЩЕНИЯ**

Бакулин В.Н.

Институт прикладной механики РАН, Москва, Россия

vbak@yandex.ru

**THREE-DIMENSIONAL FINITE ELEMENT MODEL FOR THE
ANALYSIS OF STRESSED-STRAINED STATE OF THE LAYER OF
FILLER OF LAMINATED HETEROGENEOUS IRREGULAR SHELLS OF
ROTATION**

Bakulin V.N.

Institute of applied mechanics of Russian Academy of Science, Russia

Рассматривается алгоритм для построения трёхмерной конечно-элементной модели для анализа напряженно-деформированного состояния слоя заполнителя слоисто-неоднородных нерегулярных оболочек вращения из ортотропных материалов.

The algorithm for constructing the three-dimensional finite element model for the analysis of stressed-strained state of the layer of filler of laminated heterogeneous irregular shells of rotation made of orthotropic materials is being considered.

1. Введение. В настоящее время для повышения весовой эффективности, удельной прочности и жесткости конструкций растет использование оболочек слоисто-неоднородной структуры [1 и др.]. Применение их сдерживается в т.ч. недостаточным совершенством моделей, которые должны позволять с высокой точностью и степенью детализации провести расчет напряженно-деформированного состояния (НДС) при сложных воздействиях.

2. Постановка и решение задачи. Из анализа работ по исследованиям НДС слоисто-неоднородных оболочек, следует, что в основном рассмотрен ограниченный круг видов нагружения и условий закрепления слоев, а также модели, часто не позволяющие провести анализ с необходимой точностью в общем случае не регулярных оболочек при учете таких особенностей, как слоисто-неоднородная структура ортотропных материалов, в т.ч. в слое заполнителя; переменные геометрические и физико-механические свойства.

Эффективные (повышающие скорость сходимости численных результатов, а следовательно уменьшающие порядок систем уравнений, что особенно актуально при послойном анализе слоистых конструкций) модели получены для цилиндрических трехслойных оболочек, когда в качестве аппроксимирующих функций перемещений несущих слоев используется точные аналитические решения или аппроксимации обобщенных деформаций с последующим удовлетворением уравнениям совместности деформаций [2-8 и др.].

Для оболочек не цилиндрической формы применить эти подходы не удалось из-за трудностей с получением аппроксимирующих функций деформаций и перемещений при удовлетворении уравнениям совместности деформаций.

Рассматривается алгоритм для построения оболочечной конечно-элементной модели (КЭМ) заполнителя как толстостенной оболочки двойной кривизны, учитывающей трансверсальные эффекты.

В трёхмерной постановке для слоев заполнителя построены специальные аппроксимирующие функции, обеспечивающие непрерывность перемещений на поверхностях контакта заполнителя с моментными несущими слоями. На основе этих функций получена КЭМ заполнителя как толстостенной оболочки. Модель учитывает трансверсальные эффекты.

Работа выполняется при поддержке РФФИ грант № 13-01-00982-а

Литература

1. Бакулин В.Н., Образцов И.Ф., Потопахин В.А. Динамические задачи нелинейной теории многослойных оболочек: Действие интенсивных термосиловых нагрузок, концентрированных потоков энергии. - М.: Наука. Физматлит, 1998, 464 с.
2. Образцов И.Ф., Бакулин В.Н. Уточненные модели для исследования напряженно-деформированного состояния трехслойных цилиндрических оболочек // Докл. РАН. 2006. Т.407. №1. С.36-39.
3. Бакулин В.Н., Демидов В.И. Трехслойный конечный элемент естественной кривизны // Известия ВУЗов, Машиностроение, 1978. N 5. С. 5-10
4. Бакулин В.Н. Построение аппроксимаций для моделирования напряженно-деформированного состояния несущих слоев и слоев заполнителя трехслойных неосесимметричных цилиндрических оболочек // Мат. моделирование. - М., 2006, т.18, №8, с. 101-110
5. Бакулин В.Н. Эффективные модели для уточненного анализа деформированного состояния трехслойных неосесимметричных цилиндрических оболочек // Докл. РАН 2007. Т.414. №5. С.613-617
6. Бакулин В.Н. Построение аппроксимаций и моделей для исследования напряженно-деформированного состояния трехслойных неосесимметричных цилиндрических оболочек // Мат. моделирование. - М., 2007, т.19, №12, с. 118-128
7. Бакулин В.Н. Неклассические уточненные модели в механике трехслойных оболочек // Вест. Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского.— Н. Новгород: Изд-во ННГУ им. Н.И. Лобачевского, 2011. №4. Часть 5. С. 1989-1991.
8. Бакулин В.Н. Уточненная модель для расчета напряженно-деформированного состояния трехслойных конических оболочек вращения // Вест. Московского авиационного института, 2011. Т.18, №2. С. 211-218

УДК 519.7

АНАЛИЗ СХОДИМОСТИ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫХ МОДЕЛЕЙ ТОНКИХ МОМЕНТНЫХ ОБОЛОЧЕК

*Бакулин Д.В.¹, Бакулин В.Н.², Ретинский В.В.², Марков В.Г.³, Потопахин В.А.²,
Санжаровский А.Ю.⁴*

*1 - Московский авиационный институт (национальный
исследовательский университет), Россия*

2 - Институт прикладной механики РАН, Россия

3 - Центральный аэрогидродинамический институт, Россия

*4 - Московский государственный технический университет им.
Н.Э.Баумана, Россия
vbak@yandex.ru*

ANALYSIS OF COVERGENCE OF FINITE ELEMENT MODELS OF THIN MOMENT SHELLS

*Bakulin D.V.¹, Bakulin V.N.², Repinskij V.V.², Markov V.G.³,
Potopahin V.A.², Sanjarovsky A. Ju.⁴*

1 - Moscow Aviation Institute National Research University, Russia

2 - Institute of applied mechanics of Russian Academy of Science, Russia

3 - Central Aerohydrodynamic Institute, Russia

4 - Bauman Moscow State Technical University, Russia

Рассматриваются зависимости максимальных значений прогиба под нагрузкой от изменения плотности сетки на примере цилиндрической оболочки для двух типов оболочечных конечных элементов

The dependence of the maximum values of deflection under load from the grid density changes on the example of a cylindrical shell for two types of shell finite elements is being considered.

При расчете оболочек методом конечных элементов актуальной является разработка эффективных аппроксимаций и конечно-элементных моделей (КЭМ), отличающихся высокой скоростью сходимости результатов. В [1-5] для расчета несущих слоев слоистых цилиндрических и конических оболочек рассмотрены конечные элементы (КЭ), основанные соответственно на аппроксимации функций обобщенных деформаций и на аппроксимации перемещений. В этих элементах для улучшения сходимости учтены перемещения оболочки как жёсткого целого.

В работе на примере расчета цилиндрической оболочки, нагруженной двумя диаметрально противоположными силами, рассматривается сходимость конечно-элементных решений, полученных с применением цилиндрического и конического КЭ. Оболочка из материала АМГ-6 с модулем упругости $E = 0,67 \cdot 10^6$ кг/см² имеет следующие геометрические параметры: $L = 20$ см, $R = 5.575$ см, $h = 0.15$ см, где R – радиус

срединной поверхности; L – длина и h – толщина оболочки.

Вследствие симметрии в осевом и окружном направлениях при расчете рассматривалась 1/8 симметричная часть оболочки, на которой строилась конечно-элементная сетка (КЭС), состоящая из прямоугольных КЭ.

Для определения плотности КЭС, обеспечивающей достаточную точность расчета, применена методика [8,9], где предлагается алгоритм обработки последовательных вариантов расчета с кратно растущей плотностью разбиения. В [8,9] под плотностью разбиения понималось количество КЭ в единице длины выбранного локального направления.

В данной работе в качестве параметра плотности сетки рассматривалось одновременно количество КЭ по образующей и в окружном направлении t . Получены зависимости максимальных значений прогиба под нагрузкой от изменения плотности сетки для двух типов оболочечных КЭ.

Работа выполняется при поддержке РФФИ грант № 15-08-99591.

Литература

1. Бакулин В.Н. Построение аппроксимаций для моделирования напряженно-деформированного состояния несущих слоев и слоев заполнителя трехслойных неосесимметричных цилиндрических оболочек // Мат. моделирование. - М., 2006, т.18, №8, с. 101-110
2. Бакулин В.Н. Эффективные модели для уточненного анализа деформированного состояния трехслойных неосесимметричных цилиндрических оболочек // Докл. РАН 2007. Т.414. №5. С.613-617
3. Бакулин В.Н. Построение аппроксимаций и моделей для исследования напряженно-деформированного состояния трехслойных неосесимметричных цилиндрических оболочек // Мат. моделирование. - М., 2007, т.19, №12, с. 118-128
4. Бакулин В.Н. Неклассические уточненные модели в механике трехслойных оболочек // Вест. Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского.– Н. Новгород: Изд-во ННГУ им. Н.И. Лобачевского, 2011. №4. Часть 5. С. 1989-1991.
5. Бакулин В.Н. Уточненная модель для расчета напряженно-деформированного состояния трехслойных конических оболочек вращения // Вест. Московского авиационного института, 2011. Т.18, №2. С. 211-218
6. Бакулин В.Н., Инфлянскас В.В. К вопросу о достаточной плотности конечно-элементной сетки//Материалы XVII Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС2011), 25-31 мая 2011. г. Алушта.- М.: МАИ-ПРИНТ, 2011. с. 40-44
7. Бакулин В.Н., Инфлянскас В.В. К выбору локальной плотности сетки в конечно-элементных задачах // Международная конференция Седьмые Окуневские чтения. 20-24 июня 2011 г., Санкт-Петербург: Материалы докладов / Балт. Гос. Техн. Ун-т. – СПб., 2011. с. 219-220.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ПРОЦЕССОВ
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СУХИХ И ВОДОНАСЫЩЕННЫХ ГРУНТОВЫХ
СРЕД С ДЕФОРМИРУЕМЫМИ КОНСТРУКЦИЯМИ**

*Балафендиева И.С.¹, Бережной Д.В.², Карамов А.В.², Секаева Л.Р.²,
Султанов Л.У.²*

1 - Казанский институт экономики, управления и права

*2 - Казанский (Приволжский) федеральный университет
e_xo@mail.ru*

**MODELING OF NONLINEAR PROCESSES
INTERACTION OF DRY SOIL AND WATER SATURATION
MEDIA WITH DEFORMABLE STRUCTURES**

Balafendieva I.S.¹, Berezhnoi D.V.², Karamov A.V.², Sekaeva L.R.², Sultanov L.U.²

1 - Kazan Institute of Economics, Management and Law, Russia

2 - Kazan (Volga Region) Federal University, Russia

В работе дана постановка упругопластической задачи механики деформируемых твердых тел при конечных перемещениях и деформациях. При описании предельного состояния грунтов вместо соотношений типа Прандля-Рейсса, связывающих приращения компонент тензора напряжений и тензора деформаций, по аналогии принимаются соотношения между приращениями компонент тензора истинных напряжений и тензора истинных деформаций. Для решения геометрически нелинейных задач в работе используется алгоритм, реализованный на основе «модифицированной инкрементальной теории Лагранжа», когда процесс деформирования представляется в виде последовательности равновесных состояний при соответствующих уровнях нагружения. Решен ряд тестовых и модельных задач.

In this paper we state the elastic-plastic problems of mechanics of deformable solids under finite displacements and deformations. In the description of the limit state of soil instead of relations of the type Prandtl-Reuss, linking increment component of the stress tensor and the strain tensor by analogy accepted ratio between increments true stress tensor components, and the true strain tensor. To solve the geometrically nonlinear problems in the algorithm, implemented on the basis of "incremental theory of modified Lagrangian" when the deformation is represented as a sequence of equilibrium states at the appropriate levels of loading. Some test and model problems were solved.

При расчете водонасыщенных грунтовых сред принимается модель квазидвухфазного грунта, для которой считается, что газ либо полностью растворен в жидкости, либо находится частично в пузырьках, движущихся со скоростью фильтрующейся жидкости. При моделировании напряженного состояния используется принцип напряжений Терцаги. Уравнение пьезопроводности (для установившейся фильтрации) записывается с учетом закона фильтрации в форме Дарси-Герсеванова. Механизм взаимодействия между элементами деформируемых конструкций реализован в рамках конечно-элементной методики. Все возможные случаи отрыва и моделируются в рамках механики сплошной среды, т.е. путем введения между контактирующими поверхностями дополнительного контактного слоя из материала, обладающего специфическими свойствами. Полученная задача

является нелинейной и требует применения специальных методик для ее решения. Характерной особенностью этой нелинейности является то, что для нормальных напряжений имеет место ограничения по деформации (деформация контактного слоя не может быть больше его толщины), а для касательных напряжений – по их предельным значениям, определяющим возможность проскальзывания. Общее разрешающее уравнение в вариационной форме записывается исходя из принципа виртуальных перемещений.

Решен ряд тестовых и модельных задач взаимодействия грунтовых массивов и деформируемых конструкций. Разработана и реализована методика определения напряженно-деформированного состояния в обделке тоннеля метрополитена на основе уточненных моделей, позволяющих учитывать такие факторы, как: реальное распределение свойств грунтового массива в расчетных сечениях; заглубление туннеля от поверхности; достижения грунтом предельного состояния; давление грунтовых вод; учет контактного взаимодействия между обделкой тоннеля и грунтом; раскрытие и смыкание зазора между блоками обделки тоннеля в окружном направлении; расположение замкового блока в обделке тоннеля. Можно отметить следующие особенности деформирования разрезного кольца: нижнее расположение замкового блока уменьшает величину максимальных и минимальных окружных напряжений; максимальное растягивающее напряжение всегда возникает в блоке, противоположном замковому.

Для оценки достоверности проведенных расчетов и оценки разработанной методики проводились сравнения их результатов с данными мониторинговых исследований обделки возводимого тоннеля. В частности, на блоках трех колец устанавливались специальные приборы измеряющие их деформации (тензометры) до размещения этих блоков в обделку тоннеля. Затем по истечению достаточного времени, необходимого для стабилизации напряженного состояния как в обделке, так и в грунтовом массиве ее окружающем, снимались показания окружных и продольных деформаций. Эти окончательные показания измеряющих деформации приборов принимались как базовые при оценке напряженного состояния обделки при эксплуатации тоннеля.

Исходя из полученных результатов, следует отметить, что разработанная численная методика исследования напряженно-деформированного состояния колец обделки тоннеля метрополитена в трехмерной постановке с моделированием контактного взаимодействия блоков между собой дает результаты, хорошо согласующиеся с данными натурных испытаний. Следовательно, на ее основе можно рассчитывать подобные конструкции и получать достоверные результаты. В частности можно судить о напряженном состоянии внешней поверхности обделки, для которой невозможно получить экспериментальные данные по напряжениям.

Издание тезисов доклада осуществлено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Республики Татарстан в рамках научных проектов № 15-41-02555, № 15-31-20602.

ЗАКОНЫ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДЛЯ ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕЧЕНИЯ ТЕЙЛОРА-КУЭТТА ПРИ ОЧЕНЬ БОЛЬШИХ ЧИСЛАХ ТЕЙЛОРА

Балонишников А.М.

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического
приборостроения, Россия
balonishnikov@mail.ru

RESISTANCE LAWS FOR TURBULENT TAYLOR-COUETTE FLOW AT VERY LARGE TAYLOR NUMBERS

Balonishnikov A.M.

St.-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Russia

Resistance laws for fully developed turbulent Taylor-Couette flow between independently rotating coaxial cylinders were obtained from the model of dissipation transport at very large Taylor numbers.

В статье выводятся исходя из полуэмпирической модели переноса удельной скорости диссипации турбулентной энергии законы сопротивления для турбулентного течения Тейлора-Куэтта при вращении как внешнего так и внутреннего цилиндров при очень больших числах Тейлора.

1. Introduction.

Turbulent flow between independently rotating coaxial cylinders has attracted great attention of researchers as well as theoreticians (among them V.V. Novozhilov). The basic parameters of flow are : a - radius of internal cylinder, b - radius of external cylinder, ρ - fluid density, ν - viscosity, L - length of both cylinders, ω_1 - angular velocity of internal cylinder rotation, ω_2 - angular velocity of external cylinder rotation, $G = T / (\rho \nu^2 L) = 2\pi a^2 u_1^{*2} / \nu^2$ - dimensionless and T - dimensional torques, acting on internal cylinder, $T = 2\pi \rho a^2 L u_1^{*2}$, u_1^* - friction velocity on the surface of internal cylinders.

2. Extended local-balance model of turbulence.

One-parameter model of turbulence, based on assumption of local balance of turbulence energy and dissipation rate transport equation, was put forward [1]. Logarithmic layers were chosen as boundary conditions. The model gave Karman resistance law for turbulent Couette-Taylor flow a kind of Prandtl :

$$4\pi q u_1^* \kappa^{-1} (q^4 - 1)^{-1} J_0 + u_1^* q \kappa^{-1} \ln[Cu_1^*(b-a)/\nu] + u_2^* \kappa^{-1} \ln[Cu_2^*(b-a)/\nu] = V_2 + V_1 q, \quad (1)$$

where $q = b/a > 1$, $\kappa = 0.4$ and $C = 9.5$ - Prandtl - Karman constants, V_1 and V_2 - linear velocities of side surfaces of cylinders, rotating in contra direction (or one cylinder is at rest), angular momentum conservation $u_1^* a = u_2^* b$ is assumed,

$$J_0 = \int_1^q dx \{ x \csc[\pi(x^4 - 1)/(q^4 - 1)] - (q^4 - 1)(4\pi)^{-1}(x - 1)^{-1} - (q^4 - 1)(4\pi)^{-1} q^{-2}(q - x)^{-1} \}$$

Algebraic equation (1) gives dependence $G(\text{Re}_1, \text{Re}_2)$, $\text{Re}_1 = \frac{V_1(b-a)}{\nu}$, $\text{Re}_2 = \frac{V_2(b-a)}{\nu}$. Asymptotic dependence $G(\text{Re}_1, 0)$ at very large Re_1 was obtained in [2].

We can change right hand side of equation (1) by $b(\omega_2 + \omega_1)$, since $V_2 + V_1 q = b\omega_2 + a\omega_1 q = b(\omega_2 + \omega_1)$.

Let the largest linear velocity of two cylinders be positive. Then we can rewrite right hand side of equation (1) as $b|\omega_2 - \omega_1|$. We obtain:

$$4\pi q u_1^* \kappa^{-1} (q^4 - 1)^{-1} J_0 + u_1^* q \kappa^{-1} \ln[Cu_1^* (b - a) / \nu] + u_1^* q^{-1} \kappa^{-1} \ln[Cu_1^* q^{-1} (b - a) / \nu] = b|\omega_2 - \omega_1| \quad (2)$$

instead of equation (1).

Case of $\omega_2 = \omega_1$ corresponds to solid body rotation.

General situation with co- and contra- rotating cylinders, introducing Taylor Number (Ta), was considered in [3]:

$$Ta = \frac{1}{4} \sigma d^2 (a + b)^2 (\omega_1 - \omega_2)^2 \nu^{-2}, \quad (3)$$

where $\sigma = \left(\frac{1 + \eta}{2\sqrt{\eta}} \right)^4$, $\eta = \frac{a}{b} = q^{-1}$, $d = b - a$.

It can be shown that $u_1^* = \frac{\nu}{a} \sqrt{\frac{G}{2\pi}}$, $|\omega_1 - \omega_2| = \sqrt{\frac{4Ta}{\sigma}} \frac{\nu}{d(a + b)}$. Following asymptotic method, used in [2], we obtain

$$G = \frac{32\pi\kappa^2 q^4 Ta}{(q^4 - 1)^2 \sigma \ln^2(4Ta / \sigma)}, \quad \text{at } Ta \rightarrow \infty \quad (4)$$

Or in asymptotic equivalent form:

$$G = \frac{32\pi\kappa^2 q^4 Ta}{(q^4 - 1)^2 \sigma \ln^2(Ta)}, \quad \text{at } Ta \rightarrow \infty \quad (5)$$

Sometimes quasi Nusselt number Nu_ω ,

$$Nu_\omega = G / G_{lam}, \quad (6)$$

where laminar torque $G_{lam} = 2\nu^{-1} a^2 b^2 |\omega_1 - \omega_2| (b^2 - a^2)^{-1}$ or $G_{lam} = \frac{2q^2 \sqrt{Ta}}{\sqrt{\sigma} (q^2 - 1)^2}$, is used.

Combining (5) and (6), we can write:

$$Nu_\omega = \frac{16\pi\kappa^2 q^2 \sqrt{Ta}}{(q^2 + 1)^2 \sqrt{\sigma} \ln^2 Ta}, \quad \text{at } Ta \rightarrow \infty \quad (7)$$

Comparison of the expressions (5) and (6) with recent experiments is discussed.

References

1. Balonishnikov A.M. Extended local balance model of turbulence and Couette – Taylor flow. //Physical review E, 2000. v. 61, N2, p. 1390-1394.
2. Balonishnikov A.M. Resistance law for turbulent Taylor-Couette flow at very large Reynolds numbers. //Zhurnal of technical physics, 2003, v.73, N.2, pp.139-140. (in Russian)
3. Van Gils D.P.M., S.G. Huisman, G.-W. Bruggert, C. Sun, Lohse D. Torque scaling in Turbulent Taylor-Couette Flow with Co- and Contra- rotating Cylinders. //Physical review letters, 2011, v.106, 024502

УДК 539.43

РАСЧЕТ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ ТЕПЛООВОГО НАГРУЖЕНИЯ ЦИЛИНДРО-ПОРШНЕВОЙ ГРУППЫ В ЖИЗНЕННОМ ЦИКЛЕ АВТОМОБИЛЬНОГО ДИЗЕЛЯ

Барченко Ф.Б.¹, Бакулин Д.В.²

*1 - Московский государственный технический университет имени Н.Э.
Баумана, Россия*

*2 - Московский авиационный институт (национальный
исследовательский университет), Россия
barchenco@mail.ru*

COMPUTATION OF THERMAL BOUNDARY CONDITIONS OF CYLINDER AND PISTON IN THE LIFE CYCLE OF AUTOMOTIVE DIESEL ENGINE

Barchenko Ph.B.¹, Bakulin D.V.²

1 - Bauman Moscow State Technical University, Russia

2 - Moscow Aviation Institute (National Research University), Russia

Предложена математическая модель расчета тепловых нагрузок деталей цилиндро-поршневой группы автомобильного двигателя, работающего на переходных и неуставившихся режимах, в его полном жизненном цикле.

A mathematical model for computation heat loads of the cylinder-piston of automotive multicylinder engine working on the transient modes in its full life cycle.

1. Введение. Надежность и ресурс поршней двигателей внутреннего сгорания зависит от их механической и тепловой нагруженности. Определение ресурса и надежности деталей двигателя производится по запасу циклической прочности, пределу текучести или прочности. Традиционно расчет этих показателей производится на одном режиме: максимальной мощности (максимального крутящего момента) или другом, заранее выбранном. Работа двигателя на одном режиме характерна для судовых, стационарных и авиационных двигателей. Двигатели автомобилей работают в существенно нестационарных (на переходных и неуставившихся режимах) условиях практически весь срок эксплуатации (около 90 ... 95 %). Поэтому проводить стационарный расчет теплового и напряженно-деформированного состояния поршня на одном режиме в общем случае не корректно. Учет нестационарной тепловой нагрузки в течении одного цикла не приводит увеличению точности прогнозирования ресурса и надежности, так как известно [1] что высокочастотное тепловое нагружение поршня приводит к изменению температуры поверхности на 5 ... 10 С (при общем уровне температур 300 ... 400 С), и на глубине 0,1 ... 1 мм изменение температуры уже не происходит, и температурное поле можно принимать стационарным. Больше влияние на нестационарное тепловое состояние оказывает изменение нагрузки на двигатель и частоты вращения коленчатого вала в процессе эксплуатации, что особенно характерно для транспортных

двигателей. Такой характер нагружения приводит к изменению теплового состояния не только тонкого поверхностного слоя, но и всей детали. Моделированием прочности при таком виде нагружения занимаются большое количество исследовательских центров [2, 3, 4], однако данные о тепловом нагружении в приведенных работах предполагаются известными. Использование известных тепловых нагрузок возможно при доработке существующих образцов техники. Однако при создании новых и перспективных образцов техники необходимо уметь прогнозировать тепловые и механические нагрузки. Данному вопросу посвящена статья.

2. Расчет граничных условий теплового нагружения цилиндро-поршневой группы в жизненном цикле автомобильного двигателя. Точность расчета теплового и напряженно-деформированного состояния для деталей двигателя зависит от точности определения граничных условий. В предлагаемой работе, для корректного расчета запаса циклической прочности предлагается математическая модель нестационарной работы двигателя и определения граничных условий для моделирования теплового и напряженно-деформированного состояния цилиндро-поршневой группы. Математическая модель многоцилиндрового двигателя [5] включает расчет рабочего процесса в каждом цилиндре на основе термодинамической модели, нестационарного газообмена с помощью одномерной модели, включающей тройники, турбины и компрессора. Для оценки теплового состояния со стороны системы охлаждения используется упрощенная математическая модель, включающая насосы, трубопроводы, теплообменники и элементы системы управления. Для расчета запаса циклической прочности, предела текучести, прочности предполагается использовать универсальные программы, типа ANSYS, NASTRAN и т.д.

Работа выполняется при финансовой поддержке Российского Фонда фундаментальных исследований, грант № 14-08-01030.

Литература

- 1 Давыдов Г. А., Овсянников М. К. Температурные напряжения в деталях судовых дизелей. Л.: «Судостроение», 1969. 248 с.
- 2 Malakizadi A., Chamani H., Shahangian S. N., Jazayeri S. A., Sattarifard I. Thermo-mechanical fatigue life prediction of a heavy duty diesel engine liner. Proceedings of the ASME Internal Combustion Engine Division 2007 Fall Technical Conference. ICEF2007. October 14-17, 2007, Charleston, South Carolina, USA
- 3 Zieher F., Langmayr F., Ennemoser A., Jelatancev A., Hager G., Wieser K.. Advanced Thermal Mechanical Fatigue Life Simulation of Cylinder Heads. 2004 ABAQUS Users' Conference. pp 789-805.
- 4 Riedler M., Leitner H., Prillhofer B., Winter G., Eichlseder W. Lifetime simulation of thermo-mechanically loaded components. Meccanica. February 2007, Volume 42, Issue 1, pp 47-59. Springer.
- 5 Барченко Ф.Б., Бакулин В.Н. Особенности численного моделирования работы многоцилиндрового двигателя // Материалы XIX Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам, 22-31 мая 2015 г., Алушта. М.: Изд-во МАИ, 2015 С.40-41

УДК 539.3

**АНАЛИЗ РАБОТЫ ПОЛИУРЕТАНОВЫХ АМОРТИЗАТОРОВ
ТОННЕЛЬНОГО ТИПА ПРИ БОЛЬШИХ ДЕФОРМАЦИЯХ В
УСЛОВИЯХ СТАТИЧЕСКОГО И ДИНАМИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ**

Белкин А.Е., Брезгин Н.А., Хоминич Д.С.

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,

Россия

a_belkin@newmail.ru

**THE WORK ANALYSIS OF THE POLYURETHANE TUNNEL SHOCK-
ABSORBERS WITH REGARD TO LARGE DEFORMATIONS IN STATIC
AND DYNAMIC LOADING CONDITION**

Belkin A.E., Brezgin N.A., Khominich D.S.

Bauman Moscow State Technical University (BMSTU), Russia

Представлена математическая модель вязкоупругого поведения полиуретана СКУ-ПФЛ-100 при деформировании с умеренно высокими скоростями. Параметры модели определены по результатам испытаний образцов на сжатие, растяжение и кручение. С использованием разработанной модели материала выполнены расчеты полиуретановых амортизаторов тоннельного типа при статическом и динамическом нагружении с целью обеспечения требуемых характеристик.

The mathematical model of viscoelastic behaviour of polyurethane СКУ-ПФЛ-100 at moderately high speeds of deformation is presented. Model parameters are defined with testing results of samples in compression, tension and torsion. The developed model of a material was used in calculations of the behaviour of polyurethane tunnel shock-absorber in static and dynamic loading for the purpose of getting the demanded operational characteristics.

1. Введение. Для амортизации ряда объектов предлагается использовать полиуретановые амортизаторы тоннельного типа. Образец такого амортизатора показан на рисунке.

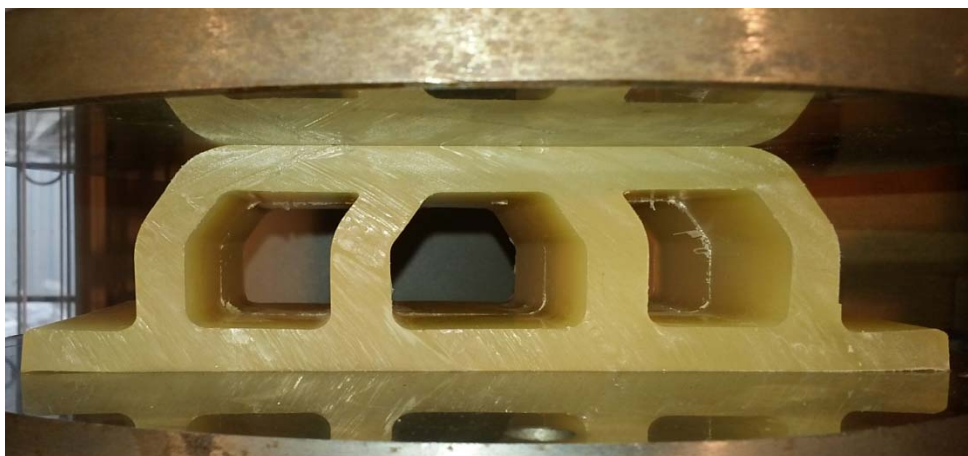


Рис. 1. Полиуретановый амортизатор, помещенный между плитами испытательной машины

Проектирование амортизаторов с требуемыми характеристиками должно основываться на вычислительных экспериментах, учитывающих реальные условия работы полиуретановых деталей. Основная сложность создания математической модели для подобных расчетов связана с недостаточной изученностью зависимости механических свойств полиуретана от параметров нагружения, в частности скорости нагружения.

2. Математическая модель вязкоупругого поведения полиуретана.

Для описания вязкоупругости полиуретана СКУ-ПФЛ-100 при умеренно высокой скорости деформирования до 10с^{-1} применена реологическая модель Бергстрема-Бойс [1], согласно которой тензор скоростей вязких деформаций $\mathbf{D}_v$ выражается по закону течения через девиатор напряжений $\text{dev } \boldsymbol{\sigma}_v$ в вязкой структуре материала

$$\mathbf{D}_v = \frac{3}{2} \frac{A(\sigma_v)^{m-1}}{(\lambda_{\text{chain}} - 1 + \delta_0)^n} \text{dev } \boldsymbol{\sigma}_v,$$

где λ_{chain} - кратность удлинения макромолекулярной цепи эластомера, σ_v - интенсивность напряжений, A, m, n, δ_0 - параметры закона деформирования.

Предполагается, что напряжения в упругой структуре материала связаны с деформациями законом Арруда-Бойс [2]. Идентификация модели проведена с использованием результатов испытаний образцов полиуретана на сжатие, растяжение и кручение. Достигнуто приемлемое соответствие между экспериментальными данными и результатами численного анализа построенной модели.

3. Расчеты амортизаторов выполнены методом конечных элементов в программном комплексе MSC MARC/Mentat. Рассмотрены статическое нагружение и удар плитой с заданной начальной скоростью движения. В расчетах удара по амортизатору сжатия высотой H начальная скорость осадки составляла от $4H$ до $11H$ в секунду. Определены силы, передаваемые на амортизируемый объект, а также значения энергии, накопленной, возвращенной и рассеянной амортизатором.

Литература

1. Bergström J.S., Boyce M.C. Constitutive Modeling of the Large Strain Time-Dependent Behavior of Elastomers // Journal of Mechanic Physics Solids, 1998, Vol. 46, pp. 931–954.
2. Arruda E.M., Boyce M.C. A Three-dimensional Constitutive Model for the Large Stretch Behavior of Rubber Elastic Materials // Journal of Mechanic Physics Solids, 1993, Vol. 41, No. 2, pp. 389-412.

АДАПТИВНЫЕ ДИНАМИЧЕСКИЕ КОНЕЧНОЭЛЕМЕНТНЫЕ МОДЕЛИ В ОСНОВЕ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА КОНСТРУКЦИЙ УНИКАЛЬНЫХ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

Белостоцкий А.М.¹, Каличава Д.К.², Островский К.И.², Новиков П.И.²

1 - НИУ МГСУ, г. Москва, Россия

2 - ЗАО НИЦ СтаДуО, г. Москва, Россия

niccm@mgsu.ru

ADAPTIVE DYNAMIC FINITE ELEMENT MODELS AS THE BASE OF MONITORING OF UNIQUE BUILDINGS.

Belostotsky A.M.¹, Kalichava D.K.², Ostrovsky K.I.², Novikov P.I.²

1 – Moscow State University of Civil Engineering, Russia

2 – StaDyO Ltd, Moscow, Russia

Предложена, теоретически обоснована, верифицирована и апробирована расчетно-экспериментальная методика мониторинга несущих конструкций уникальных (высотных и большепролетных) зданий и сооружений. Методика базируется на детальном большеразмерном пространственном параметризующем динамическом КЭ-моделе, который адаптируется по данным инструментальных измерений (метод «стоячих волн») и визуальных обследований.

Не секрет, что сегодня обязательная система мониторинга многих уже возведенных уникальных зданий существует лишь на бумаге, утвержденной госэкспертизой. Анализ действующей российской нормативно-методической базы показал, что основные положения по динамическому мониторингу несущих конструкций нуждаются в конкретизации и развитии для уникальных (в том числе, высотных и большепролетных) зданий на базе расчетно-экспериментальных исследований и разработок.

Предложена и теоретически обоснована расчетно-экспериментальная методика мониторинга несущих конструкций уникальных зданий и сооружений. Методика базируется на детальном большеразмерном пространственном динамическом КЭ-моделе, который параметризуется для значимых стадий «жизненного цикла» объекта и адаптируется по данным инструментальных наблюдений, и позволяет оценить состояние несущих конструкций с учетом дефектов и отступлений от проекта (например, класс бетона и марка металла, геометрические отклонения, ослабления контактов колонн и стен с перекрытиями и др.) при строительстве и эксплуатации.

Показано, в частности, что метод измерений должен обеспечивать уверенное определение не только низших общесистемных, но и собственных частот и форм колебаний, которые идентифицируют локальные изменения состояния конструкций (включая разрушения) – этим критериям удовлетворяет выбранный метод «стоячих волн» в варианте, разработанном д.т.н. Емановым А.Ф. (СО РАН), до недавнего времени использовавшийся для определения динамических характеристик гидротехнических и иных сооружений.

В ходе верификации на стендовых моделях (МГСУ) и апробации на реальных объектах (высотные комплексы г. Москвы, возведенные с зафиксированными отступлениями от проекта, большепролетные спортивные сооружения и пешеходный мост в сейсмически активном районе и др.) выявлен истинный потенциал – возможности и ограничения – разработанной методики динамического мониторинга и ее место в ряду альтернативных-дополняющих подходов.

Рекомендуется внедрить предложенную комплексную расчетно-экспериментальную методику для динамического мониторинга несущих конструкций уникальных зданий на стадиях их строительства и эксплуатации. При этом требуют дальнейшего обоснования и развития как методы измерений, так и численные процедуры параметризации и адаптации-калибровки КЭ-моделей (наиболее перспективным представляется решение некорректных обратных задач идентификации).

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРУЗОК И ВОЗДЕЙСТВИЙ,
НДС, ПРОЧНОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ УНИКАЛЬНЫХ
КОНСТРУКЦИЙ, ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ. ОПЫТ 2013-2015 Г.Г.**

*Белостоцкий А.М.^{1,2}, Акимов П.А.^{1,2}, Кайтуков Т.Б.¹, Павлов А.С.¹,
Пеньковой С.Б.¹, Аул А.А.¹, Афанасьева И.Н.^{1,2}, Вершинин В.В.¹,
Дмитриев Д.С.², Дядченко Ю.Н.², Нагибович А.И.^{1,2}, Негрозов О.А.²,
Островский К.И.¹, Петряшев С.О.², Петряшев Н.О.², Щербина С.В.²*

1 - НИУ МГСУ, Россия

2 - ЗАО НИЦ СтаДиО, Россия

niccm@mgsu.ru

**LOADS/IMPACTS, STRESS-STRAIN, STRENGTH AND STABILITY
ANALYSIS OF UNIQUE STRUCTURES AND BUILDINGS.**

EXPERIENCE OF LAST YEARS (2013-2015)

*Belostotsky A.M.^{1,2}, Akimov P.A.^{1,2}, Kaytukov T.B.², Pavlov A.S.¹, Penkovoy S.B.²,
Aul A.A.¹, Afanasyeva I.N.^{1,2}, Vershinin V.V.², Dmitriev D.S.¹, Dyadchenko Y.N.¹,
Nagibovich A.I.^{1,2}, Negrozov O.A.², Ostrovsky K.I.¹, Petriashev S.O.²,
Petriashev N.O.², Scherbina S.V.²*

1 – Moscow State University of Civil Engineering, Russia

2 – StaDyO Ltd, Moscow, Russia

Представлен и проанализирован опыт расчетного обоснования нагрузок и воздействий, статического и динамического напряженно-деформированного состояния (НДС), прочности и устойчивости уникальных конструкций, зданий и сооружений, накопленный в 2013-2015 гг. (период между конференциями BEM&FEM).

Среди наиболее значимых объектов (для этапов их жизненного цикла – проектирование, строительство, эксплуатация-мониторинг) и задач, решенных коллективами ЗАО НИЦ СтаДиО и НОЦ КМ МГСУ в 2013-2015 гг. по необходимости в сложных постановках с применением современных подходов численного моделирования (распараллеливание вычислений, подконструкции, субмоделирование, нелинейные эффекты и др.), реализованных в программных комплексах:

- 1) определение ветровых нагрузок на несущие и фасадные (ограждающие) конструкции и параметров пешеходной комфортности двух проектируемых многоэтажных жилых комплексов (г. Москва, Юго-Запад) на основе решения трехмерных стационарных и нестационарных задач аэродинамики (ПК ANSYS CFD);
- 2) разработка и верификация методики численного моделирования и расчетные исследования НДС трехмерных гидроупругих систем "стальной резервуар - понтон (плавающая крыша) - жидкость" АО "Транснефть" при сейсмических воздействиях (ПК ANSYS, ANSYS CFD, ABAQUS);

- 3) численное моделирование НДС (с учетом последовательности монтажа и контактных взаимодействий), прочности и устойчивости трубопроводной системы «Грушовая-Шехарис» АО "Транснефть" с целью разработки рационального конструктивного решения. (ПК ANSYS, АСТРА-НОВА);
- 4) расчетные исследования НДС и прочности трубопроводных систем различных отраслей при нормативно регламентированных сочетаниях статических нагрузок, температурных и сейсмических воздействий (ПК АСТРА-НОВА);
- 5) разработка, верификация и апробация численных методик динамического расчета системы «грунтовое основание – водохранилище - сооружение напорного фронта ГТС» на сейсмические воздействия, заданные акселерограммами (ПК СТАДИО, ПК ANSYS);
- 6) расчетно-экспериментальные исследования НДС и прочности несущих ж/б конструкций пешеходного моста через железную дорогу в ОК «Дагомыс» (г.Сочи) при действии нормативно-регламентированных сочетаний статических, ветровых и сейсмических нагрузок (ПК ANSYS);
- 7) уточненный КЭ-анализ НДС, прочности и устойчивости пространственной системы «основание – ж/б конструкции – большепролетное металлическое покрытие на сейсмоизолирующих резинометаллических опорах» торгово-развлекательного центра олимпийской медиадеревни «Горная карусель» (горный кластер Олимпиады Сочи 2014) в динамической и нелинейной постановках (ПК Лира, ПК ANSYS), сопровождение в ФАУ «Главгосэкспертиза России»;
- 8) уточненная оценка проектного и фактического состояний и несущей способности основания и ж/б конструкций, выработка рекомендаций по реконструкции возведенного высотного многофункционального жилого комплекса (г. Москва, ...) на основе численного моделирования с учетом данных геодезического мониторинга (ПК ANSYS, ПК Лира);
- 9) комплексное обоснование НДС, прочности и устойчивости систем "свайное основание - ж/б конструкции стилобата и трибун - металлоконструкции крыши и фасадов" и наиболее ответственных узлов-элементов шести проектируемых стадионов к Чемпионату мира по футболу 2018 г. (гг. Самара, Волгоград, Нижний Новгород, Ростов-на-Дону, Екатеринбург, Сочи) при основных и особых сочетаниях нагрузок (включая нелинейные динамические расчеты на прогрессирующее обрушение) с использованием альтернативных моделей в ПК ANSYS, ПК MIDAS Civil, ПК Robot Structure, ПК SCAD, ПК Лира и прохождением «Главгосэкспертизы России».

Ряд работ был выполнен в «инициативном» порядке, среди них - успешное завершение верификации ПК ABAQUS в системе RAACH.

Литература

1. <http://www.stadyo.ru>, ЗАО НИЦ СтаДиО, Опыт работ, 2013-2015.

СОВРЕМЕННЫЕ ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И САПР-ТЕХНОЛОГИИ В ПРОЧНОСТНЫХ РАСЧЕТАХ ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМ. ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС АСТРА-НОВА'2015

Белостоцкий А.М., Воронова Г.А., Потапенко А.Л., Аул А.А.

ЗАО НИЦ СтаДиО, г. Москва, Россия

niccm@mgsu.ru

MODERN NUMERICAL METHODS AND CAD-TECHNOLOGIES IN PIPELINES STRENGTH ANALYSIS. PROGRAM PACKAGE ASTRA-NOVA'2015.

Belostotsky A.M., Voronova G.A., Potapenko A.L., Aul A.A.

StadyO Ltd, Moscow, Russia

Дается критический обзор современного состояния нормативно регламентированных комплексных прочностных расчетов произвольных разветвленных и протяженных надземных и подземных трубопроводных систем различных отраслей. Особое внимание уделено новым, востребованным практикой возможностям, реализованным в актуальной версии ПК АСТРА-НОВА'2015, в числе которых: включение сложных конструктивных узлов (опоры, детали, оборудование и др.) в единую динамическую суперэлементную модель с использованием матриц Крейга-Бемптона, учет статического и сейсмического взаимодействия с грунтом для подземных трубопроводов тепловых сетей, магистральных газо- и нефтепроводов, расчет трубопроводов высокого давления с учетом автофретирования и интерфейс с развитыми САПР и расчетными программами.

The critical review of a modern condition complex strength calculations of the any pipeline systems of various technical branches is given. The special attention is given new, demanded by practice to the opportunities realized in the actual version of the program package ASTRA-NOVA'2015, among which: inclusion of complex constructive units (a support, a detail, the equipment, etc.) in uniform dynamic superelement model, static and seismic interaction with a ground for underground pipelines of thermal networks, gas- and oil pipelines, high pressure pipelines analysis, the interface with advanced CAD- and strength analysis programs.

Востребованные практикой и отраженные в обязательных к исполнению нормативных положениях задачи комплексного автоматизированного прочностного расчета сложных пространственных разветвленных трубопроводных систем решаются с привлечением современных численных методов механики и САПР-технологий.

Излагаются методы и алгоритмы, вновь реализованные в действующей версии аттестованного (в системах Госатомнадзора и Ростехнадзора) и сертифицированного программного комплекса АСТРА-НОВА'2015 [1]:

- построение и использование матриц Бемптона-Крейга для адекватного учета в единой суперэлементной модели геометрико-жесткостных и инерционных свойств сложных конструктивных узлов, работающих совместно с трубопроводами (нестандартные опоры, сложные детали, технологическое оборудование и др.);

- уточненный расчет температурного и напряженно-деформированного

состояний, статической, сейсмической и циклической прочности элементов-деталей трубопроводов: тройников, отводов, переходов, линзовых компенсаторов, сварных соединений и др. (оболочечные и трехмерные схемы МКЭ;

– учет взаимодействия труб с грунтовым массивом для подземных трубопроводов тепловых сетей (бесканальной прокладки с пенополиуретановой изоляцией и полиэтиленовой оболочкой) и магистральных нефте- и газопроводов (подземных и в насыпях) в рамках разработанной «инженерной» методики, базирующейся на результатах трехмерного конечноэлементного анализа с использованием нелинейной реологической модели грунта [2];

– расчет трубопроводов высокого и сверхвысокого давления в физически нелинейной (пластичность металла) постановке с учетом автофреттирования.

Рассматриваются также проблемы (основная из которых – необходимость «интеллектуальной» доводки расчетных моделей, импортированной из других систем) и особенности реализации интерфейса с развитыми программными комплексами расчета трубопроводов (СТАРТ, CAESAR II) и специализированными САПР (CADWorx, Smart Plant и др.).

Приводятся показательные примеры построения моделей и практических прочностных расчетов по ПК АСТРА-НОВА'2015 сложных трубопроводных систем, выполненных с применением изложенных разработок в ряде проектных и научно-исследовательских фирм.

Литература

1. Белостоцкий А.М., Воронова Г.А., Потапенко А.Л. «Семейство» программ АСТРА-НОВА для автоматизированных нормативно регламентированных расчетов на прочность трубопроводных систем атомных и тепловых установок и нефтехимических производств. Труды XVIII Международной конференции «Математическое моделирование в механике сплошных сред на основе методов граничных и конечных элементов». BEM&FEM-2000, С-Петербург, 2000, с. 72-76.
2. Белостоцкий А.М., Белый М.В., Рассказов Л.Н. Численные исследования напряженно-деформированного состояния систем «сооружение-основание» с учетом нелинейных реологических свойств грунтов. Труды XX Международной конференции «Математическое моделирование в механике сплошных сред на основе методов граничных и конечных элементов». BEM&FEM-2003, С-Петербург, 2003.
3. Белостоцкий А.М., Воронова Г.А., Потапенко А.Л., Аул А.А. Верификация и аттестация программного комплекса АСТРА-АЭС. Новый уровень прочностных расчетов трубопроводных систем. International Journal for Computational Civil and Structural Engineering, Volume 7, Issue 3, 2011, pp. 33-40.

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ СТЕРЖНЕВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПЕРЕМЕННОЙ ЖЕСТКОСТИ

Белый Г.И., Аскинази В.Ю.

СПбГАСУ, Россия

office@erkon.ru

OVERALL STABILITY OF STEEL TAPERED MEMBERS

Belyy G., Askinazi V.

St.-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

В докладе представлено решение задачи о пространственной устойчивости тонкостенных стержней переменного сечения за пределом упругости с использованием аналитически-численного метода. Произведено сравнение результатов расчета предложенным методом и методом конечных элементов.

Efficient computational method for the evaluation ultimate capacity of thin-walled steel tapered members under biaxial loadings is presented. The comparison of results made by presented technique and by FEM is also demonstrated.

В настоящее время рамные каркасы с двутавровыми профилями переменной жесткости получили достаточно широкое распространение в мировой практике за счет экономичного распределения материала по длине элементов. Однако в нашей стране использование таких элементов во многом ограничивается отсутствием нормативных положений по их расчету.

В рамных плоских конструкциях основным расчетным сочетанием усилий является сжатие с изгибом. При этом несовершенства, связанные с изготовлением и монтажом нормируются в виде случайных эксцентриситетов, поэтому при рассмотрении устойчивости выделенных из конструкций элементов необходимо принимать пространственно-деформированную схему. В докладе представлено решение такой задачи за пределом упругости, в котором для ускорения процесса расчета используется аналитически-численный метод. Решение основано на аналитическом методе (алгоритм «Стержень»), который базируется на решениях частных задач – бифуркационных задач устойчивости и задач недеформационного расчета. Развитие пластических деформаций в алгоритме «Стержень» учитывается с помощью дополнительных пространственных перемещений, которые численно определяются по установлению равновесного состояния в сечениях (алгоритм «Сечение»). Этот подход позволяет быстро и с минимальными погрешностями определять пространственные деформации и оценивать устойчивость на любом уровне нагружения.

В докладе приведены некоторые результаты расчетов, характеризующие особенности пространственных деформаций и устойчивости в зависимости от различных факторов: гибкости стержневых элементов, величин двухосных

эксцентриситетов продольной силы, степени изменения жесткости по длине. Построены графики пространственного деформирования по длине стержневых элементов на разных уровнях нагружения. Предельное значение нагрузки определялось с определенной точностью при нарушении устойчивости процесса пространственного деформирования.

Для оценки предложенного решения произведено сравнение результатов расчетов с решением МКЭ, которое подтвердило правильность принятых предпосылок и преимущества метода, что позволяет его использовать в практических методах расчета.

В сравнении с элементами с постоянной жесткостью, для исследуемых стержней при некоторых схемах загрузки потеря прочности может происходить раньше потери устойчивости. Таким образом, в отличие от традиционных задач устойчивости, в стержневых элементах переменной жесткости необходимо также проверять прочность в поперечных сечениях.

УДК 539.3

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ
ПРИ КОНТАКТНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ УПРУГОГО ТЕЛА С
ЖЕСТКИМ ШТАМПОМ**

Бобылёв А.А., Белашиова И.С.

*Московский автомобильно-дорожный государственный технический
университет (МАДИ), Россия
abobylov@gmail.com*

**NUMERICAL SIMULATION OF DAMAGE ACCUMULATION
UNDER CONTACT INTERACTION OF THE ELASTIC BODY
WITH THE RIGID PUNCH**

Bobylov A.A., Belashova I.S.

Moscow Automobile and Road Construction University (MADI), Russia

Рассмотрена связанная задача о накоплении повреждений при контактном взаимодействии упругого тела с жестким штампом. Разработан алгоритм ее численного решения на основе метода конечных элементов.

The coupled problem of damage accumulation under contact interaction of an elastic body with a rigid punch is considered. The numerical algorithm for solving of the problem is developed on the basis of the finite element method.

Усталостные повреждения при контактном взаимодействии твердых тел возникают в результате повторного деформирования поверхностных слоев, характерного для нормальной работы подвижных соединений. В последнее время для описания процессов усталостного разрушения развиваются модели на основе концепций континуальной механики разрушения. В этих моделях повреждаемость количественно описывается некоторыми внутренними параметрами материала. Развитие повреждаемости определяется эволюционными кинетическими уравнениями, отражающими необратимый характер повреждаемости.

В настоящей работе рассмотрена связанная задача о накоплении повреждений при контактном взаимодействии упругого тела с жестким штампом. В рамках связанной постановки процесс накопления повреждений оказывает влияние на напряженно-деформированное состояние тела и, в тоже время, напряжения и деформации в зонах локализации поврежденности в значительной мере определяют характер ее распределения и ее уровень.

При постановке задачи задаются нелинейные граничные условия одностороннего контакта упругого тела с жестким штампом, содержащие неравенства. Поврежденность материала описывается скалярным параметром. Предполагается, что в условиях сложного напряженного состояния скорость накопления повреждений зависит от совместных инвариантов тензора напряжений и тензора, характеризующего механические свойства материала. В качестве такой величины принимается удельная энергия упругого деформирования.

Для решения задачи использован вариационный подход. Получена формулировка задачи в виде квазивариационного неравенства эволюционного типа. Для дискретизации задачи по времени (циклам нагружения) использованы разностные схемы. Разработаны вычислительные алгоритмы на основе явной схемы Эйлера и схемы типа предиктор-корректор. В результате на каждом временном шаге требуется решить эллиптическое вариационное неравенство или эквивалентную ему задачу минимизации функционала потенциальной энергии. Дискретизация задачи по пространственным координатам производилась на основе метода конечных элементов. В результате получена задача квадратичного программирования с нелинейными ограничениями в виде равенств и неравенств. Для решения этой задачи разработаны варианты методов сопряженных градиентов и последовательной верхней релаксации, учитывающие специфику ограничений.

Получены численные решения контактных задач в плоской и осесимметричной постановках. Для дискретизации задач использовались треугольные и четырехугольные конечные элементы первого и второго порядков. Исследовано влияние параметров кинетического уравнения накопления повреждений на процесс усталостного разрушения при контактном взаимодействии.

Разработанные вычислительные алгоритмы реализованы в виде пакета прикладных программ. Проведен сравнительный анализ вычислительной эффективности используемых разностных схем. Сформулированы рекомендации по выбору параметров разработанных вычислительных алгоритмов – шага дискретизации по времени и сетки конечных элементов. Даны рекомендации по практическому использованию разработанных вычислительных алгоритмов.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект №13-01-00728).

*Боденкова Е.О.**Санкт-Петербургский Государственный Университет, Россия**Bodenkova23@mail.ru***PROBLEM OF INTERACTION OF BIOOBJECT***Bodenkova E.O.**St.-Petersburg State University, Russia*

The interaction of two biological objects is discussed. In particular, the effect of pressure changes on objects is investigated. These studies may be useful in the study of problems of increasing intra-abdominal pressure.

Анализируется влияние биообъектов друг на друга с помощью модельной задачи. В программе ANSYS построены картины напряжений. Результаты качественно сравниваются с результатами исследований напряжений методом фотоупругости и картинами свечений, полученными методом ГРВ.

1. Введение. Исследуется взаимодействие биообъектов. Так как в природе действует закон экономии, по которому природа всегда «ищет кратчайшие пути и выбирает экономные решения», мы можем наблюдать его действие в строении биологических форм макромира и микромира. Определенные простые формы в тех или иных комбинациях повторяются в огромном многообразии сложных форм. К таким формам, в том числе относятся цилиндр и шар. Поэтому для исследования взаимодействия биообъектов в качестве модельной задачи рассматривается задача Ламе.

2. Модель, анализ и применение. В данной работе изучаются две биоконструкции с внутренним давлением. Для этого решается идентичная задача. Рассматривается прямоугольная пластинка размера 26×12 с двумя круглыми включениями радиуса $r=1$. Внутри включений приложено давление.

Анализируется влияние размеров отверстий, расстояния между ними и соотношения внутреннего давления.

Поскольку результаты исследований будут качественно сравниваться с результатами исследований напряжений методом фотоупругости, то в качестве характеристики материала пластины берём механические характеристики эпоксидного полимера: модуль Юнга $E=3 \cdot 10^6$ Па и коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$.

В программе ANSYS построены картины напряжений. (Рис. 1) При малом расстоянии между объектами наблюдаем большие деформации, значит, будет изменяться структура ткани. Для случая равного давления получено, что, чем меньше расстояние между отверстиями, тем больше напряжение в центре пластины.

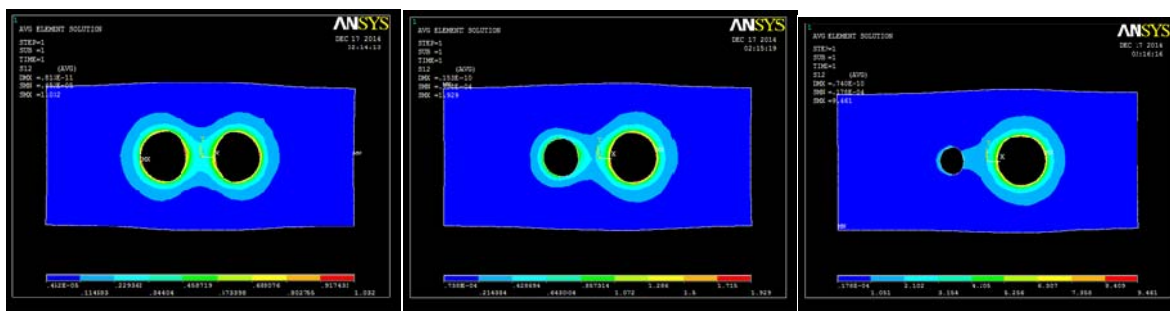


Рис. 1. Картины напряжений при разном соотношении давлений

Хотя состояние биоконструкции зависит от очень многих факторов, мы видим, что на неё может повлиять даже просто повышение давление в соседнем биообъекте.

Можно наблюдать такое взаимодействия на примере берёзы и сосны. Когда они посажены слишком близко, считается, что берёза давит на сосну, тем самым мешая второй нормально расти. Поэтому данная задача практически применяется при посадке деревьев. (Рис. 2)



Рис. 2. Взаимодействие берёзы и сосны

Также данная модель может применяться при решении задач о взаимодействии клеток, людей.

ЗАВИСИМОСТЬ ХАРАКТЕРНЫХ ВРЕМЕН РЕЛАКСАЦИИ ОТ СТРУКТУРЫ МАТЕРИАЛА ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ МЕХАНИЗМОВ ПЛАСТИЧНОСТИ

Бородин И.Н.^{1,2}, Селютина Н.С.³, Петров Ю.В.^{3,1}, Майер А.Е.²

1 - Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, Россия

2 - Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия

3 - Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

elbor7@gmail.com

DEPENDENCE OF RELAXATION TIMES ON THE MATERIAL MICROSTRUCTURE FOR DIFFERENT MECHANISMS OF PLASTICITY

Borodin E.N.^{1,2}, Selyutina N.S.³, Petrov Yu.V.^{1,3}, Mayer A.E.²

1 - Institute of Problems of Mechanical Engineering, Russia

2 - Chelyabinsk State University, Russia

3 - Saint-Petersburg State University, Russia

На основе модели Максвелла для очень вязкой жидкости получены уравнения для определения параметров характерных времен пластической релаксации, используемых в интегральных критериях пластичности. Времена релаксации являются постоянными для материала с данной микроструктурой и не зависят от параметров процесса деформации, но меняются при смене доминирующего механизма пластичности. Приведены выражения для зависимости характерных времен релаксации от скалярной плотности дислокаций и размера зерна материала для механизмов дислокационной пластичности и ползучести соответственно.

On the basis of the Maxwell model for very viscous liquid we derive equations for definition of characteristic relaxation times that are used in the integral criterion of plasticity. Relaxation times are constants for the material with current microstructure and do not depend on the features of the deformation process, but they change at the change of the main deformation mechanism of plasticity. The equations are proposed that connect the characteristic time of plastic relaxation with the scalar dislocation density and grain size of the material for dislocation plasticity and creep consequently.

1. Введение. В ряде моделей пластической деформации, учитывающих не только наличие в материале предела текучести (как барьерного напряжения после которого начинается пластическая деформация), но и динамические особенности, такие как конечную скорость релаксации напряжений, включается также временной параметр характерного времени пластической релаксации. Этот параметр полагается постоянной материала и не зависит от условий самого процесса деформации. При этом, он изменяется при изменении микроструктуры и смене доминирующего механизма пластической деформации [1]. Рассмотрим более подробно модель очень вязкой жидкости Максвелла [1]. Сравнивая следующие из нее выражения с определяющими соотношениями при дислокационной пластичности и ползучести можно получить выражения для определения соответствующих

параметров характерных времен релаксации [1,2]. На случай динамической деформации обобщение подхода Максвелла может быть осуществлено в рамках интегрального критерия пластичности [2,3], который сводится к модели Максвелла при малых скоростях деформации.

2. Выражения для характерных времен пластической релаксации.

Пренебрегая статическим пределом текучести по сравнению с действующими напряжениями и используя соотношение Орована [1] можно получить [1,2] для характерного времени релаксации при дислокационном скольжении:

$$\tau_D = \frac{\chi B_D}{\rho_D G b^2}, \quad (1)$$

где ρ_D – скалярная плотность дислокаций, $G b^2 \rho_D$ – полная упругая энергия дислокационных линий в единице объема, а коэффициент фононного трения B_D [4] характеризует скорость рассеяния кинетической энергии дислокаций, $\chi = (1 - V_D^2 / c_t^2)^{-3/2}$ – динамический фактор, учитывающий увеличение плотности дефектов в процессе деформации, V_D – скорость дислокаций, $c_t^2 = G / \rho$ – квадрат поперечной скорости звука.

Для характерного времени релаксации при пластичности по механизму Кобла [5] можно получить аналогичным образом:

$$\tau_{gb} = \frac{k_b T d^3}{A_C D_{gb} G b^3 \delta}, \quad (2)$$

Для механизмов ползучести по Набарро-Херрингу и Харперу-Дорну [5] аналогичным образом имеем соотношения (3) и (4):

$$\tau_{NH} = \frac{k_b T d^2}{A_{NH} D_l G b^3}, \quad (3)$$

$$\tau_{HD} = \frac{k_b T}{A_{HD} D_l G b}. \quad (4)$$

Здесь постоянные моделей $A_C \sim 30-50$, $A_{NH} \sim 10-15$, $A_{HD} \sim 10^{-11}$ [5], T – температура, d – размер зерна материала, δ – ширина границы зерна, k_b – постоянная Больцмана. Значение времени релаксации здесь существенно зависит от величины коэффициентов самодиффузии атомов в объеме D_l и по границам зерен D_{gb} .

Полученные соотношения могут быть использованы для определения изменения предела текучести материала в динамике при увеличении скорости деформации материала. На Рис.1 показан расчет прямого и обратного эффекта Холла-Петча [5] в условиях квазистатической и динамической деформации. Статическая часть получена на основе моделей для барьерных напряжений при дислокационном скольжении [4] и

зернограничном проскальзывании [6]. Динамическая часть получена на основе подобранного из экспериментов [7] характерного времени релаксации для дислокационного скольжения (1), а также соотношения (2) для зернограничного проскальзывания с ползучестью по механизму Кобла.

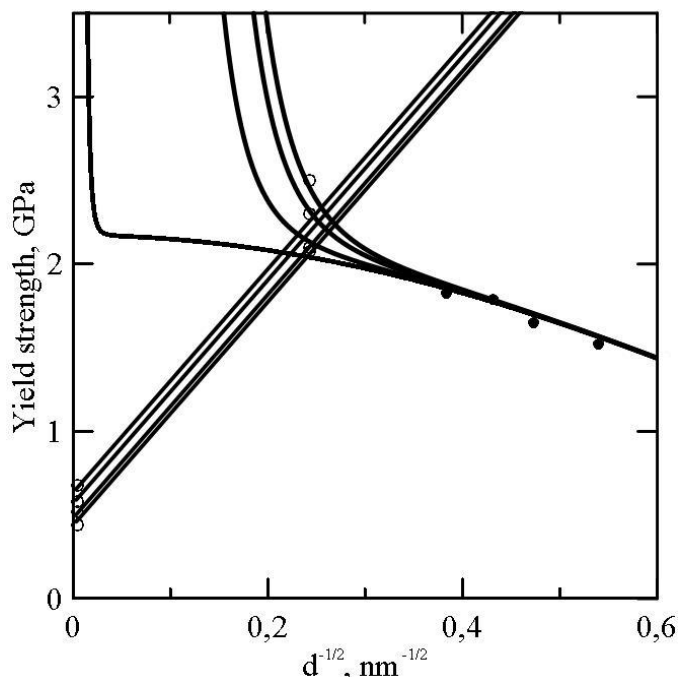


Рис. 1. Кривые в координатах Холла-Петча для четырех различных скоростей деформации, построенные по интегральному критерию пластичности [2,3]. Точки – экспериментальные данные [7,8].

Работа поддержана РФФИ (проекты 14-01-00814 и 13-01-00598), грантом Президента РФ (МД-286.2014.1), Минобрнауки РФ (проектная часть гос. задания ЧелГУ № 3.1334.2014/К), СПбГУ (мер. 6.38.243.2014 и 6.39.319.2014), фонда Марии Кюри TAMER № 610547 и программы № 25 Президиума РАН.

Литература

1. Бородин, И.Н., Майер, А.Е., Петров, Ю.В., Груздков А.А., 2014. Физика твердого тела. 56, 2384-2393.
2. Петров, Ю.В., Бородин И.Н., 2015. Физика твердого тела. 57 (2) 336–341.
3. Груздков, А.А., Петров, Ю.В., Смирнов, В.И., 2002. Физика твердого тела. 44, 1987-1989.
4. Дудоров А.Е., Майер А.Е., 2011. Вестн. Челяб. гос. ун-та. 39, 48-56.
5. Meyers M.A., Chawla K.K. Mechanical Behavior of Materials. New York, Cambridge Univ. Press, 2009. 856 p.
6. Borodin E.N., Mayer A.E. 2012. Mat. Sci. Eng. A. 532, 245-248.
7. Rajaraman, S., Jonnalagadda, K.N., Ghosh, P., 2012. Volume 1: Proceedings of the 2012 Annual Conference on Experimental and Applied Mechanics.
8. Schiotz, J., Di Tolla, F.D., Jacobsen, K.W., 1998. Nature London 391, 561–563.

**ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ДВОЙНИКОВАНИЯ В СТАЛИ 12Х18Н10Т ПРИ РАЗЛИЧНОЙ
ИНТЕНСИВНОСТИ ДИНАМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ**

Бородин И.Н.^{1,2}, Атрошенко С.А.^{1,3}, Майер А.Е.²

1 - ИПМаш РАН, Россия

2 - Челябинский государственный университет, Россия

3 - СПбГУ, Россия

elbor7@gmail.com

**THEORETICAL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF
MECHANICAL TWINNING AT 18CR-10NI-TI STEEL AT DIFFERENT
RATE OF DYNAMICAL LOADING**

Borodin E.N.^{1,2}, Atroshenko S.A.^{1,3}, Mayer A.E.²

1 - Institute of Problems of Mechanical Engineering, Russia

2 - Chelyabinsk State University, Russia

3 – Saint Petersburg State University, Russia

Проведены микроструктурные исследования образцов стали 12Х18Н10Т после их плоскопараллельного нагружения стальными ударниками в диапазоне скоростей от 146 м/с - 450 м/с. Выявлены особенности механического двойникования в каждом случае, для объяснения которых необходимо привлечение представлений о значительной роли концентраторов внутренних напряжений. Полученные результаты обсуждаются с энергетических позиций, что позволяет дополнить предложенную ранее авторами модель двойникования для предсказания аспектного отношения формирующихся двойников и доли задвойникованных зерен материала при различных интенсивностях внешнего воздействия.

We have performed microstructural investigations of 18Cr-10Ni-Ti steel samples after flat plate collisions by steel impactors in the range of impactor velocities from 146 m/s to 450 m/s. The features of mechanical twinning process at each of considered impactor velocities have been revealed. For interpretations of these peculiar properties one need to involve the submission about the important role of stress concentrators in the material. The results are discussed from the energy point of view that allow us supplement the previously proposed model for twinning to predict aspect ratio of twins and fraction of grains contain twins at different intensities of external loading.

1. Введение. Среди множества моделей пластичности большинство имеют феноменологическую природу [1], а те из них, которые явно конкретизируют механизмы пластической деформации, в основном посвящены дислокационному скольжению или ползучести. При этом, для многих металлов при высоких скоростях деформации [2] доминирующим механизмом становится механическое двойникование [3]. Имеющиеся в литературе модели двойникования, как правило, посвящены магнию, титану и их сплавам (ГПУ-металлам) при низких скоростях деформации в условиях пониженных температур [4]. В работах [5,6] была предложена модель механического двойникования, являющаяся продолжением модели

дислокационной пластичности и содержащей только один дополнительный параметр энергии дефекта упаковки γ_{SF} . Эта модель показала хорошее качественное и количественное соответствие экспериментальным данным по объемной доли двойников при динамическом нагружении металлов [5]. В данной работе мы проводим дополнительные микроструктурные исследования процесса двойникового, что позволяет развить модель [5,6].

2. Полученные результаты и их обсуждение. На микроскопе Axio-Observer-Z1-M были проведены микроструктурные исследования образцов стали 12X18H10T после их плоскопараллельного нагружения стальными ударниками в диапазоне скоростей от 146 м/с до 450 м/с. Серия экспериментов по ударному нагружению была выполнена Ю.И. Мещеряковым с сотрудниками [7] на газовой пушке. Стальной ударник толщиной 1.8 мм соударялся с мишенью толщиной 5мм. После прохождения ударной волны во всех случаях наблюдается большое количество двойников и микротрещин. Численное моделирование проводилось при помощи конечно-разностного численного кода CRS [8]. В работе [5] были проведены подобные исследования для скоростей ударника 229 и 298 м/с. Рассмотрение более широкого диапазона скоростей соударения позволяет обнаружить новые закономерности процесса двойникового. В Таблице 1 представлены данные о средней ширине двойников $\langle h \rangle$ и числе двойников в одном зерне N_d для различных скоростей ударника V_{imp} . Также приведены средний размер зерна материала D и рассчитанная при помощи кода CRS амплитуда ударной волны σ_{ampl} .

$V_{imp}, \text{ m/s}$	$\langle h \rangle, \mu\text{m}$	$\langle N_d \rangle$	$D, \mu\text{m}$	Calculated $\sigma_{ampl}, \text{ GPa}$
146	3.6	3	55.7	3
229	0.9	6	62.1	4.6
246	0.78	7	63.5	4.9
298	0.66	10	63.5	5.9
450	1.1	9	43.6	8.9

Таблица 1. Ширина двойников и среднее число двойников на одно зерно при различных скоростях ударника.

На Рис. 1 показаны фотографии двойников для скоростей ударника 146 м/с и 298 м/с.

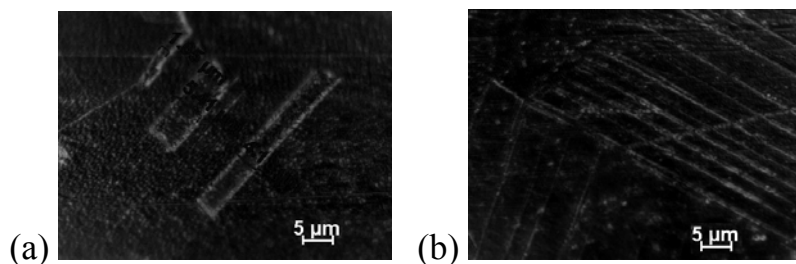


Рис. 1. Двойники при скорости ударника 146 м/с (a) и 298 м/с (b)

Одной из зафиксированных в ходе исследований особенностей двойникования, которая не учитывалась нами ранее, является то, что двойники, прежде всего, образуются в ослабленных трещинами или другими концентраторами внутренних напряжений областях материала. Это позволяет предположить, что при достаточно низких напряжениях двойники зарождаются только в таких областях и затем существенно утолщаются. При повышении внешних напряжений начинает активироваться все большее число мест возможного зарождения двойников и, начиная с некоторого значения напряжения, этот фактор перестает играть заметную роль. В этом случае ослабленные области могут провоцировать рост отдельных крупных двойников, ширина которых во много раз превышает средний размер.

Работа поддержана грантом Президента РФ (проект МД-286.2014.1), грантом РФФИ 13-01-00335 и Минобрнауки РФ в рамках проектной части гос. задания (3.1334.2014/К).

Литература

1. Lapczyk, I., Rajagopal, K.R., Srinivasa, A.R., 1998. Computational Mechanics, 21, 20-27.
2. Meyers, M.A., Murr, L.E. (Ed.), 1981. Shock waves and high-strain-rate phenomena in metals. Plenum, NewYork–London.
3. Christian, J.W., Mahjan, S., 1995. Prog. Mater. Sci. 39, 1.
4. Kumar, M.A., Kanjarla, A.K., Niezgoda, S.R., Lebensohn, R.A., Tome, C.N., 2015. Acta Materialia 84, 349–358.
5. Бородин, И.Н., Атрошенко, С.А., Майер, А.Е., 2014. Журнал технической физики 84, 59-66.
6. Borodin, E.N., Mayer, A.E., 2015, International Journal of Plasticity 74, 141-157.
7. Meshcheryakov, Yu.I., Divakov, A.K., 1994. DYMAT J. 1, 271.
8. Mayer, A.E., Borodin, E.N., Krasnikov, V.S., Mayer, P.N., 2014. Journal of Physics: Conference Series 552, 012002.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОТКОЛЬНОГО РАЗРУШЕНИЯ МЕДИ И
АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА Д16 В СЛАБЫХ И СИЛЬНЫХ
УДАРНЫХ ВОЛНАХ**

Майер А.Е.¹, Бородин И.Н.^{1,2}, Атрошенко С.А.^{2,3}

1 - Челябинский государственный университет, Россия

2 - ИПМаш РАН, Россия

3 - СПбГУ, Россия

elbor7@gmail.com

**STUDY OF THE SPALL FRACTURE OF COPPER AND ALUMINUM D16
IN WEAK AND STRONG SHOCK WAVES**

Mayer A.E.¹, Borodin E.N.^{1,2}, Atroshenko S.A.^{2,3}

1 - Chelyabinsk State University, Russia

2 - Institute of Problems of Mechanical Engineering, Russia

3 – Saint Petersburg State University, Russia

Проведено численное моделирование и микроструктурные исследования поверхности разрушения образцов меди и алюминиевого сплава Д16, подвергнутых плоскопараллельному соударению и воздействию сходящейся ударной волны. Моделируются особенности процесса разрушения, образование и рост полостей в области откола. Результаты расчетов сравниваются с данными микроструктурных исследований поверхности разрушения, демонстрируется многомасштабная структура поверхности, обсуждаются особенности разрушения материалов при различных интенсивностях внешнего воздействия.

We have performed numerical simulation and micro-structure investigation of the fracture surface of copper and aluminum alloy D16 samples subjected to collision with the flat impactor and to converging shock wave loading. Features of the fracture process and the formation and growth of cavities in spallation area are discussed. Calculation results compare with the microstructural investigations of the fracture surface. Multiscale structure of the surface has been shown. Also we discuss the features of the material fracture at different intensities of external loadings.

1. Введение. Особенности откольного разрушения представляют фундаментальный интерес ввиду сложности, многомасштабности и нелинейности процесса [1]. Для его исследования необходимо как моделирование отражения ударных волн от тыльной поверхности мишени с учетом эффектов пластичности металла, так и моделирование образования и последующего роста множества микрополостей, объединяющихся в конечном счете в магистральную трещину, что приводит к отделению откольной тарелочки. Структурные модели пластической деформации [2-4] и разрушения [5] позволяют провести подобное моделирование при различных интенсивностях внешнего воздействия и для различных материалов. Для их верификации требуются подробные микроструктурные экспериментальные исследования поверхности разрушения, что также было проделано в настоящей работе.

2. Результаты микроструктурных исследований. На микроскопе Axio-Observer-Z1-M были проведены исследования образцов меди и алюминия Д16 подвергнутых ударному нагружению. Серия динамических экспериментов была выполнена Ю.И. Мещеряковым с сотрудниками [6] на газовой пушке. В случае плоскопараллельного соударения при скорости ударника больше нескольких сотен метров в секунду наблюдалось разрушение мишени с образованием откольной тарелочки. В Таблице 1 представлены данные о ширине откольной тарелочки L и типе наблюдаемого разрушения в меди и алюминии Д16 для различных скоростей ударника V_{imp} . Здесь D_t – толщина мишени, D_{imp} – ширина ударника. Обращает на себя внимание неоднородность откольной тарелочки по толщине и конечная ширина зоны откольного разрушения – до нескольких сотен микрометров.

Металл	V_{imp} , м/с	D_{imp} , мм	D_t , мм	L , мм	Особенности разрушения образца
Медь М2	180	-	5	0.5-0.7	Трещина
	438	-	10	1	Откольная тарелочка
Алюминий Д16	271	3	12	2.7-3	Трещина
	288	2	10	1.9-2	Трещина
	297	2	7	1.7	Откольная тарелочка
	329	2	4.5	1.3-1.5	Откольная тарелочка
	434	2	4.5	0.85-1.3	Откольная тарелочка с вылетом пробки

Таблица 1. Особенности разрушения образцов меди М2 и алюминия Д16 при различной начальной скорости ударника.

Исследования структуры поверхности разрушения демонстрируют несколько масштабных уровней. На элементах макроскопическом уровня размерами 100-400мкм образуется структура чашечек размерами 10-50мкм, внутри которых также различимы субмикрометровые элементы поверхности разрушения. На Рис. 1 показана фотография поверхности разрушения меди и профиль вдоль поверхности. Наблюдаются как области вязкого, так и хрупкого разрушения.

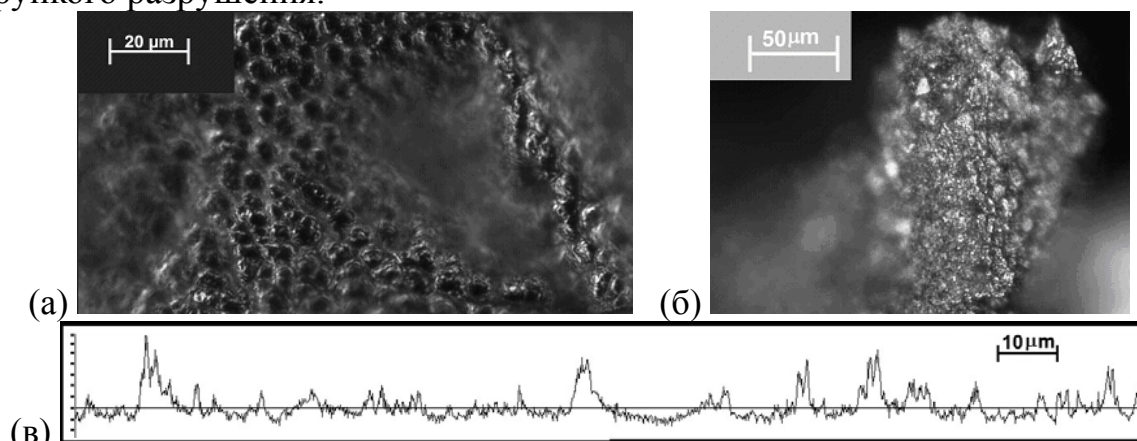


Рис. 1. Фотография поверхности разрушения образца меди: площадки вязкого (а), хрупкого (б) разрушения и профиль поверхности разрушения (в).

Численное моделирование проводилось при помощи конечно-разностного численного кода CRS [7].

Работа поддержана Российским научным фондом (проект № 14-11-00538).

Литература

1. Meyers, M.A., 1994. Dynamic Behavior of Materials. Wiley, New York.
2. Krasnikov, V.S., Mayer, A.E., Yalovets, A.P., 2011. Int. J. Plast. 27, 1294.
3. Mayer, A.E., Khishchenko, K.V., Levashov, P.R., Mayer, P.N., 2013. J. Appl. Phys. 113, 193508.
4. Borodin, E.N., Mayer, A.E., 2015. International Journal of Plasticity 74, 141-157.
5. Mayer, A.E., Krasnikov, V.S., 2011. Eng. Fract. Mech. 78, 1306–1316.
6. Yu.I. Mescheryakov, A.K. Divakov. // In: *"Shock Compression of Condensed Matter-2003"*. Ed. by M.D. Furnish, Y.M Gupta, and J.W. Forbes, American Institute of Physics Melville, New York, 2004. P.587-591.
7. Mayer, A.E., Borodin, E.N., Krasnikov, V.S., Mayer, P.N., 2014. Journal of Physics: Conference Series 552, 012002.

**СРАВНЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ПОДХОДОВ ДЛЯ ПРЕДСКАЗАНИЯ
ЭВОЛЮЦИИ ДИСЛОКАЦИОННОЙ СТРУКТУРЫ И
ДИНАМИЧЕСКОЙ РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ В МЕДИ И АЛЮМИНИИ
ПОДВЕРГНУТЫХ РКУП**

Братов В.А.^{1,2}, Бородин И.Н.^{1,3}

1 - Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, Россия

2 - Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

*3 - Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия
vladimir@bratov.com*

**COMPARISON OF DIFFERENT APPROACHES FOR PREDICTION OF
DISLOCATION STRUCTURE EVOLUTION AND DYNAMIC
RECRYSTALLIZATION IN ALUMINIUM AND COPPER PROCESSED BY
ECAP**

Bratov V.A.^{1,2}, Borodin I.N.^{1,3}

1 - Institute of Problems of Mechanical Engineering, Russia

2 – Saint-Petersburg State University, Russia

3 - Chelyabinsk State University, Russia

Три известные структурные модели дислокационной пластичности внедрены в конечно-элементный коммерческий пакет ANSYS и используются для предсказания эволюции дислокационной структуры и получаемого размера зерна в образцах изготовленных из меди и алюминия, подвергаемым одному или нескольким проходам процесса равноканального углового прессования (РКУП). Показано, что для предсказания плотности дислокаций после сильной пластической деформации (СПД) материала достаточно простой классической модели дислокационной кинетики. При этом, дополнительное разделение плотности дислокаций на подвижные и неподвижные открывает возможность предложить новый подход для предсказания динамической рекристаллизации в ходе СПД. Разработанный подход показал свою применимость в широком диапазоне размеров зерен.

Three known dislocation density based models were embedded into ANSYS finite element (FE) software and firstly utilised to predict aluminium and copper transformations (dislocation density evolution and the resulting grain size) in a result of a single and multiply pass of equal channel angular pressing (ECAP). It is demonstrated that for the studied problem dislocation density evolution under severe plastic deformation (SPD) can be precisely predicted utilizing simple classical model. Employing the idea of separation of dislocations into mobile and immobile, a new approach for dynamic recrystallization coupling dislocation density and the size of grain formed in metal is proposed. The proposed approach for dynamic recrystallization appeared to be applicable for the whole range of grain sizes.

1. Введение. Большинство подходов применяемых для описания пластических деформаций металлов не учитывают особенности эволюции их реальной дефектной структуры [1]. Однако, в ряде задач, таких как методы интенсивных пластических деформаций [2,3] конкретный вид микроструктуры является целью всего процесса деформации и необходимы

новые структурные модели пластичности, содержащие новые переменные процесса деформации. Среди ряда имеющихся на сегодняшний день подобных моделей можно выделить три [4-6], отличающиеся друг от друга учетом дополнительных особенностей микроструктуры материала. В работе проводится сравнение этих моделей и обсуждается возможность предсказания динамической рекристаллизации материала.

2. Моделирование структурных изменений в ходе сильной пластической деформации. Для сравнения моделей кинетики дислокаций были проведены как одномерные расчеты, результаты которых сравнивались с экспериментами [1,2], так и двумерные расчеты процесса РКУП. Для этого в коммерческий пакет конечноэлементных прочностных расчетов ANSYS был внедрен модуль учета кинетики плотностей дислокаций. На Рис. 1 показано распределение скалярной плотности дислокаций в сечении алюминиевого стержня в ходе РКУП при расчете с использованием модели кинетики [5].

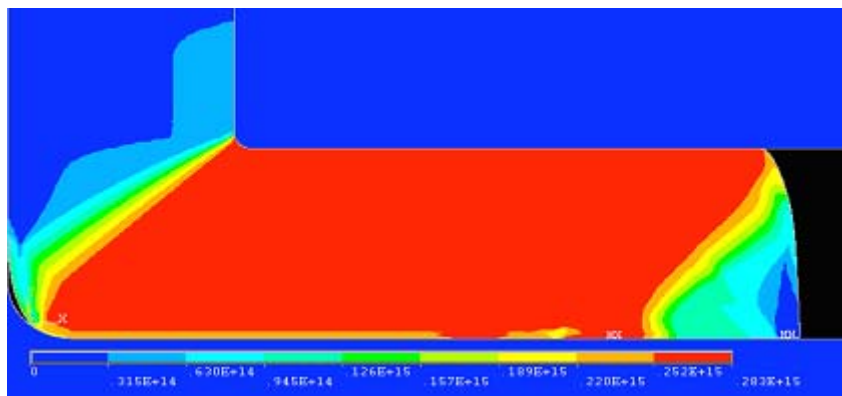


Рис. 1. Скалярная плотность дислокаций в материале (м^{-2}) после одного прохода РКУП с использованием модели [5].

Расчеты показали, что уточнения классической модели дислокационной кинетики [4] увеличивают количество необходимых параметров, но не приводят к существенным изменениям в предсказываемом механическом поведении материала и его свойствах. При этом, оказалось, что широко используемая модель динамической рекристаллизации [7] применима только в узком диапазоне размеров зерен. Для ее экстраполяции на всю область размеров зерен достигаемых в эксперименте требуется до 5 подгоночных параметров [8]. С использованием разделения полной скалярной плотности дислокации на подвижные и неподвижные [5] оказалось возможным построить модель динамической рекристаллизации лишь с одним дополнительным параметром [9]. Перспективы дальнейшего развития этой модели обсуждаются в докладе.

Работа поддержана грантом Президента РФ (проект МД-286.2014.1), грантом Минобрнауки РФ в рамках проектной части гос. задания (3.1334.2014/К) а так же грантом РФФИ (13-01-00598 А).

Литература

1. Качанов, Л.М., 1969. Основы теории пластичности. М.: Наука, 420 с.
2. Gubicza, J., Chinh, N.Q., Horita, Z., Langdon, T.G., 2004. Mater. Sci. Eng. A 387/389, 55.
3. Gubicza, J., Chinh, N.Q., Langdon, T.G., Ungár, T., 2006. in: Y.T. Zhu, T.G. Langdon et.al. (Eds.), Ultrafine Grained Materials IV.
4. Malygin, G.A., 1999. Phys Usp, 169, 979–1010.
5. Baik, S.C., Estrin, Y., Kim, H.S., Hellmig R.J., 2003. Materials Science and Engineering A 351, 86-97.
6. Mayer, A.E., Khishchenko, K.V., Levashov, P.R., Mayer, P.N., 2013. Appl. Phys. J. 113, 193508.
7. Meyers, M.A., Nesterenko, V.F., LaSalvia, J.C., Xu, Y.B., Xue, Q., 2000. J. Phys. IV France 10, 51–56.
8. Lapovok, R., Dalla Torre, F.H., Sandlin, J., Davies, C.H.J., Pereloma, E.V., Thomson, P.F., Estrin, Y., 2005. J. Mech. Phys. Solids 53, 729–747.
9. Bratov, V., Borodin, E.N., 2015. Materials Science & Engineering A 631, 10–17.

**НЕСТАЦИОНАРНОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО
НАПРЯЖЕННЫХ ОБОЛОЧЕК ПЕРЕМЕННОЙ ТОЛЩИНЫ ПРИ
ИМПУЛЬСНОМ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИИ**

Бугай И.В.¹, Бакулин В.Н.¹, Острик А.В.²

1 - Институт прикладной механики РАН, Москва, Россия

*2 - Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка, Россия
ibug@mail.ru*

**NON-STATIONARY DEFORMATION OF PREVIOUSLY
STRAINED SHELLS HAVING VARIABLE THICKNESS
AT IMPUCT ENERGY RELEASE**

Bugay I.V.¹, Bakulin V.N.¹, Ostriak A.V.²

1 – Institute of Applied Mechanics RAS, Moscow, Russia

2 – Institute of Problems of Chemical Physics RAS, Chernogolovka, Russia

Предлагается численный метод прогнозирования теплового и напряженно-деформированного состояний тонкостенных ортотропных конструкций переменной толщины при воздействии потоков энергии различной физической природы. Приводятся результаты расчетов температурных профилей, распределений толщин тепловых уносов и нестационарных деформаций при многократном воздействии потоков излучений и частиц с объемным и поверхностным характерами поглощения на конические оболочки из углеродных композитов.

A numerical method for predicting the thermal and stress-strain states of thin-walled orthotropic constructions having variable thickness under the action of energy fluxes of different physical nature are considered. The results of calculations of temperature profiles, distributions of thicknesses of thermal degradations and non-stationary deformations at multiple flow action of radiations and particles with volume and surface characters of absorption in conical shells made of carbon composites are presented.

1. Введение. Прогнозирование последствий воздействия потоков излучений и частиц (ПИЧ) различной физической природы на композитные элементы конструкций летательных аппаратов (ЛА) представляет практический интерес. Во многих случаях тепловое действие ПИЧ оказывается определяющим, поскольку при достаточном удалении их источника от ЛА механическое действие уже не реализуется.

В полете ЛА могут быть подвергнуты воздействию ПИЧ в спектральных диапазонах от оптического до характерного для гамма – квантов. Несмотря на такой большой интервал изменения энергий квантов и частиц, а также сильно отличающиеся практически реализуемые длительности и поверхностные плотности энергии ПИЧ, основную опасность для несущих тонкостенных конструкций ЛА при тепловом действии представляют прогрев конструкции и изменение ее толщины в результате абляции.

2. Тепловое действие ПИЧ. Расчет параметров теплового действия (нестационарного температурного профиля и распределения толщины

унесенного материала) может быть произведен в рамках единой физико-математической модели. Ранее такая модель рассматривалась в квазиодномерной постановке, в настоящей работе она обобщается на трехмерный случай.

Трехмерная модель тепломассопереноса в ортотропной многослойной оболочке вращения при действии эксплуатационных тепловых потоков и односторонних воздействиях ПИЧ с объемным или поверхностным характером поглощения энергии строится в предположении, что направления осей ортотропии композита совпадают с направлением осей системы координат, связанной с оболочкой, а температура твердого остатка равняется температуре газообразных продуктов термодеструкции.

Положение и форма границ слоев оболочки изменяются вследствие физико-химических процессов при подводе энергии. Для отображения расчетной области на область с неподвижными границами в каждом слое оболочки делается переход к новой пространственной переменной, которая в пределах каждого слоя меняется от нуля до единицы. Сформулированная в новых переменных задача решается методом конечных разностей по неявной схеме с расщеплением по пространственным переменным.

3. Деформирование и разрушение оболочки. Достаточно быстрый (импульсный) прогрев, сопровождающийся изменением деформационных и прочностных свойств, а также изменение толщины тонкостенной конструкции, находящейся под действием квазистационарных полетных нагрузок, приводят к развитию нестационарных процессов деформирования и разрушения, которые могут представлять опасность для конструкции ЛА.

Расчет нестационарного деформирования и разрушения неравномерно прогретой ортотропной композитной оболочки вращения переменной толщины проводится по численной модели [1], дополненной моделью послойного разрушения. Для численного интегрирования уравнений движения оболочки используется явная конечно-разностная схема, имеющая второй порядок аппроксимации на равномерной сетке.

4. Результаты. Приводятся результаты расчетов температурных профилей, распределений толщин тепловых уносов и нестационарных деформаций при многократном воздействии ПИЧ на коническую оболочку из углеродного композитного материала, находящуюся под действием переменного по образующей внутреннего давления. Определены уровни воздействующих ПИЧ планковского спектра, безопасные для рассматриваемого варианта конструкции.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (13-08-12239офи_м, 13-08-01401а).

Литература

1. Бакулин В.Н., Острик А.В. С //ПММ. 2014, Т. 78. Вып. 2. С. 225-235.

**АТОМНО - СИЛОВАЯ МИКРОСКОПИЯ И ФИЗИКО -
МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НОВЫХ ЭЛАСТОМЕРНЫХ
КОМПОЗИТОВ**

*Валиев Х.Х., Карнет Ю.Н., Корнев Ю.В., Кочуров Н.Л., Паршина М.С.,
Семенов Н.А., Юмашев О.Б., Белов Д.Е., Яновский Ю.Г.
Институт прикладной механики РАН, Россия
hhvly@mail.ru*

**ATOMIC FORCE MICROSCOPY AND PHYSICO-MECHANICAL
PROPERTIES OF NEW ELASTOMERIC COMPOSITES**

*Valiev H.H., Karnet Yu.N., Kornev Yu.V., Kochurov N.L., Parshina M.S., Semenov
N.A., Yumashev O.B., Belov D.E., Yanovsky Yu.G.
Foundation Russian Academy of Sciences Institute of Applied Mechanics RAS,
Russia*

Представлены результаты комплексного исследования новых композитов, наполненных модифицированными микро и наноразмерными шунгитами. Проведена корреляция особенностей структуры поверхности эластомеров с их физико-механическими свойствами и фрактальными размерностями поверхности наполнителей.

The results of complex study of the new composites filled with modified micro and nanosized schungits are presented. Correlations between the surface structure features of elastomers, their physical and mechanical properties and calculated fractal dimensions of filler surfaces were obtained.

1. Введение. Для разработки современных технологий получения наноструктурированных композиционных материалов с улучшенными физико-механическими свойствами требуется проведение современных фундаментальных и прикладных исследований в области физики и химии функциональных материалов. В работе [1] методом квантовой механики проводилось компьютерное моделирование адгезионных взаимодействий углеродных и силикатных адсорбционных комплексов - наномоделей агрегатов наполнителей. Данные квантово - механических расчетов указали на важность модификации силикатной составляющей шунгита, используемого как наполнитель, для получения требуемых параметров усиления эластомеров.

2. Методика и экспериментальные результаты. В ИПРИМ РАН изготовлены новые модельные образцы резин на основе бутадиен - стирольного каучука СКС-30-АРК (серии МШИ 1 - 7) с шунгитовым наполнителем. Введение и диспергирование наполнителя, и смешивание всех ингредиентов композитов производилось в лабораторном смесителе НААКЕ. Использовались порошкообразные частицы шунгита как микро, так наноразмерные, полученные дополнительной физико-химической обработкой на планетарной шаровой мельнице РМ -100 (Retsch, Германия). Для улучшения совместимости кремнеземной составляющей наполнителя с

каучуковой матрицей микро и наношунгит функционализировались различными неорганическими и органическими модификаторами: серой, м – Ретайром, олеатом калия и органосилоном соответственно.

Исследование структуры поверхности композитов проводилось с помощью атомно – силового микроскопа (АСМ) easyScan (Nanosurf, Швейцария), работавшего в полуконтактной моде при комнатной температуре, с одновременным использованием моды фазового контраста. Обработка АСМ снимков осуществлялась с использованием современной вычислительной программы SPIP™ (Image Metrology, Denmark).

В качестве подложки для исследования порошков модифицированного шунгита использовался высокоориентированный пиролитический графит. Установлено, что порошки наполнителя обладают тенденцией образовывать агломераты. Прямые АСМ измерения диаметров выделенных агломератов позволили определить микро и наноразмерный диапазон этих образований. Компьютерная обработка АСМ изображений исследованных агломератов позволила определить величины фрактальных размерностей их поверхностей. Эти микро и наноагломераты были использованы в качестве компонентов эластомерных композитов.

Полученные снимки топографии и материального контраста поверхности композитов позволили непосредственно визуализировать распределение частиц наполнителей в матрице каучука СКС–30–АРК. Исследования поверхности отдельных образцов композитов с помощью сканирующего электронного микроскопа MIRA – 3 TESCAN (Чехия) и энергодисперсионный анализ фазового состава позволили получить типичные спектры участков, обогащенных углеродом и кремнием с захватом элементов прилегающих компонентов.

Изучение механических характеристик этих опытных образцов резин проведено на разрывной машине UTS – 10 (Ulm, Германия). Анализы зависимости условная прочность – относительное удлинение и гистограмм условной прочности и относительного удлинения от состава для изученных композитов выявили корреляцию особенностей структуры поверхности исследованных композитов, визуализированных с помощью АСМ с их физико-механическими свойствами и с фрактальной размерностью поверхности образцов наполнителей.

3. Выводы. Полученные данные выявляют корреляцию между особенностями структуры поверхности, наблюдающимися в АСМ, и закономерностями изменения деформационных характеристик исследованных сложных гетерогенных материалов с наноструктурой в функции изменения состава наполнителей. Данные результаты существенны для дальнейшего улучшения прочностных свойств этих наноструктурированных материалов с конечной целью практического применения разрабатываемых новых эластомерных композитов.

Литература

1. Yanovsky Yu. G., Nikitina E. A., Karnet Yu. N. et all Physical Mesomechanics. 2014, Volume 17, Issue 1, Pages 39-49

УДК 539.3

О РЕШЕНИИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ПЛАСТИНКИ МЕТОДОМ РАЗДЕЛЕНИЯ ПЕРЕМЕННЫХ

Видюшенков С.А.¹, Соколов Е.В.²

*1 - Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I, Россия*

*2 - Санкт-Петербургский политехнический университет Петра
Великого, Россия
baklava@mail.ru*

ABOUT SOLVING DIFFERENTIAL EQUATIONS OF SQUARED PLATE METHOD OF SEPARATION OF VARIABLES

Vidyushenkov S. A.¹, Sokolov E. V.²

1 - Petersburg State Transport University the Emperor Alexander I, Russia

2 - Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia

Методом разделения переменных дифференциальное уравнение в частных производных четвертого порядка от двух переменных разбивается на два дифференциальных уравнения, каждое из которых зависит только от одной переменной.

The method of separation of variables partial differential equation of the fourth order from two variables into two differential equations, each of which depends only on one variable.

Дифференциальное уравнение изгиба прямоугольной пластинки постоянной толщины имеет вид:

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = 0, \quad (1)$$

где $w(x,y)=u(x) \cdot v(y)$. Здесь w – функция прогиба пластинки, зависящая от координат x и y .

Так как дифференциальное уравнение (1) имеет постоянные коэффициенты, его решение $u \cdot v$ можно представить в виде суммы показательных функций вида e^{kx+ny} . Принимая во внимание, что $n = \pm kl$, общее решение дифференциального уравнения (1), запишем следующим образом:

$$w = uv = C_1 y e^{k(x+y)} + C_2 x e^{k(x-y)} + C_3 x e^{k(-x+y)} + C_4 y e^{k(-x-y)}.$$

Используя алгоритм метода разделения переменных [1] применительно к исходному дифференциальному уравнению (1), получим дифференциальные уравнения, зависящие от одной переменной

$$\frac{\partial^4 u}{\partial x^4} - 2k^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + k^4 u = 0, \quad \frac{\partial^4 v}{\partial y^4} + 2k^2 \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + k^4 v = 0. \quad (2)$$

То есть в данном случае выполнена задача решения дифференциального уравнения в частных производных (1) в виде независимых решений по

переменным x и y .

Нетрудно показать, что общие решения дифференциальных уравнений (2) имеют вид:

$$\begin{aligned} u(x) &= C_1 e^{kx} + C_2 e^{-kx} + C_3 x e^{kx} + C_4 x e^{-kx}; \\ v(y) &= D_1 e^{ky} + D_2 e^{-ky} + D_3 y e^{ky} + D_4 y e^{-ky}. \end{aligned}$$

Литература

1. Видюшенков С.А., Соколов Е.В. Обобщенный метод разделения переменных для дифференциальных уравнений в частных производных // Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ : межвуз. темат. сб. тр. Вып. 14. – СПб. : СПбГАСУ, 2008. – С. 12-18.

УДК 519.7

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
НАПРЯЖЁННО ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ ПРИ ДЕЙСТВИИ
СОСРЕДОТОЧЕННЫХ РАДИАЛЬНЫХ СИЛ**

Виноградов Ю.И.¹, Бакулин В.Н.²

*1 - Московский государственный технический университет им.
Н.Э.Баумана, Россия*

*2 - Институт прикладной механики РАН, Москва, Россия
vbak@yandex.ru*

**EXPERIMENTAL AND ANALYTICAL INVESTIGATION OF THE
STRESSED STRAINED STATE OF A CYLINDRICAL SHELL UNDER
THE ACTION OF CONCENTRATED RADIAL FORCES**

Vinogradov Yu.I.¹, Bakulin V.N.²

1 - Bauman Moscow State Technical University, Russia

2 - Institute of applied mechanics of Russian Academy of Science, Russia

Проводится экспериментальное исследование деформирования цилиндрической оболочки радиальными силами и сравнение с аналитическим решением

Experimental study of deformation of a cylindrical shell by radial forces and comparison with the analytical solution are being performed

1. Введение. Аналитическое решение задачи деформирования цилиндрической оболочки радиальными силами и сравнение с результатами, полученными по асимптотическим формулам, показало расхождение в значениях искомых величин. Для доказательства достоверности аналитического решения задачи проводится сравнение с результатами эксперимента на примере деформирования оболочки радиальными силами.

2. Постановка эксперимента. Цель - определить деформации в окрестности приложения сосредоточенных сил. Оболочка из материала АМГ-6 с модулем упругости $E = 0,67 \cdot 10^6$ кг/см² (65,7 ГПа) и размерами: $l=200$ мм, радиус $R=55,75$ мм, $h=1,5$ мм. Безразмерные параметры $\frac{l}{R} = 3,6$ и $\frac{R}{h} = 37,2$.

Сосредоточенные радиальные силы расположены в диаметрально противоположных точках на середине длины образующей, где $\varphi = 0$. Нагрузка передавалась через динамометр, который определял силу P .

Для определения деформаций применяли тензодатчики с базой 1 и 5 мм и сопротивлением 50 и 100 Ом. Для регистрации сигналов с тензодатчиков использовался тензометрический мост с дистанционным переключателем. Нагружали оболочку силами 0Н; 284,4 Н; 549,2 Н; 814 Н; 1075,7 Н. Значения деформаций получали вычитанием показаний для ненагруженной оболочки из тех, которые регистрировались при действии сил.

Значения продольного M_1 и окружного M_2 изгибающих моментов вычисляли по формулам

$$M_1 = D(\chi_1 + \nu\chi_2), \quad M_2 = D(\chi_2 + \nu\chi_1),$$

где $\chi_1 = \frac{\xi_B + \xi_H}{h}$, $\chi_2 = \frac{\xi'_B + \xi'_H}{h}$, $D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$, $E = 65,7$ ГПа, $h = 1,5$ мм, $\nu = 0,3$

ξ_B и ξ_H — относительные деформации, полученные для точки с помощью тензодатчиков, наклеенных соответственно на внутренней и наружной поверхности оболочки вдоль ее образующей $\varphi = 0$. Штрихи обозначают, что деформации оболочки определены в направлении окружной координаты.

$$\overline{M}_i = \frac{\pi M_i}{2P_z}$$

Значения изгибающих моментов $\overline{M}_i$ ($i=1,2$) при деформировании силами $P_z = 284,4$ Н; 549,2 Н; 814,0 Н; 1078,7 Н, приведены в табл.

Расстояние до тензодатчика, мм Изгибающие моменты	10	20	30
$M_1 \frac{\pi}{2P_z}$ (эксперимент)	0,0346<a<0,0368	0,0238<a<0,0251	0,0251<a<0,0255
$M_1 \frac{\pi}{2P_z}$ (вычисление)	0,0320	0,0270	0,0271
$M_2 \frac{\pi}{2P_z}$ (эксперимент)	0,170<a<0,177	0,114<a<0,118	0,105<a<0,106
$M_2 \frac{\pi}{2P_z}$ (вычисление)	0,175	0,126	0,105

Вычисление значений изгибающих моментов в оболочке проводилось методом сопряжения интервалов.

Работа выполняется при поддержке РФФИ грант № 15-08-99591

УДК 629.7.023:531.391.5

ДИНАМИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ОРТОТРОПНОЙ ОБОЛОЧКИ С ЗАПОЛНИТЕЛЕМ, ПОДКРЕПЛЕННОЙ РЕБРАМИ ПРИ ДЕЙСТВИИ ОСЕВЫХ СИЛ

Волков Е.Н.¹, Бакулин В.Н.², Недбай А.Я.¹

1 - АО «Корпорация «Московский институт теплотехники», Россия

2 - Институт прикладной механики РАН, Москва, Россия

vbak@yandex.ru

DYNAMIC STABILITY OF THE ORTHOTROPIC CYLINDRICAL SHELL WITH FILLER SUPPORTED WITH LONGITUDINAL EDGES AT ACTION OF AXIAL FORCES

Volkov E.N.¹, Bakulin V.N.², Nedbaj A.Ya.¹

1 - JSC «Corporation «Moscow Institute of Heat Technology», Russia

2 - Institute of applied mechanics of Russian Academy of Science, Russia

Рассмотрена динамическая устойчивость ортотропной цилиндрической оболочки, одновременно подкрепленной продольными ребрами и упругим цилиндром. Для равномерно расположенных ребер решение получено в явном виде.

Dynamic stability of the cylindrical shell supported with longitudinal edges and the hollow cylinder is considered. For evenly located edges the decision is received in an explicit form.

1. Введение. Вопросам динамической устойчивости цилиндрических оболочек, которые в большинстве летательных аппаратов являются несущими элементами, посвящен ряд работ [1-4]. Однако, класс оболочек, изготовленных из композиционных материалов и подкрепленных ребрами жесткости, остается практически не исследован.

Рассмотрена динамическая устойчивость ортотропной цилиндрической оболочки, одновременно подкрепленной продольными ребрами и упругим цилиндром. Использовалась двухчленная аппроксимация системы уравнений типа Матье-Хилла, учитывались осевые усилия контактного взаимодействия оболочки и ребер. Для равномерно расположенных ребер решение получено в явном виде.

2. Постановка и решение задачи. Введем безразмерную систему цилиндрических координат, в которой линейные размеры отнесены к радиусу срединной поверхности оболочки. Тогда уравнения движения оболочки можно представить в виде [5]

$$\begin{aligned}
l_{11}u + l_{12}w = & -a_{10}L_{22} \sum_{i=1}^M \left[\frac{\partial^2 u_i}{\partial \alpha^2} - a_{13} \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} + a_{14} \frac{\partial^3 w_i}{\partial \alpha^3} \right] \delta(\beta - \beta_i); \\
l_{21}u + l_{22}w = & -a_{10}L_{22} \sum_{i=1}^M \left[a_{14} \frac{\partial^3 u_i}{\partial \alpha^3} + a_{12} \frac{\partial^4 w_i}{\partial \alpha^4} + a_{13} \frac{\partial^2 w_i}{\partial t^2} + \right. \\
& \left. + a_{11}(T_0 + T_1 \cos \omega t) \frac{\partial^2 w_i}{\partial \alpha^2} \right] \delta(\beta - \beta_i)
\end{aligned} \tag{1}$$

где l_{kj} – дифференциальные операторы; α, β – безразмерные координаты вдоль образующей и в окружном направлении; u, w – осевое и радиальное перемещения оболочки; T_0, T_1 – постоянная составляющая и амплитуда переменной составляющей осевой силы соответственно; ω – частота пульсаций; M – количество ребер; $\delta(\beta)$ – дельта-функция.

Решение уравнения (1) будем искать в виде

$$u = \cos \gamma \alpha \sum_{n=0}^{\infty} \varphi_n(t) \cos n\beta; w = \sin \gamma \alpha \sum_{n=0}^{\infty} \psi_n(t) \cos n\beta. \tag{2}$$

где $\gamma = \frac{m\pi}{\alpha_0}; \alpha_0 = \frac{L}{R};$ L – длина оболочки;

m – параметр волнообразования.

Раскладывая дельта-функцию в тригонометрический ряд и подставляя (2) в (1), приходим к системе обыкновенных дифференциальных уравнений типа Матье – Хилла, решая которую переходим к системе 4^M алгебраических уравнений, равенство нулю определителя которой представляет характеристическое уравнение критических частот.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект 14-08-01026_а.

Литература

1. Болотин В.В. Динамическая устойчивость упругих систем. М.: ГИТТЛ, 1956. – 600с.
2. Вольмир А.С. Нелинейная динамика пластинок и оболочек. М.: Наука, 1972. – 432с.
3. Огибалов П.М., Колтунов М.А. Оболочки и пластины. Изд-во МГУ, 1971. – 696с.
4. Майлыбаев А.А., Сейранян А.П. Многопараметрические задачи устойчивости. Теория и приложения в механике. – М.: Физматлит, 2009. – 400с.
5. Соломонов Ю.С., Георгиевский В.П., Недбай А.Я., Андрияшин В.А. Методы расчета цилиндрических оболочек из композиционных материалов. М.: Физматлит, 2009. – 264с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ДЕФОРМАЦИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА УНИКАЛЬНОЕ ЗДАНИЕ И СПОСОБОВ ЕГО ЗАЩИТЫ

Воробьев А.В., Кашеварова Г.Г.

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Россия
km02@yandex.ru*

Путем применения компьютерного моделирования, изучается влияние процесса оседания земной поверхности на строительные конструкции уникального здания. Рассматриваются различные варианты усиления фундаментов здания и их комбинация. Расчёты выполняются в линейной и нелинейной постановках. Это дает возможность выбрать оптимальный вариант усиления с целью сохранения памятника культуры.

1. Введение. В городе Березники Пермского края в потенциально опасной зоне влияния горных работ на подработанной территории оказалась церковь Иоанна Предтечи, являющаяся старейшим храмом на территории Березников. Церковь построена в 1754 г и представляет исключительную историческую ценность.

Фактически церковь расположена на целике, однако в непосредственной близости располагаются два очага оседания, инициированные техногенной аварией, в результате которой происходит затопление выработанного пространства. В результате действия очагов оседания формируется сложная геотехническая ситуация вокруг здания церкви.

Имеются: результаты мониторинга оседания здания церкви полученные при помощи гидронивелирования, результаты экспертизы технического состояния и прогноз ожидаемых деформаций земной поверхности на 20 лет, выполненный в соответствии с нормативной литературой.

В данной работе рассматриваются различные варианты усиления фундамента здания церкви.

2. Методы решения задач. Построена информационная модель здания храма Иоанна Предтечи, находящего в потенциально опасной зоне подработанной территории. Процесс моделирования здания храма сложной геометрии с наличием криволинейных поверхностей сводов, которые сходятся в одной точке, связан с определёнными трудностями, для преодоления которых автором разработан и применен CAD-ориентированный подход экспорта – импорта фрагментов модели с обходом ошибок топологии и последующей сборкой в ANSYS с помощью команд алгоритмического языка APDL.

Выполнено моделирование воздействия деформаций земной поверхности на здание по данным мониторинга оседаний грунта, осуществляемого методами гидронивелирования и прогноза развития горно-геологической ситуации.

Основным источником деформаций здания церкви являются горизонтальные деформации земной поверхности, которые приводят к

сложному растяжению церкви относительно продольной оси. По результатам обследования здание имеет повреждения характерные для совместного действия растягивающих деформаций с изгибом.

Трёхмерная конечно-элементная модель здания, включающая элементы усиления (железобетонный обвязочный пояс) и грунтовый массив, усиленный грунтоцементными элементами.

Все расчёты выполнены в двух постановках: линейно-упругой и нелинейной, включающей в себя нелинейное поведение бетона и грунтового основания.

В результате расчёта определено, что усиление здания целесообразно только при помощи комбинации рассмотренных методов.

Литература

1. Солдатенко Т. Н. Модель идентификации и прогноза дефектов строительной конструкции на основе результатов ее обследования // Инженерно-строительный журнал. 2011. №7(25). С. 52-61.
2. Аникеев Г.Е., Василец А.Н. Обзор технологий интеграции CAD и CAE. Электронный журнал "Вычислительные сети. Теория и практика". – ВС/NW 2006, №2, (9):11.1.
3. Г.Г. Кашеварова, Н.А. Труфанов. Численное моделирование деформирования и разрушения системы «здание-фундамент-основание». Екатеринбург – Пермь: УрО РАН, 2005. – 225 с.
4. Кашеварова Г.Г., Фаизов И.Н., Зобачева А.Ю. Конструктивные меры защиты зданий и сооружений на подработанной территории. Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. 2010. № 1. Изд-во ПГТУ, Пермь. С. 72-77.
5. А.М. Белостоцкий, В.Н. Сидоров, П.А. Акимов, Г.Г. Кашеварова. Математическое моделирование техногенной безопасности ответственных строительных объектов мегаполисов. International Journal for Computational Civil and Structural Engineering / Международный журнал по расчету гражданских и строительных конструкций. 2010. Т. 06. № 1-2. С. 45-64.

УДК 539.3

**АЛГОРИТМ ФОРМИРОВАНИЯ УНИВЕРСАЛЬНОЙ МОДЕЛИ
ПРОЦЕССА ПОСАДКИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА КАК
СТРУКТУРНО-СЛОЖНОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С
ВНУТРЕННИМИ СВЯЗЯМИ**

Воронин В.В.¹, Бакулин В.Н.², Борzych С.В.¹

*1 - Открытое акционерное общество «Ракетно-космическая корпорация
«Энергия» им. С.П.Королева», Россия*

*2 - Институт прикладной механики РАН, Москва, Россия
vitaliyvoronin@gmail.com*

**THE APPROACH TO FORMING THE UNIVERSAL MODEL OF THE
PROCESS OF SPACECRAFT LANDING AS STRUCTURE OF THE
COMPLEX MECHANICAL SYSTEM WITH INTERNAL CONNECTIONS**

Voronin V.V.¹, Bakulin V.N.², Borzykh S.V.¹

1 - Rocket-Space Corporation «Energia», Russia

2 - Institute of applied mechanics of the Russian Academy of Sciences, Russia

Предложен подход, основанный на представлении космического аппарата и элементов его посадочного устройства как структурно сложной механической системы с внутренними связями, степени свободы которых обеспечивают обжатие демпфирующих элементов и рассеяние кинетической энергии космического аппарата. Уравнения движения записаны для каждого тела системы. Действие других тел учитывается в виде реакций связей на данное тело. Разработан универсальный метод формирования итоговой матрицы коэффициентов уравнений связей.

The approach based on the spacecraft concept and landing device elements as structurally complex mechanical system with specific internal connections, the degree of freedom which allow to compress damping of elements and the absorption of the spacecraft kinetic energy. Equations of motion are recorded for each body of system. The effect of other bodies is considered in the form of connection reactions in the selection body. In the text a universal method of forming a common matrix of the constraint equations coefficients is considered.

Завершающей и одна из наиболее ответственных фаз функционирования космического аппарата (КА) является посадка КА. Процесс мягкой посадки характеризуется большими динамическим нагрузками на аппарат, возникающими при взаимодействии с посадочной поверхностью. Нагрузки на КА не должны превышать предельных величин, выбираемых из условий переносимости перегрузок экипажем [1]. Поэтому КА снабжается посадочным устройством (ПУ), как правило, рычажного типа с демпфером.

Поскольку возможности наземной экспериментальной отработки ограничены, основным способом обоснования принятых технических решений по характеристикам посадочного устройства является математическое моделирование [2-5]. Движение КА с рычажными ПУ моделируются структурно-сложной механической системой тел, состоящей

из центрального тела (корпуса КА) и демпферов, один конец которых крепится к корпусу КА, а другой – к тарели, непосредственно контактирующей с посадочной поверхностью. Число опор обозначим индексом « k ». К каждой тарели сходится от корпуса 3 демпфера (число демпферов, подходящих к « k »-й тарели, обозначим « j »; иногда одни или два демпфера в «треноге» могут быть заменены жесткими стержнями (подкосами). Каждый « j »-й демпфер « k » -й тарели считается состоящим из штока и стойки; внутри последней находится энергопоглотитель (например, сминаемые соты).

Предлагаемый подход основан на корректной записи уравнений поступательного перемещения центра масс каждого тела в инерциальных осях и уравнения вращательного движения относительно центра масс в связанных осях.

Для определения сил и моментов реакций связей в точках взаимодействия тел системы используется подход, основанный на записи специальных уравнений связи, вид и структура которых определяется конкретным характером связи, то есть числом и видом степеней свободы, допускаемых данной связью [4]. Конкретный характер связей между корпусом КА и элементами ПУ в процессе посадки определяется его конструктивным исполнением. Таким образом, если исходная матрица коэффициентов сформирована для начальной недеформированной механической системы со связями, запрещающими любое относительное движение, то для формирования расчетной схемы конкретного ПУ необходимо для каждой связи исключить строки и столбцы, соответствующие степеням свободы, разрешенным данной связью. Главные вектора сил и моментов реакций связей, действующих на корпус КА, получаются суммированием по числу J стоек либо подкосов в « k »-й опоре и по числу опор ПУ.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований - грант № 13-01-00853-а.

Литература

1. Рабинович В.И. Безопасность человека при ускорениях. - М.: Книга и бизнес. 2007.-208с.
2. Бакулин В.Н., Борzych С.В., Воронин В.В. Математическое моделирование процесса посадки космического аппарата на участке его контакта с поверхностью.// Вестник Московского авиационного института.2011. т. 18. №4. с.38-46.
3. Бакулин В.Н., Борzych С.В., Решетников М.Н. Моделирование относительного движения возвращаемой капсулы и транспортного корабля при их разделении// Вестник Московского авиационного института, 2011, т.18, №3, с. 287-294
4. Бакулин В.Н., Кокушкин В.В., Борzych С.В., Воронин В.В. Динамика процесса посадки космического аппарата с рычажно-торсовым посадочным устройством.// Вестник Московского авиационного института.. 2012, т.19. № 5, с.45-50.
5. Бакулин В.Н., Кокушкин В.В., Борzych С.В., Воронин В.В., Щиблев Ю.Н. Исследование влияния свойств грунта посадочной поверхности на устойчивость процесса посадки космического аппарата с механическим посадочным устройством. //Вестник Московского авиационного института. 2014, т.21. № 1. С.25-32

*Бережной Д.В., Габсаликова Н.Ф.**Казанский (Приволжский) Федеральный Университет, Россия**n.gabsalikova@yandex.ru*

Нарушение непрерывности материалов при сильном деформировании и разрушении создает много проблем в описании подобных явлений. Развитие вычислительной техники позволило вернуться к проблеме описания сред на микроуровне. В последнее время все чаще стал использоваться метод частиц. Количественная сложность компьютерной модели позволяет получать качественно новые результаты. Метод частиц заключается в том, что тело представляется как совокупность взаимодействующих частиц. В качестве таких частиц выступают атомы, молекулы и материальные точки. На данный момент потенциалы межатомного взаимодействия для большинства материалов известны, они позволяют моделировать динамику молекулярных взаимодействий с высокой степенью точности.

Несомненное преимущество метода частиц по сравнению с методами, основанными на концепции сплошной среды, заключается в том, что он требует значительно меньше предположений о свойствах материала. Использование только простейшего потенциала взаимодействия (например, Леннарда-Джонса) позволяет моделировать такие сложнейшие эффекты, как пластичность, образование трещин, разрушение, температурное изменение свойств материала, фазовые переходы. Для описания каждого из этих эффектов в рамках сплошной среды требуется отдельная теория, в то время как при моделировании методом частиц эти эффекты получаются автоматически, в результате интегрирования уравнений движения.

Специфика метода частиц состоит в необходимости интегрирования очень большого числа уравнений. При расчетах основное время уходит на вычисление силы, действующей на данную частицу. Связано это с существенной нелинейностью силы взаимодействия и необходимостью суммирования большого числа слагаемых (прежде всего сил взаимодействия с соседними частицами). Указанное обстоятельство снижает эффективность методов, требующих на каждом шаге многократного вычисления правой части уравнения.

Для ускорения расчета потенциал взаимодействия обычно обрезается на некотором заданном расстоянии, то считается, что взаимодействие между частицами пренебрежимо мало и оно не учитывается в расчетах. Поэтому для расчетов, производимых в данной работе, пространство разбивается на кубические ячейки и для частиц, находящихся в некоторой ячейке, рассматривается взаимодействие только с частицами из пограничных с ней ячеек. Таким образом, удается добиться, что число операций оказывается

пропорциональным числу частиц. Вся область пространства разделяется между процессорами, на каждом шаге интегрирования процессор проводит вычисление внутри отведенной ему области с захватом граничных ячеек из соседних областей, а затем происходит обмен информацией о частицах, находящихся в пограничных ячейках.

Используемый в работе потенциал Леннарда-Джонса является двухпараметрическим, поэтому он имеет очень ограниченные возможности для вариации макроскопических параметров моделируемого им материала. Фактически, он позволяет удовлетворить значению только одного макроскопического параметра – это, например, модуль упругости или предел прочности в статике, скорость распространения продольных волн в динамике. Отношение между указанными параметрами остается неизменным. С другой стороны, данный потенциал достаточно точно описывает силы взаимодействия Ван-дер-Ваальса, играющие важную роль в твердых телах. Потенциал Леннарда-Джонса широко применяется как классический модельный потенциал, особенно в работах, в которых основной задачей является исследование общих физических закономерностей, а не получение точных количественных результатов.

В работе был реализован метод частиц, позволяющий исследовать взаимодействие некоторой системы материальных точек, находящихся в потенциальном поле. Для описания движения совокупности материальных точек использовалась система уравнений движения. Его интегрирование проводилось при помощи метода Верле. Были рассмотрены потенциалы взаимодействия, с указанием их основных свойств. При составлении уравнений движения предусматривалась возможность движения материальных частиц с учетом диссипации. Кроме того можно было исследовать поведение материальных точек, находящихся в поле силы тяжести. Был решен ряд модельных задач, при решении которых применялся потенциал Леннарда-Джонса. Полученные результаты были проанализированы.

Издание тезисов доклада осуществлено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Республики Татарстан в рамках научных проектов № 15-41-02555, № 15-07-05380.

**КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ПРЕДНАПРЯЖЕННЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК ПРИ
ДЛИТЕЛЬНОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ**

*Гайджуров П.П., Высоковский Д.А., Маяцкая А.П.
Ростовский государственный строительный университет, Россия
gpp-161@yandex.ru*

**FINITE ELEMENT MODELING OF THE PRESTRESSED CONCRETE
BEAMS UNDER LONG DEFORMATION**

*Guyjuorov P.P., Visokovsky D.A., Mayzkay A.P.
Rostov State University of Civil Engineering, Russia*

Предлагается методика численного анализа напряженно-деформированного состояния железобетонных преднапряженных балок при квазистатическом переменном нагружении с учетом ползучести бетона.

1. Введение. Опыт современного строительства показал, что создание начального напряженно-деформированного состояния (НДС) в железобетонных балках путем обжатия бетона с помощью предварительно растянутой арматуры позволяет создавать экономичные большепролетные перекрытия. Вместе с тем в нормативном документе СП 52-102-2004 [1], регламентирующем проектирование преднапряженных железобетонных конструкций, ползучесть бетона на этапах преднапряжения и последующего длительного деформирования учитывается в упрощенной форме. В этой связи актуальной является проблема анализа длительного деформирования преднапряженных железобетонных балок с учетом наблюдаемого на практике явления быстро нарастающей ползучести и эффекта «возрастного» наследования напряженно-деформированного состояния, обусловленного историей нагружения конструкции. Общеизвестным универсальным подходом к исследованию НДС железобетонных конструкций является расчет, базирующийся на методе конечных элементов.

2. Модель стареющего бетона. В рамках теории наследственного старения бетона Н.Х. Арутюняна, С.В. Александровского [2, 3] с помощью символьного процессора системы Maple получено выражение для ядра релаксации $R(t, \tau)$ удобное для программирования. На рис. 1 приведены графики наследственной функции $R(t, \tau)$ для бетона различного “возраста”, построенные на базе разработанного программного модуля.

Из приведенных графиков $R(t, \tau)$ видно, что предлагаемая механико-математическая модель материала учитывает явление быстро нарастающей ползучести бетона в момент времени τ .

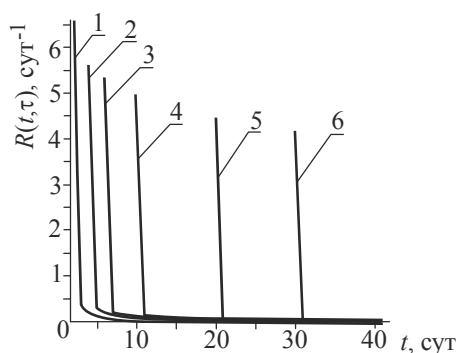


Рис. 1. Графики наследственной функции $R(t, \tau)$. Номера линий соответствуют значениям параметра τ (в сутках): 1 – $\tau=2$; 2 – $\tau=4$; 3 – $\tau=6$; 4 – $\tau=10$; 5 – $\tau=20$; 6 – $\tau=30$

3. Конечно-элементная реализация плоской задачи теории ползучести. В разработанной процедуре для вычисления ядра релаксации в хронологическом порядке учитываем индивидуальный отсчет по временной координате для каждой ступени нагружения [4]. Вычислительный процесс организуем в виде следующих трех вложенных циклов: по ступеням нагружения, включая ступень передачи усилия предварительного натяжения арматуры на бетон; по шагам численного интегрирования; по временным координатам каждой ступени нагружения. В цикле по временным координатам на основании принципа наложения воздействий осуществляем суммирование векторов узловых перемещений ансамбля конечных элементов (КЭ). В предлагаемом программном обеспечении предусмотрено совместное использование плоских 4-х узловых и 2-х узловых стержневых КЭ балочного типа. В процедуре формирования топологической информации для смешанной конечно-элементной сетки учитываем, что плоский КЭ имеет две степени свободы в узле, а балочный КЭ располагает тремя узловыми степенями свободы. Усилие предварительного натяжения арматуры прикладываем к стержневым КЭ в виде равномерно распределенной продольной нагрузки соответствующего знака. На тестовых примерах выполнено исследование точности и сходимости разработанного математического и программного обеспечения.

На модельных задачах выполнен сравнительный анализ различных схем передачи усилия предварительного натяжения арматуры на бетон. Установлено, что более достоверный результат дает схема, в которой усилие натяжения задается в виде статически эквивалентной распределенной вдоль оси армирующего элемента нагрузки.

Литература

1. СП 52-102-2004 «Предварительно напряженные железобетонные конструкции».
2. Арутюнян Н.Х., Зевин А.А. Расчет строительных конструкций с учетом ползучести. М.: Стройиздат, 1988. 251 с.
3. Александровский С. В. Расчет бетонных и железобетонных конструкций на изменения температуры и влажности с учетом ползучести. – Москва: Стройиздат, 1973. – 432 с.
4. Гайджуров П. П., Исхакова Э. Р. Решение плоской задачи наследственной теории старения методом конечных элементов// Строительная механика и расчет сооружений. – 2013.– №1 – С. 40-45.

ОЦЕНКА УДЕЛЬНОЙ ЭНЕРГОЕМКОСТИ МАХОВИЧНЫХ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ, НАХОДЯЩИХСЯ В ПОТЕНЦИАЛЬНОМ ПОЛЕ

Бережной Д.В., Гайнулина Л. Р.

*Казанский (Приволжский) Федеральный Университет, Россия
LRGajnulina@yandex.ru*

ESTIMATION FLYWHEEL ENERGY INTENSITY ENERGY STORAGE DEVICES LOCATED IN POTENTIAL FIELD

Berezhnoi D.V., Gajnulina L.R.

Kazan (Volga Region) Federal University, Russia

В работе проводится исследование удельной энергоемкости кинетических накопителей энергии, реализованных по схеме маховик-кожух, находящихся в потенциальном поле. Анализируется изменение напряженно-деформированного состояния маховика при квазистатическом увеличении скорости вращения роторной части конструкции. Отмечается, что наличие потенциального поля в системе маховик-кожух позволяет повысить удельную энергоемкость кинетического накопителя энергии.

In this paper we study the specific energy consumption of kinetic energy storage units, sold under the scheme, the flywheel housing are in a potential field. Analyzed changes in the stress-strain state of the flywheel quasistatic increasing speed of the rotor structure. It is noted that the potential field in the flywheel housing, can improve energy density of the kinetic energy accumulator.

В связи с развитием современных технологий в промышленности и на транспорте появляется множество мобильных устройств, поэтому большое значение приобретает проблема аккумулирования энергии. Создание новых материалов позволяет не только совершенствовать уже имеющиеся традиционные электрохимические батареи, а искать новые методы накопления и хранения энергии, в том числе и механические. К ним можно отнести так называемые статические и динамические механические накопители энергии.

У статических аккумуляторов механической энергии упругий элемент работает либо на растяжение (сжатие) – что предпочтительнее, либо на кручение (сдвиг), либо на изгиб, но такие аккумуляторы характеризует сравнительно небольшая накапливаемая удельная энергия. Однако, обладая достаточно ценными свойствами – стабильностью накопления энергии, высоким КПД, долговечностью, они обеспечили себе прочное место во многих машинах и механизмах.

Одной из относительно простых и, в то же время, крайне перспективных является технология накопления энергии при помощи маховика. Маховик сохраняет переданную ему энергию в виде кинетической энергии вращения. Другими словами, это некое массивное тело вращения, использующееся в качестве накопителя (инерционный аккумулятор) кинетической энергии.

Однако даже современные технологии не исчерпывают всех возможностей маховика. При достаточно быстром вращении он может накапливать кинетическую энергию, которую легко не только наращивать, но и использовать, превратив маховик в электромеханический аккумулятор.

Из потенциальных полей, применяемых в технике, а именно гравитационном, электростатическом и магнитном, в системе маховик-корпус можно применить два последних. Применение потенциальной связи в режиме взаимного отталкивания позволяет разгрузить наружные слои маховика за счет передачи нагрузки на корпус и таким образом увеличить скорость вращения маховика и запасаемую энергию. Также за счет включения в работу корпуса кинетического накопителя энергии, находящегося в сжатом состоянии из-за разности внутреннего и внешнего атмосферного давления, можно уменьшить его вес за счет снятия нагрузки на величину, создаваемую потенциальным полем, и изменить знак нагрузки с сжатия на растяжение, что более предпочтительно для современных синтетических материалов.

Расчет маховиков по удельной кинетической энергоемкости определяется удельной прочностью материала маховика и коэффициентом формы. При оценке упругой потенциальной энергии деформации используется такой параметр, как отношение временного сопротивления материала на разрыв к его модулю Юнга. Этот фактор дает более широкие возможности при конструировании маховичных накопителей энергии, т.к. в ряде случаев накопленная потенциальная энергия деформации может в разы превышать кинетическую энергию вращения, а влияние формы маховика на его энергоемкость (энергоемкость от потенциальной энергии деформации) может быть совершенно противоположным. Кроме того, если маховик будет накапливать больше потенциальной энергии деформации (чем кинетической), можно будет снизить скорость вращения и ее ускорение, что благоприятно скажется на безопасности эксплуатации и сроке службы конструкции и позволит отказаться от герметичного кожуха, создающего вакуум в зоне вращения маховика (или, по крайней мере, обойтись вакуумом меньшего порядка).

В работе излагаются основы методики численного исследования удельной энергоемкости кинетических накопителей энергии, реализованных по схеме маховик-кожух. В дополнение к традиционной оценке энергоемкости по кинетической энергии маховика добавляется оценка удельной энергоемкости системы маховик-кожух, находящейся в потенциальном поле. Анализируются возможности использования различных конструкционных материалов при изготовлении собственно маховика и кожуха. Отмечается, что наличие потенциального поля в системе маховик-кожух позволяет повысить удельную энергоемкость кинетического накопителя энергии.

Издание тезисов доклада осуществлено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Республики Татарстан в рамках научных проектов № 15-41-02555, № 15-01-05686.

МЕТОД КОНТАКТНОЙ ДИСКРЕТИЗАЦИИ

*Галилеев М.Д.¹, Галилеев С.М.²**1 - Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I, Россия**2 - Санкт-Петербургский государственный экономический университет,
Россия
galiley1010@gmail.com*

METHOD OF CONTACT MESHING

*Galileev M.D.¹, Galieev S.M.²**1- St.-Petersburg State Transport University, Russia**2 - St.-Petersburg State University of Economics, Russia*

Естественным этапом развития метода конечных и граничных элементов строительной механики является метода контактной дискретизации (МКД). В методе реализуется контакт объемных упругих блоков различных размеров не в узлах, а по поверхностям. В результате повышается точность приближения к реальному объекту, снижается трудоемкость его расчета на прочность, жесткость, динамику, устойчивость, надежность, экономичность.

The method of contact meshing (MCM) is a natural extension of the development of the finite and boundary element method in structural mechanics. Contrary to the classical nodal contact this methodology utilises the contact surfaces of volume elastic elements of different sizes. The result is increased accuracy of the approximation as well as the reduced complexity of its strength, stiffness, dynamics, stability, reliability, and efficiency analysis.

1. Basic equations. The stress-strain state of 3D elements such as plates, cubes, rectangular and warped parallelepipeds due to stresses and displacements at the edges was obtained using the method of initial functions [1]:

$$\mathbf{U} = \mathbf{L} \mathbf{U}^0, \quad (1)$$

where $\mathbf{U}$ is the vector of stresses and displacements at any point of the element; $\mathbf{U}^0$ is the vector of initial functions; $\mathbf{L} = [L_{ij}]$, $i=1,2,\dots,9$; $j=1,2,\dots,6$ is the matrix of regular operator-valued functions containing the mechanical characteristics of the elements and partial derivatives of variables.

The stresses and displacements are given on the faces of the element (e.g. cube) in the following form 1($x=a$), 1' ($x=-a$), 2($y=a$), 2' ($y=-a$), 3($z=a$), 3' ($z=-a$):

$$\begin{aligned} \mathbf{U}_{1\sigma}^+ &= \{\sigma_x^+ \tau_{xz}^+ \tau_{xy}^+\}, x = a, \\ \mathbf{U}_{1\sigma}^+ &= \{\sigma_x^+ \tau_{xz}^+ \tau_{xy}^+\}, x = -a, \\ \mathbf{U}_{1w}^+ &= \{U^+ V^+ W^+\}, x = a, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\mathbf{U}_{1W}^+ = \{U^+ V^+ W^+\}_{,x} = -a,$$

The conditions for the faces 2, 2', 3, 3' are formulated in a similar way to the equations (2).

The initial functions α, β, γ are presented on the surfaces K by the stresses and displacements, given on the faces i, i'

$$\mathbf{U}_{k\sigma}^0 = \mathbf{L}_{k\sigma}^{-1} \mathbf{U}_{ii',\sigma}^+ \quad \mathbf{U}_{kW}^0 = \mathbf{L}_{kW}^{-1} \mathbf{U}_{ii',W}^+ \quad (3)$$

The stress-strain state of the element is determined in accordance with the loading conditions of the faces as in (1)

$$\mathbf{U}_{ii',\sigma} = \mathbf{L}_{ii',\sigma} \mathbf{Z}_{k\sigma}^{-1} \mathbf{U}_{ii',\sigma}^+$$

$$\mathbf{U}_{ii',W} = \mathbf{L}_{ii',W} \mathbf{Z}_{kW}^{-1} \mathbf{U}_{ii',W}^+$$

The stress-strain state of the parallelepiped can be obtained if in the solution of the cube the two sides a are replaced by b and c .

The stress-strain state of the warped parallelepiped is obtained using the following initial functions:

$$\begin{aligned} \mathbf{U}^0 &= \{U_r^0 \ U_\varphi^0 \ U_z^0 \ \sigma_r^0 \ \tau_{r\varphi}^0 \ \tau_{rz}^0\}, \\ \mathbf{U}^0 &= \{U^0 \ V^0 \ W^0 \ \theta_1^0 \ N_1^0 \ S_1^0 \ M_1^0 \ Q_1^0\} \end{aligned} \quad (4)$$

The concretization of the solution in double trigonometric polynomials was carried out with the conglutination over the surfaces of the elements

$$\mathbf{U} = \sum_{m=0}^k \sum_{n=0}^k T_{mn} \mathbf{L} \mathbf{U}^0 e^{i\omega t},$$

where $\mathbf{T}_{mn}$ is a diagonal matrix of the ninth order for the solution in sines or cosines; $\mathbf{L}=[L_{ij}^{mn}]$, $i=1,2,\dots,9$; $j=1,2,\dots,6$, here L_{ij}^{mn} the above functions are the functions of variables x, y, z .

Under the influence of loading on the face i, i' of the element, the arising self-balanced stresses on the other faces are eliminated by continuation of the solution beyond the element boundaries. The Fourier coefficients are determined from the system of algebraic equations with six different m and n .

2. Concluding remarks. Ensemble of elements is implemented by solving the problem of the conglutination of the faces over the the surfaces. In order to test the method a numerical analysis of some known problems has been done, particularly for a three-layer structure and a structure for strengthening the soil mass with piles.

Reference

1. Galileev SM. The method of initial functions in the mechanics of anisotropic plates: monograph. St. Petersburg, SPb FGOU SPGUVK, 2007, 212p.

**ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МЕТОДЫ МАСШТАБНОГО ПОЛУЧЕНИЯ
НАНОПРОДУКТОВ ДЛЯ ШИРОКОГО ПРОМЫШЛЕННОГО
ПРИМЕНЕНИЯ**

Половцев С.В.¹, Осипов Ю.Г.¹, Панич А.Е.², Галилеев С.М.³

1 - ФГУП РНЦ «Прикладная химия», Санкт-Петербург, Россия

2 - Южный федеральный университет, Россия

*3 - Санкт-Петербургский государственный экономический университет,
Россия*

galiley1010@gmail.com

**PROMISING METHODS OF LARGE-SCALE PRODUCTION
NANOPRODUCTS FOR BROAD INDUSTRIAL APPLICATIONS**

Polovtcev S.V.¹, Osipov Y.G.¹, Panich A.E.², Galileev S.M.³,

1 - Federal State Unitary Enterprise Russian Research Center

«Applied Chemistry», St.Petersburg, Russia

2 - Southern Federal University, Russia

3 - St. Petersburg State University of Economics, Russia

В докладе рассматриваются методы получения нанопродуктов (углеродных нанотрубок и нановолокон, наноразмерного пластинчатого стекла, нанодисперсного углерода, сфер с наноразмерной стенкой из микроперлита, нанопластинчатого перлита). Нанопродукты имеют устойчивую сырьевую базу, простую отработанную технологию получения, положительный опыт применения в композитах, низкую прогнозируемую стоимость.

The report discusses methods of obtaining nanoproducts (carbon nanotubes and nanofibers, nano-sized plate glass, nanodisperse carbon spheres with a wall of nanosized mikroperlita, nanoplate perlite). Nanoproducts have a stable source of raw materials, simple fulfilled technologies for the positive experience of application in composites, the lower projected cost.

We have over 10 years of study of natural materials, industrial wastes and agricultural farms is in the presence of nanoparticles and nanostructures, as sources of available fillers and modifiers for composites and for several other effective uses of new and traditional techniques [1], [2], [3].

Among these products nanocontaining absolute majority contained from 1% to 10% nanoparticles and nanostructures, and only the individual products contained up to 50 ... 90% nanocomponent [5].

One way of obtaining nanoparticles of solids is a mechanical grinding in the planetary mills, which allows you to reach the level of nanoscale product obtained. However, despite the relative simplicity of this method and even a significant improvement of the constructive decisions in recent years, it remains highly energy-consuming [2].

In this regard, we consider the low power and therefore much more than just

a realization is being operated the way for new affordable modifier and filler composites - nanosized plate glass.

In the study of the product of deep carbonization of rice husks - an active silicon dioxide (ADC) obtained in the experimental production of "Himinzhiniring (Schelkovo, Moscow reg.), We felt justified to use this product not only as an effective modification and filler composites but also as a carrier of catalyst systems and components tribocomposition.

We have studied the unique products, formed hundreds of thousands of years ago when an eruption of volcanoes, when hit hot volcanic ash in the local lake. As a result, education attributes required mikroperlite with a particle size of 4 ... 15 microns. This mikroperlite with swelling ($\sim 900^{\circ}\text{C}$) becomes in microspheres with a volumetric weight 0,04 ... 0,08 g/cm³ and a wall thickness of 100 ... 200 nm. They photopictures in the electron microscope source no distending perlite, ideal spheres distending mikroperlita, defective areas of expanded perlite, thin walls blasted areas.

It is a nanoscale thickness suggested the possibility of mechanical crushing with low power consumption of defective areas with microsizes in nanoglassy pseudo plane particles. In our case, was subjected to crushing nanothin defect sphere - production waste mikroperlita expanded. The sight of these plates is shown in the respective photographs in a scanning electron microscope and a transmission electron microscope.

We obtained nanoplane tested as a filler in the IVS RSA, GNIICHTEOS, NIFCHI them. LY Karpov. However, the lack of completion of development and technological works delayed introduction of a new product in the nanocomposites. Such products must be effective and as fillers of composites, catalysis carrier, fillers lubricants in addition to their already certified and used stores - effectively to sorbent.

In conclusion, we reiterate that all products have a stable source of raw materials, simple fulfilled technologies for the positive experience of the use of composites, and predicting the cost will be dissipated at 70 Rub / kg at the cost of other nanoproductions orders of magnitude greater.

References

1. S.A. Kernozhitskaya, V.I. Manuilova, S.M. Galileev. Natural materials, the waste industry - the source of massive low-cost nanomaterials - modifiers and fillers, concrete and organopolimers. Innovation № 6 (116), 2008. (in Russian).
2. S.V. Polovtsiev, J.G. Osipov, S.M. Galileev. "VESTNIK ENGECON ", a series of technical, Issue 8 (27), 2008, p.p . 209 ... 217. (in Russian).
3. S.V. Polovtsiev, S.M. Galileev, A.A. Egelev. Proceedings of a Conference nanotechnology-logical Society of Russia, ed. NIYAU "MEPI", Moscow, 09.10.2009. (in Russian).
4. Y.I. Kartashov, J.G. Osipov, S.V. Polovtsiev, S.M. Galileev et al. Proceedings of the VI international conference "Innovative processes piezoelectric instrumentation and Nanotechnology, pp. 33 ... 38, Vol. Rostov Pedagogical University, 2008. (in Russian).

УДК 539.3

ТЕРМОПЛАСТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ РЕЗЕРВУАРОВ СЛОЖНОЙ ГЕОМЕТРИИ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В ХИМИЧЕСКОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

*Габимова А.К., Галимов А.Ф., Шакирова А.Т.
Казанский Федеральный Университет, Россия
Galimof.aidar@yandex.ru*

THERMOPLASTIC CALCULATION OF COMPLEX GEOMETRY TANKS, USED IN CHEMICAL MANUFACTURING

*Gabibova A.K., Galimov A.F., Shakirova A.T.
Kazan (Volga Region) Federal University, Russia*

В работе дана постановка контактной задачи термопластичности. Решен ряд задач неізотермического упругопластического деформирования резервуаров сложной геометрии, применяемых в химическом производстве, даны некоторые рекомендации по конструированию.

In the statement given to the contact problem thermoplasticity. A number of problems of nonisothermal elastoplastic deformation of complex geometry tanks used in the chemical industry, are some design recommendations.

Одной из главных задач развития научно-технического прогресса в промышленности является широкое использование систем компьютерного моделирования и автоматизированного проектирования технологических процессов. Однако, в настоящее время, несмотря на всеобщую компьютеризацию отечественных предприятий, проектирование и изготовление элементов конструкции резервуаров, применяемых в химическом производстве, часто основывается на опыте практической работы технологов, сложившихся технологических традициях использовании известных решений, а также трудоемком и металлоемком методе проб и ошибок. Опытные специалисты-практики держат в голове большое количество информации об удачных и неудачных попытках и оперируют ею, зачастую опираясь на интуицию и лишь в редких случаях - на строгие алгоритмы. Эти методы работы определяют качество и себестоимость резервуаров. Такая ситуация является следствием отставания в освоении современных автоматизированных расчетных систем с одной стороны, и нерешенности ряда важных технологических задач проектирования в применяемых системах с другой.

Вместе с тем, теории гидродинамических, тепловых, фазовых, диффузионных, фильтрационных, химических, деформационных и других процессов, протекающих при эксплуатации резервуаров, достаточно хорошо разработаны, в общем виде решены многие ключевые задачи. Базой для описания указанных выше процессов служат математические модели, разработанные методами математической физики. Однако следует отметить, что математические модели и их решения, корректно описывающие поведение резервуаров сложной геометрии, а тем более их расчетная

автоматизированная реализация, не нашли широкого отражения в отечественной литературе, что свидетельствует о недостатке наработок по этой проблеме. С другой стороны, актуальность решения подобных задач вполне очевидна. На основании изложенного, актуальна проблема разработки метода расчета напряженно-деформированного состояния резервуаров сложной формы при термосиловом нагружении и автоматизированной реализации этого метода в апробированных отечественных системах компьютерного моделирования.

В работе реализован алгоритм расчета связанной задачи термоупругости на основе метода конечных элементов. Расчет проводится на основе трехмерных линейных 8-узловых конечных элементов сплошной среды, узловыми неизвестными которого являются проекции вектора перемещений на координатные оси рабочей плоскости и температура. Предложенная авторами методика расчета позволяет эффективно решать трехмерные задачи термоупругого деформирования элементов конструкций при резком изменении внешних тепловых воздействий.

Издание тезисов доклада осуществлено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Республики Татарстан в рамках научных проектов № 15-41-02555, № 15-01-08733.

К АНАЛИТИЧЕСКОМУ РАСЧЕТУ ПОЛОГОЙ ОБОЛОЧКИ, ПОДКРЕПЛЕННОЙ РЕБРАМИ ПЕРЕМЕННОЙ ЖЕСТКОСТИ

Голоскоков Д.П.

ГУМРФ им. адмирала С.О.Макарова

dpg1954@mail.ru

Рассматривается полая оболочка, имеющая в плане прямоугольную форму: $0 \leq y \leq b$, $0 \leq x \leq a$. Оболочка подкреплена ребрами жесткости параллельно осям x и y по линиям $y = y_i$ ($i = 1, 2, \dots, K_1$), $x = x_j$ ($j = 1, 2, \dots, K_2$). Учет ребер осуществляется с помощью δ -функции Дирака и ее производных до второго порядка. Считается, что ребра имеют переменную жесткость. Определение напряженно-деформированного состояния ребристой полой оболочки сводится к решению краевой задачи для разрешающего уравнения четвертого порядка относительно комплексной функции

$$\Psi(x, y) = w(x, y) - \frac{in}{Eh} F(x, y), \quad n = \frac{\sqrt{12(1-\nu^2)}}{h}, \quad i = \sqrt{-1}, \quad \text{где } w(x, y) \text{ — функция}$$
 нормального перемещения точек срединной поверхности оболочки (прогиб), $F(x, y)$ — функция усилий, E — модуль Юнга, h — толщина оболочки, ν — коэффициент Пуассона [1, 2]. Прогиб оболочки $w(x, y)$ и функция усилий $\text{Re}[\Psi(x, y)]$ выражаются через действительную $\text{Im}[\Psi(x, y)]$ и мнимую $w(x, y)$ части функции $\Psi(x, y)$ после ее определения; затем по известным формулам определяются все элементы напряженно-деформированного состояния ребристой оболочки: усилия, моменты и напряжения. Решение основного разрешающего уравнения представлено в виде линейных комбинаций регулярных и сингулярных разрывных функций, учитывающих все особенности на стыке ребра и оболочки. Если жесткость ребер значительная, имеет место ухудшение сходимости рядов и требуется удержание большего числа членов в рядах. В этом случае полезно для улучшения сходимости рядов использовать сглаживающие сигма-множители Ланцоша [1, 3, 4]. Решение реализовано в системе аналитических вычислений Maple [5, 6].

В качестве числового примера рассматривается цилиндрическая панель с размерами в плане $a = 8$ м, $b = 6$ м. Модуль упругости материала обшивки и ребер жесткости $E = 2 \times 10^5$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$. Панель подкреплена тремя ребрами, расположенными вдоль линий $x_1 = 3$ м, $x_2 = 5$ м, $x_3 = 6,5$ м (переменной жесткости), и двумя ребрами, расположенными вдоль линий $y_1 = 2$ м, $y_2 = 4$ м (постоянной жесткости). Размеры ребер: постоянной жесткости — тавры с шириной полки $b_p = 0,35$ м, толщиной полки $t_p = 0,03$ м, высотой стенки $h_s = 0,6$ м, толщиной стенки $t_s = 0,02$ м; переменной жесткости — прямоугольного сечения, переменного по высоте (геометрические характеристики аппроксимировались многочленами — момент инерции полиномом 6-й степени, статический момент площади — полиномом 4-й степени, площадь сечения — полиномом 2-й степени). Толщина оболочки $h =$

0,012 м. Оболочка подвергается действию поперечной нагрузки — гидростатическому давлению $q(x,y) = \rho g x$ ($\rho g \cong 10000 \text{ Н/м}^3$, полный напор 8 м) и шарнирно закреплена по контуру.

Ниже (рис. 3–5) приведены результаты расчета рассматриваемой конструкции в виде графиков прогибов и напряжений в оболочке – обшивке. Все размерности указаны в системе СИ (метры, Ньютоны, Паскали). В рядах удерживалось до 15 членов ($M = N = 15$) по каждой переменной.

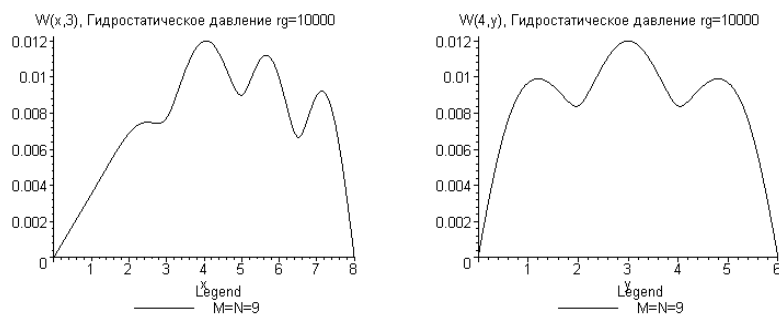


Рис. 3. Прогиб оболочки по линиям $y = 3$ м и $x = 4$ м.

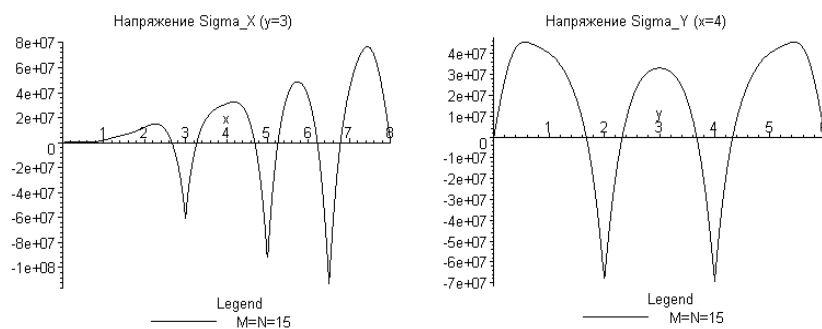


Рис. 4. Изгибные напряжения при $z = h/2$: σ_x (при $y = 3$ м) и σ_y (при $x = 4$ м).

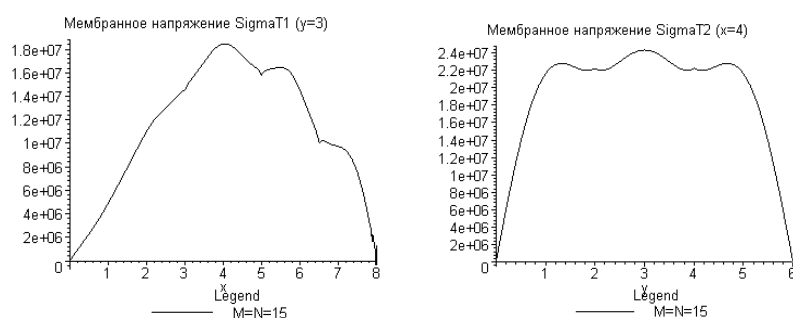


Рис. 5. Мембранные напряжения σ_x (при $y = 3$ м) и σ_y (при $x = 4$ м).

Литература

1. Голоскоков Д.П. Численно-аналитические методы расчета упругих тонкостенных конструкций нерегулярной структуры (СПб.: Изд-во А. Кардакова, 2006, 271 с.)
2. Голоскоков Д.П. Аналитический расчет водоудерживающей обшивки сегментного затвора в гидротехнических сооружениях // Вестник ГУМРФ им. адмирала С.О. Макарова. 2012. №4. С.22-29.

3. Голоскоков Д.П., Голоскоков П.Г. *Метод полиномов в задачах теории тонких плит* (СПб.: СПГУВК, 2008, 254 с.)
4. Матросов А.В. Численно-аналитический алгоритм решения задач плоской деформации линейно-упругих тел сложной конфигурации // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 10: Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. 2008. №3. С.70-84.
5. Голоскоков Д.П. Моделирование напряженно-деформированного состояния упругих тел с помощью полиномов // Вестник ГУМРФ им. адмирала С.О. Макарова. 2013. №1. С.8-14.
6. Матросов А.В. Расчет балочных перекрытий численно-аналитическим методом // Вестник ГУМРФ им. адмирала С.О. Макарова. 2012. №1. С.8-15.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕЧЕНИЯ ЧЕРЕЗ ВПУСКНОЙ КЛАПАН ПОРШНЕВОГО ДВИГАТЕЛЯ

Гришин Ю.А., Дорожнинский Р.К., Зенкин В.А.

*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
grishin@power.bmstu.ru*

MATHEMATICAL MODELING OF TURBULENT FLOWS THROUGH THE INLET VALVE PISTON ENGINES

Grishin Yu.A., Doroginsky R.K., Zenkin V.A.

Bauman Moscow State Technical University, Russia

С помощью программного комплекса *ANSYS Fluent* моделируется течение через впускной клапан поршневого двигателя. На основе сравнения с экспериментом даются рекомендации по выбору модели турбулентности и разрешению пограничного слоя.

With the *ANSYS Fluent* modeled flow through the inlet valve of the piston engine. On the basis of comparison with experiment makes recommendations on the selection of the turbulence model and discretization of the boundary layer.

При численном решении исследовательских и практических задач профилирования и оптимизации проточных частей газозвушных трактов поршневых двигателей, а также расчета их газообмена и рабочего процесса большое значение имеют определение рациональных размеров ячеек вычислительной сетки, настройка вычислительного алгоритма численного метода, выбор модели турбулентности. Это особенно актуально при постановке задачи моделирования течения через клапанные системы, так как эти элементы тракта имеют самое узкое проходное сечение, лимитирующее расход газа на входе и выходе из цилиндра. При постановке задач и тестировании выбранного подхода необходимо выполнить сравнение результатов численного моделирования с экспериментальными данными. В качестве таковых были использованы результаты, полученные *A.F. Bicen*, *C. Vafidis*, *J.H. Whitelaw*.

Численное моделирование течения вязкой сжимаемой жидкости в данной работе выполнялось с помощью программного комплекса *ANSYS Fluent*. При выборе модели турбулентности рассматривались двухслойная $k-\epsilon$ модель, модель Уилкокса $k-\omega$, гибридная модель Ментера *SST* и модель Спаларта-Аллмараса *SA*.

Анализ результатов расчета по сеточной сходимости и определение расхода через впускной клапан показал, что высокорейнольдсовая двухслойная $k-\epsilon$ модель турбулентности с использованием пристеночных функций и равномерной густотой сетки обеспечивает сеточную сходимость только при неприемлемо большом числе элементов сетки и дает значительную ошибку в определении расхода (рис.1). Поэтому в дальнейшем численные исследования проводились с использованием отмеченных выше моделей турбулентности следующего поколения. На рис.1, представлен также

результат сходимости по сетке на базе, в частности, $k-\omega$ модели, где, как и при расчетах с использованием SST и SA , применялось сгущение сетки вблизи стенок расчетной области.

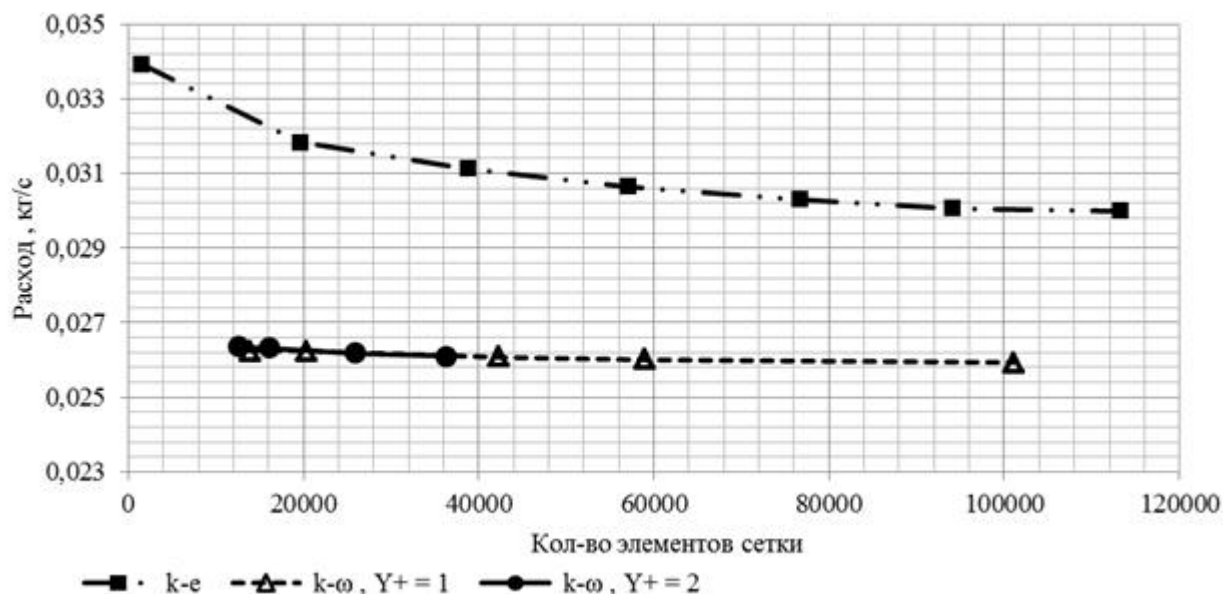


Рис.1. Исследование сеточной сходимости при использовании $k-\epsilon$ и $k-\omega$ моделей

В результате проведенных расчетных исследований наилучшие результаты были получены с использованием двухпараметрической гибридной ($k-\epsilon + k-\omega$) модели SST (рис.2), которую и следует рекомендовать для практических расчетов наиболее ответственных элементов газоздушного тракта двигателей.

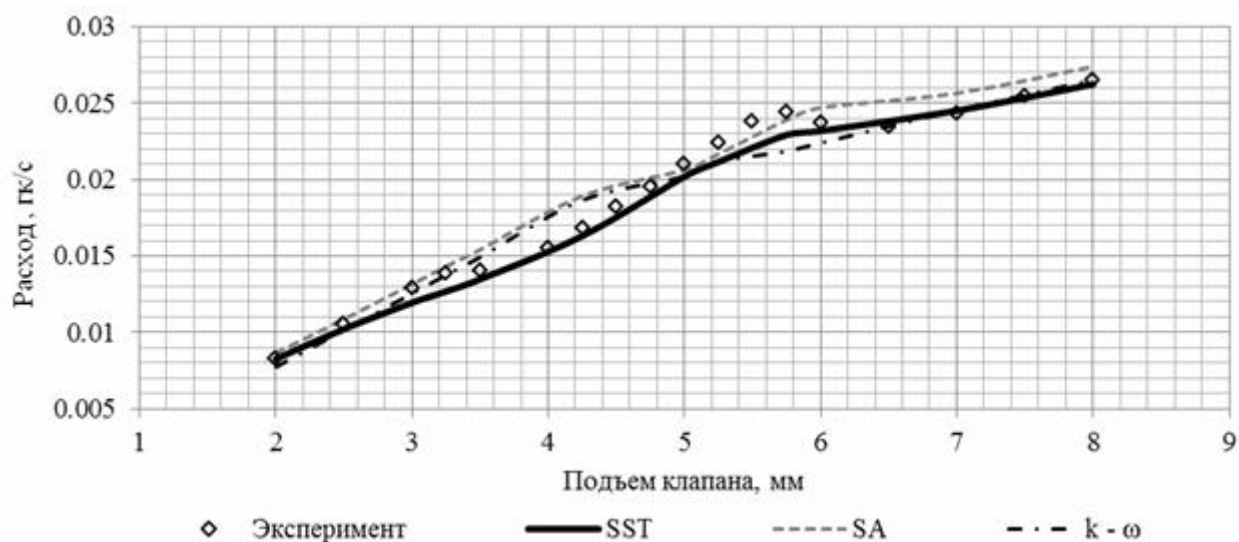


Рис.2. Экспериментальная и расчетные расходные характеристики впускного клапана при использовании различных моделей турбулентности

УДК: 539.3

**МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕУПРУГОЙ ДЕФОРМАЦИИ
МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СУПЕРСПЛАВОВ С УЧЕТОМ
ЭВОЛЮЦИИ γ/γ' ФАЗ**

Грищенко А.И., Семенов А.С., Гецов Л.Б.

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Россия
gai-gr@yandex.ru*

**MODELING INELASTIC DEFORMATION OF SINGLE CRYSTAL
SUPERALLOYS WITH ACCOUNT OF γ / γ' PHASES EVOLUTION**

Grishchenko A.I., Semenov A.S., Getsov L.B.

Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Russia

На микроскопическом уровне монокристаллические сплавы на никелевой основе представляют собой структуру, состоящую из двух фаз: γ' фазы, формирующуюся на основе Ni_3Al , которая в свою очередь рассеяна в матрице из γ фазы – твердого раствора легирующих элементов в никеле. Целью исследований являлась разработка феноменологических моделей ползучести и пластичности для монокристаллических сплавов на никелевой основе, предсказывающих их поведение при высокотемпературных термомеханических воздействиях с учетом эволюции γ и γ' фаз. Для описания поведения каждой из фаз использованы микромеханические модели неупругого деформирования, учитывающие наличие октаэдрических и кубических систем скольжения. На основе методов конечно-элементной гомогенизации произведен анализ влияния фазового состава на диаграмму деформирования, а также исследование влияния эволюции формы γ' -включения, происходящей при формировании рафт-структур, на кривые ползучести.

At the microscopic level, the single-crystal nickel-based alloys are a structure consisting of two phases: γ' -phase, forming on the basis of Ni_3Al , which is dispersed in a matrix of γ -phase, representing a solid solution alloying elements in nickel. The purpose of this research is the development of phenomenological models of creep and plasticity for the single crystal nickel-based alloys, predicting their behavior under high-temperature thermomechanical loading, taking into account the evolution of γ and γ' phases. Micromechanical models of inelastic deformation, taking into account the presence of octahedral and cubic slip systems, are used to describe the behavior of each phase. On the basis of finite element homogenization the analysis of the influence of phase composition on the stress-strain diagram, as well as study the effect of the evolution of form γ' -inclusion, occurring during the formation of raft structures, on the creep curves are performed

На микроскопическом уровне монокристаллические сплавы на никелевой основе являют собой структуру, состоящую из двух фаз: γ' фазы, формирующуюся на основе Ni_3Al , которая в свою очередь рассеяна в матрице из γ фазы – твердого раствора легирующих элементов в никеле. Частицы γ' фаза представляют собой кубоиды со средним размером ~ 500 нм, разделенные нанопрослойками γ фазы с поперечным размером 50-90 нм, объемная доля γ' фаза составляет порядка 70 % [1,2]. В качестве элементарного представительного объема (ЭПО) монокристаллического сплава на никелевой основе рассматривалась ячейка периодичности, состоящая из матрицы (γ фаза) и кубического включения с закругленными углами (γ' фаза)

При работе в режиме высокотемпературной ползучести монокристаллические сплавы на никелевой основе имеют тенденцию к

изменению структурно-фазового состояния [2,3]. Так исходно кубоидные частицы γ' фазы срачиваются между собой в пластины, перпендикулярные к оси приложения нагрузки.

Доля γ' фазы в общем объеме монокристаллического сплава на никелевой основе является одним из основных параметров, влияющих на пластические свойства сплава. С целью определения влияния объемной доли γ' фазы на эффективные упругие модули всего сплава в целом выполнена серия численных экспериментов с различной объемной долей γ' , меняющийся в диапазоне от 20 до 90 процентов. Установлено, что зависимость эффективных упругих свойств от объемной доли γ' фазы имеет слабовыраженный характер, так при изменении объемной доли γ' фазы с 70% до 90% модуль юнга увеличился всего на 2 процента. В ходе данного исследования получены расчетные диаграммы деформирования монокристаллического сплава для различных долей γ' фазы, полученные на основе прямой КЭ гомогенизации. Экспериментальные данные, легшие в основу проведенных расчетов, были взяты из работы [4]. Установлено, что при увеличении доли γ' фазы качественный характер диаграммы деформирования не меняется, однако происходит рост предела текучести. Было проведено моделирование процесса текучести ЭПО монокристаллического сплава на никелевой основе, сравнение с экспериментом показало хорошее соответствие.

Важной характеристикой для никелевых жаропрочных сплавов, особенно для монокристаллических, является несоответствие периодов кристаллических решеток фаз [5,6]: γ -матрицы, γ' - фазы, называемое мисфитом. Мисфит вызывает появление дополнительных напряжений, обусловленных тем, что для обеспечения сплошности сплава γ -матрицы вынуждена сжиматься, а более упругая γ' - фаза вынуждена расширяться. Проведено численное моделирование эффектов, вызываемых мисфитом. Установлено, что мисфит вызывает напряжения, которыми нельзя пренебрегать при дальнейших расчетах.

Литература

1. Шалин Р.Е., Светлов И.Л., Качалов Е.Б. и др. Монокристаллы никелевых жаропрочных сплавов – М.: Машиностроение, 1997. – 336с.
2. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Елютин Е.С. Монокристаллические жаропрочные сплавы для газотурбинных двигателей //Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2011. №2. С. 38–52.
3. А. И. Епишин, И. Л. Светлов, U. Brueckner, T. Link, P. Portella, E. P. Голубовский. Высокотемпературная ползучесть монокристаллов никелевых жаропрочных сплавов с ориентацией [001] // Материаловедение.1999. № 5. С. 32-42 .
4. Estevez R., Hoinard G., Franciosi P. Hardening anisotropy of superalloy crystals – II. Numerical Analysis of heterogeneity effects // Acta Materialia. 4(45), 1997. P. 1567-1584.
5. Самойлов А.И., Петрушин Н.В., Назаркин Р.М., Моисеева Н.С. Мисфит как характеристика уровня межфазных напряжений в монокристаллических жаропрочных сплавах / Известия РАН. Металлы. 2011. № 3. С. 71–77.
6. Петрушин Н.В. Исследование влияния размерного несоответствия периодов кристаллических решеток γ - и γ' -фаз на характеристики жаропрочности дисперсионно-твердеющих никелевых сплавов.// Изв. АН СССР. Металлы. 1981. №6. С. 153–159.

НЕЛОКАЛЬНЫЕ КРИТЕРИИ РАЗРУШЕНИЯ И ПРОБЛЕМА УНИВЕРСАЛЬНОСТИ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Груздков А.А.

*Санкт-Петербургский государственный технологический институт
(технический университет), Россия
gruzdkov@mail.ru*

NON-LOCAL FRACTURE CRITERIA AND THE PROBLEM OF UNIVERSAL STRENGTH CHARACTERISTICS

Gruzdkov A.A.

St.-Petersburg State Technological Institute (Technical University), Russia

Анализ результатов испытаний горных пород и некоторых других материалов обнаруживает значительные отличия прочностных характеристик, определённых с использованием различных схем нагружения. Данный эффект можно объяснить нелокальностью процесса разрушения. Введение соответствующих критериев разрушения требует определения прочностных характеристик инвариантных относительно используемых методов испытаний.

Experimental investigation of strength properties of rocks and some other materials reveals significant discrepancy between characteristics obtained by using different testing techniques. This effect could be explained by non-local nature of the fracture process. The problem is to determine a set of material characteristics and to formulate appropriate fracture criterion.

Проведение расчётов поведения конструкций, находящихся под внешним воздействием, требует адекватной модели материала и, в частности, знания прочностных характеристик материала. При этом часто упускается из виду, что определяемые параметры принципиально зависят от геометрии испытываемых образцов и используемой схемы испытаний. Перенос полученных характеристик с лабораторных образцов на реальные конструкции может, следовательно, оказаться некорректным.

В инженерной практике вводятся многочисленные параметры, характеризующие прочность – прочность на растяжение, прочность на изгиб, трещиностойкость, ударная вязкость и т.д. Данные характеристики обычно трактуются как независимые, поскольку не допускают взаимного пересчёта по стандартным алгоритмам. Для численных расчётов конструкций такая ситуация оказывается неприемлемой, поскольку далеко не всегда ясно, какие из прочностных характеристик следует использовать в расчётах при моделировании реальных условий эксплуатации. Это делает актуальной проблему выбора универсальных прочностных характеристик, не зависящих от конкретной схемы испытаний образцов.

Анализ результатов испытаний горных пород показывает, например, что предел прочности, определённый при одноосном растяжении, может отличаться от предела прочности, определённой в испытаниях на трёхточечный изгиб в 4-5 раз. Столь большие расхождения не могут быть

объяснены проявлением анизотропии в упругих свойствах материала.

Использование критериев разрушения, которые в явном или неявном виде используют характерный размер зоны разрушения, позволяют при фиксированных параметрах материала давать удовлетворительное соответствие с экспериментальными данными, полученными при различных схемах испытаний – растяжение, изгиб, испытание образцов с трещиной или острым вырезом. При этом остаётся проблема выбора оптимального нелокального критерия разрушения и соответствующего ему набора параметров материала. Критериями выбора являются универсальность (применимость к произвольному полю напряжений в материале), простота определения характеристик материала, удобство использования в расчётных схемах.

УДК 537.87 ; 621.371

ПАРНЫЕ ОТОБРАЖЕНИЯ ОБЪЕКТА, ОСНОВА ТОЧНЫХ ДЕТЕРМИНИРОВАННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Гузевич С.Н.

*ОАО «Государственный научно-исследовательский навигационно-
гидрографический институт», Россия
guzevich@yandex.ru*

PAIRED DISPLAY THE OBJECT, THE BASIS OF EXACT DETERMINISTIC MEASUREMENTS

S. N. Guzevich

JSC "State scientific research navigation-hydrographic Institute", Russia

Выполнен анализ процесса измерений объектов. Выделены два этапа процесса: отображение объекта и измерение отображения. Проанализирован этап отображений объектов, который выполняют методом центрального проектирования. Построение отображений объектов построено на использовании постулатов, функции которых не выполняются на практике. Показано, что использование в методе центрального проектирования принципа парности позволяет устранить основные противоречия построения отображений объектов и их измерений.

1. Введение. Измерение любых объектов (процессов) любыми техническими средствами состоит из двух этапов: отображение объекта и измерение отображения. Качество описания модели процесса отображения определяет качество процесса измерения. Процесс измерений полученного образа это уже другой процесс, использующий другие технические средства. Процесс построения отображений любых объектов выполняется на отстоянии от них. Поэтому для построения отображений используют метод центрального проектирования, который изменяет масштаб наблюдаемого образа. Использование метода центрального проектирования предполагает использование сферической или проективной системы координат [1].

Процесс построения отображений методом центрального проектирования состоит в описании двух пространств: внешнего, характеризующего отстояние объекта от измерителя и его размер (размеры) и внутреннего, характеризующего отстояние отображения объекта от измерителя и его размер (размеры). Известны в этом построении только параметры, характеризующие внутренний процесс.

Для обеспечения возможности использования метода центрального проектирования необходимо, по аналогии с природой, использовать парные измерения в проективной системе координат. Практической реализацией парных измерений в проективной системе координат является стереоскопическая система координат.

Практическая реализация построений образов объектов основана на использовании двух постулатов: - модельно объект не имеет размеров и является математической точкой;- перенос информации от источника к ее

измерителю выполняется прямолинейными лучами. *Не один из этих постулатов практически не выполняется.*

Поэтому необходимо либо найти новые постулаты, которые позволяют выполнять требуемые функции, либо найти условия, при которых эти постулаты выполняются и однозначно.

2. Условия обеспечения лучевого распространения информации в пространстве. Эти свойства выполняются при использовании стереоскопической системы координат, обеспечивающей пространственное отображение объекта. Изменяя в стереоскопической системе координат направление осей, связанных с измерителями, можно одновременно получить оценки размеров сторон объекта, связанных со средней суммарной оценкой наблюдаемых размеров образов объекта и их разностной оценкой. В разностной оценке все реальные размеры лучей нивелируются и превращаются в математические понятия прямой линии и точки. Использование стереоскопической системы координат в проективной геометрии обеспечивает возможность построения системы из двух уравнений и определения двух неизвестных. Стереоскопическая система координат, в которой «осмотр» пространства выполняется сканирующим лучом, названа парной проективной системой координат, а аналитическая геометрия, описывающая ее измерения – парной проективной геометрией [2].

Парная система координат обладает двойными свойствами, которые модельно в разности превращают «фиктивный» измеритель в точку, не имеющую размеров, при сохранении размеров реальных измерителей и их отображений. Функциональное влияние изменений окружающей среды и скорости распространения информации исключаются *в разности их проявления*. Эти условия всегда выполняются, так как измерительная база d значительно меньше расстояния до объектов [3].

3. Условия линейного нормирования сферического пространства. При сканировании пространства лучом постоянной длины отображение наблюдаемых объектов осуществляется в сферической системе координат угловой мерой. Замена угловой метрики на отдельном участке метрического пространства его линейной метрикой допустима при условии, что сумма значений на этом участке остается постоянной.

Вывод. Принцип парности позволяет создать идеальные условия построения, распространения, отображения и измерения информации при использовании метода центрального проектирования, который реализуется в парной проективной системе координат.

Литература

1. Н.В. Ефимов. Высшая геометрия. - М.: Гос. изд. техн-теор. литературы, 1953.-528с.
2. Гузевич С.Н. «Парная проективная геометрия на постулатах Евклида». Изд: - LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2012 - 124 с.
3. Гузевич С.Н. «О методологии обеспечения измерений линейных размеров в пространстве» //5-я Всероссийская научно-техническая конференция «СУДОМЕТРИКА-2014» (14-16 октября 2014г.) Тезисы доклада. С-Петербург 2014г., С.69-72.

**ДЕТЕРМИНИРОВАННОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ И ИЗМЕРЕНИЕ
ОТОБРАЖЕНИЙ ОБЪЕКТА**

Гузевич С.Н.

*ОАО «Государственный научно-исследовательский навигационно-
гидрографический институт», Россия
guzevich@yandex.ru*

**DETERMINISTIC CONVERSION AND MEASUREMENT MAPPINGS OF
THE OBJECT**

S. N. Guzevich

JSC "State scientific research navigation-hydrographic Institute", Russia

Выполнено описание стереоскопических измерений положения и размеров объекта с позиций метода центрального проектирования. Такой подход существенно упростил и изменил геометрические зависимости для описания отстояний и размеров объекта, исключив необходимость использования угловых трансцендентных функций для оценки отстояний объектов.

1. Введение. Стереоскопический метод измерений является формой реализации метода центрального проектирования. В настоящее время для его реализации используют трансцендентные функции, связанные с измерением пространственного параллактического угла. Так как измерение пространственных углов выполняются с существенными погрешностями, это приводит к низкой точности измерений отстояний между объектами. Аналогичное положение возникает при использовании фазового метода измерений электромагнитных полей радиочастотного диапазонов, в которых используют интерферометрический метод, обеспечивают относительные измерения в опоре на постоянство скорости распространения информации и совмещения фаз принимаемых сигналов, но результаты измерений имеют только итерационный характер даже при наличии данных о реальных размерах объектов.

2. Стереоскопические измерения, как форма реализации метода центрального проектирования. Рассмотрим геометрическую модель оптических стереоскопических измерений, показанную на рис.1. Для улучшения наглядности отображений на рис.1 симметричные построения показаны отдельно только с одной из сторон. При использовании стереоскопического метода объект рассматривается как точечный, а наблюдатель имеет измерительную базу d в виде двух точек, соединенных прямой [3]. Отстояние объекта на плоскости наблюдения оценивают по величине параллактического угла:

$$L_A = d/2 \cdot \operatorname{ctg} \alpha/2, \quad (1)$$

где L_A – отстояние точки **A** на объекте от измерительной базы;
 α - параллактический угол.

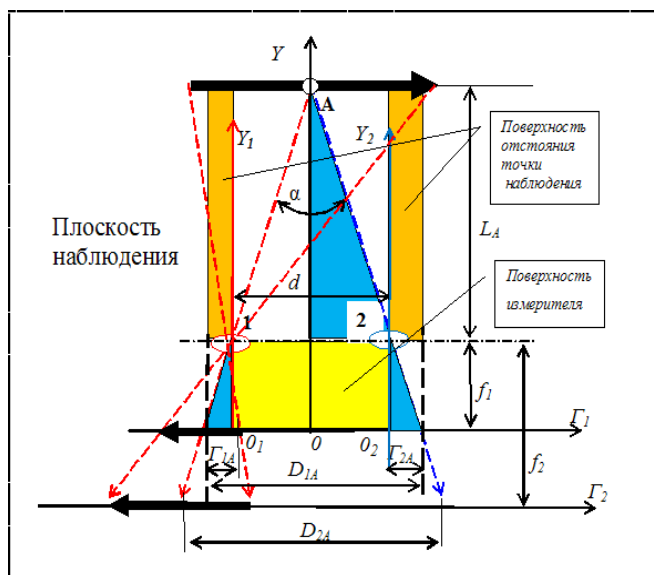


Рис.1. Модель стереоскопических измерений объекта

При построении отображений методом центрального проектирования известны только параметры, характеризующие внутренний процесс, то есть параметры f и d , которые характеризуются площадью и определяют поверхность измерителя. Из подобия трех треугольников, два из которых выделены фоном, следует следующие равенства:

$$L_A = \frac{f \cdot d}{D_A - d} = \frac{s}{D_A - d} \quad ; \quad L_A(D_A - d) = L_A \Gamma_A = S_A = f \cdot d \quad ; \quad S_A = s$$

где $S_A = L_A \Gamma_A$ – трансформируемая площадь внешнего пространства.

Равенство поверхностей, характеризующих внутренний и внешний процессы, при использовании метода центрального проектирования является основой детерминированных преобразований при измерении объектов. Опора на стационарные параметры парного измерителя задает относительную меру и относительный характер оценки отстояния L_A и ее погрешности. При опоре на площадь стереоскопического измерителя величина s входит как постоянный параметр, который исключает необходимость измерения параллактического угла. При этом отображение всех сторон объекта, зависят от линейных коэффициентов трансформации. Использование площадной опоры при оценке параметров положения и размеров объекта обеспечивает динамическую подстройку размеров проекций измерителя к частоте принимаемой информации широком спектре частот, который проявился при использовании светового диапазона.

Литература

1. Гузевич С.Н. Модель зрительных измерений // Приборостроение 2015, №1, С. 66-71.
2. Гузевич С.Н. Патент № 2533348 Оптический способ измерения размеров и дальномер-пеленгатор. Бюл. №32/2014.

УДК 539.3

**ВАРИАЦИОННАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ОПТИМАЛЬНОГО
ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С
ТРЕБУЕМЫМ И РЕГУЛИРУЕМЫМ КОМПЛЕКСОМ СВОЙСТВ ПРИ
ВОЛНОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ**

Гусев Е.Л.^{1,2}, Бакулин В.Н.³

1 - Институт проблем нефти и газа СО РАН, Россия

2 - Северо-Восточный федеральный университет, Россия

3 - Институт прикладной механики РАН, Россия

elgusev@mail.ru

**VARIATION STATEMENT OF PROBLEMS OF OPTIMUM DESIGN
OF COMPOSITE STRUCTURES WITH THE DEMANDED AND
ADJUSTABLE COMPLEX OF PROPERTIES
AT WAVE INFLUENCES**

Gusev E.L.^{1,2}, Bakulin V.N.³

*1 - Institute of problems of oil and gas of the Siberian Branch of the Russian
Academy of Science, Russia*

2 - North-East Federal University, Russia

3 - Institute of applied mechanics of the Russian Academy of Sciences, Russia

На основе математического и компьютерного моделирования проведено исследование задач численного анализа и оптимального проектирования структуры композиционных материалов с требуемым и регулируемым комплексом свойств, имеющих как плоскую, так и криволинейную симметрию. Задачи оптимального проектирования структуры композиционных материалов с требуемым комплексом свойств сформулированы в вариационной постановке.

On the basis of mathematical and computer modeling research of the problems of the numerical analysis and optimum design of structure of composite materials with the demanded and adjustable complex of the properties having both flat, and curvilinear symmetry is conducted. Problems of optimum design of structure of composite materials with the demanded complex of properties are formulated in variation statement.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований - грант № 13-08-00229.

Широкое распространение композиционных материалов в различных областях физики, техники, приборостроения, общность их математического описания приводят к необходимости создания единого подхода к задачам исследования предельных возможностей неоднородных структур по достижению требуемого комплекса свойств [1- 4]. Возможности эффективного исследования предельных возможностей необходимо связаны с разработкой эффективных методов поиска глобального экстремума соответствующих функционалов эффективности в вариационных постановках задач синтеза.

Применение оболочечных конструкций, особенно слоистой структуры,

обеспечивает сочетание высокой несущей способности с малой массой. Это актуально для конструкций ракетно-космической, авиационной, судостроительной и многих других отраслей современной техники.

На основе конструктивного исследования необходимых условий оптимальности, связанных с нелокальными вариациями управляющих параметров, установлено существование внутренней симметрии во взаимосвязи параметров, определяющих физическую и геометрическую структуру оптимальной конструкции. Существование такой внутренней симметрии в задачах оптимального синтеза слоисто-неоднородных конструкций может говорить о том, что структуры, реализующие предельные возможности, будут группироваться только внутри узкого компактного множества Q .

Разработана методика аналитического описания границ выделяемого компактного множества. На основе теории многозначных отображений [5] разработана методика продолжения решения по параметру, позволяющая осуществлять эффективное продолжение множества глобально-оптимальных решений по параметру. Разработанная методика исследования предельных возможностей, основанная на теории многозначных отображений и методах продолжения по параметру, позволяет осуществлять эффективное конструирование слоистых композиционных материалов со сложными характеристиками при волновых воздействиях.

Литература

1. Гусев Е.Л. Математические методы синтеза слоистых структур.- Новосибирск: Наука, 1993.- 262 с.
2. Гусев Е.Л. Качественные закономерности взаимосвязи параметров в оптимальных структурах в задачах оптимального синтеза неоднородных структур из дискретного набора материалов при волновых воздействиях //Доклады РАН. 1996. т.346, № 3. С. 324-326.
3. Gusev E.L. Optimal synthesis methodology of nonhomogeneous structures under the influence of electromagnetic waves// Int. J. Of Applied Electromagnetics and Mechanics. 1999. N 10 P. 405-416.
4. Бакулин В.Н., Гусев Е.Л., Марков В.Г. Методы оптимального проектирования и расчета композиционных конструкций. В 2 т. Т.1. Оптимальное проектирование конструкций из композиционных и традиционных материалов. М. Наука-Физматлит. 2008. 256с.
5. Лисковец О.А. Некорректные задачи с замкнутым необратимым оператором//Дифференциальные уравнения. 1967. № 4. С. 636-646.

УДК 539.3

**ПРИМЕНЕНИЕ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ПРОЦЕДУР ПОИСКА
ЭКСТРЕМУМА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ
ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ХАРАКТЕРИСТИК
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Гусев Е.Л.^{1,2}

1 - Институт проблем нефти и газа СО РАН, Россия

2 - Северо-Восточный федеральный университет, Россия

elgusev@mail.ru

**USING PARALLEL PROCEDURES FOR THE SEARCHING OF THE
EXTREMUM FOR THE DECISION OF THE INVERSE PROBLEMS
PREDICTION OF THE DEFINING CHARACTERISTICS
OF THE COMPOSITE MATERIALS**

Gusev E.L.^{1,2}

*1 - Institute of problems of oil and gas of the Siberian Branch of the Russian
Academy of Science, Russia*

2 - North-East Federal University, Russia

Рассмотрен вопрос о развитии и применении параллельных процедур поиска экстремума многопараметрических показателей эффективности для решения обратных задач прогнозирования определяющих характеристик композиционных материалов на основе усложненных моделей.

It is considered the question about development and using of the parallel procedures for the searching of the extremum of the multivariable factors to efficiency for decision of the inverse problems of prediction defining parameters composite materials on the base complicated models.

При разработке различных конструкций, машин и механизмов одной из важных проблем является проблема создания надежных методов количественной оценки работоспособности конструкций из полимерных и композиционных материалов [1, 2]. Композиционные материалы, как правило, постоянно находятся под влиянием статических и динамических нагрузок, на которые дополнительно накладывается влияние экстремальных факторов внешней среды.

В соответствии с этим значительную актуальность представляет разработка и модификация эффективных методов поиска абсолютного экстремума многопараметрических показателей эффективности с учетом специфических особенностей задач прогнозирования изменения определяющих характеристик композиционных конструкций при воздействии экстремальных климатических факторов и эксплуатационных нагрузок.

Расширение областей применения композиционных материалов, совершенствование их структуры, приводит к усложнению зависимостей определяющих характеристик композиционных материалов от различных факторов внешней среды. В соответствии с этим возникает необходимость в

развитии и совершенствовании методов поиска экстремума для решения обратных задач прогнозирования определяющих характеристик композиционных материалов в усложненной постановке. На основе разработанных ранее методов, описание которых представлено в работах [3-5], разработан комбинированный подход для решения задач прогнозирования определяющих характеристик композиционных материалов в усложненной постановке.

Рассматриваемый комбинированный подход, связанный с параллельным применением составляющих его методов $M_1, M_2, \dots, M_k$ [3-5], может быть эффективно применен для решения усложненных обратных задач прогнозирования определяющих характеристик композиционных материалов, описываемых моделями сложной структуры, когда есть основания считать, что применение существующих методов не позволяет построить действительно глобально-оптимальное решение.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований - грант № 13-08-00229.

Литература

1. Уржумцев Ю. С., Черский И. Н. Научные основы инженерной климатологии полимерных и композитных материалов // Механика композитных материалов, 1985, № 4, с. 708–714.
2. Болотин В. В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций. М., 1984. 312 с.
3. Гусев Е.Л. Применение методов поиска экстремума с оптимальным выбором параметров для решения обратных задач прогнозирования изменения прочности полимерных композитов // Международный журнал «PROSPERO», Москва, 2015.
4. Гусев Е.Л. Применение методов возможных направлений с определением оптимальных направлений поиска для решения обратных задач прогнозирования изменения прочности полимерных композитных конструкций при воздействии экстремальных климатических факторов // Международный журнал «Educatio», 2015.
5. Гусев Е.Л. Релаксационные методы в прогнозировании определяющих характеристик композиционных конструкций при воздействии экстремальных факторов внешней среды // Сб. трудов XVI Межд. научно-практической конференции: «Современные концепции научных исследований», М., МНО ЕСУ, 2015

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНЕЧНЫХ
УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ**

*Давыдов Р.Л., Султанов Л.У., Гарифуллин И.Р.
Казанский Федеральный университет, Россия
ruslan.davydov@mail.ru*

**NUMERICAL ALGORITHM OF LARGE ELASTOPLASTIC
DEFORMATION**

*Davydov L.U., Sultanov L.U., Garifullin I.R.
Kazan Federal University, Russia*

В настоящей работе описан численный алгоритм исследования напряженно-деформированного состояния упругопластических тел с учетом больших деформаций. Определяющие соотношения получены с использованием потенциала упругих деформаций, а также функции текучести. Алгоритм расчета построен на линеаризованном уравнении виртуальных мощностей, записанного в актуальном состоянии в рамках метода пошагового нагружения. Пространственная дискретизация основана на методе конечных элементов.

A numerical algorithm of the investigation of stress-strain state of the elastic-plastic solids with large deformations is described. The constitutive equations are obtained using the potential of the elastic strain and yield function. Calculation algorithm is based on the linearized equation of virtual powers, defined to actual state. The incremental method is used. A spatial discretization is based on the finite element method.

Работа посвящена разработке методики исследования больших упругопластических деформаций. В качестве тензоров, описывающих деформацию и скорость деформации, используются левый тензор Коши–Грина, тензор пространственного градиента скорости и тензор деформации скорости. Вводится удельная потенциальная энергия деформации, которая зависит от левого тензора Коши–Грина.

Напряженное состояние описывается тензором истинных напряжений Коши–Эйлера, определенным в актуальном состоянии. Для упругого деформирования получены линеаризованные определяющие соотношения. В рамках теории течения для полной деформации скорости используются аддитивное представление.

Алгоритм исследования основан на методе последовательных нагружений на базе линеаризованного уравнения мощностей в актуальном состоянии. При моделировании пластических деформаций применяется метод проецирования напряжений на поверхность текучести с итерационным уточнением текущего НДС.

В качестве примера рассматривается задача растяжения круглого стержня с образованием шейки и нелинейная потеря устойчивости круглой трубы. Выбрано соответствующее выражение потенциала упругих деформаций, критерием пластического течения служит условие Губера–Мизеса с упрочнением.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства РТ в рамках научных проектов № 15-31-20602, 15-41-02557.

Литература

1. Голованов А.И., Коноплев Ю.Г., Султанов Л.У. Численное исследование конечных деформаций гиперупругих тел. I. Кинематика и вариационные уравнения // Ученые записки Казанского государственного университета. Серия физико-математические науки. – 2008. – Т. 150, Кн. 1. – С. 29-37.
2. Голованов А.И., Коноплев Ю.Г., Султанов Л.У. Численное исследование конечных деформаций гиперупругих тел. II. Физические соотношения // Ученые записки Казанского государственного университета. Серия физико-математические науки. – 2008. – Т. 150, Кн. 3. – С. 122-132.
3. Голованов А.И., Коноплев Ю.Г., Султанов Л.У. Численное исследование конечных деформаций гиперупругих тел III. Постановки задачи и алгоритмы решения // Ученые записки Казанского государственного университета. Серия физико-математические науки. – 2009. – Т. 151, Кн. 3. – С. 108-120.
4. Голованов А.И., Коноплев Ю.Г., Султанов Л.У. Численное исследование конечных деформаций гиперупругих тел IV. Конечноэлементная реализация. Примеры решения задач // Ученые записки Казанского университета. Серия физико-математические науки. – 2010. – Т. 152, Кн. 4. – С. 115–126.
5. Голованов А.И., Султанов Л.У. Численное исследование больших упругопластических деформаций трехмерных тел // Прикладная механика. – Киев. – 2005 – Т. 41. – №6. – С. 36-43.
6. Голованов А. И., Султанов Л. У. Исследование закритического упругопластического состояния трехмерных тел с учетом конечных деформаций// Известия Вузов. Авиационная техника.–2008.–N 4.–С. 13-16.
7. Уилкинс М.Л. Расчет упругопластических течений // Вычислительных методы в гидродинамике. – М. Мир, 1967. – С.212-263.
8. Bonet J., Wood R.D. Nonlinear continuum mechanics for finite elementanalysis. – Cambridge University Press, 1997. – 283 p.
9. Eidel B., Gruttmann F. Elastoplasticorthotropy at finite strains: multiplicative formulation and numerical implementation // Computational Materials Science 28 (2003), PP. 732–742.
10. Schröder J., Gruttmann F. A simple orthotropicfiniteelasto-plasticity model based on generalizedstress–strain measures // Comput. Mech. 30 (2002), PP. 38–64.

О ВОЗМОЖНОСТЯХ ПРИМЕНЕНИЯ ПРИВЕДЕННОГО ВРЕМЕНИ ДЛЯ БИОСИСТЕМ

Демидова И.И.

Санкт-Петербургский Государственный Университет, Россия
maria_ib@mail.ru

THE POSSIBILITY OF THE APPLICATION OF THE SPECIAL TIME FOR THE BIOSYSTEMS

Demidova I.

St. Petersburg State University, Russia

Исследуются возможности использования уравнений вязкоупругости для описания напряжённого состояния биоконструкций.

The possibility of the application of the viscoelastic equations for the statement of the stress state of the bioconstructions.

В основе тканей в живых системах лежат биополимеры. Исследования механического поведения биотканей показывают, что ткани обладают неупругостью. Природные конструкции имеют сложнейшую структуру с постоянно изменяющимися параметрами α_k свойств тканей и различными механическими, физическими и химическими воздействиями β_k . При этом все параметры α_k взаимозависимы, т.е. каждый из параметров α_k – функция всех других, β_k , времени t и времени возникновения конструкции t_0

$$\alpha_k = f(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{k-1}, \beta_k, t, t_0).$$

Для описания напряжённо-деформированного состояния полимерных конструкций при термосиловом воздействии в механике полимеров используются уравнения вязкоупругости, при этом введено понятие приведенного времени ξ , учитывающее изменение свойств от температуры. Численное и экспериментальное определение напряжённого состояния для конструкций с отверждёнными полимерными материалами показывает хорошее совпадение результатов [1]. Если полимерный материал недоотверждён, то в процессе эксплуатации конструкции кинетика напряжений изменяется в зависимости от соотношения степени отверждения и приложенных нагрузок. Для материалов со степенью отверждения меньше единицы используются более сложные зависимости для приведенного времени ξ и соответственно для механических характеристик.

Для биоматериалов функция релаксации запишется в виде

$$E(\xi) = E[\xi(S, p_k, T, \phi, OC, t, (t - t_0) \dots)],$$

которая для всех тканей одной биоконструкции будет разным. Свойства биологических материалов зависят от многих характеристик: структуры материала S , давления в сосудах и тканях p_k , температуры T , содержания минеральных веществ ϕ , воздействий окружающей среды OC и др. Параметры времени $t, (t - t_0)$ входят во все характеристики. Изменение

внешних и внутренних параметров, воздействующих на систему, приводит к трансформированию механических характеристик тканей. При этом заметим, что для всех параметров существуют свои функциональные границы и границы критических состояний.

В литературе известны разные варианты времени, близкие приведенному для описания функционирования биосистем [2].

Показывается, что для исследования напряжённо-деформированного состояния с применением уравнений вязкоупругости необходимо иметь данные об изменении внутренних и внешних параметров, воздействующих на биоконструкцию, провести исследования зависимости механических свойств биотканей от этих параметров и подобрать соответствующие математические зависимости.

В настоящее время исследователями проведены эксперименты, в основном, *in vitro* зависимости свойств тканей от приложенного напряжения, структуры тканей, возраста и т.д. Предложены разные математические зависимости, применение которых ограничено узким временным интервалом.

Поскольку получить исходные зависимости изменения механических свойств сложно, предлагается применять аналогии с поведением полимерных материалов. Например, для описания растяжения или сжатия тканей использовать экспериментальные данные механического поведения соответственно от резины до отверждённой эпоксидной смолы. А для качественного описания роста биоконструкции применить эксперименты по деформированию для отверждающейся эпоксидной смолы. В биомеханике такие результаты можно использовать для оценки допустимой нагрузки на кости в зависимости от состояния тканей, т.е. при учете изменения величины модуля Юнга от времени, возраста, соотношения компонентов структуры и других параметров.

Кроме этого возможно для механического описания функционирования биоконструкции в различных состояниях использовать разные модельные задачи, такие как, модели составного тела. Для определения напряженного состояния в составных моделях используется поляризационно-оптический метод. Рассматриваются варианты соотношений механических характеристик элементов системы. Показывается возможность образования разных дефектов в твердых тканях системы: в виде лунок (кариес зубов при колебаниях температуры тела), в виде расслоения или логарифмических спиралей (при страхе).

Литература

1. Бугаков И.И., Демидова И.И. Метод фототермовязкоупругости. 1993. Изд ЛГУ. Л. 160 с.
2. Левич А. П. Время — субстанция или реляция?.. Отказ от противопоставления концепций. // Журнал "Философские исследования". 1998. №1. С. 6-23

**ОСНОВНАЯ ЧАСТОТА СОБСТВЕННЫХ ПРОДОЛЬНЫХ
КОЛЕБАНИЙ КОНСОЛЬНОГО СТЕРЖНЯ, РАСПОЛОЖЕННОГО НА
УПРУГОМ ОСНОВАНИИ С ДВУМЯ УЧАСТКАМИ РАЗЛИЧНОЙ
ЖЕСТКОСТИ**

Денисов Г.В.

ФГАОУ ВО «СПбПУ», Россия

denisovgrigoriy@list.ru

**FIRST FREQUENCY OF THE LONGITUDINAL VIBRATIONS OF A
BRACKET ROD ON ELASTIC FOUNDATION WITH TWO SECTIONS
OF DIFFERENT STIFFNESS**

Denisov G.V.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia

Методом Ритца получена аналитическая зависимость для определения первой частоты собственных продольных колебаний консольного стержня, расположенного на упругом основании с двумя участками различной жесткости.

Using the method of Ritz, an analytical dependence for determination of the first natural frequency of the longitudinal vibrations of a bracket rod located on elastic foundation with two sections of different stiffness.

1. Введение. Модели «стержень на упругом основании» и «балка на упругом основании» широко используются для описания динамического поведения конструкций и сооружений, таких как железнодорожные пути, магистральные трубопроводы, протяженные фундаменты и т.д. Большинство известных решений оперирует однородным основанием, что в реальных условиях практически недостижимо.

2. Стержень на однородном упругом основании. Пусть консольный стержень имеет длину L и расположен на однородном основании с жесткостью k . Выражение для первой частоты собственных колебаний можно представить в виде:

$$\Omega = \sqrt{\frac{k}{m} + \frac{\pi^2}{4L^2} \frac{EA}{m}}, \quad (1)$$

где EA – продольная жесткость стержня, m – погонная масса стержня.

3. Стержень на неоднородном упругом основании. Пусть консольный стержень имеет длину L и расположен на кусочно-однородном основании с жесткостями k_1 и k_2 , разграниченными условной координатой $x = bL$, где $0 < b < 1$.

Для определения собственных частот колебаний ω , воспользуемся методом Ритца [1].

Принимая выражения для потенциальной и кинетической энергии колебаний стержня на упругом основании согласно [2], после математических преобразований, получим следующую систему уравнений:

$$\frac{\partial}{\partial a_n} \left[\int_0^{bL} \left(\frac{EA}{m} \left(\frac{dU}{dx} \right)^2 + \left(\frac{k_1}{m} - \omega^2 \right) U(x)^2 \right) dx + \int_{bL}^L \left(\frac{EA}{m} \left(\frac{dU}{dx} \right)^2 + \left(\frac{k_2}{m} - \omega^2 \right) U(x)^2 \right) dx \right] = 0, \quad (2)$$

где a_n – коэффициенты базисных (координатных) функций $\varphi_n(x)$, удовлетворяющих граничным условиям, $U(x)$ – функция координаты x .

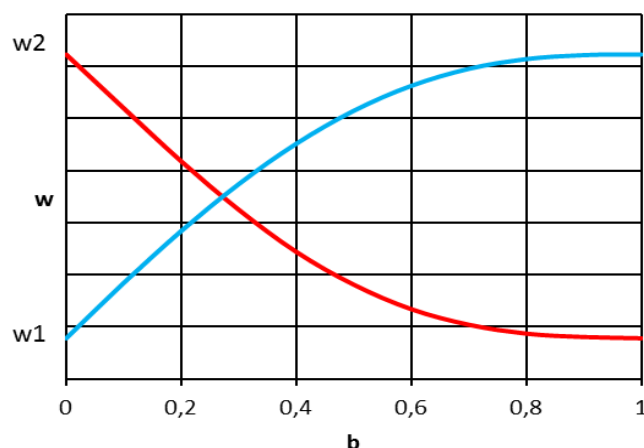
Базисные функции примем в виде форм собственных продольных колебаний консольного стержня [1]. В качестве начального приближения $U(x)$, для определения низшей собственной частоты колебаний ограничимся одним слагаемым в сумме Ритца (3).

После соответствующих математических преобразований, получим следующее выражение для определения первой частоты собственных колебаний:

$$\omega = \sqrt{\frac{k_2}{m} + \frac{\pi^2}{4L^2} \frac{EA}{m} + \frac{(k_1 - k_2)(\sin(\pi b) + \pi b)}{\pi m}}. \quad (3)$$

Результаты вычислений показывают, что погрешность расчетов по (3) относительно численного решения уравнения составляет менее 0,1 %. Проводить дальнейшее уточнение представляется нецелесообразным.

Зависимость $\omega = \omega(b)$, согласно (3), приведена на рис. 1, где красная линия соответствует условиям задачи при $k_1 < k_2$, синяя – при $k_1 > k_2$.



Ошибка!

Рис. 1. Графики функции $\omega = \omega(b)$

Выводы. Получено приближенное аналитическое выражение для первой частоты собственных продольных колебаний консольного стержня, расположенного на кусочно-однородном упругом основании, образованном двумя участками различной жесткости. Количественная оценка показывает хорошую согласованность с результатами численных решений. Полученные зависимости могут быть применены и в частном случае – случае частичного защемления стержня в упругое основание, то есть когда жесткость одного из участков равна нулю.

Литература

1. Бабаков И.М. Теория колебаний. М.: Гос. изд-во технико-теоретической лит-ры, 1958, 628 с.
2. Лалин В.В., Денисов Г.В. Трансформация волн, распространяющихся по струне и балке, как следствие неоднородности упругого основания // Вестник гражданских инженеров. 2013. № 1(36). С.46 – 54.

КОНЦЕПЦИЯ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛИ АРКТИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Диденко Н.И.

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Россия
didenko.nikolay@mail.ru*

THE CONCEPT OF DEVELOPING A MODEL OF THE ARCTIC AREA OF THE RUSSIAN FEDERATION

Didenko N.

Peter the Great St.-Petersburg Politechnic University, Russia

В докладе излагаются концептуальные положения построения модели Арктического пространства России. Арктическое пространство – это восемь субъектов РФ, административно разделенные на сто сорок три муниципальных образования, на территории которых осуществляется жизнедеятельность человека. Рассматриваются сферы жизнедеятельности человека: демографическая, социальная, производственно-экономическая, природно-экологическая.

Модель Арктического пространства представлена в виде четырех уровней: производственно-отраслевой, муниципальный, региональный, национальный. Процесс моделирования Арктического пространства в виде четырехуровневой модели осуществляется выполнением этапов: анализ особенностей объекта моделирования; формулировка оценочных показателей сфер жизнедеятельности человека; выбор и обоснование эндогенных и экзогенных переменных для уровней модели; построение модели; эмпирическая проверка модели [1, 2].

The report contains the conceptual rules for developing the model of the Arctic area of Russia. Arctic space consists of eight subjects of the Russian Federation, which are divided into one hundred forty-three municipalities. The report describes the spheres of human activity: the demographic, social, industrial, economic, natural and ecological.

The model of the Arctic area is represented by four levels: production and industry, municipal, regional, national. The process of modeling the Arctic area in the form of a four-level model is carried out implementation phases: analysis of the characteristics of the object modeling; formulation of performance indicators spheres of human activity; selection and justification of endogenous and exogenous variables for the levels of the model; model building; empirical testing of the model.

1. Введение. Архитектура сложной социально-экономической системы Арктического пространства представленной восьмью субъектами РФ, административно разделенными на сто сорок три муниципальных образования, в пространстве которых осуществляется жизнедеятельность человека в демографической, социальной, производственно-экономической, природно-экологической сферах отображается системой многоуровневых эконометрических уравнений. Для отражения зависимости выбрана система взаимозависимых уравнений, когда зависимые переменные в одних уравнениях на более низком уровне являются независимой переменной для

уравнений другого уровня (более высокого). Тем самым один и тот же показатель будет находиться и в левой, и в правой части разных уравнений, что будет характеризовать зависимость таких уравнений друг от друга, то есть один и тот же показатель будет для разных уравнений и зависимым, и независимым одновременно.

2. Модели нулевого уровня. Модели нулевого уровня – это модели предприятий на территории муниципальных образований. В качестве модели предприятия выбрана производственная функция.

Производственная функция — экономико-математическая количественная зависимость между величинами выпуска (количество продукции) и факторами производства, такими как затраты ресурсов, уровень технологий и др.

$$Q = f(A, L, K) \quad (1),$$

где Q - объем отгруженной продукции предприятия; A - технологический коэффициент (инновационное развитие предприятия); L - количество работающих; K - основные производственные фонды.

3. Модели первого уровня, второго уровня, третьего уровня. Система моделей первого уровня включает сто сорок три модели по количеству муниципальных образований, входящих в Арктическое пространство РФ. Для каждого муниципального образования разрабатывается модель в виде пяти-семи эконометрических уравнений. Модель включает в себя семь эндогенных переменных и для каждой эндогенной переменной от четырех до семи экзогенных переменных. Выбор экзогенных и эндогенных переменных основывается на сущности процессов протекающих в сферах жизнедеятельности человека: демографической, социальной, производственно-экономической, природно-экологической. В качестве системы моделей второго уровня строится система, состоящая из 8 моделей, то есть по количеству арктических субъектов РФ. Каждая такая модель состоит из нескольких эндогенных переменных, к каждой из которых подбираются несколько экзогенных переменных. На третьем уровне модели составляется одна система эконометрических уравнений, характеризующая взаимосвязи экономики Арктических регионов с национальной экономикой. Данная система состоит из нескольких эндогенных переменных и к каждой эндогенной нескольких экзогенных переменных. Зависимость эндогенных факторов от экзогенных можно выразить с помощью эконометрических уравнений. Все вместе в совокупности они будут представлять собой модель в виде системы эконометрических уравнений.

Благодарность: Доклад подготовлен по результатам исследования, выполненного при финансовой поддержке гранта Российского Научного Фонда (проект 14-38-00009) «Программно-целевое управление комплексным развитием Арктической зоны РФ» (Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого).

Литература

1. Ивантер В.В., Лексин В.Н., Порфирьев Б.Н. Арктический мега проект в системе государственных интересов и государственного управления // "Проблемный анализ и государственно-управленческое проектирование. Теория. Практика. Методология" № 6 (38), том 7, 2014. - <http://rusrand.ru/analytics/arkticheskij-megaproekt-v-sisteme-gosudarstvennyh-interesov-i-gosudarstvennogo-upravlenija> (28.04.2015)
2. Диденко Н.И., Скрипнюк Д.Ф. Методологические принципы анализа мирового рынка товара с использованием системы взаимосвязанных эконометрических уравнений // МИР (Модернизация. Инновации. Развитие). 2014. № 19, С. 50-58.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ НАКОПЛЕНИЯ
ПОВРЕЖДЕНИЙ ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО
МАТЕРИАЛА В УСЛОВИЯХ МНОГООСНОГО НАГРУЖЕНИЯ**

Додонов П.А., Федонюк Н.Н.

*ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург,
Россия*

dodonovpavel@gmail.com

**IDENTIFICATION OF THE DAMAGE MODEL PARAMETERS FOR THE
COMPOSITE MATERIAL UNDER MULTIAXIAL LOADING**

Dodonov P.A, Fedonyuk N.N.

The Krylov State Research Centre, Saint Petersburg, Russia

В работе рассматривается модель накопления повреждений и разрушения полимерного композиционного материала (ПКМ), предложенная Р. Ladevèze, для которой предлагается методология определения параметров при нахождении материала в условиях многоосного нагружения. Для решения этой задачи были проведены испытания ПКМ на основе мультиаксиальных диагональных стекло-, углетканей ($\pm 45^\circ$) и винилэфирного связующего, изготовленных методом инфузии. Нелинейное поведение материала в условиях многоосного нагружения исследовалось с помощью КЭ-анализа на базе программного комплекса SAMCEF.

In this investigation we examine the properties of the layered composite materials and verify the Ladevèze material model under multi-axial loading. The complex material model incorporates plasticity, failure and damage mechanisms. The experiments were performed and analyzed on appropriate laminated specimens made of multi-axial fabrics of UD fiber layers laid at $\pm 45^\circ$ angles that were impregnated using Infusion process. Nonlinear behavior under multiaxial loading was analyzed using numerical model implemented in SAMCEF software.

1. Introduction. Hull marine structures operate in severe environments and are designed to endure under complex loading. The supporting elements are usually designed relatively thick, multilayered with intricate scheme of reinforcement to withstand hard operational load. The studying of damaging processes and fracture mechanisms of composite materials under various types of loading allows us to increase efficiency of material use and introduce scientifically based strength standards. Prediction of mechanical behavior of the constructions using the latest numerical methods is part of this study. Considered composite materials are produced from multiaxial non-crimp fabrics made of unidirectional fiber layers laid-at various angles and impregnated with vinyl using Infusion process.

2. Damaging model. The prediction of mechanical behavior of the constructions is possible with the latest numerical methods. Both deformation process and final fracture states could be simulated considering degradation of elastic moduli.

The presented analysis is based on Ladevèze damage model [1] which uses damage indicators as internal damage variables:

$$d_i = 1 - \frac{E_i}{E_i^0}, \quad d_{12} = 1 - \frac{G_{12}}{G_{12}^0} \quad (1)$$

The damaged material strain energy of the unidirectional fiber layer is written in the following form

$$E_D^{ps} = \frac{1}{2} \left[\frac{\langle \sigma_1 \rangle_+^2}{E_1^0(1-d_1)} + \frac{\langle \sigma_1 \rangle_-^2}{E_1^0} + \frac{\langle \sigma_2 \rangle_+^2}{E_2^0(1-d_2)} + \frac{\langle \sigma_2 \rangle_-^2}{E_2^0} + \frac{\sigma_{12}^2}{G_{12}^0(1-d_{12})} \right] \quad (2)$$

The damage development laws are defined based on experiments and in our case written as follows:

$$\begin{cases} d_{12} = 0, & Y < Y_0 \\ d_{12} = A \ln(\sqrt{Y}) + B, & Y > Y_0 \\ d_2 = b_3 d_{12}, & d_{12} < 1 \end{cases} \quad \begin{cases} Y = b_2 Y_{d2} + Y_{d12} \\ Y_{d_i} = \frac{\partial E_D^{ps}}{\partial d_i} = \frac{\langle \sigma_i \rangle_+^2}{2E_i^0(1-d_i)^2}, & Y_{d12} = \frac{\sigma_{12}^2}{2G_{12}^0(1-d_{12})^2} \end{cases} \quad (3)$$

Here Y is the result of sum of thermodynamic forces Y_{d2} and Y_{d12} that are associated with the internal damage variables. The coupling between the damage and plasticity is taken into account by using the effective stress and strain:

$$\tilde{\sigma}_{12} = \frac{\sigma_{12}}{(1-d_{12})}, \quad \dot{\tilde{\epsilon}}_{12} = \dot{\epsilon}_{12}(1-d_{12}), \quad f(\tilde{\sigma}, \tilde{p}) = \sqrt{\tilde{\sigma}_{12}^2 + (a\tilde{\sigma}_2)^2} - (K\tilde{p}^y + R_0), \quad (4)$$

Here K , R_0 and y represent the shape of the equivalent plastic strain curve.

3. Multi axial loading. Nonlinear behavior under multiaxial loading was analyzed using finite-element model in SAMCEF software. The curves of degradation of elastic moduli are presented on the $\sigma_X - \sigma_Y$ plane which corresponds to plane in 0 and 90 load angles for ± 45 cross-ply laminate (see Fig. 1).

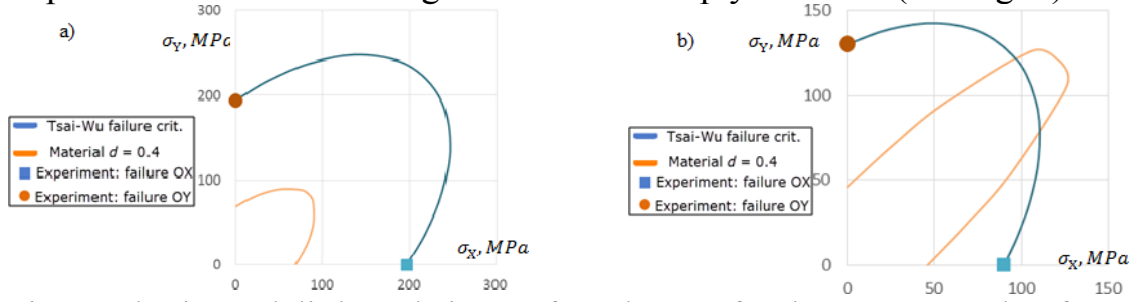


Fig. 1. Elastic moduli degradation surface $d = 0.4$ for the ± 45 cross-ply of composite reinforced by a) glass fibers; b) carbon fibers

Damaged states of material properties under multiaxial loading were analyzed. Sensitivity of the damage model to material constants b_2 and b_3 was studied which lead to development of a simplified experimental method to define these parameters. The focus of future work will be on the composite materials complied of different types of FRCL. Various combinations are going to be analyzed to achieve minimal impact of material damage on strength / stiffness of the multilayered structures under complex loading. The influence of accumulated damage on the fatigue life of FRCL materials is going to be studied to create combined damage/fatigue numerical model.

Reference

1. Ladevèze, P, A damage computational method for composite structures, Computer Structures, 1992.

**ВРЕМЕННЫЕ ЭФФЕКТЫ РАЗРУШЕНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ ПРИ
ДИНАМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ***Евстифеев А.Д.**Санкт-Петербургский государственный университет, Россия**ad.evstifeev@gmail.com***TEMPORARY EFFECTS OF FRACTURE OF SOLIDS UNDER DYNAMIC
IMPACT***Evstifeev A.D.**St. Petersburg State University, Russia*

Представлена методика анализа эффектов динамического разрушения бетонов и горных пород, связанных со сменой преобладания прочностных характеристик в зависимости от материала и внешних условий эксплуатации.

С увеличением числа работ, усиливаются разногласия между группами исследователей как по поводу значений тех или иных характеристик конкретных материалов, так и по поводу качественного характера изменения прочностных свойств. Появляются новые экспериментальные результаты, которые не вписываются в традиционные представления и не описываются известными моделями. Особенно много противоречий возникает относительно поведения материалов в условиях быстро меняющихся характеристик внешнего воздействия. Для решения поставленных задач механики разрушения необходимо иметь простой и понятный критерий разрушения.

В настоящей работе используется вариант критерия разрушения [1-3] представляемый в обобщенном виде следующим условием $\frac{1}{\tau} \int_{t-\tau}^t \left(\frac{\sigma(s)}{\sigma_c} \right)^\alpha ds \leq 1$, где σ - приложенная нагрузка, σ_c - статический предел прочности на растяжение, τ - инкубационное время, связанное с развитием релаксационных процессов в структуре материала, α - безразмерный параметр, отвечающий за чувствительность материала к амплитуде нагружения.

Рассмотрим (рис.1) влияние на прочностные свойства материала уровень влагонасыщенности. Экспериментальные данные приведены в работе [4]. Параметры материала приведены в таблице 1. В статических режимах деформирования не наблюдается кардинальных отличий в физико-механических свойствах исследуемых материалов, при этом в условиях высокоскоростного нагружения проявляются динамические эффекты, связанные с инкубационным временем материала.

Параметры материала. Таблица 1.

	«Бетон 1»	«Бетон 2»	«Бетон 3»
σ_c, MPa	3,3	3,5	3
" τ ", ms	4.9	3.6	2.7
α	8	13	6

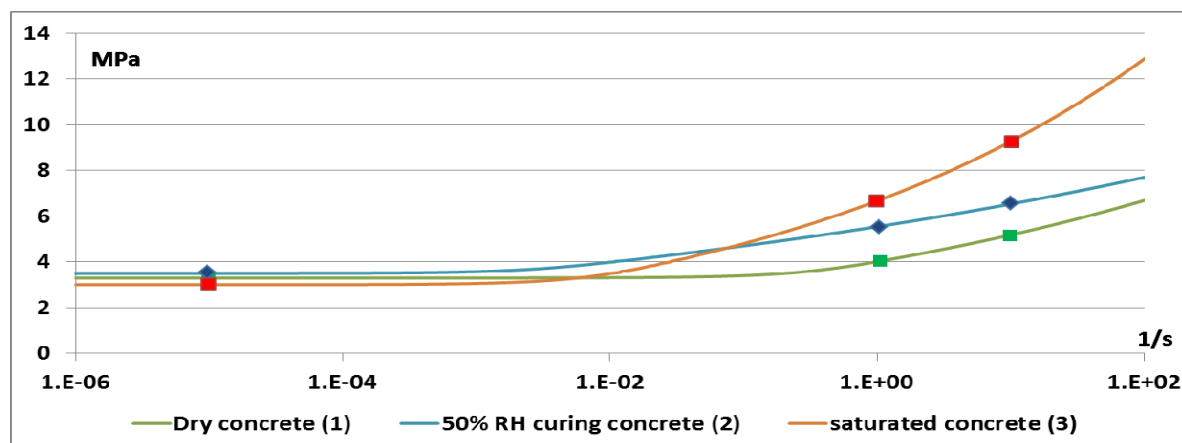


Рис. 1. Особенности прочностных характеристик материала с учетом влагонасыщенности бетона

Проведенный анализ основан на использовании критерия инкубационного времени, который позволяет отделить статическую прочность (прочность материала при квазистатических испытаниях) от динамической (инкубационное время разрушения). Поскольку инкубационное время – параметр материала, не зависящий от способа и истории нагружения, появляется возможность определения прочностных свойств материала в широком диапазоне изменения параметров внешнего воздействия.

Литература

1. Y.V. Petrov, A.A. Utkin // Materials Science 25(2) (1989) 153.
2. Y.V. Petrov, N.F. Morozov // Journal of Applied Mechanics 61 (1994) 710.
3. Y. Petrov, I. Smirnov, A. Evstifeev, N. Selyutina // Frattura ed Integrità Strutturale 24 (2013) 112.
4. E. Cadoni, K. Labibes, C. Albertini, M. Berra, M. // Materials and structures 34 (2001) 21.

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЛАКСАЦИОННЫХ ЯВЛЕНИЙ В ПОЛИМЕТИЛМЕТАКРИЛАТЕ

Ломовской В.А., Жигилий С.В., Жигилий В.С.

Кафедра Прикладной механики и основы конструирования, МИТХТ им М.В.

Ломоносова, Москва, Россия

viktorjig@yandex.ru

THE STUDY OF RELAXATION PHENOMENA IN POLYMETHYLMETHACRYLATE

Lomovskoy V.A., Zhigiliy S.V., Zhigiliy V.S.

*M.V. Lomonosov Moscow State University of Fine Chemical Technology,
Moscow, Russia*

Динамическими методами внешнего деформирующего воздействия получены спектры внутреннего трения непластифицированного и пластифицированного полиметилметакрилата (ПММА). Проведен расчет физико-химических характеристик для каждого из выявленных релаксационных процессов и установлена зависимость этих характеристик от молекулярной массы и от различных доз гамма и нейтронного облучения. Рассмотрены методы анализа и оценки степени микронеоднородности структуры ПММА.

Dynamic methods of external deforming effects of internal friction spectra obtained unplasticized and plasticized polymethylmethacrylate (PMMA). The calculation of the physicochemical characteristics for each of the identified relaxation processes and the dependence of these properties on the molecular weight and of different doses of gamma and neutron radiation. The methods of analysis and assessment microinhomogeneity structure PMMA.

Теоретическим вопросом синтеза новых материалов с заданными свойствами является вопрос о взаимосвязях физико-химических характеристик исследуемых систем с их физико-механическими характеристиками. Это изучение основано на анализе различных характеристик переходных процессов от одного равновесного (или неравновесного) состояния к другому. Характеристики оцениваются по коэффициентам (или по изменению этих коэффициентов) переходных функций, описывающих реакцию системы как на определенные изменения внутри системы, так и на изменение внешних воздействий на эту систему. Наличие переходных процессов от неравновесного к равновесному состоянию неконсервативной системы приводит к термодинамической необратимости данного процесса. Переходные процессы в этом случае представляются как процессы установления термодинамического, а, следовательно, и статистического равновесия в рассматриваемой системе. Следствием этого является диссипация в исследуемой системе части энергии внешнего силового воздействия. Степень диссипации зависит не только от вида воздействия, температуры системы и частоты внешнего воздействия, но и от химического строения и структуры, а, следовательно, физико-химических характеристик данной системы. По интенсивности изменения

коэффициентов переходных функций может быть получена определенная информация о структуре исследуемых систем и установлена основная связь физико-химической механики: «химическое строение системы - реакция этой системы на внешние механические воздействия при различных температурах и частотах». Диссипация части энергии внешнего механического воздействия связана с превращением механической формы энергии в тепловую форму, которая необратимо рассеивается в объеме исследуемой системы.

Исследования релаксационных явлений в полиметилметакрилате (ПММА) различной молекулярной массы (ММ) по спектрам внутреннего трения $\operatorname{tg} \delta = f(T, K)$ или $\lambda = f(T, K)$ выявляет несколько локальных диссипативных максимумов потерь части энергии внешнего деформирующего воздействия. Наиболее интенсивным из всех обнаруженных на этих спектрах релаксационных переходов является α переход, представляющий собой отклик сегментальной структурной подсистемы ПММА на внешнее силовое периодическое воздействие. Наряду с α максимумом на спектре $\lambda = f(T, K)$ (при постоянной частоте деформирования, т.е. $\nu = \text{const}$) для ПММА наблюдается ещё один хорошо выраженный максимум механических потерь. Этот максимум связывается с вращением эфирной группы COOCH_3 относительно оси нормальной к оси главной валентности полимерной цепи и обозначается как γ , процесс. Спектры $\lambda = f(T, K)$ показывают, что γ , пик локальных диссипативных потерь расположен в области стеклообразного состояния ПММА, т.е. $T_{\gamma, \max} < T_{\alpha, \max}$ (где $T_{i, \max}$ температура соответствующего максимума потерь $\lambda_{i, \max}$ на спектре). Кроме того, наблюдается ещё ряд пиков потерь в области хрупкого стеклообразного состояния ПММА ($T_{xp} = 244 \text{ K}$) и в области высокоэластического состояния при температурах $T > T_c$ (где T_c - температура структурного стеклования). Эти процессы при исследованиях механической релаксации имеют малую интенсивность $\lambda_{i, \max}$ относительно α и γ , релаксации и недостаточно изучены.

Изучение влияния различного типа излучений на физико-механические и физико-химические характеристики ПММА различной ММ, показывает, что такие воздействия могут инициировать изменение интенсивностей различных пиков потерь на спектре $\lambda = f(T, K)$. Это вызывается качественными или количественными изменениями в соотношениях вклада структурных подсистем в общий процесс диссипации энергии внешнего воздействия на исследуемую систему. Такое инициирование релаксационных процессов позволяет не только закрыть дискуссионный вопрос о наличии или отсутствии тех или иных малоинтенсивных локальных диссипативных явлений, но и детально их исследовать методами механической релаксации. Рассмотрены вопросы, связанные с теоретическим анализом связи между температурно-частотной зависимостью локальных диссипативных процессов имеющих различную интенсивность, проявляемых на спектрах внутреннего трения в различных температурных областях и химическим строением и

структурой ПММА. Показано, что внешние ионизирующие воздействия (малые дозы облучения) могут активизировать и выявить те диссипативные процессы, которые слабо проявляются при исследованиях реакции структурно-кинетических подсистем, образующих систему ПММА, на внешние динамические воздействия.

Показано, что описание явлений локальной неупругости (вязкоупругости) в различных исследуемых системах с позиций структурного микронеоднородного строения требует определения для каждого релаксационного процесса, обнаруживаемого при реакции структурных элементов данной системы на внешнее воздействие, вида функции релаксации (ядра релаксации) при использовании аппарата Больцмана-Вольтерра.

Разные структурно-кинетические подсистемы, входящие в систему ПММА (например, подсистемы отвечающие за проявление альфа и гамма-эфирный процессы релаксации) описываются различными функциями релаксации, поэтому и для каждого диссипативного процесса требуется своё отдельное описание в рамках непрерывных спектров времен релаксации. В отличие от “чисел Деборы”, с помощью которых в первом приближении возможно описывать процессы структурной релаксации в стеклообразующих системах, частотно-временное соотношение Деборы D является строго фиксированной инвариантной и универсальной величиной, применение которой возможно ко всем процессам механической релаксации как в расплаве, так и стекле.

Частотно-временное соотношение Деборы показывает, что дискретный спектр времен релаксации всей стеклообразующей системы как спектр из совокупности наиболее вероятных времен релаксации каждой структурной подсистемы входящей в систему, не может быть реализован в виде линейчатого спектра на температурных зависимостях физико-химических характеристик.

**ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО
СОСТОЯНИЯ КОМПОЗИТНОЙ ОБОЛОЧКИ С ГЕРМЕТИЧНЫМ
СЛОЕМ ИЗ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Зайцев В.Н., Костриченко А.Б.

*Московский авиационный институт (национальный исследовательский
университет), Россия
vnzaicev@mail.ru*

**INVESTIGATION OF THE STRESS-STRAIN STATE OF COMPOSITE
SHELLS WITH HERMETIZING LAYERS MADE FROM VARIOUS
MATERIALS**

Zaitsev V.N., Kostrichenko A.B.

Moscow Aviation Institute (National Research University), Russia

Исследовано напряженно-деформированное состояние композитной оболочки с герметичным слоем из различных материалов. Оболочка представляла собой цилиндрическую обечайку с эллиптическими днищами, была нагружена продольными силами и внутренним давлением. Аналитическое решение такой конструкции не представляется возможным, поэтому использовался численный метод. Для решения задачи использовался метод конечных элементов. Проведено исследование напряженного и деформированного состояния такой конструкции.

A stress-strain state of a cylindrical composite shell with elliptic bottoms and various sealing layer is studied. The shell is loaded by the longitudinal forces and the internal pressure. The numerical approach based on the finite element method is used to analyze the deformed and stress state of construction.

1. Введение. Особенностью сосудов, работающих длительное время под давлением, является требование сохранения ими герметичности. Используемые способы герметизации композитных конструкций не всегда отвечают этому условию. Так, резиновый слой с течением времени теряет герметизирующие свойства вследствие старения, а слои термопласта можно использовать в сравнительно узком диапазоне температур.

Один из перспективных способов обеспечения герметичности – введение несущего металлического слоя, обладающего малой проницаемостью, стойкостью к агрессивным средам и позволяющего использовать металлическую оболочку в качестве оправки при намотке оболочки. Получаемая комбинированная конструкция, состоящая из внутреннего изотропного слоя и наружного армированного слоя, как правило, оказывается тяжелее баллона из композита, однако обладает по сравнению с последним рядом технологических и эксплуатационных преимуществ.

2. Модель оболочки. Исследуется бак под действием внутреннего давления и комплексной нагрузки со стороны соседних отсеков. Бак представляет собой цилиндрическую обечайку диаметром $D=3,9$ м и длиной $l=1,73$ м с эллиптическими днищами. Одна полуось эллипса равна радиусу

цилиндрической части бака, а другая полуось равна 1,3 м. Объем бака равен 41,3 м³. Конструктивно бак изготовлен из композитного материала с герметичным металлическим слоем. Композитная оболочка, получается путем намотки ленты толщиной 0,8 мм. в несколько слоев под углом $\pm 30^\circ$. Оболочка нагружалась внутренним давлением и продольной силой со стороны переходного отсека и со стороны опорного отсека. Для разных случаев полета она различна по величине и направлению. Моделирование волокнистых композитов усложняется их анизотропией, зависящей от направления волокон, порядка и места их расположения. При моделировании объемных элементов достаточно определить усредненные характеристики материала по всем направлениям. При моделировании двумерных элементов достаточно задаться жесткостными характеристиками в двух направлениях. Напряженное состояние такой оболочки – нельзя считать безмоментным, Модель оболочки строилась численным методом. На оболочку наносилась сетка конечных элементов. Использовался многослойный конечный элемент. По толщине элемент состоял из нескольких слоев. Первый слой этого элемента – изотропен, а остальные ортотропные.

3. Результаты исследования. Рассматриваются различные случаи изготовления баллона.

1. Баллон изготовлен из композитного материала Армос с герметичным алюминиевым слоем.
2. Баллон изготовлен из композитного материала Армос с герметичным титановым слоем.
3. Баллон изготовлен из композитного материала Армос с герметичным стальным слоем.

Задача решалась с помощью программного комплекса NX Nastran 7.5. Определялось напряженное состояние во всех слоях оболочки. Наиболее нагруженным оказался герметичный слой оболочки, изготовленный из стали, но во всех оболочках напряжения по критерию Мизеса превосходили предел текучести и превосходили по величине предел прочности. При уточнении модели (при условии нелинейного деформирования) напряжения в герметичном слое не превышали предела прочности.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (код проекта 15-01-03421_a).

ДИНАМИЧЕСКОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ И РАЗРУШЕНИЕ ТОНКИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОЛЬЦЕВЫХ ОБРАЗЦОВ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНЫМ МЕТОДОМ

Зайченко О.К., Лукин А.А., Морозов В.А.

Санкт-Петербургский государственный университет, Россия

viktor.morozov@math.spbu.ru

Данная работа является продолжением исследований, проводимых Н. Zhang и К. Ravi-Chandar [1, 2] и развитых нами [3, 4] на более широкий диапазон скоростей деформаций. Разработанный и апробированный магнитно-импульсный метод деформирования и разрушения тонких кольцевых металлических образцов основан на силовом взаимодействии токов, протекающих по катушке и по соосно надетому на нее кольцу (закон Ампера). Основной трудностью метода является нахождение тока в кольце. В работе дан анализ уравнений, описывающих электромагнитные колебания в связанных контурах катушки и кольца. На основе анализа вычисляется ток в кольце. Разработаны различные экспериментальные способы его определения, а также нахождения силы Ампера, радиального давления на внутреннюю поверхность кольцевого образца и окружного напряжения. По полученным результатам построены графики зависимости силы, действующей на кольцо, распределенной радиальной нагрузки и окружного напряжения от энергии заряженного конденсатора.

Литература

1. Н. Zhang, К. Ravi-Chandar. On the dynamics of necking and fragmentation – I. Real-time and post-mortem observations in Al 6061-O. Int J Fract (2006) 142:183–217.
2. Н. Zhang, К. Ravi-Chandar. On the dynamics of necking and fragmentation—II. Effect of material properties, geometrical constraints and absolute size. Int J Fract (2008) 150:3–36.
3. В. А. Морозов, Ю. В. Петров, А. А. Лукин, В. М. Кац, А. Г. Удовик, С. А. Атрошенко, Г. Д. Федоровский. Растяжение металлических колец при ударном воздействии магнитно-импульсным методом. ДОКЛАДЫ АКАДЕМИИ НАУК, 2011, том 439, № 6, с. 761–763
4. A.A. Lukin, N.F. Morozov, V.A. Morozov, Yu.V. Petrov. Fracture of metal ring samples caused by magnetic pulse loading in a wide time range of durations. 20th European Conference on Fracture (ECF20). Procedia Materials Science 3 (2014) 686 – 690

УСЛОВИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ РАЗРЫВА ДЛЯ РЕДУЦИРОВАННОЙ СРЕДЫ КОССЕРА

Лалин В.В., Зданчук Е.В.

Санкт-Петербургский Политехнический Университет Петра Великого,

Россия

zelizaveta@yandex.ru

CONDITIONS ON THE SURFACE OF DISCONTINUITY FOR THE REDUCED COSSERAT CONTINUUM

Lalin V.V., Zdanchuk E.V.

Peter the Great St.-Petersburg Polytechnic University, Russia

Рассматривается редуцированная среда Коссера – одна из моделей сплошных сред с микроструктурой. В такой модели каждая частица сплошной среды имеет 6 степеней свободы и отсутствуют моментные напряжения. С помощью теоремы переноса из законов сохранения механики получены уравнения, описывающие условия на поверхности разрыва.

Использование неклассических моделей сплошных сред для описания материалов позволяет учесть их микроструктуру. Одной из таких моделей является редуцированная среда Коссера. В этой среде учет вращательных степеней свободы происходит наравне с трансляционными, тензор напряжений несимметричен. При этом в редуцированной среде Коссера равен нулю тензор моментных напряжений, в отличие от классической среды Коссера, а значит и неизвестных констант в ней меньше, что делает более реальным возможность применения редуцированной среды Коссера на практике. Идея создания такой среды появилась в 1984 году [1] и ее исследованию посвящены работы [2-6].

Ранее в работах [2-6] рассуждения относились к областям, внутри которых все рассматриваемые функции предполагались непрерывными и дифференцируемыми нужное число раз. В данной работе рассматриваются области, в которых есть поверхности, на которых искомые функции могут иметь разрыв. Получению условий на поверхности разрыва и посвящена данная статья.

Рассмотрен произвольный объем, внутри которого существует поверхность, с разных сторон от которой заданы разные параметры состояния среды. Из интегральных законов сохранения для актуальной конфигурации для редуцированной среды Коссера с использованием теоремы переноса для поверхности Γ , движущейся в области V ,

$$\dot{\Phi} = \dot{\Phi}_1 + \dot{\Phi}_2 + \int_{\Gamma} [\phi(\mathbf{v} \cdot \mathbf{n} - u)] d\Gamma, \quad (1)$$

где $\Phi = \int_V \phi dV$, $\Phi_i = \int_{V_i} \phi dV$ ($i = 1, 2$), ϕ - произвольная функция, которая предполагается непрерывной в подобластях V_i , $\mathbf{n}$ -вектор нормали к

поверхности Γ , направленный из объема V_1 , u - скорость движения поверхности разрыва по нормали к Γ , $\mathbf{V}$ – скорость частиц среды, получены условия на поверхности разрыва, которые можно записать следующим образом:

- поток импульса

$$[\rho \mathbf{v}(\mathbf{v} \cdot \mathbf{n} - u) - \mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\tau}] = 0, \quad (2)$$

- поток кинетического момента (момента импульса)

$$[\rho \mathbf{J} \cdot \boldsymbol{\omega}(\mathbf{v} \cdot \mathbf{n} - u)] = 0, \quad (3)$$

- поток энергии

$$\left[\left(\frac{1}{2} \rho \mathbf{v}^2 + \frac{1}{2} \boldsymbol{\omega} \cdot \rho \mathbf{J} \cdot \boldsymbol{\omega} + \rho \Pi \right) (\mathbf{v} \cdot \mathbf{n} - u) - \mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{v} \right] = 0, \quad (4)$$

- поток вещества

$$[\rho(\mathbf{v} \cdot \mathbf{n} - u)] = 0. \quad (5)$$

Здесь квадратные скобки означают скачок величины, заключенной в скобках, $\boldsymbol{\tau}$ - несимметричный тензор напряжений, $\mathbf{J}$ - массовая плотность тензора инерции, $\boldsymbol{\omega}$ - угловая скорость частиц, Π - массовая плотность энергии деформации, ρ - массовая плотность.

Литература

1. Schwartz L.M., Johnson D.L., Feng S. Vibrational modes in granular materials// Physical review letters. 1984. v. 52, №10. pp. 831-834.
2. Grekova E.F., Kulesh M.A., Herman G.C. Waves in linear elastic media with microrotations, part 2: Isotropic reduced Cosserat model// Bulletin of the Seismological Society of America. 2009. 99 (2 B). pp. 1423-1428.
3. Grekova E.F. Nonlinear isotropic elastic reduced Cosserat continuum as a possible model for geomedium and geomaterials. Spherical prestressed state in the semilinear material// Journal of seismology. 2012 . vol 16, issue 4. pp. 695-707.
4. Lalin V., Zdanchuk E. Reduced Cosserat continuum as a possible model for granular medium// Proceedings of the International Conference „Innovative Materials, Structures and Technologies”.2014. Riga.
5. Кулеш М.А., Грекова Е.Ф., Шардаков И.Н. Задача о распространении поверхностной волны в редуцированной среде Коссера// Акустический журнал. 2009.Т. 55, №2. С. 216-225.
6. Lalin V., Zdanchuk E. Nonlinear thermodynamic model for reduced Cosserat continuum// International Journal of Mathematical Models and Methods in Applied Sciences.2014. V. 8. Pp 208-213

ПОСТРОЕНИЕ КРИТЕРИЯ АДАПТАЦИИ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ СЕТКИ

Инфлянскас В.В., Бакулин В.Н.

*Институт прикладной механики Российской академии наук, Москва, Россия
vbak@yandex.ru*

CONSTRUCTION OF THE CRITERION OF ADAPTATION OF FINITE ELEMENT MESH

Inflianskas V.V., Bakulin V.N.

*Institute of applied mechanics of Russian Academy of Science,
Moscow, Russia*

Рассматривается задача построения критерия адаптации конечно-элементной сетки, то есть нахождения такой ее плотности, при которой обеспечивается приемлемая точность расчета.

The problem of constructing a criterion of adaptation of the finite element mesh is being considered, i.e., finding a density, which provides an acceptable accuracy of calculations.

1. Введение. При решении задач механики деформируемого твердого тела методом конечных элементов дискретизация расчетной области производится путем построения конечно-элементной сетки. Типичным в конструкциях является наличие локальных концентраторов, вызывающих большие градиенты напряжений, вызывающих необходимость уплотнения сетки [1].

2. Постановка и решение задачи. Сходимость метода конечных элементов к предельному решению в пространстве L_2 обоснована в [2]. Зависимости погрешности от шага сетки h для наиболее распространенного случая кусочно-линейной аппроксимации перемещения u^h , данные в виде неравенств [2]

$$\|u - u^h\| \leq ch^2 \|u''\| \leq ch^2 \|F\|$$

Для напряжений, являющихся линейными комбинациями производных от перемещений, погрешность имеет вид

$$\|\sigma - \sigma^h\| \leq c'h \|F\|$$

Здесь c, c' - некоторые неизвестные постоянные.

Получение сколь угодно уточненного решения связано с уплотнением сетки, что приводит к повышению порядка системы линейных алгебраических уравнений и соответствующему росту вычислительной погрешности. Поэтому уплотнение сетки производят лишь в областях концентрации напряжений. При этом возникает задача построения критерия

адаптации сетки, то есть нахождения такой ее плотности, при которой обеспечивается приемлемая точность расчета. Если не применять вытянутые элементы и соблюдать подобие элементов и кратность масштаба при измельчении разбиения [3, 4], то обычно получается монотонно растущая зависимость напряжений от плотности сетки – величины, обратной шагу

$$t \sim \frac{1}{h}.$$

Для построения критерия адаптации применим Δ^2 - преобразование Эйткена [5-7], представляющее собой нелинейное преобразование последовательности, как правило, используемое повторно в режиме итераций.

Доказано [6-8], что при сходимости последовательности не хуже некоторой сходящейся геометрической прогрессии преобразование Эйткена сходится к тому же пределу и улучшает сходимость, что и позволяет экстраполировать предел.

Работа выполняется при финансовой поддержке Российского Фонда фундаментальных исследований (грант № 15-08-99591).

Литература

1. Бакулин В.Н., Рассоха А.А. Метод конечных элементов и голографическая интерферометрия в механике композитов. М. Машиностроение, 1987. - 312с.
2. Стренг Г., Фикс Дж. Теория метода конечных элементов. М.: Мир, 1977, 349 с.
3. Бакулин В.Н., Инфлянский В.В. Оценка локальных параметров сетки в конечно-элементных задачах. // Вычисл. мех. сплошных сред. – 2013. – Т. 6, № 1. – с. 70-77.
4. Бакулин В.Н., Инфлянский В.В. Алгоритм оценки сходимости решения в конечно-элементных задачах// Вестник Московского авиационного института, -2009, т.16, №6 с. 263- 268
5. Aitken A.C., On Bernoulli's numerical solution of algebraic equations, Proc. Roy. Soc. Edinburgh Ser. A 46(1926), 289–305.
6. Крылов В.И., Бобков В.В., Монастырный П.И. Вычислительные методы, т.2. М.: Наука, 1977, 400 с.
7. Henrici P., Elements of numerical analysis, John Wiley and Sons, New York, 1964, 336 p.
8. Lubkin S., A method of summing infinite series, J. Res. Nat. Bur. Stand. 48(1952), 228–254.

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ГРАНИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ К РЕШЕНИЮ
ЗАДАЧ ДИНАМИКИ В ПОРОВАЗКОУПРУГОЙ ПОСТАНОВКЕ**

Игумнов Л.А., Ипатов А.А., Белов А.А., Литвинчук С.Ю.

*Научно-исследовательский институт механики Нижегородского
университета им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия
SanSan.com@inbox.ru*

**BOUNDARY ELEMENT METHOD IN SOLVING DYNAMIC PROBLEMS
IN POROVISCOELASTIC FORMULATION**

Igumnov L.A., Ipatov A.A., Belov A.A., Litvinchuk S.Yu.

*Research Institute for Mechanics, Lobachevsky State University of Nizhni
Novgorod, Nizhny Novgorod, Russia*

Рассматриваются краевые задачи линейной трехмерной динамической теории поровязкоупругости. Базовые уравнения насыщенной пористой среды, предложенные Био, модифицированы с помощью применения принципа соответствия к упругому скелету. Для описания вязкоупругих свойств используются следующие модели: модель стандартного вязкоупругого тела и модель со слабосингулярным ядром. Применяется метод граничных интегральных уравнений (ГИУ) и метод граничных элементов (МГЭ) с согласованной дискретизацией для получения численных решений. Решение задачи производится в пространстве Лапласа. Модифицированный алгоритм Дурбина численного обращения преобразования Лапласа используется для получения решения в явном времени. Исследуется влияние параметров моделей вязкоупругости, а так же коэффициента проницаемости на динамические отклики среды.

Boundary-value problem of three-dimensional poroviscoelasticity is considered. The basic equations for fluid-saturated porous media proposed by Biot are modified by applying elastic-viscoelastic principle to classical linear elastic model of the solid skeleton. To describe viscoelastic properties of the solid skeleton various viscoelastic models are used, such as standard linear solid model and model with weakly singular kernel. Boundary Integral Equations (BIE) method and Boundary-Element Method (BEM) with mixed discretization are applied to obtain numerical results. Solutions are obtained in Laplace domain. Modified Durbin's algorithm of numerical inversion of Laplace transform is used to perform solutions in time domain. An influence of viscoelastic parameter and permeability coefficient on dynamic responses is studied.

1. Введение. Исследование волновых процессов в дисперсных средах представляет широкий научный и практический интерес. К таким средам относятся вязкоупругие, пороупругие и поровязкоупругие материалы. В исследованиях применяется модель Био пороупругой среды [1]. Теория Био является расширением классической теории упругости на случай двухфазной среды. Классическая теория вязкоупругости широко представлена в литературе [2, 3]. Рассматриваемая поровязкоупругая модель является комбинацией пороупругой модели и модели вязкоупругой среды, примененной к упругому скелету [4].

2. Гранично-элементная методика. Ядра ГИУ допускают выделение

особенностей [4]. Численная схема основана на использовании формулы Грина-Бетти-Сомильяны. Чтобы ввести ГЭ-дискретизацию, рассматривается регуляризованное гранично-интегральное уравнение [5]. Поверхность тела разбивается на граничные элементы. В качестве функций формы выбраны квадратичные полиномы интерполяции. Неизвестные граничные поля интегрируются через узловые значения в интерполяционных узлах. При поэлементном численном интегрировании используется метод Гаусса и иерархический алгоритм интегрирования. Гранично-элементные схемы созданы на основе согласованной аппроксимации граничных функций и модификаций метода Дурбина численного обращения преобразования Лапласа. Для получения дискретного аналога ГИУ применяется метод коллокации.

3. Численные эксперименты. Получены гранично-элементные решения следующих задач: о действии торцевой силы на призматическое поровязкоупругое тело, о действии вертикальной силы в виде функции Хэвисайда на поровязкоупругое полупространство. В качестве пористого материала рассматривается песчаник Berea [4], насыщенный водой. Продемонстрировано влияние параметров моделей вязкоупругости на динамические отклики [6], в том числе и при различных значениях коэффициента проницаемости поровязкоупругой среды.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 14-08-00811-а 15-08-02814, 15-08-02817, 15-48-02333).

Литература

1. Biot M.A. // J. Appl. Phys. 27(5). 1956. P.459–467
2. Кристенсен Р. Введение в теорию вязкоупругости // М.: Мир, 1974. 338 с.
3. Угодчиков А.Г., Хуторянский Н.М. Метод граничных элементов в механике деформируемого твердого тела // Казань: Изд-во КГУ, 1986. 296 с.
4. Schanz M. Wave Propagation in Viscoelastic and Poroelastic Continua. Berlin Springer, 2001. 170 p.
5. Баженов В.Г., Игумнов Л.А. Методы граничных интегральных уравнений и граничных элементов в решении задач трехмерной динамической теории упругости с сопряженными полями. М.: Физматлит, 2008. 352 с.
6. Игумнов Л.А., Ипатов А.А., Сабаева Т.А. // Проблемы прочности и пластичности. Межвуз. сб. Нижний Новгород: Изд-во ННГУ. 2014. Вып. 76 (2). С. 106-113.

РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ МНОГООБЛОЧНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ АЭРОДИНАМИКИ ВЫСОТНЫХ СООРУЖЕНИЙ С УЧЕТОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С ВИХРЕВЫМИ ВОЗМУЩЕНИЯМИ

Исаев С.А.¹, Ватин Н.И.², Miau Jiun-Jih³, Лебига В.А.⁴

*1 - Санкт-Петербургский государственный университет гражданской
авиации*

2 - Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

3 - National Cheng Kung University

*4 - Институт теоретической и прикладной механики СО РАН
isaev3612@yandex.ru*

Комплексные расчетно-экспериментальные исследования по архитектурно-строительной аэродинамике высотных энергоэффективных зданий выполняются в международной кооперации научными коллективами Москвы, Санкт-Петербурга, Новосибирска (все Россия) и Тайнаня (Тайвань). Значительное внимание уделяется трубному эксперименту в Институте механики МГУ (рис.1,*a*), ИТПМ СО РАН и NCKU. Инициирован ряд проектов по разработке программного обеспечения под кластерные платформы на основе многоблочных вычислительных технологий и мезомасштабных моделей аэродинамики окружающей среды [1,2]. Проведены исследования аэродинамики ансамблей высотных сооружений (Рис.1,*b,c*). Акцент делается на влиянии рельефа местности [3], при этом используется задел по аэрогидромеханике и теплообмену поверхностей с дискретной шероховатостью, в частности лунками. Решаются задачи снижения аэродинамического сопротивления строительных сооружений и отбора ветровой энергии [4]. Акцент в данном исследовании делается на сравнительном анализе различных версий MSST [5] в приложении к периодическому обтеканию полукругового цилиндра [6] и к учету влияния на силовые характеристики вихревых возмущений, взаимодействующих с конструкциями.

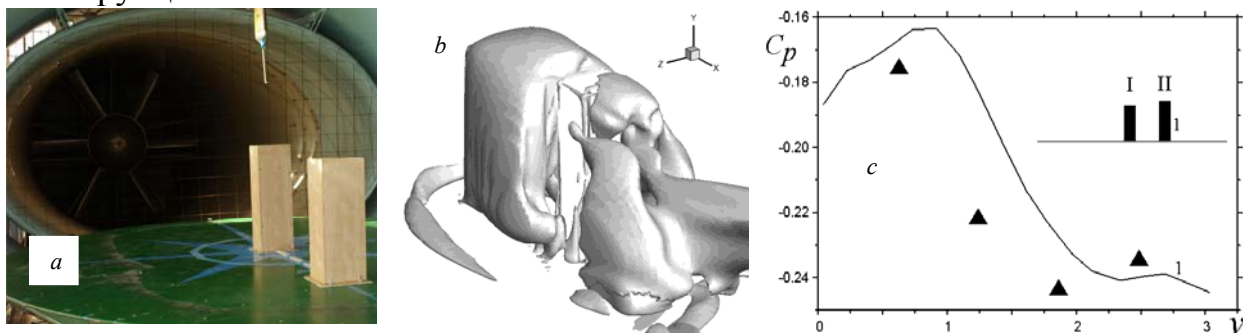


Рис. 1. Модель строительного ансамбля в аэродинамической трубе (*a*), срыв вихревой пелены при обтекании тандема зданий (*b*) и сравнение расчетных и экспериментальных C_p на тыльной стороне второго здания (*c*).

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты 14-01-00043 и 14-08-92002).

Литература

1. Губернюк С.В., Егорычев О.О., Исаев С.А., Корнев Н.В., Поддаева О.И. Численное и физическое моделирование ветрового воздействия на группу высотных зданий // Научно-технический журнал. Вестник МГСУ. 2011. Т.1. №3. С.185-191.
2. Isaev S. A., Baranov P. A., Zhukova Yu. V., Tereshkin A. A., Usachov A. E. Simulation of the wind effect on an ensemble of high-rise buildings by means of multiblock computational technologies // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2014. Vol. 87, Issue 1. P. 112-123.
3. Isaev S.A., Vatin N.I., Lebiga V.A., Zinoviev V.N., Chang Keh-Chin, Miao Jiun-Jih. Problems and methods of numerical and experimental investigation of aerodynamics for high rise constructions in the coastal region "sea-land" // Magazine of Civil Engineering. 2013. No.2. P.54-61.
4. Vatin N., Isaev S., Guvernyik S., Gagarin V., Basok B., Zhukova J. Architectural building aerodynamics of tall structures with the bleeding effect and wind energy selection // Proceeding of International Conference "Innovative Materials, Structures and Technologies". Riga, November 8, 2013. RTU Press. Riga-2014. P.193-197.
5. Isaev S.A., Baranov P.A., Zhukova Yu.V., Usachov A.E., Kharchenko V.B. Correction of the shear-stress-transfer model with account of the curvature of streamlines in calculating separated flows of an incompressible viscous fluid // J. of Engineering Physics and Thermophysics. 2014. Vol.87. Issue 4. P.1002-1015.
6. Isaev S.A., Miao J.-J., Sudakov A.G., and Usachov A.E. Analysis of extremal lift behavior of a semicircular airfoil in a turbulent airfoil at a near-zero angle of attack // Technical Letters. 2015. Vol. 41. No.8. P.737-739.

О ВЫЧИСЛЕНИИ ЧАСТОТ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ СЖАТЫХ СТЕРЖНЕЙ ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Каган-Розенцвейг Л.М.

Санкт-Петербургский архитектурно-строительный университет, Россия
Kagan_R@mail.ru

В задачах, требующих повышенной точности вычисления собственных частот (например, в неконсервативных задачах упругой устойчивости) применение метода Бубнова-Галеркина при большом числе базисных функций может приводить к системам линейных уравнений с плохо обусловленной матрицей[1].

Ниже предлагается способ построения уточненных базисных функций, существенно повышающий точность результатов без увеличения числа функций. В качестве примера рассмотрена консоль переменного сечения. Вычислены частоты ненагруженной консоли и критическая сила консоли, сжатой следящей силой.

Рассматривается консоль с переменными по длине жесткостью EI и погонной массой m , сжатая приложенной к торцу силой P . Характеристический показатель $\lambda = i\omega$ (ω – собственная частота) определяет главное колебание консоли. Силы инерции, связанные с поворотом поперечных сечений, считаются пренебрежимо малыми.

Обычно характеристические показатели λ стержня переменного сечения вычисляются методом Бубнова-Галеркина. Используется дифференциальное уравнение изгиба четвертого порядка:

$$(EI w'')'' + P w'' = \lambda^2 m w \quad (1)$$

Прогиб w представляется линейной комбинацией n базисных функций w_i , которые подчиняются кинематическим и силовым граничным условиям (для консоли имеем четыре условия):

$$w = \sum_{i=1}^n a_i w_i \quad (2)$$

Уравнение (2) подставляется в (1), результат последовательно умножается на функции w_i и интегрируется вдоль стержня. Характеристические показатели λ вычисляются как корни определителя получившейся системы линейных уравнений относительно коэффициентов a_i .

Когда число базисных функций $n > 10$, матрица системы может быть плохо обусловленной.

Ниже используется уравнение изгиба второго порядка, записанное через изгибающий момент M в поперечном сечении [2]:

$$M'' + \frac{P}{EI} M = -q \quad (3)$$

Здесь интенсивность q распределенной силы инерции пропорциональна прогибу w стержня:

$$q = -m \ddot{w} = -\lambda^2 m w$$

Связь величин q и w позволяет подчинить базисные функции M_i , соответствующие моменту M , не двум, а четырем граничным условиям. Функции w_i , отвечающие прогибу w , строятся по функциям M_i на основе дифференциальных уравнений изгиба

$$w'' = -M / EI$$

с учетом двух геометрических граничных условий.

Получающаяся система базисных функций названа уточненной, поскольку помимо силовых и кинематических граничных условий частично учитывает связи, накладываемые дифференциальным уравнением изгиба.

Эффективность предлагаемой системы функций демонстрируется на примерах.

Литература

1. Темис Ю. М., Федоров И. М. Сравнение методов анализа устойчивости стержней переменного сечения при неконсервативном нагружении // Проблемы прочности и пластичности. 2006. Вып. 68. С. 95–105.
2. Ржаницын А. Р. Устойчивость равновесия упругих систем. М.: Изд-во Гостехиздат. 1955. 475 с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАОТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ ДЛЯ ОДНОМЕРНОЙ ДИНАМИКИ С СУХИМ ТРЕНИЕМ

Кадашев Ю.И.¹, Крыжев С.Г.², Помяткин С.П.³

*1 - Санкт-Петербургский государственный технологический
университет растительных полимеров*

2 - Университет Техаса в Даласе

*3 - Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения
kadashevich-yulij@yandex.ru*

Рассматривается разрывное одномерное отображение, моделирующее динамическую систему с сухим трением. С физической точки зрения, рассматриваемая система соответствует процессу ударного бурения. Предлагается метод, позволяющий находить точки разрыва этого неявно заданного отображения (обозначим его символом T). Для отрезков, на которых отображение T непрерывно, исследуется соответствующий коэффициент растяжения. Полученные методы позволяют вычислять периодические точки рассматриваемого отображения и находить соответствующие инвариантные меры (в частности, определять хаотические режимы). Аналогичные идеи могут быть применены для изучения динамических систем, заданных кусочно-непрерывными отображениями, возникающих при изучении виброударных систем, движений частиц в неоднородных средах и в других областях механики.

1. В статье Кривцова и Верчигроха [1] рассматривалась простейшая модель

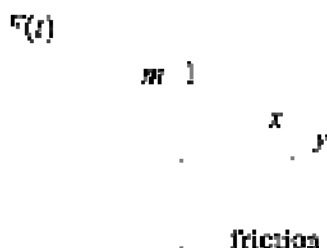


Рис 1. Рассматриваемая механическая система.

процесса ударного бурения (Рис.1), состоящая из массы, движущейся под действием внешней силы, имеющая постоянную и гармоническую составляющие, и слайдера, дающего при взаимодействии с массой кулоново трение. У рассматриваемой системы имеется три режима динамики: а) бесконтактный режим, когда слайдер неподвижен, а масса движется только

под воздействием внешней силы;

б) режим покоя, когда масса и слайдер находятся рядом и неподвижны;
в) режим движения с контактом, когда масса и слайдер движутся одновременно, причем действие ослабляется постоянным трением. Все эти три режима описываются легко интегрируемыми дифференциальными уравнениями. В целом, система моделируется дифференциальными уравнениями с кусочно-гладкими (филипповскими) правыми частями [2].

2. В нашей работе изучается получившаяся филипповская система. Описываются сценарии поведения решений (в каком порядке меняются режимы). Выясняется, что при выполнении определенных условий на параметры системы ни один из описанных выше режимов не является «вечным». При любых начальных значениях переменных рассматриваемой системы, существует последовательность отрезков времени, уходящих на бесконечность и соответствующих бесконтактному режиму соответствующего решения. Более того, каждый момент перехода к бесконтактному режиму однозначно определяет следующий момент (здесь удобнее говорить не о моментах времени, а о фазах по отношению к периоду внешней силы). Рассматривается соответствующее разрывное отображение. Используя методы одномерной динамики, удастся привести условия, при выполнении которых рассматриваемая система полусопряжена с так называемой символической динамикой (иными словами, хаотична). В этом случае можно вычислить соответствующую инвариантную меру (SRB - меру).

Изучаются также и те значения параметров, при которых указанные выше утверждения не выполняются. В этом случае, приводятся достаточные условия наличия устойчивых в целом периодических движений рассматриваемой системы. Изучаемые периодические колебания системы, возникающие хаотические инвариантные множества и инвариантные меры могут быть найдены численно.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ, грант 14-01-00202, гранта СПбГУ 6.38.223.2014, а также при поддержке Программы Фулбрайта.

Литература

1. Krivtsov A.M., Wiercigroch M. Dry Friction Model of Percussive Drilling // Meccanica. 1999. Vol.34. P. 425-434.
2. Филиппов А.Ф. Дифференциальные уравнения с разрывной правой частью. М.: Наука, 1985. 216с.

**ДИНАМИКА СИСТЕМЫ «ВАНТОВЫЙ МОСТ + РЕГУЛЯРНАЯ
КОЛОННА ГРУЗОВЫХ АВТОМОБИЛЕЙ»**

Кадисов Г.М.

Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия, Россия

kadisov@rambler.ru

DYNAMICS OF SYSTEMS

"CABLE-STAYED BRIDGE + REGULAR COLUMN OF TRUCKS"

G.M. Kadisov

Siberian State Automobile and Highway Akademy, Russia

Колебания вантового моста, представленного складкой с абсолютно жесткими поперечными диафрагмами, пилоном и вантами, совместно с регулярной колонной грузовых автомобилей получены численным решением системы интегральных уравнений Вольтерра первого рода. Представлены графики максимальных прогибов в заданных сечениях складки в зависимости от параметров вязкоупругости складки и скорости движения колонны.

1. Введение. Пространственные колебания разрезных и неразрезных балочных пролетных строений мостов при движении по ним с постоянной скоростью или одного автомобиля или регулярной колонны грузовых автомобилей изложены в [1]. В случае регулярной колонны автомобилей наибольший динамический эффект проявляется при скорости, обеспечивающей продвижение колонны на один шаг регулярности за один период свободных колебаний пролетного строения.

2. Основная часть. Решена задача о пространственных колебаниях вантового моста при движении с постоянной скоростью регулярной колонны грузовых двухосных автомобилей. Каждый автомобиль имеет 7 степеней свободы, включая кузов с тремя степенями свободы (вертикальное перемещение центра тяжести и два угловых относительно продольной и поперечной горизонтальных осей) и четыре колеса (с одной степенью свободы по вертикали каждый). Вантовый мост представлен пролетным строением в виде складчатой системы, одним пилоном и веером вант. Складчатая система снабжена абсолютно жесткими поперечными диафрагмами в местах прикрепления к вантам.

Для определения собственных частот и собственных форм вантового моста уравнения равновесия складки, пилон, диафрагм и уравнения совместности преобразованы к двум однородным матричным уравнениям относительно неизвестных усилий в вантах и сил взаимодействия складки и диафрагм. Полюсы определителя однородной системы соответствуют собственным числам раздельных складки и пилон, а нули – собственным числам всей конструкции. Для каждого вычисленного собственного числа формируется соответствующий нормированный собственный вектор вантового моста, состоящий из подвекторов складки и пилон.

Неоднородная система интегральных уравнений Вольтерра первого рода, описывающая колебания вантового моста совместно с регулярной колонной автомобилей, движущихся с постоянной скоростью и находящихся в данный момент на пролетном строении, преобразована в систему двух матричных интегральных уравнений, в результате решения которой получаем для каждого фиксированного момента времени значения усилий в рессорах и шинах каждого активного автомобиля, а затем – коэффициенты разложения узловых линий складки по собственным формам, что позволяет для конкретного момента времени получить эпюру перемещений узловых линий складки или, например, график изменения во времени перемещений группы точек характерного ее поперечного сечения.

3. Пример. Неразрезная стальная складка с пролетами 96 м. и 48 м., шириной 12 м. с шестью ребрами жесткости ($E=2.06e+08$ КПа, $\rho=7.85$ т/м³). Толщина листов 0.035 м. Поперечные диафрагмы расположены в местах прикрепления вант с шагом 24 м. Площадь сечения каждой ванты – 0.09 м³, $E=1.95e+08$ КПа. Пилон высотой 48 м. из железобетона ($E=3.07e+07$ КПа, $A=6.25$ м², $J_x=5.875$ м⁴, $J_y=11.75$ м⁴, $\rho=2.45$ т/м³).

Расчетом получены собственные формы вантового моста. Первая собственная частота $\omega_1 = 1,31188$ рад/сек. При скорости v^* один автомобиль успевает преодолеть за половину основного периода свободных колебаний вантового моста расстояние, равное длине пролетного строения.

Колонна состоит из 21-го одинакового грузового автомобиля с параметрами, как в [1, с.165], и движется вдоль узловых линий 2 и 3 с «шагом» 18 м. При скорости $v^{**} = 0.125v^*$ колонна продвигается на шаг регулярности за половину основного периода свободных колебаний. На рис.1 показаны графики максимальных прогибов точек, расположенных на узловых линиях 2 и 3 в среднем поперечном сечении складки (балки жесткости), в зависимости от параметра $32v/v^{**}$. Когда первый автомобиль еще не достиг конца пролетного строения, соответствуют графики 3 и 4, На следующем этапе движения – графики 1 и 2. Графики 1 и 3 рассчитаны при логарифмическом декременте, равном 0.01, графики 2 и 4 – 0.16.

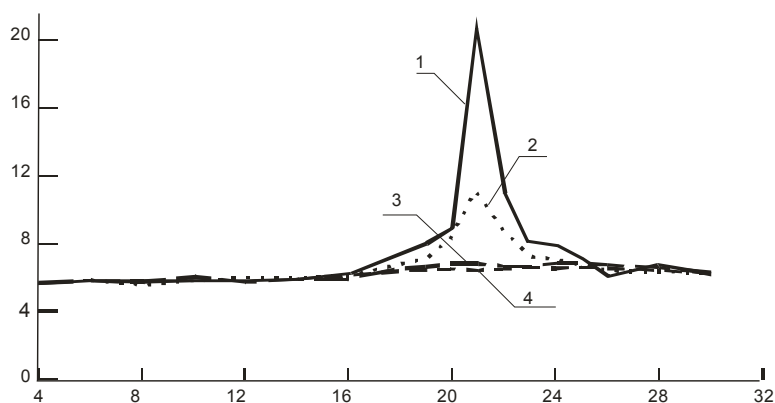


Рис.1. Максимальные прогибы (мм) в среднем сечении складки в зависимости от параметра скорости колонны.

жесткости), в зависимости от параметра $32v/v^{**}$. Когда первый автомобиль еще не достиг конца пролетного строения, соответствуют графики 3 и 4, На следующем этапе движения – графики 1 и 2. Графики 1 и 3 рассчитаны при логарифмическом декременте, равном 0.01, графики 2 и 4 – 0.16.

Литература

1. Кадисов Г.М. Динамика и устойчивость сооружений: учебное пособие. – 2-е изд. – М. : Изд-во АСВ, 2007. – 272 с.

ВРАЩЕНИЕ УПРУГОГО ВАЛА В ЖЕСТКОЙ ТРУБКЕ

*Калашиников С.В., Елисеев В.В., Беляев А.К.**Санкт-Петербургский Политехнический Университет Петра Великого,**Санкт-Петербург, Россия**kalash27@mail.ru*

ROTATION OF ELASTIC SHAFT IN RIGID CHANNEL

*S.V. Kalashnikov, V.V. Eliseev, A.K. Belyaev**Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russia*

Представлены уравнения и численные методы для анализа динамики и устойчивости вращения упругого вала в жестком канале. Вал рассматривается как стержень Коссера в самой общей постановке с произвольной зависимостью свойств от координаты. При квазистатическом рассмотрении при некотором сочетании параметров возникают перескоки из одной конфигурации стержня в другую. Динамическая постановка показала, что вместо квазистатического перескока на первом этапе вращения вала наблюдается плавное проворачивание, резко переходящее в интенсивные колебания, продолжительное действие которых способно привести к усталостному разрушению вала.

The paper is concerned with equations and numerical methods for calculation of the flexible shaft's rotation in a rigid tube. In the very general statement the shaft represented as a Cosserat rod with arbitrary dependence of properties on the coordinate. In the framework of quasi-static consideration the jumps are shown to occur for some combination of parameters. The dynamic formulation shows that instead of quasi-static jumps the initial stage of rotation is a smooth rotation which jumps are abruptly replaced by intensive vibrations. Its lasting effect can lead to fatigue and failure.

Рассматривается задача о передаче вращения посредством гибкого вала. Искривленный упругий стержень вставлен в жесткий канал и приводится во вращение на одном конце. Даже при идеально гладкой внутренней поверхности канала вращение вала оказывается резко неравномерным.

Вал рассматривается как стержень Коссера без растяжения и поперечного сдвига

$$\mathbf{Q}' + \mathbf{q} = \rho \ddot{\mathbf{r}}, \mathbf{M}' + \mathbf{r}' \times \mathbf{Q} + \mathbf{m} = (\mathbf{I} \cdot \boldsymbol{\omega})',$$

$$\mathbf{k} = \boldsymbol{\Omega} - \mathbf{P} \cdot \boldsymbol{\Omega}_0 = \mathbf{a}^{-1} \cdot \mathbf{M}, \boldsymbol{\gamma} = \mathbf{r}' - \mathbf{P} \cdot \mathbf{r}'_0 = \mathbf{b}^{-1} \cdot \mathbf{Q} \equiv 0 \quad (1)$$

Уравнение, описывающее изгиб и кручение вала (проекция уравнения моментов на касательную к стержню ось):

$$a_3 \theta'' - I \ddot{\theta} = g(s, \theta, t) \equiv -a_3 (T - T_0 - \theta'_0)' +$$

$$+ k^2 \frac{a_1 - a_2}{2} \sin 2\theta - k k_0 [a_1 \cos \theta \sin \theta_0 - a_2 \sin \theta \cos \theta_0] - m_3. \quad (2)$$

Данное уравнение является волновым с нелинейным слагаемым в правой части. Для гладкой трубки $m_3 = 0$, и явной зависимости от времени нет.

Граничные условия при заданных «входном» повороте и «выходном» моменте:

$$\theta(0, t) = \Theta_0(t), M_3(l, t) = M_l(t) \Rightarrow \theta' = \theta'_0 + T_0 - T + M_l/a_3. \quad (3)$$

Начальная скорость нулевая, начальная конфигурация определяется из соответствующей статической задачи о стержне со свободными концами, находящемся в канале. Обозначив решение исходной статической задачи $\theta^*(s)$, придем к начальным условиям $\theta(s, 0) = \theta^*(s)$, $\dot{\theta}(s, 0) = 0$.

Ввиду осевой симметрии сечения $a_1 = a_2 = a$ и $\theta_0(s) = 0$. Уравнение (2) упрощается:

$$a_3\theta'' - I\ddot{\theta} = kk_0a_2 \sin \theta - a_3(T' - T'_0) \equiv f(s, \theta). \quad (4)$$

В случае медленного вращения без кручения и моментной нагрузки имеем квазистатическую постановку и обыкновенное дифференциальное уравнение :

$$a_3\theta'' = kk_0a_2 \sin \theta, \theta(0) = \Theta_0, \theta'(l) = 0. \quad (5)$$

На рис. 1 представлены результаты расчета зависимости выходного угла Θ_l от входного Θ_0 для стальной трубы длиной 1 км с внешним диаметром 10,16 см и толщиной стенки 1 см (характерные параметры буровой трубы). Рис. 1,а соответствует значениям кривизны $k = \pi/5000, k_0 = \pi/3000$ (м^{-1}) (дуги окружностей с углами $\pi/5, \pi/3$). В этом случае вращение передается почти равномерно. На рис. 1,б представлен случай увеличенных значений $k = \pi/2500, k_0 = \pi/1500$; при этом вращение резко неравномерное, с перескоками

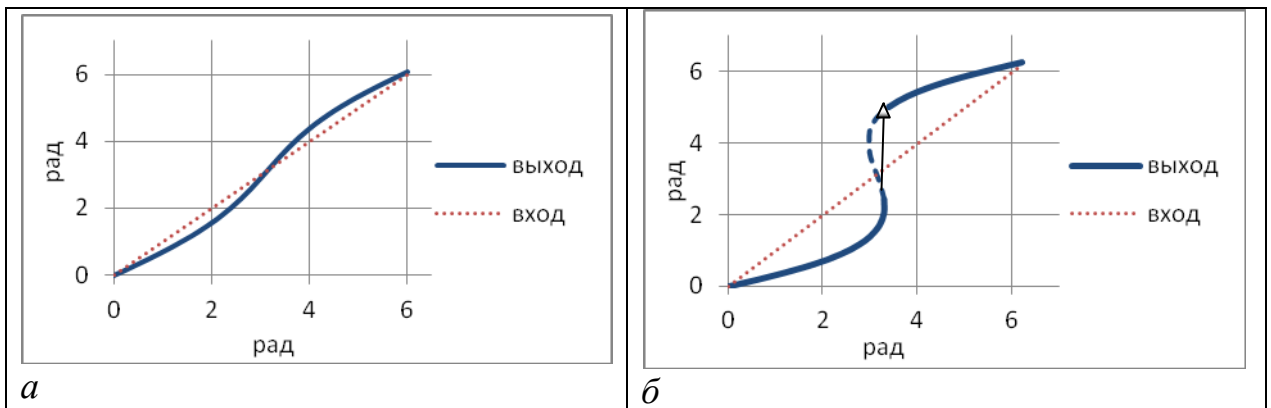


Рис. 1. Зависимость выходного угла от входного: а – без перескоков (малые или докритические) кривизны; б – с перескоками (большие или закритические кривизны)

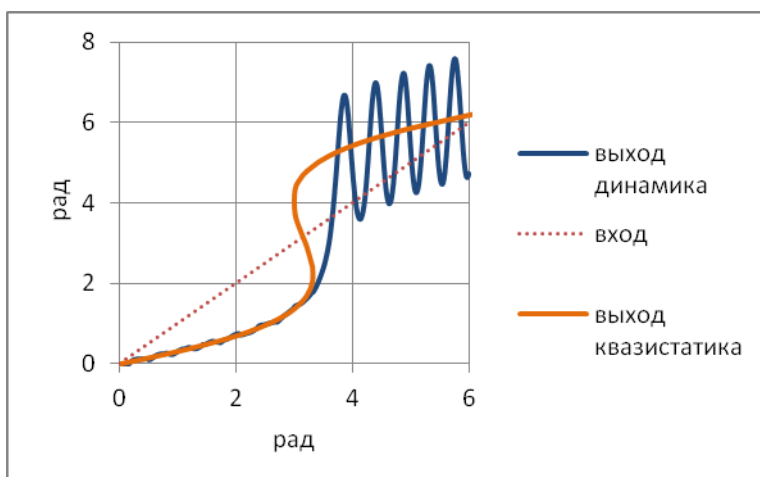


Рис. 2 Динамический аналог перескока

На рис. 2 представлены результаты расчета трубы с теми же параметрами, что и в случае рис.1,б, но уже в динамической постановке. Решение производилось при помощи дифференциально-разностного метода. Таким образом, перескоки, возникавшие в квазистатике, хорошо объясняются с помощью решения динамической задачи. В результате при равномерном вращении входного конца вала возникают интенсивные высокочастотные колебания на выходном конце.

ВЫЧИСЛЕНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ ПОЛЗУЧЕСТИ ГРУНТОВ ПО НАСЛЕДСТВЕННОЙ ТЕОРИИ ПРИ ПОСТОЯННЫХ И ЦИКЛИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ

Каюмов Р.А., Шакирзянов Ф.Р.

*Казанский государственный архитектурно-строительный университет,
Россия
farit.shakir@gmail.com*

CALCULATION OF CREEP DEFORMATION OF SOILS BY HEREDITARY THEORY IN CONSTANT AND CYCLIC LOADING

Kayumov R.A., Shakirzyanov F.R.

Kazan State University of architecture and engineering, Russia

Рассматривается численный метод расчета деформаций ползучести грунтов по наследственной теории с помощью аппроксимации напряжений в нескольких точках. Проводятся численные эксперименты и оценивается сходимость приближенного метода к аналитическому решению при постоянных и переменных нагрузках. Решается модельная задача определения осадки. Разработанная методика обобщается на случай циклических нагрузок.

1. Введение. При расчете осадки системы конструкция-грунт при длительных и переменных нагрузках широкое распространение получили модели, учитывающие деформации ползучести. Наиболее популярным считается вязко-упруго-пластическая модель. Однако эта модель при определении осадки методом конечных элементов требует больших вычислительных ресурсов. Поэтому в работе предлагается упрощенная методика расчета.

2. Основные соотношения. Связь между деформациями и перемещениями считается линейной, используются соотношения Коши. Для оценки прочности конструкции используется критерий Мизеса, а в качестве критерия прочности грунта принимается критерий Друккера-Прагера [1], записываемый в форме:

$$F = \alpha J_1 + \sqrt{J_2} - K = 0. \quad (1)$$

Полная деформация определяется как сумма упругих, пластических деформаций и деформаций ползучести [2]:

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^p + \varepsilon_{ij}^c. \quad (2)$$

Пластичность грунта описывается ассоциированным законом течения:

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^p = \dot{\lambda} \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}}. \quad (3)$$

Упругие деформации ε_{ij}^e определяются по соотношению

$$\varepsilon_{ij}^e = \left(\frac{1}{3K} - \frac{1}{2G} \right) \sigma_0 \sigma_{ij} + \frac{1}{2G} \sigma_{ij}. \quad (4)$$

Ползучесть грунта учитывается по наследственной теории в виде [2]:

$$\varepsilon_{ij}^c = \int_0^t \frac{\mu \cdot \sigma_{ij}^\beta}{(t - \tau)^\alpha} d\tau. \quad (5)$$

Поскольку в наследственной теории ползучести необходимо запоминать всю историю нагружения, что усложняет расчеты, то предлагается упрощенная методика вычисления деформаций ползучести по наследственной теории с помощью аппроксимации напряжений по четырем их значениям в различные моменты времени [3].

Проводится тестовый расчет растяжения балки по упрощенной методике и сравнительный анализ решения с аналитическим. Предложенная методика быстрого вычисления деформаций ползучести по наследственной теории аппроксимацией напряжений по четырем точкам дает результат близкий к точному (рис. 1).

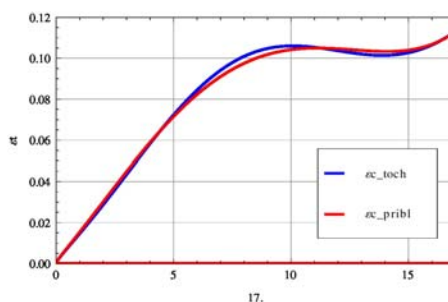


Рис. 1. Деформация ползучести по наследственной теории

В случае действия циклических нагрузок методика вычисления деформаций ползучести модернизируется так, чтобы в каждом цикле нагружения запоминались лишь четыре значения напряжений.

3. Пример расчета. В качестве модельной рассмотрена задача оценки осадки подземного гаража, находящегося в грунтовой массе. Подземный гараж представляет из себя двухсекционное коробчатое строение. Сверху на него действует распределенная нагрузка от верхней части здания, а внутри гаража действует переменная нагрузка от автомобилей. НДС системы определяется методом конечных элементов. Проводится анализ и выявляются закономерности осадки системы при постоянной и переменной нагрузках.

Литература

1. Drucker D.C., Prager W. Soil mechanics and plastic analysis or limit design, Q. Appl. Math., 10, 1952. – P. 157-165.
2. Качанов Л.М. Основы теории пластичности. – М.: Наука, 1969. – 420 с.
3. Каюмов Р.А., Шакирзянов Ф.Р., Бутенко А.В. Приближенный метод вычисления деформаций ползучести по наследственной теории и сравнение ее с инкрементальной теорией // Известия КГАСУ. – Казань: КГАСУ, 2014. – № 3(29).

УДК 539.3

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ПЛЕНОЧНО-ТКАНЕВЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ ТЕМПЕРАТУРЫ И СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ

Каюмов Р.А., Мухамедова И.З.

*Казанский государственный архитектурно-строительный университет,
Россия*

kayumov@rambler.ru

RELIABILITY ASSESSMENT PROCEDURE FILM-FABRIC COMPOSITE MATERIALS UNDER THE INFLUENCE OF TEMPERATURE UNSTEADY AND SOLAR RADIATION

Kayumov R.A., Muhamedova I.Z.

Kazan State University of Architecture and Engineering, Russia

Разработана методика расчета напряженно-деформированного состояния и долговечности представительного элемента пленочно-тканевого композитного материала (ПТКМ) на основе моделей поведения фаз ПТКМ при совместном воздействии силовых факторов, солнечной радиации и изменения температуры. Построена двумерная модель поведения представительного элемента ПТКМ при совместном воздействии силовых факторов, солнечной радиации и температуры. Проведены качественные исследования закономерностей влияния перепада температуры на долговечность ПТКМ. В основе расчета долговечности лежит принцип линейного суммирования поврежденности.

1. Введение. При проектировании элементов конструкций и сооружений из композиционных материалов (КМ) к важнейшим относятся задачи оценки их жесткости, прочности и долговечности с учетом деструкции материала под воздействием эксплуатационных факторов – силовых воздействий, температурных перепадов, а также агрессивных сред и различных физических полей. В работах [1,2] предложены варианты определяющих соотношений процесса деформирования и фотодеструкции пленочного композиционного материала и рассмотрена плоская задача о долговечности представительного элемента этого материала (фактически для материала с искривленными армирующими слоями и поперечными прямолинейными волокнами).

2. Решение задач при нестационарных изменениях температуры. Для проведения качественного анализа поведения исследуемого композитного материала задача формулировалась в упрощенной постановке. Во-первых, исследовалась прочность матрицы, разрушение которой является основной причиной последующего разрушения тканевой основы ввиду появления доступа к ней воздействия ультрафиолета. Вначале процесс деформирования ПТКМ рассматривался при осредненной температуре. Во-вторых, деформации и перемещения считались малыми. Критерий разрушения принимался в виде обобщения обычно используемых в статических задачах условий прочности, а именно, считалось, что разрушение элемента

начинается тогда, когда интенсивность напряжений достигает предельного значения. Проведены качественные исследования закономерности влияния перепада температуры на долговечность ПТКМ.

Для оценки долговечности используется принцип линейного суммирования поврежденности, согласно которому разрушение происходит при выполнении условия:

$$\sum_i D t_i / t_i^* = 1 \quad (1)$$

Механические характеристики, входящие в соотношения ползучести, будут зависеть от влияния температуры T . Введена следующая функция f_1 :

$$f_1 = (f_0 \cdot (\text{Arctg}[(T - T_{cp} + \frac{\text{tg}[(\frac{1}{f_0} - 1) \cdot \frac{\pi}{2}]}{\theta_1}) \cdot \theta_1] + \frac{\pi}{2}) / \frac{\pi}{2})^2, \quad (2)$$

здесь константы f_0, θ_1 определяют характер изменения механических характеристик, которые увеличиваются при повышении температуры.

Модуль упругости аналогично вышесказанному, также будет зависеть от влияния температуры. Для этого введена аналогичная функция f_2 .

3. Численные эксперименты. Выявлены качественные закономерности изменения долговечности от перепада температуры ΔT . Если перепад температуры приводит к небольшим изменениям упругих характеристик и параметров ползучести, то при увеличении ΔT долговечность также падает.

С другой стороны эксперименты показывают, что при достаточно больших θ_1 и θ_2 долговечность начинает увеличиваться с некоторого значения ΔT . Это можно объяснить тем, что при больших параметрах θ_1 и θ_2 материал настолько быстро размягчается для значительных ΔT , что поврежденность в материале накапливается медленнее.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №15-08-06018).

Литература

1. Каюмов Р.А., Сулейманов А.М., Мухамедова И.З. Моделирование поведения пленочно-тканевого материала при воздействии эксплуатационных факторов // Механика композиционных материалов и конструкций. 2005. т.11. №4. С.519-530.
2. Каюмов Р.А., Куприянов В. Н., Мухамедова И.З., Сулейманов А.М., Шакирова А.М. Деформирование представительной ячейки пленочно-тканевого композита при конечных перемещениях // Механика композиционных материалов и конструкций. Том 13, 2, апрель - июнь 2007. Москва: "РАН", 2007 г. - С. 165 - 173.
3. Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела . Наука, 1988. - 712 с.
4. Образцов И.Ф., Савельев Л.М., Хазанов Х.С. Метод конечных элементов в задачах строительной механики летательных аппаратов. М.: Высш.шк., 1985. –392 с.

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЧНОСТИ ВНУТРИОБЪЕКТОВЫХ ТРАНСПОРТНЫХ КОНТЕЙНЕРОВ РЕАКТОРОВ ТИПА БН ПРИ АВАРИЙНОМ ПАДЕНИИ

Баженов В.Г.¹, Кайдалов В.Б.², Кибец А.И.¹, Лапшин Д.А.²

*1 - Научно-исследовательский институт механики Нижегородского
государственного университета им. Н.И. Лобачевского, Россия*

*2 - Акционерное Общество «Опытное Конструкторское Бюро
Машиностроения им. И.И. Африкантова», Россия
kibec@mech.unn.ru*

Рассматривается геометрически и физически нелинейная задача упругопластического деформирования внутриобъектовых транспортных контейнеров (ВТУК) реактора типа БН при аварийном падении. Численное решение задачи основано на методе конечных элементов и явной схеме интегрирования по времени типа «крест». Результаты решения позволили оценить прочность и герметичность ВТУК, оптимизировать конструкцию и снизить ее металлоемкость.

Современный этап развития атомной энергетики характеризуется повышенными требованиями безопасности, предъявляемыми к объектам использования атомной энергии (ОИАЭ). Особое место на ОИАЭ занимают системы хранения и транспортирования ядерного топлива вследствие существования потенциальной возможности возникновения аварийных ситуаций, связанных с падением оборудования при проведении транспортно-технологических операций, что может привести к серьёзным радиационным последствиям

Для транспортировки радиоактивных материалов применяют специально разработанные для этого контейнеры, которые входят в состав внутриобъектового транспортного упаковочного комплекта, обеспечивающего ядерную и радиационную безопасность. В конструктивном исполнении контейнер является сложным и дорогостоящим изделием. Он должен отвечать требованиям динамической прочности конструкции, подвергающейся воздействию ударных нагрузок высокой интенсивности, обладать при этом определенными демпфирующими качествами, позволяющими снижать внешние динамические перегрузки на транспортируемое оборудование.

В настоящей работе для оценки прочности ВТУК: а) определены возможные сценарии аварий на основании анализа транспортно-технологического тракта; б) построены расчётные и компьютерные модели, отражающие реальные жесткостные и весовые характеристики исследуемых конструкций; в) проведено численное исследование напряженно-деформированного состояния ВТУК.

Для описания деформирования конструкции применяется текущая лагранжевая формулировка [1]. В качестве уравнений состояния используются соотношения теории течения с кинематическим и изотропным

упрочнением [2,3]. Уравнение движения выводится из баланса виртуальных мощностей работы. Контакт между контейнером и плитой моделировался условиями непроникания. Для решения задачи применялись метод конечных элементов и явная схема интегрирования по времени типа «крест», реализованные в рамках вычислительной системы «Динамика-3» [4].

Использование на стадии проектирования предварительного полномасштабного 3-D конечно-элементного моделирования позволило оптимизировать конструкцию ВТУК и снизить ее металлоемкость за счет уменьшения необоснованно заложенных запасов прочности. По результатам численного анализа ВТУК были выработаны рекомендации, направленные на обеспечение радиационной безопасности применительно к ситуациям, связанными с их возможным падением.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №15-19-10039).

Литература

1. Поздеев А.А., Трусов П.В., Няшин Ю.И. Большие упругопластические деформации: теория, алгоритмы, приложения. М.: Наука, 1986. 232с.
2. Артемьева А.А., Баженов В.Г., Кибец А.И., Лаптев П.В., Шошин Д.В. Верификация конечно-элементного решения трехмерных нестационарных задач упругопластического деформирования, устойчивости и закритического поведения оболочек//Вычислительная механика сплошных сред. 2010. Т.3, №2. С.5-14.
3. Баженов В.Г., Кибец А.И., Петров М.В., Федорова Т.Г., Шошин Д.В., Артемьева А.А. Экспериментально-теоретическое исследование нелинейного деформирования и потери устойчивости оболочек вращения при изгибе//Проблемы прочности и пластичности. Межвуз. сб. Нижний Новгород: Изд-во ННГУ. 2010. Вып. 72. С. 80-85.
4. Сертификат соответствия Госстандарта России № РОСС RU.ME.20.H00338.

УДК 519.86

МЕЖДУНАРОДНЫЙ ТРАНСПОРТНЫЙ КОРИДОР В МОРСКОМ ПРОСТРАНСТВЕ АРКТИКИ

Киккас К.Н.

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Россия
didenko.nikolay@mail.ru*

THE INTERNATIONAL TRANSPORT CORRIDOR IN THE SEA SPACE OF THE ARCTIC

Kikkas K.

Peter the Great St.-Petersburg Politechnic University, Russia

В статье рассматривается процедура построения модели международного транспортного коридора и анализируются факторы, влияющие на эндогенную переменную модели. В качестве модели выбрана модель авторегрессии распределённого лага (ADL-модель, autoregressive distributed lags), в которой текущие значения ряда зависят как от прошлых значений этого ряда, так и от текущих и прошлых значений других временных рядов. В статье представлены характеристики международных транспортных коридоров, имеющих потенциальную возможность проходить через территорию России: Транссибирская магистраль и Северный морской путь. Проводится сравнительный анализ Северного морского пути и Суэцкого канала с целью выявления общих подходов к работе транспортных путей. При построении моделей транспортных коридоров в качестве эндогенной переменной для всех коридоров принят объём перевозимого товара. Экзогенные переменные для каждой модели выбирались свои. Коэффициенты уравнений определялись на основе данных статистики за 1990 -2013 гг. В статье описаны основные этапы методики использования модели auto regressive distributed lags. Они следующие: проверка автокорреляции эндогенных и экзогенных переменных; анализ стационарности/нестационарности временных рядов; регрессионный анализ. В заключении изложены выводы о результатах сравнения Северного морского коридора с другими транспортными коридорами.

The procedure for create a model of the international transport corridor and the factors influencing the endogenous variable of the model are discussed. The model of autoregressive distributed lags in which the current values depend on the number of past values of the series and from the current and past values of other time series was selected. The article presents the characteristics of international transport corridors have the potential to pass through the territory of Russia: Trans-Siberian Railway and the Northern Sea Route. A comparative analysis of the Northern Sea Route and the Suez Canal in order to identify common approaches to the transportation routes was made. In constructing models of transport corridors as an endogenous variable for all the corridors was adopted volume of transported goods. The exogenous variables in each model were different. The coefficients of the equations were determined on the basis of statistics for the years 1990 -2013. The article describes the main stages of the method of using the model auto regressive distributed lags. They are as follows: checking autocorrelation of endogenous and exogenous variables; analysis of stationary / non-stationary time series; regression analysis. In conclusion, the results of the Northern Maritime Corridor comparison with other transport corridors is described .

1. Введение. Роль Северного морского пути и морского пространства Арктики в экономике России важно анализировать с двух позиций. Во-

первых, Северный морской путь является инфраструктурной производственно-логистической системой российской Арктики, которая связывает районы Европейского Севера, Севера Сибири и Дальнего Востока России. И в этом плане, Северный морской путь обеспечивает экономическую интеграцию арктических территорий с освоенными районами страны. Во-вторых, Северный морской путь имеет огромный потенциал, на основе которого может быть создан международный транспортный коридор из Европы в Юго-Восточную Азию. По морям Северного Ледовитого океана можно рассматривать два пути из Европы в Юго-Восточную Азию. Первый - это Северный морской путь вокруг арктического побережья России и частично по Тихому океану. Он является кратчайшим морским путем между Европой и Юго-Восточной Азией. Второй - это Северо-Западный проход (Northwest Passage) вдоль северного берега Северной Америки через Канадский Арктический архипелаг. Альтернатива Северному морскому пути и Северо-Западному проходу между Европой и Юго-Восточной Азией: а) по морю — транспортные артерии, проходящие через Суэцкий канал; в) по суше - транспортные артерии включающие Транссибирскую железнодорожную магистраль (Транссиб). С учетом складывающихся природных и экономических факторов видна значимость и возможные выгоды от использования Северного морского пути. Базируясь на такой значимости морского пространства Арктики для развития экономики России, Северный морской путь необходимо рассматривать как пространственный каркас опережающего роста в геоэкономической стратегии России [1]. Разработка и осуществление проектов такого опережающего развития должна осуществляться в рамках комплексной целевой программы развития Северного морского пути [2].

2. Модель международного транспортного коридора (МТК). Рассматривались две функции при выборе функции наиболее пригодной для моделирования процесса зависимости Y_t - объема перевозок через МТК в период t от влияющих параметров в период t : модель авторегрессии распределённого лага (ADL-модель, англ. autoregressive distributed lags) и мультипликативная функция. Была выбрана модель ADL ($p, q; k$)

$$y_t = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i y_{t-i} + \sum_{j=0}^{q_1} b_j x_{t-i}^1 + \dots + \sum_{j=0}^{q_k} b_j x_{t-i}^k + E_t \quad (1),$$

где k — кол-во экзогенных переменных; q — кол-во лагов; n — глубина запаздываний по переменной; E_t - остатки, образующие процесс белого шума.

Для улучшения точности использовалась ARCH-модель.

$$U_t^2 = c_0 + c_1 * U_{t-1}^2 + \dots + c_n * U_{t-n}^2 \quad (2),$$

где U_t^2 - дисперсия эндогенной переменной в t -й период времени.

Эмпирическая проверка модели (1) по статистическим данным за период 2000-2013 гг. осуществлялась для Северного морского пути, Транссиба и Суэцкого канала.

Рассмотрено превращение Северного морского пути в международный

транспортный коридор. Для управления развитием портов и инфраструктуры Северного морского пути по пути движения к международному транспортному коридору выбрана концепция программно-целевого управления. Использование математического аппарата теории графов дает возможность моделировать и управлять процессом развития портов и инфраструктуры Северного морского пути.

***Благодарность:** Доклад подготовлен по результатам исследования, выполненного при финансовой поддержке гранта Российского Научного Фонда (проект 14-38-00009) «Программно-целевое управление комплексным развитием Арктической зоны РФ» (Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого).*

Литература

1. Порфирьев Б.Н. Глобальные изменения климата: угроза или фактор международной безопасности? // Проблемы экономической безопасности Евроатлантического региона. Материалы ситуационного анализа в рамках проекта Евроатлантическая инициатива в области безопасности (EASI). (Москва, 29 июня 2010 г.). - М: ИМЭМО РАН, 2010 – С. 40–43.
2. Диденко Н.И., Комков Н.И. Концептуальные основы программно-целевого управления комплексным развитием Арктической зоны РФ // Неделя науки Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. СПб: Изд-во СПбГПУ. - 2014. - № 1. - С. 171 – 185.

О ДЕФОРМИРОВАНИИ ТОЛСТОСТЕННЫХ ТРУБ В УСЛОВИЯХ СВЕРХПЛАСТИЧНОСТИ

Китаева Д.А.¹, Рудаев Я.И.², Сапарова Г.Б.³

*1 - Санкт-Петербургский политехнический университет Петра
Великого, Россия*

2 - Кыргызско-Российский Славянский университет, Киргизия

*3 - Ошский технологический университет, Киргизия
dkitaeva@mail.ru*

Рассматривается задача о деформировании толстостенной алюминиевой трубы с соблюдением изотермических условий, не выходящих за диапазон сверхпластичности. Решение отыскивается в рамках динамической модели, обобщенной на пространственный случай, с привлечением соотношений теории упругопластических процессов малой кривизны и является базовым для моделирования уникальных технологических операций обжата, волочения, раздачи труб, автофретирования. Такой подход позволяет получить мелкозернистую структуру в конечном изделии.

*Клованич С.Ф.**Варминско-мазурский университет в г. Ольштын, Польша**scotch@te.net.ua***THERMOCREEP OF CONCRETE AT THE REGIME LOADINGS***Klovanich S.F.**University of Warmia and Mazury in Olsztyn, Poland*

Приведены зависимости для определения длительных деформаций бетона при нагреве с учетом условий его высыхания. В основу положена нелинейная теория ползучести бетона при нормальной температуре. Предложен численный алгоритм вычисления длительных деформаций при различных режимах нагружения и нагрева.

1. Простая ползучесть бетона при нагреве. Деформации ползучести бетона в момент времени t при сжатии напряжениями $\sigma(\tau) = \text{const}$ (простая ползучесть), приложенными в момент τ равны

$$\varepsilon_{cr}(t) = C(t, \tau) \cdot \sigma(\tau), \quad (1)$$

где $C(t, \tau)$ - мера ползучести (деформации ползучести бетона в момент t при $\sigma(\tau) = 1$). Для функции $C(t, \tau)$ примем выражение [1]

$$C(t, \tau) = f_n(\sigma) \cdot \theta(\tau) \cdot f(t - \tau), \quad (2)$$

где $f_n(\sigma) = f_n(t)$ - функция нелинейности, $f(t - \tau)$ - функция продолжительности действия нагрузки

$$f(t - \tau) = 1 - k e^{-\gamma(t - \tau)} - (1 - k) e^{-b(t - \tau)}, \quad (3)$$

$k = 0.6 \div 0.8$ - экспериментальный параметр; $\theta(\tau)$ - предельная мера ползучести бетона, нагруженного в момент τ

$$\theta(\tau) = C(\infty, 28) \Omega(\tau) \varphi_T. \quad (4)$$

$C(\infty, 28)$ - предельная мера ползучести бетона (эталонная), нагруженного в возрасте 28 суток в МПа⁻¹, определяется по опытным данным; $\Omega(\tau) = 0.5 + d \cdot e^{-2 \cdot \gamma \cdot \tau}$ - функция старения бетона; φ_T - функция влияния температуры $T, ^\circ\text{C}$ и условий высыхания бетона при нагреве на предельную меру (определяется по опытным данным).

Нагрев интенсифицирует процесс ползучести бетона, скорость нарастания деформаций ползучести увеличивается. Учет этого явления может быть осуществлен заменой в формулах (1)-(5) реального времени t на, так называемое, приведенное t^* [2]. При изотермическом нагреве до $T, ^\circ\text{C}$

$$t^* = \beta(T) \cdot t; \quad \tau^* = \beta(T) \cdot \tau \quad (6)$$

где $\beta(T) = 1 + \omega(1 - 0.02 \cdot g / \omega)^{0.0376 m_o}$ - функция приведения, определенная по опытным данным [2,4] с учетом условий высыхания бетона; $g = 1 + 0.308 \cdot (i - 1)$; $\omega = 1.02 \cdot g - 1$; m_o - модуль открытой поверхности в 1/м

(отношение открытой поверхности образца к его объему)

Выражение (2) допускает разделение переменных t и τ , а (1) и может быть записано в виде [5]

$$\varepsilon_{cr}(t) = C(t, \tau) \cdot \sigma(\tau) = \sigma(\tau) \cdot \sum_{i=1}^3 C_i(t, \tau) = \sigma(\tau) \cdot \sum_{i=1}^3 H_i(\tau) \cdot G_i(t) = \sum_{i=1}^3 \varepsilon_{cr}^i(t), \quad (7)$$

где $H_1(\tau) = \theta(\tau)$; $H_2(\tau) = -k \cdot \theta(\tau) \cdot e^{\gamma\tau}$; $H_3(\tau) = -(1-k) \cdot \theta(\tau) \cdot e^{b\tau}$;
 $G_1(t) = f_n(t)$; $G_2(t) = f_n(t) \cdot e^{-\gamma t}$; $G_3(t) = f_n(t) \cdot e^{-bt}$.

2. Ползучесть при переменных напряжениях и температурах. Пусть напряжения и (или) температура меняются во времени, т.е. $\sigma = \sigma(\tau) \neq const$, $T = T(\tau) \neq const$. Определим деформации ползучести в момент $t + dt$. Получим рекуррентную формулу для каждой из трех составляющих деформаций ползучести (7)

$$\varepsilon_{cr}^i(t+dt) = G_i(t+dt) \cdot \left\{ \varepsilon_{cr}^i(t) / G_i(t) + \int_t^{t+dt} \left[H_i(\tau) \cdot \frac{\partial \sigma(\tau)}{\partial \tau} + \sigma(\tau) \cdot \frac{dH_i(\tau)}{d\tau} \right] d\tau \right\}. \quad (8)$$

Учитывая, что $(\partial \sigma / \partial \tau) d\tau \approx \Delta \sigma$, а $[dH_i / d\tau] d\tau \approx \Delta H_i$, после численного интегрирования (8) получим шаговый алгоритм вычисления деформаций ползучести

$$\varepsilon_{cr}^i(t_{n+1}) = G_i(t_{n+1}) \left\{ \varepsilon_{cr}^i(t_n) / G_i(t_n) + [H_i(t_n) \cdot \Delta \sigma_n + \sigma_n \cdot \Delta H_i(t_n)] \right\}. \quad (9)$$

В выражении (9) время t следует заменить на приведенное время

$$t^* = \int_{t_0}^t \beta [T(\tau)] d\tau.$$

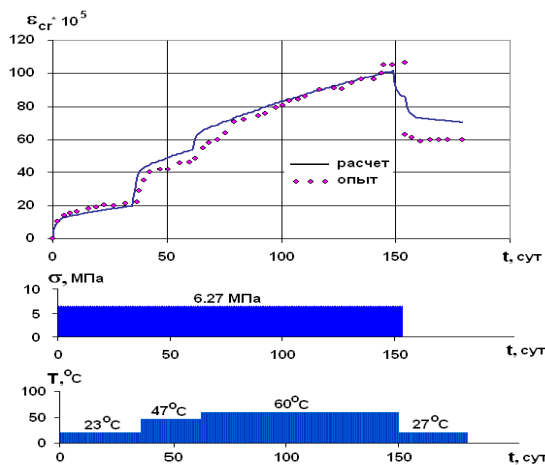


Рис.1. Пример расчета

На рис.1. приведен пример расчета по формуле (9) при следующих исходных данных $f_c = 42.3 \text{ МПа}$; $m_0 = 0$; $\gamma = 0.008$; $b = 0.6$; $C(\infty, 28) = 8 \cdot 10^{-5} \text{ МПа}^{-1}$. Опытные данные заимствованы из работы [6].

Литература

1. Прокопович И.Е., Зедгенидзе В.А. Прикладная теория ползучести. – М.:Стройиздат, 1980. – 240 с.
2. Кричевский А.П. Расчет железобетонных инженерных сооружений на температурные воздействия. – М.: Стройиздат, 1984. – 148 с.
3. Александровский С.В. Расчет бетонных и железобетонных конструкций на изменение температуры и влажности с учетом ползучести. – М.: Стройиздат, 1973. – 432 с.
4. Hannant D.J. Strain Behavior of Concrete Up to 95°C Under Compressive Stresses// *JCE, London.* – 1968. – P.177-191.
5. Кудашев В.И. Сокращенная схема запоминания истории нагружения при численном решении задач линейной ползучести бетона // *Изв. вузов. Сер. Стр. и архитектура.* -1987. - №10. – С.32-36.
6. Fahmi H.M., Polivka M., Bresler B. Effect of Sustained and Cyclic Elevated Temperature on Creep of Concrete// *Cem. And Concr. Res.*- 1972. - №2.- P. 591-606.

**ПРИМЕНЕНИЕ КОМПОЗИТНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ
СТРОИТЕЛЬСТВЕ АВТОМОБИЛЬНЫХ И ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ,
А ТАКЖЕ ДРУГИХ ТРАНСПОРТНЫХ КОММУНИКАЦИЙ**

Козьминская О.В.^{1,2}, Лисицын П.Б.^{1,2}

*1 - Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I, Россия*

*2 - Московский государственный университет технологий и управления,
Россия
olgakozm@list.ru*

**THE USE OF COMPOSITE TECHNOLOGIES IN THE CONSTRUCTION
OF ROADS AND RAILWAYS AND OTHER TRANSPORT
COMMUNICATIONS**

Kozminskaia O.V.^{1,2}, Lisitsyn P.B.^{1,2}

*1 - St.Petersburg's state university of railways of Emperor Alexander I,
Russia*

2 - Moscow university of technology and management, Russia

Рассматривается концепция применения геотекстильных и геосинтетических материалов для дорожного строительства. Показаны принципы расчета дорожных сооружений и конструкций при использовании механических гипотез прочности материалов.

Examines the concept of use of geotextiles and geosynthetic materials for road construction. Shows the principles of calculation road constructions and structures using mechanical hypotheses the strength of materials.

1.Введение. Основным потребителем геосинтетических материалов являются автодорожная и железнодорожная отрасли. Технологические решения применения геосинтетических материалов включают в себя два основных направления. Это земляные сооружения и дорожные одежды.

2.Основной принцип рационального применения геосинтетических и геотекстильных материалов. С целью обеспечения требуемой надежности и долговечности дорожных сооружений. Рассматриваемая концепция устанавливает взаимосвязь геотехники, механики грунтов и требований к геосинтетическим и геотекстильным материалам. Определяются физико-механические свойства геотекстильных и геосинтетических материалов при работе с различными видами грунтов или другими дорожно-строительными материалами.

3. Разработка новых методов расчета дорожных конструкций и сооружений. На основе решения уравнения пластических деформаций для пространства Мориса Леви и его следствия для механических гипотез прочности материалов. Из решения данного уравнения следует, что условие текучести Сен-Венана и условия пластичности М.Леви пропорциональны друг другу и наоборот.

Доказано, что теория пластичности удельной потенциальной энергии изменения формы Максвелла и октаэдрическая теория пластичности материалов Н.М.Беляева идентичны. Это и составляет теоретическую основу современного учения о прочности (пластичности) материалов.

Применение данных расчетов в композитных технологиях при строительстве автомобильных и железных дорог и других транспортных коммуникаций позволяет на принципиально новом уровне внедрять геосинтетические и геотекстильные материалы.

Например, данная технология может применяться при строительстве КАД (кольцевой автомобильной дороги) вокруг Санкт-Петербурга при устройстве насыпей на сваях с ростверком из прочных геосинтетических материалов, при возведении дорог на болотах, а также при строительстве автомобильных и железных дорог в зоне сезонного промерзания в условиях вечномерзлых грунтов, что характерно для очень многих климатических зон России, особенно в районах Севера и Дальнего Востока.

СОВРЕМЕННЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ И РАСЧЕТА ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ В ПК ЛИРА 10.4

Колесников А.В.
ООО "ЛИРА софт", Россия
heallex@lira-soft.com

Рассматриваются методы моделирования и расчета реализованные в ПК ЛИРА 10.4.

Изложена теория сходимости МКЭ. Представлены применяемые в ПК ЛИРА10 конечные элементы, в том числе и с узлами в серединах сторон (ребер).

Линейные статические задачи формулируются как принцип возможных перемещений

$$a(U, V) = q(V), \quad (1.1)$$

где $a(U, V)$ - симметричный положительно определенный билинейный функционал, $q(V)$ - линейный функционал, действительное перемещение U и любое возможное перемещение V определены на области Ω с границей Γ и принадлежат энергетическому пространству H .

Задачу (1.1) требуется свести к конечномерной, к системе линейных алгебраических уравнений (СЛАУ). Одним из наиболее универсальных и распространенных способов для этого является метод конечных элементов (МКЭ) в перемещениях

Область Ω разбивается на конечные элементы (КЭ) Ω_r , которые, в зависимости от размерности, являются отрезками, выпуклыми многоугольниками или многогранниками, Γ_r - граница Ω_r . Различные КЭ не имеют общих внутренних точек. Узлами X_j конечно-элементной сетки являются вершины КЭ, возможны и узлы на сторонах (ребрах).

Наибольшее расстояние между узлами сетки, принадлежащими одному КЭ, обозначим h .

Разбиение на конечные элементы предполагается согласованным - если вершина или ребро элемента принадлежит и другому КЭ, то является вершиной или ребром этого другого конечного элемента.

Все функционалы, получаемые интегрированием по Ω , будем представлять как суммы соответствующих интегралов по Ω_r , функционал, полученный интегрированием по Ω_r , обозначаем индексом r .

Неизвестными МКЭ (степенями свободы) являются линейные функционалы $L_k(U)$, носители которых обозначим S_k . Функционалы $L_k(U)$ линейно-независимы, т.е. если равенства $c_k L_k(U) = 0$ выполнены для всех $U \in H$, то все $c_k = 0$. Обычно функционалы $L_k(U)$ - значения функций и их производных в узлах, т.е. S_k совпадает с одним из узлов. Неизвестные в узлах:
перемещения для трехмерных областей;

перемещения и повороты для стержней и пластин;
для тонкостенных стержней добавляется седьмое.

Звездой элементов Ω^k , соответствующей функционалу $L_k(U)$, называется объединение всех элементов Ω_r , содержащих S_k .

Перемещения аппроксимируем линейными комбинациями базисных функций $\mu_k(x)$:

$$U_h(x) = d_k \mu_k(x). \quad (1.2)$$

Множество функций вида (1.2) обозначим H_μ .

Базисные функции $\mu_k(x)$ отличны от нуля только на Ω^k , они удовлетворяют равенствам

$$L_k(\mu_i) = \delta_{ki}. \quad (1.3)$$

Из (7.3) следует линейная независимость базисных функций.

Положив в (1.1) при $U = U_h$, $V = \mu_i$, получаем уравнения МКЭ

$$a(U_h, \mu_i) = q(\mu_i), \quad (1.4)$$

которые, используя (1.2), запишем в виде

$$d_k a(\mu_k, \mu_i) = q(\mu_i). \quad (1.5)$$

Элементы матрицы $a(\mu_k, \mu_i)$ и вектора $q(\mu_i)$ получаем суммированием по всем КЭ Ω_r элементов матриц $a_r(\mu_k, \mu_i)$ и векторов $q_r(\mu_i)$. Очевидно, что $a_r(\mu_k, \mu_i) \neq 0$ только при $\Omega_r \subset \Omega^k \cap \Omega^i$, $q_r(\mu_k) \neq 0$ только при $\Omega_r \subset \Omega^k$.

Матрица $a_r(\mu_k, \mu_i)$ и вектор $q_r(\mu_i)$ вычисляются в местной системе координат, связанной с элементом, корректируются на шарниры жордановыми исключениями, на жесткие вставки – при помощи матрицы, соответствующей перемещениям АЖТ, а затем преобразуются в общую, используется матрица, составленная из координат единичных векторов местной системы, матрица косинусов.

При вычислении интегралов применяется численное интегрирование - кубатурные формулы

$$\int_{\Omega} f d\Omega = \gamma_k f(x_k), \quad x_k \in \Omega. \quad (1.6)$$

Изложенный достаточно простой метод построения системы уравнений МКЭ, основанный на том, что большинство вычислений выполняется независимо на каждом отдельном КЭ, является одним из основных алгоритмических преимуществ МКЭ.

Вторым существенным преимуществом МКЭ является простота удовлетворения граничным условиям. Из (1.2) и (1.3) следует равенство $L_j(U_h) = d_j$. Поэтому для выполнения не обязательно однородного граничного условия $L_j(U_h) = z_j$ достаточно положить в (1.2) и (1.5) $d_j = z_j$. Граничные условия на напряжения (усилия) выполнены всегда, т.к. МКЭ использует принцип возможных перемещений.

Элементы матрицы $a(\mu_k, \mu_i)$ отличны от нуля только если пересечение $\Omega^k \cap \Omega^i$ содержит хотя бы один КЭ. Такие матрицы называют разреженными или слабо заполненными. При решении системы (1.5) методом Гаусса заполнение, т.е. количество ненулевых элементов возрастает. Для

уменьшения количества вычислений и времени решения СЛАУ следует перенумеровать неизвестные, чтобы заполнение стало как можно меньше. Такие методы, основанные на теории графов, изложены в [15].

По решению задачи (1.5) находим перемещения каждого КЭ в его системе координат, затем вычисляем напряжения для трехмерных элементов, усилия для стержней и пластин. Усилия в стержнях корректируются на распределенные нагрузки.

Литература

1. Городецкий А.С., Евзеров И.Д. Компьютерные модели конструкций.- Киев: Факт, 2007.- 394 с.
2. Деклу Ш. Метод конечных элементов. М.: Мир, 1976. - 95 с.
3. Евзеров И.Д. Сходимость МКЭ в случае не принадлежащих энергетическому пространству базисных функций// Вычисления с разреженными матрицами. – Новосибирск: ВЦСО АН СССР.- 1981. С. 54-61.
4. Евзеров И.Д. Оценки погрешности по перемещениям при использовании несовместных конечных элементов // Численные методы механики сплошной среды. – Новосибирск: ВЦСО АН СССР.- 1981. С. 54-61.
5. Евзеров И.Д. Неконформные конечные элементы в задаче на собственные значения// Численные методы механики сплошной среды. –1984. Т.15. - №5 -С. 84-90.
6. Евзеров И.Д., Здоренко В.С. Сходимость прямолинейных конечных элементов при расчете криволинейных стержней//Соппротивление материалов и теория сооружений. – Киев: Будивельник.- 1983. – вып.42. - С. 99-101.
7. Евзеров И.Д., Здоренко В.С. Сходимость плоских конечных элементов тонкой оболочки//Строительная механика и расчет сооружений. – 1984. - №1. - С. 35-40.
8. Евзеров И.Д. Неконформные конечные элементы для нелинейных уравнений с монотонными операторами// Численные методы механики сплошной среды. –1985. – Т.16. - №5. - С. 49-56.
9. Карпиловский В.С. Методы конструирования конечных элементов. – Киев, 1980.-50 с. - Деп. УкрНИИТИ 23.06.80, № 2153.
10. Карпиловский В.С. Треугольный шести узловый элемент плиты // Известия ВУЗов. Строительство и архитектура. -Новосибирск, 1989, №4.-стр.35-39.
11. Карпиловский В.С. Четырехугольный восьмиузовый конечный элемент плиты // Строительная механика и расчет сооружений, 1990. — С. 13-17.
12. Карпиловский В.С. Четырехугольные конечные элементы для решения плоской задачи теории упругости. // Системы автоматизированного проектирования объектов строительства, — Киев: Будівельник, 1991. —С.35-43
13. Михлин С.Г. Вариационно-сеточная аппроксимация// Записки научн. семин.- ЛОМИ. –1974. Т.48. - С. 32-188.
14. Обен Ж.-П. Приближенное решение эллиптических краевых задач.- М.: Мир, 1977. – 383 с.
15. Писсанецки С. Технология разреженных матриц. - М.: Мир, 1988. – 411 с.
16. Соболев С.Л. Некоторые применения функционального анализа в математической физике. - М.: Наука, 1988. – 333 с.
17. Сьярле Ф. Метод конечных элементов для эллиптических задач. - М.: Мир, 1980. –512 с.
18. Courant R. Variable methods for the solution of problem of equilibrium and vibration. – Bull. Amer. Math. Soc., 1943, №1.
19. Cea J. Approximation variationelle des problemes aux limites. – Ann. I inst. Fourier., 1964, 14, 345-444.
20. Clough R.W., Bathe K.I. Finite element analysis of dynamic response. – The Univ. of Alabama in Huntsville Press, 1972, 153-159.
21. Miyoshi T. Convergence of finite element solution, represented by a nonconforming basis. – Kumamoto J. Sci. (Math.), 1972, 9, №1, 11-20.
22. Nitsche J. Ein Kriterium fur die Quasioptimalitat des Ritzchen Verfahrens. - Numer. Math., 1968, 11, 346-349.
23. Strang G., Fix G. A Fourier analysis of the finite element method. – Proc. SIME summer school, Italy, 1971.

**ВЛИЯНИЕ НЕКОГЕРЕНТНЫХ НАНОВКЛЮЧЕНИЙ НА МИГРАЦИЮ
ГРАНИЦ ЗЕРЕН В НАНОКОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛАХ**

Конаков Я.В.^{1,2}, Овидько И.А.^{1,2,3}, Шейнерман А.Г.^{1,2,3}

1 - Институт проблем машиноведения РАН, Россия

*2 - Санкт-Петербургский политехнический университет Петра
Великого, Россия*

*3 - Санкт-Петербургский государственный университет, Россия
for-rams@yandex.ru*

**INFLUENCE OF INCOHERENT NANOINCLUSIONS ON GRAIN
BOUNDARY MIGRATION IN NANOCOMPOSITE MATERIALS**

Konakov Ya.V.^{1,2}, Ovid'ko I.A.^{1,2,3}, Sheinerman A.G.^{1,2,3}

*1 – Institute of Problems of Mechanical Engineering, Russian Academy of
Sciences, Russia*

2 – Peter the Great St. Petersburg Polytechnical University, Russia

3 – St. Petersburg State University, Russia

Предложена модель миграции малоугловых границ зерен в неоднородных материалах, содержащих некогерентные наноскопические включения второй фазы. С помощью метода двумерной дислокационной динамики выявлены возможные режимы миграции малоугловых границ зерен в таких материалах. Проведен качественный анализ режимов миграции границ зерен для различных размеров включений и расстояний между ними. Показано, что критическое напряжение для миграции малоугловых границ зерен существенно растет с увеличением объемной доли включений.

A model is proposed that describes migration of low-angle tilt boundaries in composite solids containing incoherent nanoscale inclusions. Using the method of two-dimensional dislocation dynamics, the possible modes of grain boundary migration in the presence of nanoinclusions are revealed. A qualitative analysis of grain boundary migration modes for various inclusion sizes and their separations is performed. It is shown that the critical stress for grain boundary migration significantly increases with increasing the volume fraction of inclusions.

Известно, что атермическая миграция границ зерен под действием внешней нагрузки является одним из механизмов деформации в нанокристаллических и субмикрокристаллических металлах. Недавно стимулируемая внешней нагрузкой миграция малоугловых границ зерен также наблюдалась при горячей прокатке алюминия, содержащего керамические включения, и при растяжении алюминиевых сплавов, содержащих частицы Al_3Sc . Целью настоящей работы является описание процессов миграции малоугловых границ зерен в нанокompозитах, содержащих наноскопические включения, с учетом влияния тройных стыков границ зерен на миграцию таких границ и расчет зависимости критического напряжения миграции границ от геометрических параметров включений.

В рамках модели мы рассматриваем миграцию малоугловых границ наклона под действием сдвигового напряжения τ при наличии нескольких

некогерентных нановключений. Малоугловые границы зерен моделируются стенками решеточных дислокаций, а тройные стыки таких границ содержат дисклинации. Предполагается, что упругое взаимодействие границ зерен с некогерентными включениями отсутствует. С помощью метода двумерной дислокационной динамики мы рассчитали эволюцию ансамблей дислокаций, составляющих малоугловые границы, в материале с включениями и таким образом построили профили таких границ. В результате было выявлено два режима миграции малоугловых границ. В первом режиме мигрирующие границы полностью тормозятся включениями, и их миграция прекращается. Во втором режиме некоторые сегменты движущихся границ тормозятся включениями, а оставшиеся сегменты продолжают мигрировать на большие расстояния. Переход от первого ко второму режиму возможен при достижении сдвиговым напряжением критического значения τ_c . При этом, как и следовало ожидать, критическое напряжение увеличивается с ростом объемной доли включений, а увеличение расстояния от исходного положения мигрирующей границы до ближайших включений может как уменьшать, так и увеличивать критическое напряжение.

**ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА ВЕЛИЧИНУ
КРИТИЧЕСКОЙ СИЛЫ И ЧАСТОТЫ СВОБОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ
СКЛАДЧАТЫХ ОБОЛОЧЕК**

Кондратьева Л.Н.¹, Поварова И.Б.²

*1 - Санкт-Петербургский государственный архитектурно-
строительный университет, Санкт-Петербург, Россия*

*2 - Петербургский государственный университет путей сообщения
императора Александра I, Санкт-Петербург, Россия
kondratjevaln@yandex.ru*

**THE INFLUENCE OF VARIOUS FAKTORS ON THE VALUE OF
CRITIKAL FORCE AND THE FREQUENCY OF FREE OSCILLANIONS
OF FOLDED MEMBRANENS**

Kondratyeva L.N.¹, Povarova I.B.²

*1 - Saint-Petersburg state University of architecture and construction,
Russia*

*2 - Petersburg state University of means of communication of the Emperor
Alexander I, Russia*

В данной работе проведено исследование нелинейных свободных колебаний призматических оболочек в зависимости от соотношения сторон.

In this work we have investigated the nonlinear free vibration of prismatic shells, depending on the aspect ratio.

Рассматривается пологая складчатая оболочка, состоящая из плоских элементов с изломами срединной поверхности в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Прямоугольная в плане оболочка имеет размеры: a – вдоль координаты x , b – вдоль координаты y , h – толщина оболочки (рис.1)

Для исследования устойчивости и оценки частоты нелинейных колебаний применяется методика динамического расчета пологих складчатых оболочек аналитическим методом, основанным на едином подходе, исключающем решение задач сопряжения по (2), (3).

По формуле $\mu^2 = 1 - \frac{8}{3\pi} \alpha \tilde{A} + \frac{3}{4} \beta \tilde{A}^2$ полученной в (4) построены графики зависимости частот нелинейных колебаний от амплитуды.

Анализ полученных результатов позволяет предсказать влияние различных факторов на величину частоты свободных колебаний в зависимости от соотношения сторон оболочки и прогнозировать резонансные ситуации, которые могут возникнуть при воздействии внешних периодических нагрузок .

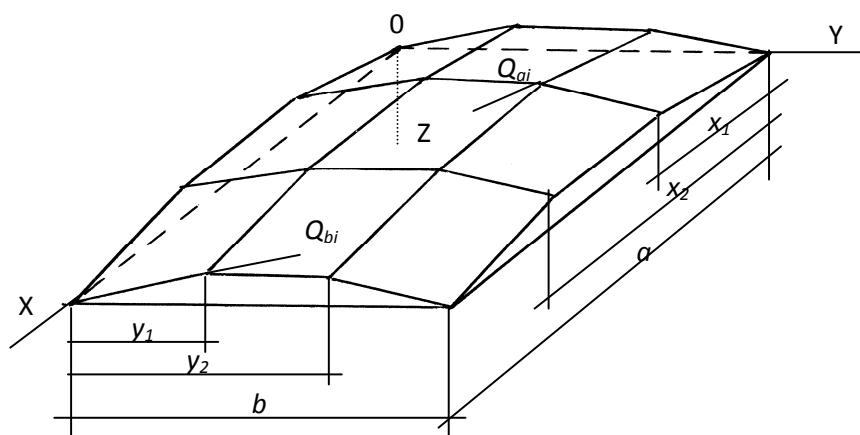


Рис.1.Геометрия складчатой оболочки

Литература

- 1.Поварова И.Б. // Анализ устойчивости тонких пологих оболочек под действием поперечной распределенной нагрузки / «Известия Орел ТГУ». – 2007- Вып.4/16(538)
2. Видюшенков С.А., Соколов Е.В., Захаров М.В. // Аналитический метод расчёта пластин и оболочек с разрывными жесткостными и грузовыми характеристиками / Актуальные проблемы механики и машиностроения: Материалы III Междунар. науч. конф.17-19 июня 2009 г. Том I. – Алматы: Изд-во «ЭВЕРО», 2009 – С. 181-185
3. Кондратьева Л.Н., Поварова И.Б. //Устойчивость пологих складчатых оболочек/ Научно-технический журнал «Вестник ТГАСУ» – Томск.– 2007. – Вып.№1
4. Кондратьева Л.Н., Поварова И.Б. //Вывод формулы частоты свободных колебаний складчатых пологих оболочек / Материалы IX Междунар. конф.27-28 мая 2014г.:ВПО ПГУПС СПб 2014– С. 115-121

**ДИНАМИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ ПОДКРЕПЛЕННОЙ
ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПОДВИЖНОЙ
НАГРУЗКИ**

Коновалов А.В., Антуфьев Б.А.

*Московский Авиационный Институт (Национальный Исследовательский
Университет), Россия
Alexey.Vl.Konovalov@gmail.com*

**DYNAMIC BEHAVIOR OF CYLINDRICAL SHELL WITH SUPPORT
ELEMENTS UNDER UNSTEADY LOAD**

Konovalov A.V., Antufiev B.A.

Moscow Aviation Institute (National Research University), Russia

Приближенно в контактной постановке решается задача о динамическом поведении дискретно подкрепленной ребрами жесткости тонкой цилиндрической оболочки, по боковой поверхности которой движется бесконечная инерционная радиальная нагрузка. Задача решается в предположении квазистатической формы изгиба конструкции. Деформированное состояние оболочки описывается уравнениями технической теории в смешанной форме относительно ее прогиба и функции напряжений. Изгиб ребер жесткости определяется на основании теории изгиба балок. Эти ребра рассматриваются как дискретные упругие включения в оболочку. При решении задачи считается, что контакт между телами осуществляется только в направлении нормали к поверхности оболочки, а в тангенциальных направлениях допускается проскальзывание. Ребра жесткости мысленно отделяются от оболочки, и их действие заменяется распределенной по линии контакта в срединной поверхности оболочки радиальной нагрузкой. Она из уравнения движения ребра выражается через его прогибы и с учетом условий совместности перемещений подставляется в уравнения движения оболочки. В силу квазистатической постановки задачи, силы инерции оболочки выражаются через скорость движения нагрузки. В конечном итоге проблема сводится к системе двух дифференциальных уравнений движения оболочки с разрывными и по окружной координате коэффициентами вследствие наличия ребер жесткости и содержащей в качестве параметра скорость движения нагрузки. Уравнения решаются методом Бубнова. Рассмотрены два варианта движения нагрузки, как по всей поверхности оболочки, так и только по подкрепляющим ребрам. В обоих случаях приближенно определена критическая скорость движения инерционной нагрузки. Рассмотрен ряд примеров.

ПРИМЕНЕНИЕ ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ АНАЛИЗА НОВЫХ МЕТОДИК ДИНАМИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

Константинов А.Ю.^{1,2}, Брагов А.М.¹, Игумнов Л.А.¹, Ломунов А.К.¹

*1 - Научно-исследовательский институт механики Нижегородского
государственного университета им. Н.И. Лобачевского, Нижний
Новгород, Россия*

*2 - НИИ машиностроения им. В.В. Бахирева, Дзержинск, Россия
constantinov.al@yandex.ru*

APPLICATION OF NUMERICAL METHODS FOR THE STUDY OF NEW SCHEMES OF DYNAMIC TESTING OF MATERIALS

Bragov A.M.¹, Igumnov L.A.¹, Konstantinov A.Yu.^{1,2}, Lomunov A.K.¹

*1 – Research Institute of Mechanics, Nizhny Novgorod State University, Nizhny
Novgorod, Russia*

2 - Research Institute of engineering V.V.Bahirev, Dzerzhinsk, Russia

В работе приводятся результаты анализа ряда схем динамических испытаний материалов с применением методов высокоточного численного моделирования. Исследованы следующие методики: определение динамического коэффициента трения, высокоскоростное растяжение образцов в системе разрезного стержня, метод прямого удара с использованием технологии мерных стержней.

При динамических испытаниях материалов имеют место сложные переходные процессы, вызванные взаимодействием волн нагрузки и разгрузки. В связи с этим возникает задача численного анализа экспериментальных схем, в ходе которого может быть установлен диапазон применимости конкретного метода испытания, выявлены основные эффекты, способные повлиять на интерпретацию экспериментальной информации, а также проведена оптимизация параметров нагружения, формы и размеров образца, выбора материалов узлов испытательной установки.

В предлагаемом сообщении приводятся результаты численного исследования ряда методов динамических испытаний: метод прямого удара, модификации РСГ для исследования ударного растяжения материалов, а также методику определения динамического коэффициента трения с применением техники мерных стержней.

Представлены результаты экспериментального и численного анализа метода прямого удара [1] для определения динамических свойств конструкционных материалов при скоростях деформации 10^3 - 10^4 с⁻¹. С целью выявления влияния на получаемые свойства инерционных сил, сил трения, вида напряженно-деформированного состояния (НДС) был проведен вычислительный эксперимент. Было показано, что силы трения и инерции влияют на динамические диаграммы деформирования, указаны пути учета этих эффектов. Приведено сравнение диаграмм деформирования меди и сплава Д16Т, полученных методом Кольского и методом прямого удара.

Показана перспективность использования этого метода для изучения динамического поведения материалов при скоростях деформации свыше 10^3 с^{-1} .

Отработана расчетная схема позволяющая моделировать поведение образца в эксперименте на высокоскоростное растяжение по схеме Николаса [2]. Численно исследовано влияние длины рабочей части образца, а также наличия выреза на распределение полей напряжений и деформаций. Показано, что при использовании образцов с различной длиной рабочей части разрушение происходит при приблизительно одном и том же виде напряженного состояния, показатель которого, однако, отличается от такового для одноосного растяжения, поскольку в момент образования шейки на одноосное НС накладывается всестороннее растяжение. Эквивалентная деформация, рассчитанная по относительному сужению образца, адекватно отражает локальные деформации в зоне шейки, в то время как соответствующая величина, определенная по относительному удлинению, дает заниженное значение.

Также проведено численное исследование метода определения динамического коэффициента трения [3] при использовании образцов различной конфигурации. Показано, что на начальном этапе выпрессовки за счет динамической раздачи сердечника величина радиальных напряжений по отношению к посадочному давлению возрастает. Далее значение посадочного давления остается практически неизменным. По результатам моделирования можно сделать вывод о том, что на этапе установившегося движения сердечника в обойме при небольших его перемещениях (когда площадь контакта меняется незначительно при выходе внутренней части сборки), коэффициент трения можно адекватно определить по силе, измеренной с помощью опорной трубки, и рассчитанному аналитически значению статической посадочной силы.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 15-38-20759_мол_а_вед, 13-08-00862)

Литература

1. Dharan C.K.H., Hauser F.E. Determination of stress-strain characteristics at very high strain rates // Exp.Mech. 1970. Vol.10. P.370-376.
2. Nicholas O.// Tensile testing of materials at high rates of strain. Exp.Mech. 1981. Vol.21, N 5. P.177-195.
3. A.M.Bragov, A.Yu.Konstantinov and A.K.Lomunov Determining dynamic friction using a modi-fied Kolsky method // Technical Physics Letters, Vol.34, No 5, 2008, pp.439-440.

**СОВРЕМЕННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ
ПОДХОД К РАЦИОНАЛЬНОМУ ПРОЕКТИРОВАНИЮ ОБЪЕКТОВ
НОВОЙ ТЕХНИКИ**

Константинов А.Ю.^{1,2}, Брагов А.М.¹, Игумнов Л.А.¹, Ломунов А.К.¹

*1 - Научно-исследовательский институт механики Нижегородского
государственного университета им. Н.И. Лобачевского, Нижний
Новгород, Россия*

*2 - НИИ машиностроения им. В.В. Бахирева, Дзержинск, Россия
constantinov.al@yandex.ru*

**THE MODERN EXPERIMENTAL-TEORETICAL APPROACH TO
RATIONAL DESIGN OF NEW EQUIPMENT**

Bragov A.M.¹, Igumnov L.A.¹, Konstantinov A.Yu.^{1,2}, Lomunov A.K.¹

*1 – Research Institute of Mechanics, Nizhny Novgorod State University, Nizhny
Novgorod, Russia*

2 - Research Institute of engineering V.V.Bahirev, Dzerzhinsk, Russia

В работе приводится общая методология решения задачи анализа прочности динамически-нагруженных конструкций от разработки, обоснования и использования экспериментальных схем получения данных о динамическом деформировании и разрушении материалов различной физической природы, до построения достоверных верифицированных определяющих соотношений. Даны примеры применения подобного подхода для ряда конструкционных материалов.

В настоящее время необходимость применения численного моделирования на ранних этапах проектирования объектов новой техники ни у кого не вызывает сомнения. Математическое моделирование, помимо сокращения сроков проектирования, позволяет существенно оптимизировать разрабатываемую конструкцию, так как появляется возможность проанализировать значительно большее число вариантов компоновки (геометрия, материалы, способы соединения и пр.), а так же эксплуатационных условий по отношению к опытному подходу. Следует отметить, что численные методы и современные вычислительные ресурсы позволяют с достаточной степенью точности решать сложные системы математических уравнений, описывающих процессы, протекающие в конструкции под действием тех или иных факторов, описывать поведение материалов сложными нелинейными математическими моделями, а также учитывать различные геометрические и физические особенности. Таким образом, можно утверждать, что точность численного решения в основном определяется точностью входных данных, одной из важных составляющих которых являются математические модели поведения материалов. Для оснащения и верификации феноменологических моделей поведения необходима обширная база данных по динамическим свойствам материалов.

Для динамических испытаний материалов практически отсутствуют стандартизованные методы испытаний и серийно выпускаемые установки и оборудование. Построение динамических диаграмм деформирования в настоящее время проводят с использованием нескольких наиболее распространенных методик: метод копровых испытаний на растяжение или сжатие, кулачковый пластометр, методы Кольского и Тейлора [1-2]. Реже для этих целей применяются другие методики, например, использующие раздачу кольцевых образцов, методика А.А.Ильюшина и В.С.Ленского, основанная на теории распространения одномерных упругопластических волн и распределении остаточных деформаций по длине образца и т.д.

Можно констатировать, что динамические свойства ряда традиционных и, тем более, новых материалов изучены недостаточно. Поэтому зачастую проектирование указанных ответственных объектов выполняется с использованием статических свойств (или данных по известным зарубежным аналогам), что ведет к нерациональному проектированию конструкций, испытывающих ударные нагрузки. В связи с этим разработка инструментальных и методических средств проведения динамических испытаний, широкомасштабные исследования динамического поведения конструкционных материалов при различных условиях является весьма актуальной задачей, а создание банка данных динамических свойств конструкционных материалов в зависимости от скорости деформации, температуры, интенсивности и истории ударно-волнового воздействия имеет чрезвычайную важность и значимость.

В настоящем сообщении представлены примеры применения комплексного подхода для построения достоверных определяющих соотношений ряда конструкционных материалов. Исследования включают в себя разработку, обоснование и реализацию методик базовых испытаний, получение экспериментальных данных о высокоскоростном деформировании и разрушении материалов, идентификацию математических моделей, проведение специальных тестовых экспериментов и верификацию математических моделей путем сравнения результатов натурных и численных экспериментов. Полученная в ходе исследований информация собирается в единую базу данных.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты 15-38-20759_мол_а_вед, 13-08-00862, 14-08-00197А)

Литература

1. Гольдерман М.А., Храбровицкая Е.Д., Молокова Л.Д. Установки для ударных испытаний материалов и конструкций: Обзорная информация // ЦНИИТЭИ приборостроения. - М. - 1981. - ТС-7. - Вып. 1 - С. 1-44.
2. Klepaczko J. Advanced experimental techniques in materials testing // "New Experimental Methods in Material Dynamics and Impact", Trends in Mechanics of Materials, eds. W.K.Nowacki, J.R.Klepaczko, Warsaw, 2001, p. 223-266.

**ВКЛАД ЛИНЕЙНЫХ И ТОЧЕЧНЫХ ДЕФЕКТОВ
КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ В АМПЛИТУДНО
НЕЗАВИСИМУЮ ВЕТВЬ ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ**

Белашова И.С.¹, Горшков А.А.², Коровайцева Е.А.³, Ломовской В.А.²

1 - Московский авиационный институт (НИИ), Россия

*2 - Московский государственный университет тонких химических
технологий имени М.В. Ломоносова, Россия*

3 - НИИ механики МГУ, Россия

ag60341@gmail.com

**CONTRIBUTION OF LINEAR AND POINT DEFECTS OF CRYSTAL
STRUCTURE TO AMPLITUDE INDEPENDENT BRANCH OF INTERNAL
FRICTION**

Belashova I.S.¹, Gorshkov A.A.², Korovaytseva E.A.³, Lomovskoy V.A.²

1 - Moscow Aviation Institute (NRU), Russia

2 - Lomonosov Moscow University of Fine Chemical Technology, Russia

3 - Institute of Mechanics MSU, Russia

Анализ диссипативных процессов по спектрам внутреннего трения в различных кристаллических структурах при низких температурах позволяет предположить, что в образовании фона потерь в той или иной степени принимают участие элементы всех структурно-кинетических подсистем, образующих исследуемую систему. Проведены расчеты возможного вклада линейных дефектов (дислокаций) в интенсивность фона потерь. В качестве модельных представлений использовались модели Эшелби и Келера – Гранато – Люке для ГЦК структур.

Analysis of dissipative processes on the basis of internal friction spectra in different crystal structures at low temperatures allows suggesting that occurrence of losses background in a varying degree is caused by the elements of all structure-kinetic subsystems forming the investigated system. Calculations of possible contribution of linear defects (dislocations) to the intensity of losses background are carried out. Models of Eshelby and Koehler-Granato-Lucke for face-centered cubic arrangements were used as model representations.

Анализ диссипативных процессов по спектрам внутреннего трения в различных по кристаллической структуре материалах показывает, что в области гомологических температур ниже 0,2 на этих спектрах наблюдается фон диссипативных потерь. Интенсивность экспериментально наблюдаемого фона при температурах значительно меньших температуры фазового перехода первого рода в зависимости от типа кристаллической структуры практически не исследована. Однако установлено, что в этих интервалах температур в диапазонах напряжений, отвечающих гуковской зависимости, интенсивность диссипативных потерь для большинства кристаллических структур не зависит от амплитуды внешнего деформирующего воздействия и имеет очень слабую зависимость от температуры исследуемой системы и частоты внешнего деформирующего воздействия.

Наличие фона диссипативных потерь в этих амплитудно-частотных и

температурных интервалах для кристаллических систем позволяет отнести процесс реакции данной системы как непрерывного однородного сплошного тела к процессу механически обратимому, но термодинамически необратимому. При этом следует отметить, что исследование температурных зависимостей спектров внутреннего трения поликристаллического палладия с различной концентрацией растворимого в нём водорода показало, что в образовании фона внутреннего трения на спектре участвуют все структурные единицы, образующие данную гранецентрированную кристаллическую кубическую систему [1]. Переход к структурным представлениям при реакции на внешнее воздействие переводит рассмотрение и анализ данной реакции от модельных представлений непрерывного сплошного однородного тела к атомно-молекулярному дискретному строению. В этом случае рассматривается реакция не одной монолитной системы, а системы, образованной всей совокупностью структурных единиц, участвующих в образовании исследуемой системы. Степень подвижности этих структурных единиц при равных внешних условиях является различной, т.к. эти структурные единицы сами подразделяются на подсистемы: линейные, точечные, трёхмерные, фазовые и т.д. Таким образом, в образовании фона диссипативных потерь на спектре внутреннего трения в области гомологических температур ниже 0,2 участвуют все структурно-кинетические подсистемы, которые в своей совокупности образуют исследуемую систему [2]. При этом следует отметить, что каждая из структурно-кинетических подсистем будет описываться своим уравнением движения со своими коэффициентами упругости и потерь, что позволит отнести процесс релаксации каждой подсистемы на внешнее воздействие к процессу обратимому механически, но необратимому термодинамически. Следовательно, и подвижность дислокаций, как линейного дефекта кристаллической структуры, будет описываться своим уравнением движения, а подвижность точечных дефектов – своим уравнением.

Описание подвижности дислокации при её реакции на внешнее синусоидальное деформирующее воздействие в данном интервале температур может быть проверено по двум направлениям: линейному и нелинейному [3]. Если принять условие, что диссипативная характеристика дифференциального уравнения движения дислокаций подсистемы не зависит от скорости деформирования и от геометрических характеристик исследуемого кристаллического образца, то решение нелинейной задачи колебательного процесса подвижности дислокации может быть сведена к решению линейного дифференциального уравнения [4].

Анализ реакционной подвижности дислокационной структурно-кинетической подсистемы в поле внутренних напряжений, описываемой параболической формой потенциальной силовой ямы для гомологических температур ниже значений 0,2 проводили на трёх модельных представлениях. Это модель незакреплённых стопорами сегментов дислокаций, расположенных в положениях энергетических минимумов рельефа Пайерлса, модель стопорных точек крепления с предположением о не взаимодействии

полей напряжений дислокаций, не взаимодействующих между собой, модель колебаний дислокационной подсистемы в совокупности с облаками Котрелла. Расчёт диссипативных потерь по модели свободных и незакреплённых стопорами сегментов дислокации (модель Эшелби) показал, что в интервале температур до гомологического значения равного 0,2 и диапазоне частот от $0,001$ до 1000 с^{-1} интенсивность фона спектра лежит в интервале от $\lg \text{tg } \delta = -10$ до -4 , что существенно ниже экспериментально наблюдаемых значений на спектрах внутреннего трения. Расчёт диссипативных при закреплённых сегментах дислокаций, где стопорами закрепления являются точечные дефекты – примесные атомы (модель Келера) показал ещё более низкое значение фона, чем рассчитанное по модели Эшелби. При этом предполагалось, что облака Котрелла не совершают колебательного смещения при колебаниях дислокаций, однако при этом не происходит отрыва дислокации от примесных стопорных атомов (модель Келера – Гранато – Люке). В случае отрыва примесных атомов от колеблющейся дислокации эти точечные дефекты как квазинезависимая структурно-кинетическая подсистема должна описываться своим уравнением движения со своими коэффициентами. Это должно привести к тому, что в интенсивность фона диссипативных потерь на спектре внутреннего трения будет аддитивно вноситься вклад от двух подвижных структурно-кинетических подсистем: потери от диффузионной подвижности точечных дефектов и потери от колебательной подвижности сегментов дислокации. Проведённые расчёты показывают, что вклад точечных дефектов (на примере вакансий в ГЦК структуре) практически равен нулю в области температур ниже гомологической, равной 0,2. Дается теоретический анализ данного процесса и показывается, что возможный диссипативный процесс от подвижности вакансий в данных условиях не является релаксационным и не может быть описан феноменологической моделью Максвелла.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ № 14–08–00806-а).

Литература

1. Горшков А.А., Ломовской В.А., Наими Е.К. О природе фона внутреннего трения в поликристаллическом палладии // Вестник МИТХТ. 2009. Т.4. №6. С. 85-89.
2. Горшков А.А., Коровайцева Е.А., Ломовской В.А. Дислокационный вклад в гистерезисный механизм внутреннего трения при гомологических температурах ниже 0,2. // Изв. РАН Механика твёрдого тела. 2015 (в печати).
3. Ильюшин А.А. Пластичность. Упруго-пластические деформации. Часть 1. ОГИЗ, М-Л. 1948. 376 с.
4. Горшков А.А., Коровайцева Е.А., Коровайцев А.В., Ломовской В.А. Моделирование процесса диссипативных потерь в стержневом элементе кварцевого резонатора // Материалы XIX международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова. М.: «ТР-принт», 2013. Т.2. С. 82-94.

**ИТЕРАЦИОННЫЙ МЕТОД РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ФИЗИЧЕСКИ
НЕЛИНЕЙНОЙ ЗАДАЧИ ДЛЯ СИСТЕМЫ БАЛКА – УПРУГОЕ
ОСНОВАНИЕ**

Кузнецов С.Ф.¹, Островский К.И.²

1 - Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия

2 - ЗАО «НИЦ СтаДуО», Россия

KuznetsovSF@mpei.ru

**THE ITERATIVE METHOD FOR SOLVING PHYSICALLY NONLINEAR
INVERSE PROBLEM FOR SYSTEM BEAM - ELASTIC FOUNDATION**

Kuznetsov S.F.¹, Ostrovskii K.I.²

1 - «National research university «MPEI», Russia

2 – “Stadyo”, Russia

Рассматривается обратная физически нелинейная задача об определении напряженно-деформированного состояния и внешних нагрузок для системы балка – упругое основание. Предложена двухшаговая итерационная процедура численного решения на основе дискретной совокупности данных о перемещениях оси балки. Исследовано влияние на точность решения объема и погрешности входной информации.

The formulation of the physically nonlinear inverse problem of stress-strain state and external loads determination for system beam – elastic foundation is proposed. Two-step iterative numerical solution procedure using discrete beam deflections data has been developed. The influence of the input data amount and error on the accuracy of solution is studied.

В работах [1,2] предложен численный метод определения напряженно-деформированного состояния элементов конструкций, взаимодействующих с основанием, при задании дискретной информации о перемещениях. Характер деформирования системы предполагался линейно упругим и использовались математические постановки в форме линейных обратных задач. Вместе с тем, в расчетной практике при анализе непроектных ситуаций весьма часто возникают проблемы оценки уровня поврежденности конструкций. Это требует применения моделей нелинейного деформирования и необходимости формулировки соответствующих физически нелинейных задач.

Ставится обратная задача об определении распределений внешней нагрузки и характеристик напряженно-деформированного состояния упругопластической балки на упругом основании. В качестве входной информации рассматривается дискретная ограниченная совокупность данных о прогибах балки, содержащая погрешности, уровень которых предполагается известным.

Формулировка задачи ограничивается случаем активного нагружения и заключается в требованиях удовлетворения уравнению равновесия упругопластической балки, уравнению состояния в форме нелинейной зависимости момент-кривизна, краевым условиям (и/или условиям ограниченности) и заданной информации о перемещениях.

Разработан метод решения обратной упругопластической задачи, представляющий собой двухшаговую итерационную процедуру ньютоновского типа. В качестве начального приближения для распределений внешних нагрузок $p(z)$, изгибающего момента $M(z)$ и прогиба $w(z)$ принимается решение обратной задачи в предположении линейно упругого характера деформирования. Каждая итерация включает шаг I получения приближения для $M(z)$, $w(z)$, выполняемый по алгоритму метода начальных напряжений (моментов) при актуальном приближении для нагрузки $p(z)$. Образующаяся при этом невязка в условиях удовлетворения входным данным по прогибам используется на шаге II для определения последующего приближения для распределения нагрузки $p(z)$. Получение начального приближения и выполнение шага II итераций осуществляются на основе решения линейных обратных задач.

Верификация разработанного итерационного метода проведена на серии модельных задач для протяженных систем. Рассмотрены задачи реконструкции распределенных нагрузок и систем сосредоточенных сил. Результаты определения параметров нагружения и характеристик напряженно-деформированного состояния сопоставлены с эталонными, полученными из решения соответствующих прямых задач.

Проведено исследование чувствительности решений обратных упругопластических задач к погрешности входной информации. Показано, что при наличии априорной информации о характере нагружения и построении на этой основе компактных дискретных моделей, рассмотренные задачи близки к регулярным. Погрешность решения в этих случаях имеет порядок погрешности входных данных. Применение моделей большой размерности, требующих больших объемов входной информации, сопряжено с возрастанием влияния погрешности входных данных и ставит точность и информативность результатов в зависимость от эффективности применяемых процедур регуляризации.

Представлены примеры применения разработанного метода для решения некоторых родственных задач, формулируемых на основе физически нелинейных моделей. В том числе рассмотрены задачи определения механического состояния элементов конструкций из железобетона и труб большого диаметра с учетом овализации сечений при деформировании.

Литература

1. Кузнецов С.Ф., Островский К.И., Семенов А.С. Метод дополнительных нагрузок для решения задач реконструкции механического состояния и идентификации характеристик системы балка – неоднородное упругое основание. // Справочник. Инженерный журнал. - 2013. - №5. - С. 28-36.
2. Кузнецов С.Ф., Островский К.И. Реконструкция напряженного состояния протяженной системы балка – упругое основание по данным натурных обследований. // Строительная механика и расчет сооружений. - 2014. - №4. - С. 18-24.

**РЕШЕНИЕ КРАЕВЫХ ЗАДАЧ ДЛЯ ЦИЛИНДРА И ПЛАСТИНЫ ИЗ
СПЛАВА С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ**

Кухарева А.С.

Петербургский государственный университет путей сообщения

Императора Александра I, Россия

kukhareva_as@mail.ru

**THE SOLUTION OF BOUNDARY PROBLEMS FOR SHAPE MEMORY
ALLOY CYLINDER AND PLATE**

Kukhareva A.S.

Petersburg State Transport University, Russia

Решены полностью связанные термомеханические краевые задачи для цилиндра и пластины из сплава с памятью формы, нагруженных внешней силой и охлаждаемых или нагреваемых с поверхности. Свойства материала описываются с помощью микроструктурной модели. Показано, что даже при малой скорости охлаждения, поля температур, напряжений и распределение объемной доли мартенсита по ширине образца неоднородны. Отмечается, что величина эффекта пластичности превращения уменьшается при увеличении скорости охлаждения.

A connected thermomechanical boundary problems for TiNi cylinder and plate, loaded by an external force and subjected to cooling or heating from the surface, has been solved. The constitutive relations are given by the microstructural model. Even for a low cooling rate, the temperature, stress, and martensite volume fraction are inhomogeneous, and the transformation-induced strain in the force direction decreases with an increase in the temperature rate.

1. Введение. Сплавы с памятью формы (СПФ) способны накапливать или возвращать значительные неупругие деформации при различных термосиловых воздействиях. Благодаря необычному деформационному поведению они находят широкое применение в различных отраслях техники и медицины. Для решения широкого круга технических проблем необходимо разработать методы расчета напряженно-деформированного состояния тел различных форм и размеров.

2. Постановка задачи. Свойства СПФ сильно зависят от температуры, поэтому решение задачи о нахождении напряжений и деформаций в общем случае необходимо проводить совместно с решением задачи теплопроводности. Систему уравнений замыкают определяющие уравнения, позволяющие рассчитать изменения неупругой деформации, мощности источников тепла и внутренних параметров. Таким образом, получается полностью связанная термомеханическая задача, т.к. неупругая деформация, входящая в уравнения равновесия, зависит от температуры, а мощность источников тепла в уравнении теплопроводности зависит от напряжений, возникающих в теле. Сформулированная задача решалась численно с использованием итерационной процедуры с переменным итерационным параметром. Для этого она разделялась на три подзадачи. Первая – задача

механики – нахождение напряжений и деформаций в предположении, что неупругие деформации известны. Вторая – определение поля температур при известном источнике тепла. Третья – нахождение неупругих деформаций и тепловыделения при известных напряжениях и изменении температуры. Решение проводилось по шагам, на каждом из которых задавались приращения внешних воздействий и времени. Рассчитывались изменения температур и напряжений, затем находились изменения неупругих деформаций и тепловыделение. Производился пересчет температур и напряжений с учетом новых данных. Итерации повторялись, пока не выполнялось условие окончания итерационного процесса, означающее, что конечные значения изменений температуры, напряжения, неупругих деформаций и тепловыделения найдены с заданной точностью. При численном моделировании все механические и тепловые поля задавали таблично в виде их значений в равноотстоящих узлах. Для решения задачи о нахождении поля температур при известном источнике тепла применяли метод сеток с неявной схемой. Для описания свойств СПФ использовалась микроструктурная модель [1], учитывающая его строение и основные физические закономерности развития фазовой и пластической деформации.

3. Результаты. Разработанный алгоритм численного решения связанной термомеханической задачи был применен для расчета напряженно-деформированного состояния в цилиндре и пластине из СПФ. Показано, что даже при малой скорости изменения температуры окружающей среды наблюдается неоднородное распределение температур, а, следовательно, объемной доли мартенсита, напряжений и деформаций по сечению образца. Отмечается, что величина эффекта пластичности превращения уменьшается при увеличении скорости охлаждения (Рис. 1).

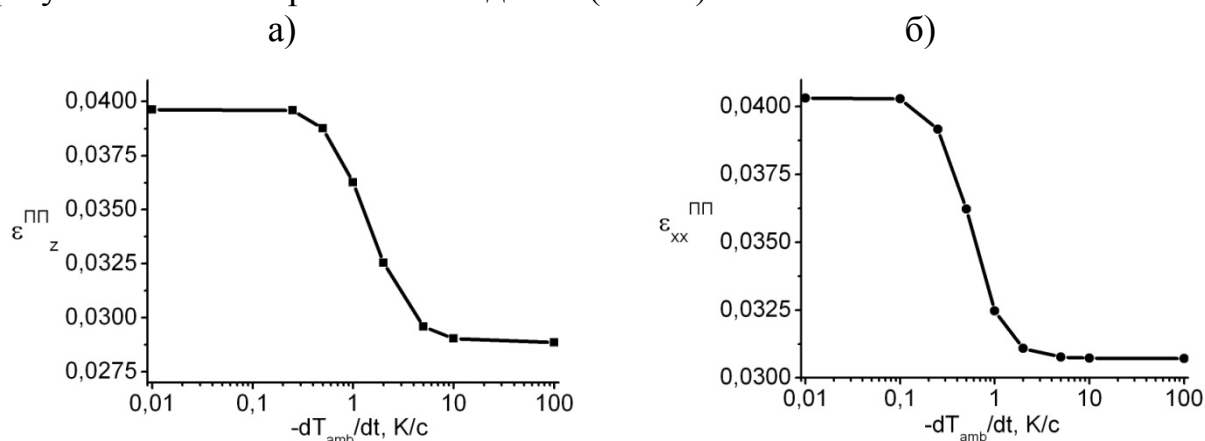


Рис. 1. Зависимость величины эффекта пластичности превращения ($\epsilon^{ПП}$) от скорости охлаждения для цилиндра (а) и пластины (б).

Литература

1. Волков А.Е. Микроструктурное моделирование деформации сплавов при повторяющихся мартенситных превращениях // Изв. Академии Наук. Сер. Физическая. 2002. Т.66, № 9. С. 1290 – 1297.

НОВАЯ ПОСТАНОВКА ЛИНЕЙНЫХ ЗАДАЧ МЕХАНИКИ С МОМЕНТНЫМИ ВОЗДЕЙСТВИЯМИ

Лалин В.В., Савченко А.В., Беляев М.О.

*Санкт-Петербургский Политехнический Университет Петра Великого,
Россия*

vllalin@yandex.ru

Стандартные постановки линейных задач механики с моментными воздействиями не сохраняют тип момента, то есть потенциальность или не потенциальность внешнего момента. Например, известно, что в точной нелинейной постановке «мертвый» момент не является потенциальным, однако, в стандартной линейной постановке «мертвый» момент становится потенциальным: его потенциал равен скалярному произведению вектора момента на вектор поворота. Представляется, что такая ситуация является не допустимой: тип внешнего воздействия не должен зависеть от того, в какой постановке (линейной или нелинейной) рассматривается задача.

В настоящем докладе предлагается новая постановка линейных задач механики с моментными воздействиями, позволяющая сохранить тип (потенциальность или не потенциальность) моментов. Основное отличие новой постановки от классической заключается в наличии дополнительных слагаемых, пропорциональных векторному произведению вектора моментов на вектор поворота. Предлагается также новая формулировка теоремы взаимности в линейной механике, согласованная с новой постановкой.

Приводятся примеры решения статических и динамических задач в новой постановке.

В плоских задачах классическая постановка линейных задач остается справедливой, так как векторное произведение вектора моментов на вектор поворота тождественно равно нулю, и указанные дополнительные слагаемые не появляются. Отсюда, в частности, следует принципиальная недостаточность изучения и обучения механике только на примерах задач в плоской постановке.

УДК 621.791

ОЦЕНКА СНИЖЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СЛОИСТЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПОМОЩЬЮ КОМПЬЮТЕРНОЙ РЕНТГЕНОВСКОЙ ТОМОГРАФИИ

Ларин А.А.¹, Бакулин В.Н.²

*1 - ОАО Московский Машиностроительный Экспериментальный Завод -
композиционные технологии, Россия*

*2 - Институт прикладной механики РАН, Россия
vbak@yandex.ru*

ASSESSMENT OF THE REDUCTION OF MECHANICAL CHARACTERISTICS OF LAMINATED POLYMER COMPOSITE MATERIALS USING X-RAY COMPUTED TOMOGRAPHY

Bakulin V.N.¹, Larin A.A.²

1 - ОАО «МЕМР-СТ», Moscow, Russia

2 - Institute of applied mechanics of Russian Academy of Science, Russia

Рассмотрена методика томографического исследования композиционных материалов на наличие дефектов. Проводится оценка снижения свойств материала с помощью специальных методик, использующих данные томографического контроля в качестве исходной информации.

The technique of tomographic studies of composite materials for defects was being considered. Assessment of the reduction of material properties with the aid of specific techniques using tomographic control data as a source of information is being held

Развитие методов неразрушающего контроля (НК) и их внедрение в различные отрасли промышленности позволяет повысить надежность, безотказность и ресурс конструкций, что приводит к повышению общей эффективности эксплуатации изделий на различных этапах жизненного цикла. Современные методы НК - тепловые, магнитные, акустические, радиографические и др. – применяются для выявления дефектов внутренней структуры традиционных материалов - металлов и сплавов. В то же время, в различных отраслях промышленности (авиация, ракето-, вертолето-, судостроение) активно осуществляется внедрение в конструкции полимерных слоистых композиционных материалов (КМ), требующих особых подходов в части проведения неразрушающего контроля [1, 2].

Наиболее распространенные для исследования металлов акустические методы контроля имеют ряд ограничений при проведении диагностики полимерных КМ, что связано со значительным затуханием волн внутри композита при частоте волны свыше 1МГц. Композиты на полимерных термопластичных и термореактивных связующих, являясь немагнитными материалами, не допускают возможности использовать магнитные методы НК. Тепловые методы контроля слоистых пластиков не позволяют получить высокую точность положения и идентификации внутренних дефектов.

Среди перспективных методов НК слоистых полимерных КМ следует выделить акустико-эмиссионный метод и метод компьютерной рентгеновской томографии (КРТ), обеспечивающие высокую разрешающую способность состояния внутренней структуры изделий. В частности, применение КРТ позволяет получить трехмерную картину внутренней структуры изделия, что дает возможность надежно идентифицировать повреждения и определить их линейные геометрические размеры.

Компьютерная рентгеновская томография как метод НК композитных материалов обладает высокой чувствительностью, позволяет выявлять дефекты на микроуровне, в частности, минимальный линейный размер выявляемых трещин составляет 0,05-0,06 мм, минимальный объем выявляемых порообразований - 0,1-0,12 мм³, минимальный размер расслоений - 0,1-0,2 мм². Среднее квадратичное отклонение плотности материала объекта контроля определяется с точностью до второго знака после запятой. Результаты НК с применением томографии позволяют получить значительный объем исходных данных для оценки снижения несущих свойств изделий из полимерных слоистых КМ.

Оценка снижения свойств материала проводится с помощью специальных методик, использующих данные томографического контроля в качестве исходной информации. Определение характеристик поврежденного материала возможно для изделий, содержащих такие виды внутренних дефектов, как "разрыв волокнистой армирующей структуры", "расслоение между слоями материала", "порообразование", "инородное включение", "трещина".

Для рассматриваемых дефектов определяются изменения таких характеристик, как модуль упругости материала в различных направлениях, концентрация напряжений в окрестностях дефекта, изменение несущей способности.

Созданные модели для изучения механических характеристик КМ с дефектами различной природы верифицированы конечно-элементным моделированием в специализированном программном комплексе MSC.Nastran/Patran, а также экспериментальными исследованиями образцов с созданными дефектами.

Работа выполняется при поддержке РФФИ грант № 14-08-01054-а).

Литература

1. Бакулин В.Н., Ларин А.А., Резниченко В.И. Методы повышения качества изготовления изделий из полимерных композиционных материалов на основе применения компьютерной томографии как метода неразрушающего контроля. Инженерно-физический журнал, 2015. Т. 88, № 2. С.534-538
2. Бакулин В.Н., Ларин А.А., Резниченко В.И. "Применение компьютерной томографии для контроля качества технологического процесса изготовления изделий из композитов" - материалы XXV Международной конференций "Математическое моделирование в механике деформируемых сред и конструкций. Методы граничных и конечных элементов" - 2013. - Т.1. С.33-35

УДК 539.3

**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УТОЧНЕНИЯ
КОНЕЧНОЭЛЕМЕНТНЫХ МОДЕЛЕЙ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ ПО
РЕЗУЛЬТАТАМ ИЗМЕРЕНИЙ ИХ ДИНАМИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК**

*Лебедев В.Л., Семенов В.А., Солдатов А.Ю., Трубников С.А.
ООО Техсофт, Москва, Россия
vll@tech-soft.ru*

**COMPUTER SIMULATION FOR UPDATING OF FINITE ELEMENT
MODEL OF BUILDINGS AND STRUCTURES FROM MEASUREMENTS
OF THEIR DYNAMIC CHARACTERISTICS**

*Lebedev V.L., Semenov V.A., Soldatov A.Y., Trubnikov S.A.
Techsoft Ltd., Moscow, Russia*

Анализируются особенности компьютерной реализации алгоритмов решения задачи уточнения матриц масс, жесткости и демпфирования конструкций на основе использования измеренных частот ее свободных колебаний. Некоторые алгоритмы кроме измеренных частот могут также использовать и измеренные формы свободных колебаний конструкции. В результате работы алгоритмов, получаются симметричные матрицы масс, жесткости и демпфирования. Эти алгоритмы могут быть эффективно использованы в составе систем мониторинга несущих конструкций зданий и сооружений. Приводятся примеры их использования для реальных сооружений, выполненные при помощи ПК MicroFe 2015 и иллюстрирующие высокую эффективность алгоритмов.

В последнее время весьма активно проводится мониторинг несущих конструкций разнообразных зданий и сооружений. Одним из наиболее распространенных является динамический (сейсмометрический) метод инструментального мониторинга. Во многих работах отмечается, что такие системы должны функционировать на основе анализа конечно-элементного моделирования изучаемых конструкций. При этом конечно-элементные модели должны уточняться (иногда говорят адаптироваться) по текущим данным инструментальных наблюдений. В качестве основного критерия обычно используют соответствие расчетного и измеренного спектра собственных частот и форм во всем значимом диапазоне частот. К сожалению, в качестве расчетного спектра собственных частот и форм используют частоты и формы недемпфированных свободных колебаний конструкций. Измеренный же спектр частот всегда соответствует демпфированным свободным колебаниям конструкций. Поэтому, чем больше демпфирование в реальной конструкции, чем выше интенсивность статических нагрузок на нее или чем существеннее влияние основания на ее динамические характеристики, тем бессмысленнее результаты уточнения конечно-элементных моделей с использованием недемпфированного спектра частот. Поэтому мы реализовали для построения уточненных конечноэлементных моделей три алгоритма, основанных на использовании

спектра частот и форм демпфированных свободных колебаний конструкции. Построение такого спектра называют прямой квадратичной задачей на собственные значения. Этот спектр представляет основные исходные данные для алгоритмов. В результате работы алгоритмов мы получаем уточненные симметричные матрицы масс, жесткости и демпфирования, для которых прямая квадратичная задача в качестве результата дает измеренный спектр частот и форм. Этот измеренный спектр является еще одной группой исходных данных. Таким образом, реализованные нами алгоритмы основаны на решении прямых и обратных квадратичных задач на собственные значения. Уточненные матрицы жесткости и демпфирования должны удовлетворять еще некоторым условиям. Обычно в качестве такого условия используется минимум взвешенного отклонения уточненных матриц от исходных матриц в смысле нормы Фробениуса. Важной особенностью данных алгоритмов является то, что для их использования не требуется вычислять полный набор собственных значений и векторов исходной системы. Поэтому они могут быть применены для анализа достаточно больших систем.

**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРАВЛЕНИЯ
ДИНАМИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ЗДАНИЙ И
СООРУЖЕНИЙ**

*Лебедев В.Л., Семенов В.А., Солдатов А.Ю., Трубников С.А.
ООО Техсофт, Москва, Россия
vll@tech-soft.ru*

**COMPUTER SIMULATION OF CONTROL OF DYNAMIC
CHARACTERISTICS OF BUILDINGS AND STRUCTURES**

*Lebedev V.L., Semenov V.A., Soldatov A.Y., Trubnikov S.A.
Techsoft Ltd., Moscow, Russia*

Анализируются особенности компьютерной реализации алгоритмов решения задачи частичного переназначения собственных значений свободных колебаний демпфированных систем, оставляющих оставшиеся собственные значения и соответствующие собственные вектора без изменений. В результате работы алгоритмов, решающих задачу с использованием управления и заключающихся в построении матриц обратной связи, получаем несимметричные матрицы демпфирования и жесткости. Эти решения могут быть эффективно применены при решении задач гашения колебаний конструкций при сейсмических и других динамических воздействиях в режиме реального времени. Приводятся примеры расчета реальных сооружений, выполненные при помощи ПК MicroFe 2015 и иллюстрирующие высокую эффективность алгоритмов.

Существует много различных способов борьбы с нежелательными колебаниями конструкций. Хорошо известны такие способы, как использование динамических гасителей колебаний, введение дополнительного демпфирования и т.п. В последнее время более широко стали использоваться активные устройства гашения колебаний, основанные на управлении колебаниями конструкции. Такие устройства создают некоторые изменения в первоначальной системе, которые влияют на ее частоты свободных колебаний. Новые значения частот свободных колебаний должны удовлетворять некоторым условиям. Как правило, эти условия связаны с частотным диапазоном внешнего возмущения. Таким образом, мы приходим к обратной задаче на собственные значения. Поскольку на практике все конструкции содержат демпфирование, то эта задача является квадратичной. Один из современных подходов для решения такой задачи заключается в использовании управления и требует вычислений двух матриц обратной связи. В результате применения такого подхода получают новые несимметричные матрицы демпфирования и жесткости. Для случая кинематических воздействий такую задачу обычно называют задачей сейсмогашения. Новые матрицы демпфирования и жесткости строятся таким образом, чтобы новые собственные значения и собственные вектора удовлетворяли требуемым условиям. Обычно эти условия заключаются в том, чтобы новый спектр равнялся такому, который мы получаем из спектра

исходной системы путем замены небольшого количества резонансных собственных значений на соответствующие назначенные значения, сохраняя при этом оставшиеся собственные значения и связанные с ними собственные векторы неизменными. Последнее свойство, необходимо, чтобы большое количество не назначенных собственных значений не стали резонансными или неустойчивыми. Для реализации активной стратегии управления гашением колебаний, обратная связь должна вычисляться в реальном времени. Таким образом, очень важно, чтобы все изменения в конструкции вычислялись эффективным и численно надежным способом. В результате мы хотим получить такую ситуацию, при которой все частоты свободных колебаний конструкции расположены вне диапазона частот внешних воздействий, либо частотам, расположенным в этом диапазоне должно соответствовать заданное модальное демпфирование. Для решения этой задачи в ПК MicroFe 2015 реализован эффективный алгоритм. Этот алгоритм учитывает особенности численной реализации решения обратных задач на собственные значения, которые позволяют получить корректные решения.

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОГО ПОВЕДЕНИЯ НАСЫЩЕННЫХ ГРУНТОВЫХ И СКАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ СЛОЖНОМ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОРОПЛАСТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

*Ле-Захаров С.А., Мельников Б.Е., Семёнов А.С.
Санкт-Петербургский политехнический университет, Россия
lezakharov@gmail.com*

NONLINEAR ANALYSIS OF FLUID SATURATED SOIL AND ROCK UNDER COMPLEX HYDROMECHANICAL LOADING WITH POROPLASTIC MODELS

*Le-Zakharov S.A., Melnikov B.E., Semenov A.S.
St.-Petersburg State Polytechnical University, Russia*

Для описания механического и гидравлического нагружения насыщенных сред используется модель материала, описывающая упруго-пластическое деформирование материала с учетом влияния давления фильтрующей жидкости. Линейные деформации определяются с использованием связанных уравнений Био. Переход в пластическое состояние определяется значением эффективного напряжения Терцаги по критериям Кулона-Мора и Друкера-Прагера. Для интегрирования нелинейных определяющих уравнений (ОУ) используется подход многоповерхностной теории пластического течения. Решается ряд тестовых задач и выполняется сравнение расчетных диаграмм нагружения с результатами известных экспериментов.

1. Введение. Неупругое деформирование грунта является причиной деформирования и повреждения фундаментов зданий и сооружений, приводит к нештатным режимам работы плотин ГЭС. Прогнозирование неупругого деформирования и разрушения грунтов и скал играет важную роль в задачах нефтегазодобычи, в том числе при проектировании гидроразрыва. Во многих ситуациях фильтрационные процессы оказывают значительное влияние на деформирование среды, в совокупности с механическим воздействием приводя к развитию необратимых деформаций и разрушению. Необходимость моделирования таких процессов требует развития связанных поропластических моделей геоматериалов и их внедрения в инженерную практику с использованием эффективных методов численного интегрирования ОУ.

2. Упруго-пластическая модель насыщенной пористой среды. ОУ относительно упругой деформации $(\varepsilon - \varepsilon^p)$ и пористости $(\phi - \phi^p - \phi_0)$ записываются в виде связанной системы уравнений Био:

$$\begin{aligned}\sigma &= ({}^4\mathbf{D} + N\mathbf{b}\mathbf{b}) \cdot (\varepsilon - \varepsilon^p) - \mathbf{b}N(\phi - \phi^p - \phi_0) \\ p &= -N\mathbf{b} \cdot (\varepsilon - \varepsilon^p) + N(\phi - \phi^p - \phi_0)\end{aligned}$$

где $\varepsilon, \varepsilon^p$ – полная и пластическая деформации, ϕ, ϕ^p, ϕ_0 – полная, необратимая и начальная пористость, σ, p – макроскопическое напряжение и поровое давление, 4D – тензор упругих модулей, b – тензор пороупругих коэффициентов Био, N – модуль Био. Условие перехода в пластический режим деформирования определяется поверхностью нагружения, зависящей от эффективного напряжения Терцаги σ'' и сил упрочнения q :

$$\Phi(\sigma'', q) = 0.$$

Эволюция пластической деформации ε^p описывается уравнением

$$\dot{\varepsilon}^p = \dot{\lambda} \frac{\partial \Gamma(\sigma'', q)}{\partial \sigma''},$$

где, $\Gamma(\sigma'', q)$ – пластический потенциал, зависящий от σ'' и q , $\dot{\lambda}$ – обобщенный пластический множитель.

3. Тестирование пороупругой модели. Выполнен расчет серии тестов бетона и известняка. Смоделированы тесты на одноосное и трехосное сжатие и растяжение, чистый сдвиг, гидростатическое растяжение (набухание). Выполнено сравнение с имеющимися из литературы экспериментальными данными. Выполнен расчет эксперимента, иллюстрирующего эквивалентность всестороннего механического сжатия (растяжения) уменьшению (увеличению) порового давления, что подтверждает правомерность выбора напряжения Терцаги в качестве диссипативной силы (рис. 2).

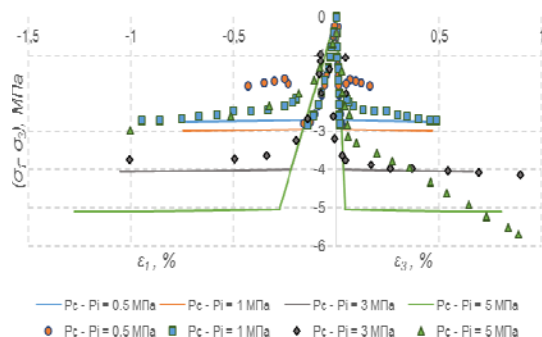


Рис. 1. Трехосное компрессионное дренированное испытание рыхлого известняка, поровое давление $P_i = 2$ МПа. Эксперимент по [1].

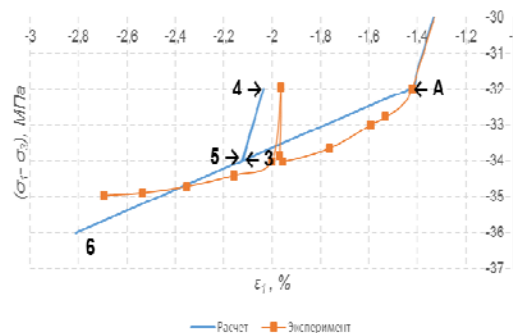


Рис. 2. Сложное нагружение известняка. Участок 3-4 – механическая разгрузка, 4-5 – восстановление напряжения Терцаги за счет изменения порового давления. Эксперимент по [2].

Литература

1. Xie, S. Y. An experimental study and constitutive modeling of saturated porous rocks / Xie, S. Y., Shao J. F. // Rock Mech Rock Eng (online). 2014. 12 p.
2. Kerbouche R. On the poroplastic behavior of porous rocks / Kerbouche R., Shao J.-F., Skozylas F., Henry J.-P // European Journal of Mechanics, A/Solids, 14, (4), 1995. pp. 3577–3587.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСТАНОВИВШЕГОСЯ НАПРЯЖЕННО-
ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ В СПЛОШНЫХ
ВРАЩАЮЩИХСЯ ДИСКАХ**

Кузнецов Е.Б., Леонов С.С.

*Московский авиационный институт (национальный исследовательский
университет), Россия
powerandglory@yandex.ru*

**DEFINITION OF STEADY STATE STRESS-STRAIN IN ROTATING
SOLID DISKS**

Kuznetsov E.B., Leonov S.S.

Moscow Aviation Institute, Russia

Рассматривается задача определения установившегося напряженно-деформированного состояния в сплошных вращающихся дисках с учетом ползучести. Указанная проблема описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений энергетического варианта теории ползучести с граничными условиями. Предложен метод решения данной задачи, основанный на нейросетевом моделировании. Полученное решение хорошо согласуется с результатами других авторов.

A problem of defining steady state stress-strain in rotating solid disks at creep conditions is considered. This problem is described by a system of nonlinear differential equations with boundary conditions. The equations of the energy variant of the creep theory are used. A method for solving this problem based on neural network modeling is proposed. The obtained solution agrees well with the results of other authors.

Во многих практических задачах строительной механики, самолетостроения и машиностроения возникает необходимость в расчете установившегося напряженно-деформированного состояния рабочих конструкций в условиях сложного напряженного состояния. При учете ползучести материала требуется применение уравнений одной из многочисленных теорий ползучести. Помимо сложности определяющих уравнений (являющихся нелинейными обыкновенными дифференциальными уравнениями), краевые задачи, к которым сводится рассматриваемая задача, могут быть недоопределенными. Это означает, что имеющихся краевых условий недостаточно для получения единственного решения задачи. Это осложняет применение традиционных методов решения краевых.

Рассматривается задача определения установившегося напряженного состояния в сплошных вращающихся дисках [1,2]. Для ее описания используется система уравнений энергетического варианта теории ползучести с краевыми условиями [2]. Особенностью рассматриваемой краевой задачи является то, что краевые условия на ободу диска заданы только для радиальной компоненты напряжения, а краевое условие в центре диска дается равенством радиальной и тангенциальной компонент

напряжения без задания их значений. Применение традиционных методов решения краевых задач (например, метода стрельбы) осложнено тем, что неизвестны начальные значения для компонент напряжения в центре диска. Для их определения необходимы дополнительные данные о процессе деформирования, в данном случае – упругое решение задачи [2]. Однако, решение упругой задачи для многих конструкций весьма сложно и целесообразнее применить иной подход.

Применим для решения описанной выше задачи метод нейронных сетей [3]. Для этого разложим обе компоненты напряжения по нейросетевому базису, в качестве которого используем функции Коши с набором линейно и нелинейно входящих параметров (нейросетевых коэффициентов) подлежащих определению. Нейросетевые разложения подставляются вместо искомых функций в рассматриваемую краевую задачу, используя которую составляется функционал ошибки, отражающий погрешность аппроксимации. Входящие параметры находятся в результате минимизации функционала ошибки.

Данный подход не чувствителен к форме записи системы определяющих уравнений и позволяет получить решение без рассмотрения упругой задачи, что является значительным преимуществом по сравнению с традиционными методами.

Помимо описанного подхода, для упрощения процесса минимизации можно перед построением функционала ошибки провести дискретизацию рассматриваемой задачи. Это более частный прием, но он позволяет уменьшить время счета и увеличить точность полученного решения.

В данной работе нейросетевой подход применен к решению задачи определения установившегося напряженного состояния во вращающемся диске из титанового сплава ОТ-4 при постоянной температуре в условиях ползучести [1,2]. Найденные нейросетевые решения хорошо согласуются с результатами работы [2].

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 13-08-00473.

Литература

1. Кузнецов Е.Б., Леонов С.С. Ползучесть и длительная прочность вращающихся дисков // Материалы XIX Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2015), 24–31 мая 2015 г., Алушта. – М.: Изд-во МАИ, 2015. – С. 292–294.
2. Соснин О.В., Горев Б.В., Никитенко А.Ф. Энергетический вариант теории ползучести. Новосибирск: Ин-т гидродинамики СО АН СССР, 1986. 96 с.
3. Васильев А.Н., Тархов Д.А. Нейросетевое моделирование. Принципы. Алгоритмы. Приложения. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2009. 528 с.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВОЛНЫ СЖАТИЯ СО СЛОЕМ КАВИТИРОВАННОЙ ВОДЫ ПРИ ЭЛЕКТРОГИДРОИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКЕ

*Мамутов В. С.**Санкт-Петербургский государственный политехнический университет**Петра Великого, Россия**v.mamutov@yahoo.com*

INTERACTION OF WAVE OF COMPRESSION WITH LAYER OF WATER AFTER CAVITATION AT ELECTRO-HYDRAULIC PROCESS

*Mamutov V.S.**Peter the Great Saint-Petersburg polytechnic university, Russia*

При конечно-элементных расчетах электрогидроимпульсной обработки материалов могут возникать зоны отрицательного давления в жидкости. Решением тестовой задачи со слоем пузырьковой жидкости рассмотрено распространение волны сжатия, идущей от канала разряда. Сделана оценка изменения формы волны и амплитуды давления. Рассмотрены возможности корректировки конечно-элементных моделей на основе комплекса LS-DYNA®, разработанные ранее.

1. Введение. Эффективность электрогидроимпульсной обработки (ЭГИО) материалов часто определяется уровнем максимального давления на объекте обработки в условиях ограниченной энергоемкости процесса. Использование для расчетов ЭГИО конечно-элементных моделей, разработанных на основе комплекса *LS-DYNA®* [1, 2], показало, что в зоне воздействия давления при некоторых условиях возможно возникновение областей с отрицательным давлением. Разработанные модели учитывают эффект кавитации жидкости приближенно. Кроме того, слой пузырьковой жидкости может быть создан искусственно до момента электрического разряда с целью интенсификации процесса. Целью данной работы являлась оценка влияния слоя пузырьковой жидкости на изменение параметров волны сжатия в условиях ЭГИО для последующей корректировки конечно-элементных моделей.

2. Модель электрогидроимпульсной обработки. Условно рассматривалось расширение сферического канала плазмы с параметрами ЭГИО в идеальной жидкости сферической геометрии, имеющей область без пузырьков, а также слой пузырьковой жидкости. Слой пузырьковой жидкости примыкал к границе, которая задавалась либо жесткой, либо подвижной. Для жидкости использовалось уравнение состояния, соответствующее адиабате Пуассона-Тэта

$$\rho = \rho_0 [1 - \lambda(p - p_0) + \beta(p_0 / p)^{1/\gamma}]^{-1/\gamma}; \quad \lambda = \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial p} \cong 1 / (2350 \text{ МПа}),$$

где ρ_0 – начальная плотность воды, p_0 – атмосферное давление, β –

пористость пузырьковой жидкости, $\gamma = 1,4$ показатель адиабаты газа. Для области жидкости, примыкающей к каналу разряда, полагалось $\beta = 0$. На границе канала разряда задавалось уравнение баланса энергии

$$(\gamma - 1)N(t) = V_k \frac{dp_k}{dt} + \gamma p_k \frac{dV_k}{dt},$$

где $\gamma = 1,26$ – показатель адиабаты плазмы, полученной из воды; V_k и p_k – объем канала и давление в нем, N – мощность ввода электрической энергии в канал разряда.

При численном решении гидродинамической задачи варьировались величина пористости и толщина слоя пузырьковой жидкости. Отмечено изменение исходной формы волны сжатия и увеличение амплитуды давления при подходе к границе при увеличении пористости воды в пузырьковом слое. Рассмотрены возможности корректировки конечно-элементных моделей, разработанных на основе комплекса *LS-DYNA*.

Литература

1. Mamutov Viacheslav, Mamutov Alexander, Sergey Golovaschenko Simulation of High-Voltage Discharge Channel in Water at Electro-Hydraulic Forming Using LS-DYNA® 13th International LS-DYNA® Users Conference, Metal forming, Dearborn, USA, June 8-10, 2014, p. 9.
2. Alexander V. Mamutov, Sergey F. Golovashchenko, Viacheslav S. Mamutov, John J.F. Bonnen. Modeling of electrohydraulic forming of sheet metal parts. Journal of Materials Processing Technology, 219 (2015), pp. 84-100.

УЧЕТ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ ОЦЕНКЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ ПЛЕНОЧНО-ТКАНЕВОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

Каюмов Р.А.¹, Мангушева А.Р.², Мухамедова И.З.¹

1 - Казанский государственный архитектурно-строительный университет, Россия

2 - Казанский национальный исследовательский технологический университет, Россия
alinamr@mail.ru

ACCOUNTING CHANGES IN TEMPERATURE IN ASSESSMENT OF DURABILITY FABRIC COMPOSITE MATERIAL

Kayumov R.A.¹, Mangusheva A.R.², Mukhamedova I.Z.¹

1 - Kazan State University of Architecture and Engineering, Russia

2 - Kazan National Research Technological University, Russia

Рассматриваются методики расчета напряженно-деформированного состояния и долговечности представительных элементов пленочно-тканевых композитных материалов (ПТКМ) на основе моделей поведения фаз ПТКМ при совместном воздействии силовых факторов, солнечной радиации и изменения температуры. Построена трехмерная модель поведения представительных элементов ПТКМ. Проведены качественные исследования закономерностей влияния перепада температуры на долговечность ПТКМ. В основе расчета долговечности лежит принцип линейного суммирования поврежденности.

1. Введение. Рассматривается ПТКМ, представляющая собой ткань из высокопрочных синтетических нитей и полимерного покрытия. Регулярность структуры ПТКМ позволяет выделить одну его ячейку, образованную двумя соседними парами нитей (основы и утка) (рис.1). Построены структуры определяющих соотношений для компонент ПТКМ, связывающих статические, кинематические и структурные параметры материала при наличии ультрафиолетового облучения и температуры.

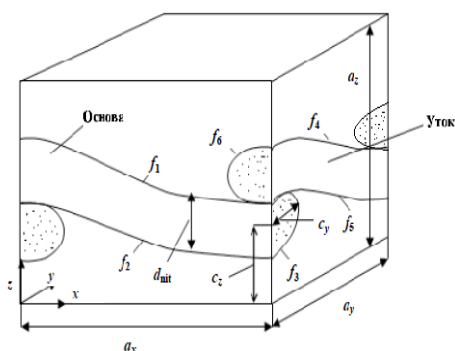


Рис. 1. Элементарная ячейка пленочно-тканевого композита

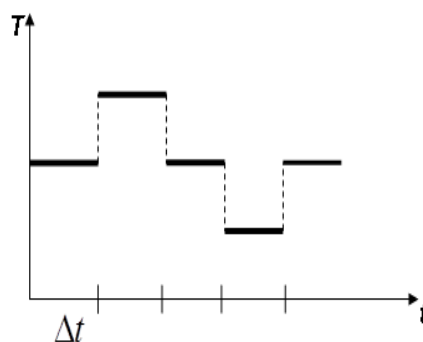


Рис.2. Аппроксимация температуры ступенчатой функцией

2. Решение задач при нестационарных изменениях температуры.

Проведены качественные исследования закономерностей влияния перепада температуры на долговечность ПТКМ. График изменения температуры представлен на рис.2. В этом случае для оценки долговечности используется принцип линейного суммирования поврежденности, согласно которому разрушение происходит при выполнении условия:

$$\sum_i \Delta t_i / t_i^* = 1 \quad (1)$$

Через Δt_i обозначен период времени, в течение которого температура считается постоянной. Например, определяемый как три месяца весны, лета, осени и зимы, перепад температуры за год происходит четыре раза. Согласно этому можно записать условие (1) в виде:

$$N_{лет} \cdot \left(\frac{\Delta t}{t_{весна}^*} + \frac{\Delta t}{t_{лето}^*} + \frac{\Delta t}{t_{осень}^*} + \frac{\Delta t}{t_{зима}^*} \right) = 1 \quad (2)$$

здесь $N_{лет}$ - искомое число лет, которое определяет долговечность рассматриваемого вида композита при том, или ином перепаде температуры ΔT . Механические характеристики будут зависеть от температуры T . Соотношение для скорости деформации ползучести по теории течения принималось в виде:

$$\{D\} = C(s_i) [D^{-1}] \{s\},$$

$$C(s_i) = (s_0 + s_1 s_i)^x,$$

где s_i – интенсивность напряжений, $[D^{-1}]$ – матрица, обратная матрице упругих постоянных для трехмерного деформированного состояния, s_0 , s_1 , x – механические характеристики.

Например, параметры, входящие в соотношения ползучести представлены в виде следующих функций:

$$c_0 = c_{01} \cdot f_1(T), \quad c_1 = c_{11} \cdot f_1(T),$$

$$\alpha_0 = \alpha_{01} \cdot f_1(T), \quad \alpha_1 = \alpha_{11} \cdot f_1(T) \quad (3)$$

$$\text{где } f_1 = \left(f_0 \cdot \left(\text{Arctg} \left[(T - T_{cp} + \frac{\text{tg} \left[\left[\frac{1}{f_0} - 1 \right] \cdot \frac{\pi}{2} \right]}{\theta_1}) \cdot \theta_1 \right] + \frac{\pi}{2} \right) / \frac{\pi}{2} \right)^2 \quad (4)$$

здесь $c_{01}, c_{11}, \alpha_{01}, \alpha_{11}$ - механические параметры, которые соответствуют средней температуре эксплуатации T_{cp} .

Литература

1. Каюмов, Р.А. Моделирование поведения плёночно-тканевого материала при воздействии эксплуатационных факторов / Р.А. Каюмов, А.М. Сулейманов, И.З. Мухамедова // Механика композиционных материалов и конструкций. 2005. т.11. № 4. - С. 519-530.
2. Каюмов, Р.А. Деформирование представительной ячейки плёночно-тканевого композита при конечных перемещениях / Р.А. Каюмов, В.Н. Куприянов, И.З. Мухамедова, А.М. Сулейманов, А.М. Шакирова // Механика композиционных материалов и конструкций. Том 13, 2, апрель-июнь 2007. Москва: РАН 2007. – С. 165-173.
3. Каюмов Р.А. К определению долговечности пленочно-тканевого композиционного материала, подвергаемого воздействию солнечной радиации./ Р.А. Каюмов, А.Р. Мангушева, А.Т. Мухаметшин – Ученые записки КГУ. Серия физ.-мат. науки. 2010. Т.152, кн. 4.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ БИАКСИАЛЬНОЙ СТЕКЛОТКАНИ

Мельников Б. Е., Маняк И. С.

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Россия*

ivan.manyak.89@mail.ru

Объект исследования – биаксиальная стеклоткань, которая представляется в виде двух разноориентированных монослоев. Из полученных экспериментально диаграмм деформирования стеклоткани определяются упругие и прочностные характеристики и константы модели прогрессирующего разрушения монослоя. Результаты конечно-элементного моделирования опытов на растяжение стеклоткани под разными углами относительно направления армирования сравниваются с экспериментом. Отмечаются преимущества и недостатки подобного подхода к описанию прочности стеклоткани, даются рекомендации.

The object of study is stitched biaxial fiberglass fabric, which is modeled in a form of two differently oriented monolayers. Elastic and strength properties and progressive failure model's constants of a monolayer are determined from fabric's stress-strain diagrams. Finite element modeling results of fiberglass fabric tension tests are compared with experiments. Advantages and disadvantages of such approach are mentioned. Recommendations are given.

1. Введение. Для прогнозирования прочности изделий из биаксиальных стеклотканей широкое распространение получили полиномиальные критерии [1,3], представляющие собой свертки тензора напряжений с тензорами прочности четных рангов. Главным недостатком применения таких критериев является большое количество констант, требующих экспериментального определения. В этой связи в работе делается попытка представления стеклоткани в виде набора однонаправленных монослоев, для которых модели и критерии прочности существенно проще.

2. Определение упругих и прочностных характеристик монослоя. Упругие и прочностные характеристики монослоя определялись через характеристики отдельных компонент (стекловолокон и полимерного связующего) по схеме Фойгта таким образом, чтобы в сумме два монослоя давали характеристики стеклоткани, полученные из опытов на растяжение в направлениях «0/90» и «+45/-45». Использовалась модель прогрессирующего разрушения Маценмиллера с многокомпонентным критерием прочности Хашина [2], который для случая плоского напряженного состояния записывается в виде

$$f_{ii} = \sqrt{\frac{\sigma_{ii}^2}{X_{ii}^2} + \frac{\sigma_{12}^2}{X_{12}^2}} \quad (1)$$

где σ_{ij} – напряжения Коши, X_{ij} - пределы прочности.

В соответствии с используемой моделью накопления повреждений Маценмиллера определяющие соотношения и закон накопления повреждений запишется в виде [3]

$$\sigma = C(D) \cdot \varepsilon,$$

$$D_{ii} = \varphi(f_{ii}), \text{ если } 0 \leq D \leq 1 \text{ и } \dot{D} \geq 0$$

$$\varphi(f) = \begin{cases} 0, \text{ если } f_{ii} < f_{ii \min} \\ D_{\max} \cdot \frac{f_{ii}^\alpha - f_{ii \min}^\alpha}{f_{ii \max}^\alpha - f_{ii \min}^\alpha}, \text{ если } f_{ii \min} < f_{ii} < f_{ii \max} \\ D_{ii \text{ final}} \text{ в пр. случае} \end{cases} \quad (2)$$

$$D_{12} = 1 - (1 - D_{11}) \cdot (1 - D_{22})$$

где ε – тензор деформаций, $\mathbf{D}$ – вектор, компонентами которого являются набор скалярных величин – параметров поврежденности D_{11} , D_{22} , D_{12} , $f_{\min}$, $f_{\max}$, α , $D_{\max}$, D_{final} – константы модели.

3. Результаты конечно-элементного моделирования в виде диаграмм деформирования представлены на рисунке 1.

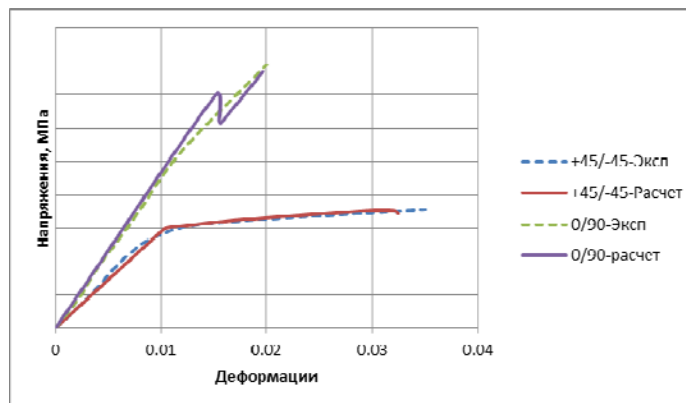


Рис. 1. Сравнение расчетных и экспериментальных диаграмм деформирования

Получено удовлетворительное совпадение расчета и эксперимента в упругой области и в точке разрушения. Расчетная кривая для армирования «0/90» имеет скачок, обусловленный практически мгновенным разрушением слоя «90», что является основным недостатком данного метода. В реальной биаксиальной стеклоткани нет явного разделения на слои, поэтому разрушение носит более плавный характер.

Литература

1. В.Л. Бажанов, И.И. Гольденблат, В.А. Копнов, А.Д. Пospelov, А.М. Синюков, Сопротивление стеклопластиков. М.: Химия, 1968.
2. Hashin Z., Rotem A., A fatigue failure criterion for fiber reinforced materials. Journal of Composite Materials, Vol. 7, no. 5. (1973) p. 448.
3. Matzenmiller, J. Lubliner, and R. Taylor. A constitutive model for anisotropic damage in fiber-composites. Mechanics of Materials, 20(12):125–152, 1995.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАТИКИ И ДИНАМИКИ ТРЕХМЕРНЫХ СОСТАВНЫХ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ТЕЛ МЕТОДОМ ГРАНИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Игумнов Л.А., Марков И.П., Аменицкий А.В.

*Научно-исследовательский институт механики Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, Россия
teanku@gmail.com*

STATIC AND DYNAMIC ANALYSIS OF 3D COMPOSITE PIEZOELECTRIC SOLIDS USING BEM

Igumnov L.A., Markov I.P., Amenitsky A.V.

Research Institute for Mechanics, Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod, Russia

Представлена схема прямого подхода метода граничных элементов в пространстве Лапласа для моделирования статики и динамики трехмерных составных пьезоэлектрических тел. Получение решений во временной области основано на модифицированном методе Дурбина. Используются интегральные представления фундаментальных решений. Для верификации предложенной гранично-элементной формулировки приводятся результаты численного моделирования.

Laplace domain direct boundary element approach for the three-dimensional static and dynamic analysis of the composite piezoelectric solids is presented. Time domain solutions are obtained by the modified Durbin's method. Integral representations of the fundamental solutions are used. Proposed boundary element formulation is verified through numerical examples.

1. Постановка краевой задачи. При нулевых начальных условиях, отсутствии объемных сил, и использовании преобразования Лапласа по времени, краевая задача для пьезоэлектрического тела $\Omega \subset R^3$ с границей Γ записывается в виде:

$$\begin{aligned} C_{ijkl} \bar{U}_{k,il} &= \rho s^2 \delta_{jk}^* \bar{U}_k, \quad \Omega \subset R^3, \quad i, l = \overline{1,3}, j, k = \overline{1,4}, \\ \bar{U}_k &= \tilde{U}_k \text{ на } \Gamma^U, \quad \bar{T}_k = \tilde{T}_k \text{ на } \Gamma^T, \\ \delta_{jk}^* &= \begin{cases} \delta_{jk}, & j = k = \overline{1,3}, \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases} \end{aligned} \quad (1)$$

где C_{ijkl} – компоненты обобщенного материального тензора, $\bar{U}_k = \{\bar{u}_i, \bar{\varphi}\}$ и $\bar{T}_k = \{\bar{t}_i, \bar{q}\}$ – компоненты векторов обобщенных перемещений и усилий в изображениях по Лапласу, ρ – плотность материала, s – параметр преобразования Лапласа.

2. Гранично-элементная схема. Для решения поставленной краевой задачи используется прямой подход метода граничных интегральных уравнений (ГИУ) в пространстве изображений по Лапласу.

Граничное интегральное представление решения задачи (1) может быть записано как

$$c_{jk} \bar{U}_k(\mathbf{x}, s) = \int_{\Gamma} \bar{g}_{jk}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, s) \bar{T}_k(\mathbf{y}, s) d\Gamma(\mathbf{y}) - p v \int_{\Gamma} \bar{h}_{jk}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, s) \bar{U}_k(\mathbf{y}, s) d\Gamma(\mathbf{y}), \quad \mathbf{x} \in \Gamma, \quad (2)$$

где $\bar{g}_{ij}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, s)$ и $\bar{h}_{ij}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, s)$ – матрицы фундаментальных и сингулярных решений. В силу того, что для пьезоэлектрических материалов не существует представления фундаментальных решений в явном виде, используются соответствующие интегральные выражения: в виде интеграла по единичной полусфере для динамической части и интеграла по единичной окружности для статической части. Для повышения эффективности вычислений применяется специальная схема аппроксимации фундаментальных решений по граничным элементам.

Методика решения ГИУ (2) основана на использовании смешанных граничных элементов. В качестве проекционного метода используется метод коллокаций. Разрешающая система линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) для задач с несколькими подобластями (составные тела) строится при использовании условий жесткого контакта. Модифицированный метод Дурбина применяется для получения оригинала решения.

3. Численные примеры. Решены статический и динамический варианты задачи о многослойной пьезоэлектрической квадратной пластине под действием механической или электрической нагрузок [1, 2]. Длина стороны относительно общей толщины пластины равна 4. Все слои имеют одинаковую толщину. Полученные результаты приведены в сравнении с решениями других авторов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 15-08-02814, 15-48-02333, 13-08-00658, 14-08-31410, 15-38-50827).

Литература

1. F. Moleiro, C.M. Mota Soares, C.A. Mota Soares, J.N. Reddy. Benchmark exact solutions for the static analysis of multilayered piezoelectric composite plates using PVDF. Compos Struct 2014;107:389-395.
2. Guanghui Qing, Jianxin Xu, Pei Li, Jiajun Qiu. A new efficient numerical method and the dynamic analysis of composite laminates with piezoelectric layers. Compos Struct 2007;78:457-467.

УДК 539.3

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УДАРА КРУГОВОЙ ТРЕХСЛОЙНОЙ ПЛАСТИНЫ НЕСИММЕТРИЧНОГО СТРОЕНИЯ ПО ТОЛЩИНЕ О ЖИДКОСТЬ

Крупенин А.М., Мартиросов М.И.

*Московский авиационный институт (национальный исследовательский
университет), Россия
Zeus-RUSS@yandex.ru*

FINITE-ELEMENT MODELING OF IMPACT OF ROUND THREE-LAYERED ASYMMETRIC PLATE WITH LIQUID

Krupenin A.M., Martirosov M.I.

Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

Методом конечных элементов исследуются динамические характеристики трехслойной несимметричной по толщине пластины при ударном взаимодействии с водой.

The dynamic characteristics of asymmetric three-layer plate under shock interaction with water are investigated with finite element method.

Рассматривается вертикальный удар о первоначально невозмущенную свободную поверхность идеальной сжимаемой жидкости круговой упругой трехслойной пластины несимметричного строения по толщине. Исследуется начальный этап такого взаимодействия, когда возникают максимальные гидродинамические нагрузки.

Толщины несущих слоев и заполнителя считаются известными, используемые материалы - заданными. Для изотропных несущих слоев приняты гипотезы Кирхгофа о несжимаемости, прямолинейности и перпендикулярности нормали к деформированной срединной поверхности. В несжимаемом по толщине сплошном изотропном заполнителе деформированная нормаль остается прямолинейной. Рассматриваются различные типы сплошного изотропного заполнителя трехслойного пакета по существующим классификациям. При принятых допущениях получены и проанализированы уравнения движения пластины.

Гидродинамическое давление, действующее на пластину при ударе, определяется приближенно по различным верифицированным отечественным и зарубежным методикам с учетом сжимаемости жидкости как для однослойной изотропной пластины.

Задача решается численно. Расчеты выполнены с помощью разработанного программного модуля методом конечных элементов в нелинейной постановке в среде MathCAD Professional 2001. Получены и исследованы эпюры гидродинамических давлений, нагрузок, перемещений, скоростей, ускорений, а также напряжений по времени и координате (по каждому из слоев трехслойного пакета). Проводится параметрический анализ. Дается сравнение полученных результатов с результатами расчетов,

выполненными с помощью программного комплекса ANSYS AUTODYN, а также с некоторыми имеющимися аналитическими и экспериментальными данными, полученными другими авторами при решении аналогичной задачи. Выработаны рекомендации по использованию полученных результатов на практике применительно к сбросу грузов на платформах с авиационных носителей на водную поверхность.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (код проекта 11-01-00540_а).

УДК 539.3

**ДЕФОРМИРОВАНИЕ И РАЗРУШЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ
АВИАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ
КОМПОЗИТОВ С УГЛЕРОДНЫМ НАПОЛНИТЕЛЕМ**

Мартиросов М.И., Ершова А.Ю.

*Московский авиационный институт (национальный исследовательский
университет), Россия
Yershova_A@mail.ru*

**DEFORMATION AND FRACTURE OF ELEMENTS OF AIRCRAFT
STRUCTURES MADE OF POLYMER COMPOSITES WITH CARBON
FILLER**

Martirosov M.I., Yershova A.U.

Moscow Aviation Institute (National Research University), Russia

Рассматривается деформирование и разрушение плоской панели, выполненной из углепластика.

Considered the deformation and failure of flat panels made of carbon fiber.

Полимерный композиционный материал (ПКМ) – материал конструкционного назначения, состоящий из высокопрочных (средне- или высокомодульных) волокон (наполнителя) и полимерной матрицы (отвержденного связующего) широко применяется в настоящее время в авиастроении.

Механика разрушения элементов конструкций из ПКМ весьма сложна из-за анизотропии, взаимного влияния напряженно-деформированного состояния (НДС) отдельных монослоев, образующих композитный пакет (КП), специфики структуры и ряда других причин.

Анализ прочности КП обычно сводится к анализу НДС его монослоев и определению их коэффициентов запаса по различным критериям. Минимальный из них определяет запас прочности всего КП.

Для КП не существует однозначного критерия разрушения. Имеющиеся критерии являются феноменологическими и описывают прочность в монослое на основе экспериментов по результатам испытаний на растяжение, сжатие и сдвиг. Критерии разрушения определяют критическую комбинацию действующих в монослое напряжений или деформаций, которая и приводит к разрушению.

У ряда применяемых на практике критериев разрушения КП серьезным недостатком является невозможность определения причины разрушения монослоя (разрушается матрица или волокно). Однако разрушение матрицы отдельного монослоя может не привести к исчерпанию его несущей способности и КП может и далее воспринимать действующую нагрузку (критерии Hill, Hoffman, Tsai-Wu и другие). В настоящее время получили распространение критерии, которые дают возможность определить запасы прочности матрицы и волокна отдельно (критерии Puck, Hashin-Rotem).

Математически критерии разрушения, как правило, описываются функциями, значения которых сравниваются с единицей.

В работе рассматривается плоская панель прямоугольной формы из углепластика марки BNCF IMS 24K/PRISM EP 2400RS на основе связующего PRISM EP 2400RS производства фирмы Cytac Engineered Materials (США) и углеродной ленты BNCF IMS 24K производства фирмы Toho Tenax (Япония). Смола – эпоксидная. Преимуществом эпоксидных смол являются высокая прочность и модуль упругости, низкая летучесть, отличная адгезия, низкая усадка, химическая инертность. Основными недостатками можно считать хрупкость и ухудшение свойств в присутствии влаги. Отверждение таких смол происходит медленнее, чем полиэфиров. Стоимость также выше, чем полиэфиров. Углеродные волокна представляют собой синтетический материал органического происхождения – полиакрилонитрил, насыщенный углеродом. Химические формулы и рецептуры связующего и армирующих волокон являются ноу-хау их производителей. Панель выполнена по безавтоклавной инфузионной технологии. Инфузионная технология – процесс пропитки сухого армирующего наполнителя в виде преформы связующим при комнатных или повышенных температурах за счет создаваемого вакуума. Преформа – предварительно уплотненный с помощью давления и температуры сухой армирующий наполнитель, принимающий форму будущего изделия. Для скрепления армирующего наполнителя в преформе используется биндер (связующий компонент).

Формат укладки панели – смешанный с преобладанием сдвиговых волокон: $+45^0/90^0/-45^0/+45^0/90^0/-45^0/0^0/0^0/-45^0/90^0/+45^0/-45^0/90^0/+45^0$ (всего в КП 14 слоев). Характеристики монослоя известны (толщина, плотность, объемное содержание наполнителя, пределы прочности при растяжении и сжатии вдоль и поперек волокна, предел прочности при сдвиге в плоскости КП, модули упругости при растяжении и сжатии вдоль и поперек волокна, модуль упругости при сдвиге в плоскости КП, коэффициент Пуассона). Определяются жесткостные и прочностные характеристики КП. Проводится расчет на прочность данной панели методом конечных элементов (МКЭ) в линейной постановке под действием различных комбинаций заданных статических нагрузок (основной вариант нагружения – растяжение-сжатие в двух направлениях и сдвиг). Рассматриваются различные варианты граничных условий (шарнирное опирание; защемление; один из краев шарнирно оперт, другой свободен; один из краев защемлен, другой свободен). Используются следующие критерии разрушения: maximum stress, maximum strain, Hill, Hoffman, Tsai-Wu, Tsai-Hill (Hill-Mises), Hankinson, Cowin, Grant-Sanders, Puppo-Evensen, Yamada-Sun, Norris, Fischer (Modified Norris), Norris-McKinnon, Puck, Hashin-Rotem и другие. Дается сравнение результатов, полученных по различным критериям разрушения. Выработаны практические рекомендации. Расчеты проведены с помощью программного комплекса NX 7.5 с использованием приложения Advanced Simulation, применены конечные элементы типа Laminate и Shell.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 11-01-00540_а).

**ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ СВЯЗЕЙ СЦЕПЛЕНИЯ ПРИ
ВДАВЛИВАНИИ СТЕРЖНЯ ЖЕСТКОЙ АРМАТУРЫ В БЕТОН**

Кашееварова Г.Г.¹, Мартиросян А.С.¹, Травуш В.И.²

*1 - Пермский национальный исследовательский политехнический
университет, Россия*

*2 - Российская академия архитектуры и строительных наук, Россия
anka_31@mail.ru*

**STUDY OF ADHESION BONDS DESTRUCTION WHEN RIGID
REINFORCEMENT BAR IS PRESSED IN THE CONCRETE**

Kashevarova G.G.¹, Martirosyan A.S.¹, Travush V.I.²

1 - Perm National Research Polytechnic University, Russia

2 - Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Moscow, Russia

В данной работе приводятся результаты экспериментального и теоретического исследований процесса разрушения связей сцепления при вдавливании стержня жесткой арматуры в бетон. Изучаются возможности повышения прочности сцепления. Для верификации результатов расчетов с натурными экспериментами решается контактная задача, позволяющая визуально представить зоны появления и распространения трещин при использовании разных расчетных моделей.

This paper presents the results of experimental and theoretical study of the process of destruction of adhesion bonds indentation rod rigid reinforcement in concrete and the possibility of increasing the strength of adhesion. The contact value problem was solved. This enabled to visualize the areas of appearance and propagation of cracks when using different computational models.

1. Введение. В настоящее время в современных высотных зданиях получили распространение железобетонные конструкции колонн с жесткой арматурой. Известно, что один из ключевых факторов, обеспечивающих совместную работу арматуры и бетона в конструкции и позволяющих работать двухкомпонентному железобетону как единому материалу, является сцепление арматуры с бетоном. Традиционно это обеспечивается за счет рифления на поверхности арматуры, что обеспечивает сопротивление бетона смятию и срезу [1, 2]. На жесткой арматуре такое рифление отсутствует, поэтому требуется исследование, насколько конкретное внешнее воздействие не нарушит совместной работы композита.

2. Экспериментальные исследования. Прочность сцепления арматуры с бетонной матрицей зависит от силы трения, на поверхности арматуры вследствие обжатия при усадке бетона, адгезионного сцепления арматуры с бетоном вследствие клеящей способности цементного геля, а также вида напряженного состояния в области контакта. Процесс разрушения связей сопровождается появлением и развитием трещин, а также изменением зон контакта.

Проблеме сцепления арматуры с бетоном уделяется большое внимание, но анализ исследований в этой области свидетельствует о неоднозначности подходов к решению и об отсутствии теоретически обоснованной методики расчета.

Экспериментальные исследования включали испытания пяти вариантов образцов при вдавливании стержня жесткой арматуры в бетон:

- стандартные образцы с жесткой арматурой;
- образцы с жесткой арматурой, усиленные стержнями гибкой арматуры;
- образцы с нанесением на жесткую арматуру полимерного слоя для повышения сцепления.
- образцы из фибробетона (с добавлением в бетон волокон хризотила для повышения пластичности);
- образцы из фибробетона с нанесением на жесткую арматуру полимерного слоя и хризотила.

3. Теоретические (численные) исследования. Решалась контактная задача типа “поверхность-поверхность” в программном комплексе ANSYS для проверки обеспечения совместной работы бетона и жесткой арматуры, на которой отсутствует рифление.

Основными характеристиками при описании свойств материалов являются диаграммы деформирования: для бетона, учитывающая накопление структурных повреждений и деформационного разупрочнения; для стали – упруго-пластическая модель, и кривая зависимости касательных напряжений сцепления от смещения арматуры относительно бетона, полученная из экспериментов.

Показано влияние на несущую способность конструкции всех компонентов (жесткой и гибкой арматуры), нелинейных свойств материалов, учета контактного взаимодействия элементов. Указано на расхождение результатов расчета по различным моделям и возможность выбора на основании этого наиболее адекватной расчетной модели.

Литература

- 1 - Бенин А.В., Семенов А.С., Семенов С.Г., Мельников Б.Е. Математическое моделирование процесса разрушения сцепления арматуры с бетоном. Часть 1. Модели с учетом несплошности соединения. Инженерно-строительный журнал, №5, 2013. с. 88-144.
- 2 - Перельмутер А.В., Сливкер В.И. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа. – М.: ДМК Пресс, 2007. – 699с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДОМ НАЧАЛЬНЫХ ФУНКЦИЙ ИЗГИБА ПЛИТ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СОБСТВЕННОГО ВЕСА

Матросов А.В.^{1,2}, Ширунов Г.Н.³

1 - Санкт-Петербургский государственный университет, Россия

2 - Санкт-Петербургский государственный университет морского и речного флота, Россия

*3 - ООО «ТЕКТОН», Россия
avmatrosov@mail.ru*

SIMULATION OF BENDING PLATES UNDER ITS OWN WEIGHT BY THE METHOD OF INITIAL FUNCTIONS

Matrosov A.V.^{1,2}, Shirunov G.N.³

1 - Saint-Petersburg state university, Russia

2 - Saint-Petersburg admiral Makarov state university of maritime and inland shipping, Russia

3 - «TEKTON» Ltd, Russia

Изгибные напряжения плиты под действием собственного веса определяются из решения неоднородной системы уравнений равновесия в перемещениях в декартовой системе координат. В качестве решения однородной системы, удовлетворяющее произвольным граничным условиям (ГУ) на двух противоположных гранях плиты (общее решение), использовано решение, полученное методом начальных функций (МНФ). В качестве частного решения неоднородной системы использовано решение с нулевыми перемещениями и напряжениями на начальной плоскости, которое совместно с решением МНФ позволяет удовлетворить произвольным ГУ на двух противоположных гранях плиты. Приведены расчеты напряженно-деформированного состояния толстой многослойной плиты.

Stresses of a plate bended by its own weight are determined by solving the non-homogeneous system of equilibrium equations in displacements in Cartesian coordinates. The solution obtained by the method of initial functions (MIF) is used as a general solution of the homogeneous system. The solution satisfied zero displacements and stresses on the initial plane is used as a partial solution of the non-homogeneous system. The results of analyses of the thick multilayer plate are presented.

1. Введение. В прямоугольной декартовой системе координат уравнения равновесия в перемещениях с учетом веса конструкции имеют следующий вид

$$\begin{aligned} 2(\nu-1)\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + (2\nu-1)\left(\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right) - \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} - \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial z} &= 0, \\ -\frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} + 2(\nu-1)\frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + (2\nu-1)\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}\right) - \frac{\partial^2 w}{\partial y \partial z} &= 0, \\ -\frac{\partial^2 u}{\partial x \partial z} - \frac{\partial^2 v}{\partial y \partial z} + (2\nu-1)\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}\right) + 2(\nu-1)\frac{\partial^2 w}{\partial z^2} &= -\rho g. \end{aligned} \quad (1)$$

Общее решение однородной системы в тригонометрических рядах, позволяющее удовлетворить произвольным ГУ на гранях $z = 0, h$, получено методом начальных функций в замкнутой форме [1,2]

$$U = \tilde{L}U^0 \quad (2)$$

Частное решение неоднородной системы (1) получено в виде, при котором компоненты напряженно-деформированного состояния на начальной плоскости равняются нулю

$$u^p = v^p = 0, w^p = -\frac{\rho g(1+\nu)(1-2\nu)}{2E(1-\nu)}z^2, \quad (3)$$

$$\sigma_x^p = \sigma_y^p = -\frac{\rho g\nu}{1-\nu}z, \sigma_z^p = -\rho g z, \tau_{xy}^p = \tau_{xz}^p = \tau_{yz}^p = 0.$$

Сумма решений (2) и (3) представляет общее решение поставленной задачи для однослойной плиты.

В случае многослойности для каждого слоя строится свое общее решение. При переходе от слоя к слою учитываются условия их контакта в соответствии с алгоритмом [3,4]. В результате для каждой гармоники в общем решении получается система трех алгебраических уравнений для удовлетворения ГУ на нижней грани плиты.

2. Расчет трехслойной плиты. Рассмотрена квадратная в плане плита ($L_x=L_y$) относительной толщины $h/L_x=1/3$ со следующими характеристиками слоев: $h_1=0,375h$, $h_2=0,5h$, $h_3=0,125h$, $E_1=E_3=2200000000$ Па, $\nu_1=\nu_3=0,2$, $\rho_1=\rho_3=2500$ кг/м³, $E_2=5000000000$ Па, $\nu_2=0,1$, $\rho_2=1500$ кг/м³. Результаты расчетов представлены на рис. 1.

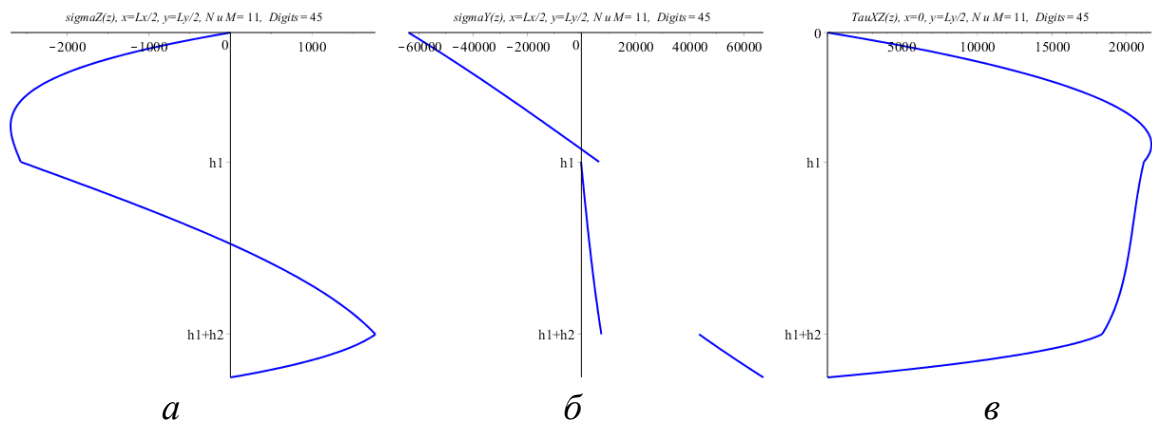


Рис. 1. Напряжения σ_z (а) и σ_y (б) в центре плиты и τ_{xz} (в) в середине грани

$x = 0$

Литература

1. Матросов А.В., Ширунов Г.Н. Алгоритмы получения замкнутых форм операторов метода начальных функций для пространственных задач теории упругости // Вестник гражданских инженеров. 2014. № 1(42). С. 136-144.
2. Матросов А.В., Ширунов Г.Н. Метод суперпозиции в решении задачи упругого изотропного параллелепипеда // Вестн. С.-Петерб. ун-та. Сер. 10: Прикладная математика, информатика и процессы управления. 2015. Вып. 2. С. 79-92.

3. Galileev S.M., Matrosov A.V., Verizhenko V. E. Method of initial functions for layered and continuously inhomogeneous plates and shells // *Mechanics of Composite Materials*. 1995. T. 30. № 4. С. 386-392.
4. Matrosov A.V., Shirunov G.N. Numerical-analytical computer modeling of a clamped isotropic thick plate // 2014 International conference on computer technologies in physical and engineering applications (ICCTPEA) Editor: E. I. Veremey; IEEE (IEEE Catalog number CFP14BDA-USB). 2014. P. 96.

ОБОБЩЕНИЕ МЕТОДА СИЛ ДЛЯ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО РАСЧЕТА СТЕРЖНЕВЫХ СИСТЕМ

Рутман Ю.Л., Мелешко В.А.

*Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный
университет, Россия
vl-meleshko@yandex.ru*

THE GENERALIZATION OF THE FLEXIBILITY METHOD FOR ELASTOPLASTIC COMPUTATION OF ROD SYSTEMS

Rutman U.L., Meleshko V.A.

St.-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

На основе обобщения метода сил разработаны математические модели, описывающие упруго пластическое деформирование стержней. Решение тестовых упругопластических задач реализовано в среде MathCad.

On the basis of generalization of the flexibility method developed mathematical models describing the elastoplastic deformation of the rods. The elastoplastic solution of the test problems implemented in MathCad.

1. Введение. В настоящее время процесс упругопластического деформирования конструкций можно рассчитать только используя мощные компьютерные программы, которые базируются на применении МКЭ. В докладе для упругопластического расчета стержневых систем будет рассмотрен обобщенный метод сил. Это обобщение предполагает использование явной по времени вычислительной схемы и определения на каждом шаге касательных жесткостей системы.

При решении упругопластических задач на основе МКЭ на каждом временном шаге надо решать систему алгебраических уравнений, число которых пропорционально числу конечных элементов. Это тысячи или десятки тысяч уравнений. При применении обобщенного метода сил возрастает число подготовительных операций, однако число алгебраических уравнений на каждом шаге равно лишь числу статической неопределимости стержневой системы.

2. Основные соотношения для определения касательных жесткостей. Для определения касательных жесткостей сечений стержней была разработана математическая модель, в основе которой положены следующие матричные соотношения:

а) геометрические соотношения, связывающие скорости изменения кинематических параметров со скоростями деформаций в точке.

$$\dot{\epsilon} = S\dot{\psi} \quad (1)$$

где ψ -матрица-столбец кинематических параметров (угловых скоростей и кривизн сечений).

Компоненты S зависят от координат рассматриваемой точки сечения стержня.

ε -матрица-столбец деформаций в точке сечения;

$$\text{б) } \dot{\sigma} = A \dot{\varepsilon}, \quad (2)$$

где σ -матрица-столбец напряжений в точке сечения.

Компоненты матрицы A зависят от напряжений в точке сечения на данном временном шаге. При упругом деформировании матрица A соответствует обобщенному закону Гука.

Из (1), (2) получаем

$$\dot{\sigma} = A S \dot{\psi}. \quad (3)$$

Умножая правую и левую часть (3) на матрицу координат точек сечения L и интегрируя полученные выражения по сечению стержня, получаем

$$\int_F L \dot{\sigma} dF = \int_F L A S \dot{\psi} dF = \int_F L A S dF \cdot \dot{\psi} = T \dot{\psi}, \quad (4)$$

где

$$T = \int_F L A S dF \quad (5)$$

касательные жесткости сечения в условиях упругопластического деформирования.

Левая часть в (4) представляет собой матрицу-столбец производных по времени внутренних усилий в сечении:

$$\int_F L \dot{\sigma} dF = \frac{\partial M}{\partial t}. \quad (6)$$

Таким образом, получаем обобщенную формулу Мора:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = T \dot{\psi}. \quad (7)$$

При создании вычислительных алгоритмов на каждом временном шаге вышеприведенные формулы записываются в виде инкрементальных соотношений.

На основе (7) уравнения метода сил для условий упругопластического деформирования также записываются в инкрементальной форме. Число этих уравнений равно степени статической неопределимости системы.

3. Численная реализация разработанного алгоритма. Сравнение полученных результатов. Для проверки разработанной математической модели были решены несколько тестовых задач обобщенным методом сил в MathCad.

Сравнение полученных результатов с ПК ANSYS показало хорошее совпадение по суммарным напряжениям от изгибающих моментов на краях сечения (отклонение $< 9\%$ для рамы, $< 2\%$ для консоли).

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ КОРОТКОЙ УСТАЛОСТНОЙ
ТРЕЩИНЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЛОКАЛЬНОГО КРИТЕРИЯ
РАЗРУШЕНИЯ**

Семенов А.С.¹, Носиков А.И.¹, Мельников Б.Е.¹, Раимбердиев Т.П.²

1 - ФГАОУ ВО СПбПУ, Россия

*2 - Университет Ахмеда Ясави, пр.Б.Саттарханова, Туркестан
melnikovboris@mail.ru*

**PREDICTION OF SHORT FATIGUE CRACK PROPAGATION ON THE
BASE OF NON-LOCAL FRACTURE CRITERION**

Semenov A.S.¹, Nosikov A.I.¹, Melnikov B.E.¹, Raimberdiyev T.P.²

1 - St. Petersburg State Polytechnic University, Russia

2 - Hoja Akhmet Yasawi International Kazakh-Turkish University, Turkestan

Использование нелокальной меры напряженно-деформированного состояния в модели Дагдейла-Леонова-Панасюка позволило прогнозировать развитие усталостной трещины при интенсивности напряжений ниже порогового значения коэффициента интенсивности, что характерно для ниспадающей части кинетической диаграммы усталостного нагружения. Такая ситуация актуальна для описания развития коротких усталостных трещин. Трещина считается короткой, если ее длина близка к значению структурного параметра материала. Предполагается, что рост усталостной трещины возможен тогда и только тогда, когда величина нелокальной меры напряженно-деформированного состояния достигнет предела текучести.

Using non-local measures of stress-strain state of the model Dagdale-Leonov-Panasjuk allowed to predict the propagation of the fatigue crack when the stress intensity factor is below a threshold intensity that is characteristic to the falling part of the kinetic diagram's of fatigue loading. Such a situation is relevant to describe the propagation of short fatigue cracks. A crack can be considered short if it's length is close to the value of the material's structural parameter. It is expected that the growth of a fatigue crack is possible only if the value of the non-local action of the stress-strain state reaches the yield stress.

Исследуется распространение прямолинейной трещины, при этом применяется одномерное осреднение.

Проведено моделирование развития короткой усталостной трещины в рамках модели Дагдейла-Леонова-Панасюка с использованием нелокального критерия разрушения.

Моделирование усталостного распространения короткой трещины проведено в предположении, что:

- скорость роста трещины зависит от размаха размера концевой зоны;
- скорость роста трещины зависит от размаха раскрытия трещины.

Результаты.

Разработана аналитическая модель описания развития короткой усталостной трещины на основе нелокального критерия разрушения. Модель позволяет описать аномальное поведение короткой трещины в окрестности

порогового коэффициента интенсивности: ниспадающий участок кинетической диаграммы усталостного разрушения до порогового значения коэффициента интенсивности напряжений.

Исследовано применение двух гипотез распространения трещины:

- скорость роста трещины зависит от размаха размера концевой зоны трещины;

- скорость роста трещины зависит от размаха ее раскрытия.

Первая гипотеза позволяет моделировать существование одного порогового значения коэффициента интенсивности напряжений. Результаты расчета порогового коэффициента интенсивности удовлетворительно соответствуют данным эксперимента.

Вторая гипотеза указывает на существование двух пороговых значений коэффициента интенсивности напряжений. Минимальный из двух коэффициентов совпадает с пороговым коэффициентом интенсивности, найденным на основе первой гипотезы.

О СТРУКТУРНОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ УДАРНО-ДЕФОРМИРУЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ

Мещеряков Ю.И.¹, Жигачева Н.И.¹, Диваков А.К.¹, Коновалов Г.В.¹, Фомина О.В.²

1 - Институт проблем машиноведения РАН, Россия

*2 - Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов "Прометей", Россия
ym38@mail.ru*

Несмотря на то, что с момента первых публикаций, касающихся экспериментов по одноосной деформации материалов, прошло более пятидесяти лет, механика многомасштабного динамического деформирования до сих пор не включена в описание ударно-волновых процессов. Это связано с тем, что отсутствуют соотношения, связывающие динамические переменные на разных масштабных уровнях. Эти соотношения должны описывать текущий обмен импульсом и энергией между уровнями в процессе деформирования. Как показывают эксперименты, подобный обмен действительно имеет место и может быть зарегистрирован в реальном масштабе времени. Количественной характеристикой энергообмена между масштабными уровнями является так называемый «дефект» скорости на плато импульса сжатия. Он появляется вследствие потерь импульса и энергии при структурных превращениях материала в процессе динамического деформирования. В случае ударного нагружения определение дефекта массовой скорости основано на независимом измерении скорости свободной поверхности U_{fs} , с одной стороны, и скорости ударника при его соударении с мишенью, с другой стороны. Как известно, при симметричном соударении массовая скорость U_p равна половине скорости ударника, т.е. $U_{y0} = 0,5 U_p$. С другой стороны, при выходе волны на свободную поверхность массовая скорость удваивается, т.е. $U_{fs} = 2U_p$, откуда следует, что в случае отсутствия потери импульса должно выполняться равенство $U_{y0} = U_{fs}$.

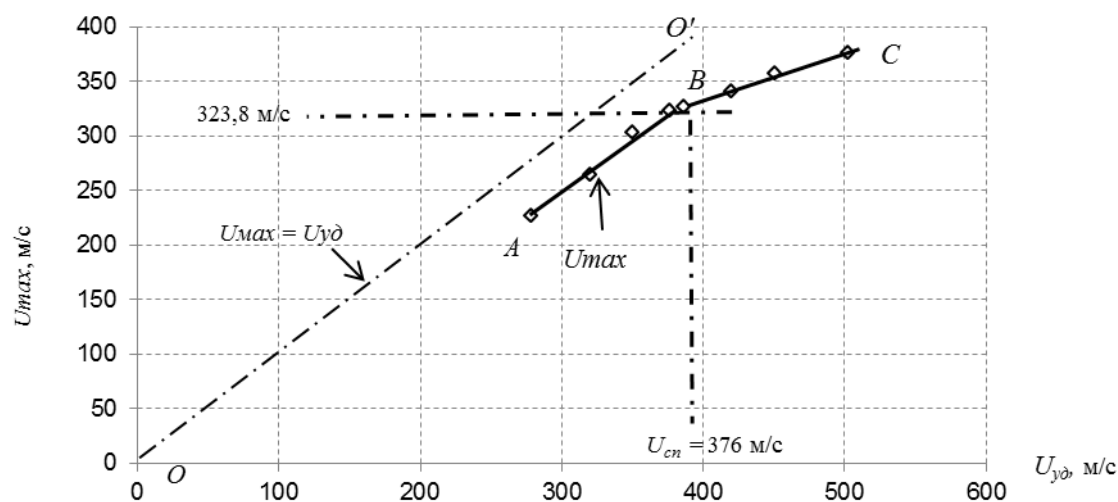


Рис.1. Зависимость максимального значения скорости от скорости ударника для стали 30ХН4М.

В действительности, как показывают ударные эксперименты, это соотношение не выполняется из-за того, что в материале мишени происходит потеря импульса за счет внутренних процессов гетерогенизации структуры. При этом дефект скорости определяется как разность между скоростью ударника и максимальным значением скорости свободной поверхности на плато импульса сжатия $U_{\text{деф}} = U_{yd} - U_{\text{max}}$.

В качестве примера на Рис. 1 представлена зависимость для стали 30ХН4М. Из рисунка видно, что при скорости ударника $U_{yd} = 376$ м/с имеет место излом кривой $U_{\text{max}} = f(U_{yd})$. Величина скорости ударника, при которой происходит излом зависимости кривой $U_{\text{max}} = f(U_{yd})$, определяет скорость деформации, соответствующей порогу структурного перехода, равному $U_{cn} = 323,8$ м/с. Выше скорости ударника 376 м/с кривая зависимости $U_{\text{max}} = f(U_{yd})$ отклоняется от линии $U_{yd} = U_{fs}$, (отрезок BC на Рис. 1), что говорит о том, что дефект скорости начинает нарастать

Рис.2 демонстрирует принципиально разную картину поведения дефекта скорости для низколегированной стали АБ2-1, структурный переход для которой происходит при скорости ударника 310 м/с и для азотосодержащей стали 04Х20Г11Н6М2АФБ, в которой структурный переход в том же диапазоне скоростей отсутствует.

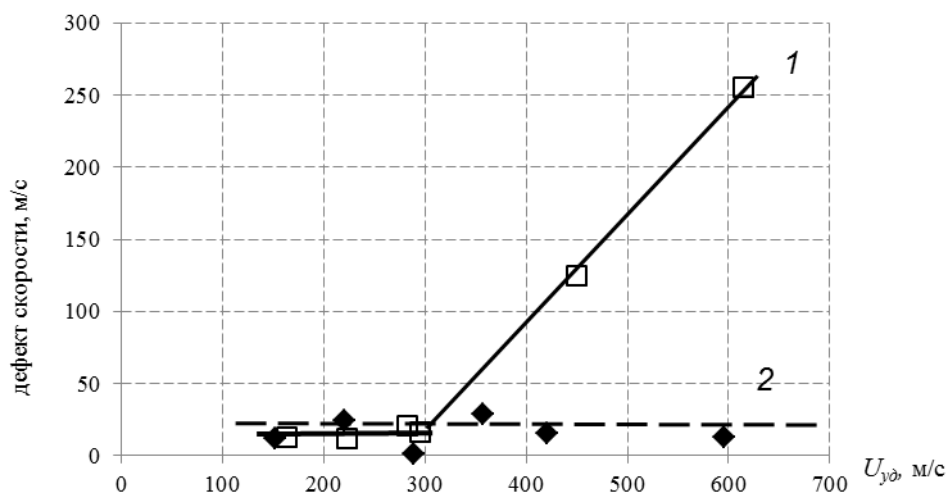


Рис. 2. Зависимость дефекта скорости от скорости ударника для перлитной стали АБ2-1 (1) и для азотосодержащей стали 04Х20Г11Н6М2АФБ (2).

Эксперименты по ударному нагружению конструкционных материалов показывают, что выше порога структурной неустойчивости резко изменяются все физико-механические характеристики – динамический предел текучести, откольная прочность и дефект скорости. Это значение скорости деформации является **критическим** для данного материала. Приведенные выше примеры свидетельствуют о том, что порог структурной неустойчивости и дефект скорости являются важными характеристиками отклика материала на ударное нагружение, на которые влияют как состояние его структуры, так и параметры процесса нагружения.

Увеличение порога структурной неустойчивости является эффективным и хорошо контролируемым средством модификации материала с точки зрения повышения его динамической прочности и пластичности. Так, специальная термомеханическая обработка стали 40ХСНМА, проведенная в НПО Специальных материалов, привела к тому, что в нужном для практики диапазоне скоростей ударника структурный переход исчезает (сравни Рис. 3а и 3б). что существенно увеличивает откольную прочность этой стали. Увеличение порога структурной неустойчивости приводит также к увеличению сопротивляемости материала высокоскоростному прониканию удлиненных ударников. Знание порога структурной неустойчивости материала дает возможность непосредственно определить константу динамической прочности материала мишени в уравнении Алексеевского-Тейта, используемого для расчета сопротивляемости материала высокоскоростному прониканию удлиненных ударников.

МОНИТОРИНГ ТЕХНИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ РЕДУЦИРОВАННЫХ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫХ МОДЕЛЕЙ

*Мешихин И.А., Гаврюшин С.С.
МГТУ им. Н.Э. Баумана, Россия
mefict@mail.ru*

Излагается численная методика, предназначенная для контроля состояния ответственных технических конструкций. В случае сложных условий работы (возможность загрязнений зоны наблюдения, работа в агрессивной среде, подвижность элементов конструкции, сезонность работы пр.) особенно востребована методика, регистрирующая состояние конструкции дистанционно, без установки на объект мониторинга аппаратуры и маркеров. При выборе в качестве параметров идентификации перемещений объекта мониторинга возможно организация их дистанционной регистрации.

Методика использует редукцию исходной конечно-элементной модели, что позволяет существенно сократить объем контролируемой информации. Предложен критерий назначения параметров идентификации, для восстановления с минимальной погрешностью априори неизвестных по величине нагрузок, действующих на конструкцию. Рассмотрена процедура, позволяющая на основе замеренных перемещений оценивать актуальное напряженно-деформированное состояние конструкции, а также идентифицировать наличие неучтенного нагружения. Формат методики мониторинга предполагает разработку оригинальной редуцированной модели, учитывающую индивидуальные особенности работы конструкции для каждого объекта мониторинга.

1. Введение

При мониторинге сложных технических конструкций и сооружений возникает необходимость в оперативном определении и оценке их текущих прочностных характеристик для принятия обоснованного решения о возможности дальнейшей эксплуатации. В качестве примера можно привести затвор шлюза, общий вид конструкции которого представлен на рисунке 1. Задача оперативной оценки напряженного состояния элементов гидрозапорных сооружений в процессе эксплуатации актуальна ввиду значительной изношенности фонда конструкций, их дороговизны и значительных издержках при нештатном блокировании судопропуска.



Рисунок 1 - общий вид конструкции шлюзового затвора

Методы и приемы оценки состояния конструкции непосредственно в процессе эксплуатации имеют свои особенности:

- изначально неполная информация о состоянии конструкции, связанная с ограничениями количества и мест установки датчиков и других устройств регистрации параметров объекта;
- необходимость оперативной оценки состояния конструкции.

Целью работы является разработка расчетно-экспериментальной методики мониторинга напряженно-деформированного состояния (НДС) сложных конструкций на основе использования ограниченного объема информации, полученного по результатам контрольных измерений объектов. Система мониторинга состояния объекта используется для принятия обоснованного решения о пригодности конструкции к дальнейшей эксплуатации, и обеспечивает возможность оперативного реагирования в случае нештатной (аварийной) ситуации, в качестве которой подразумевается превышение ограничений по прочности и жесткости.

Для мониторинга используется особая (редуцированная) модель объекта, полученная по излагаемой ниже процедуре. Применение редуцированной математической модели объекта мониторинга является естественным компромиссом между сохранением достаточной для анализа информации об объекте и возможностью ее оперативной обработки.

Для регистрации предельного состояния необходимо фиксировать определенный набор контролируемых параметров, характеризующий состояние конструкции. К данному набору предъявляются требования технической реализуемости измерений используемых параметров и возможности достоверной оценки состояния объекта по их численным значениям.

Так, например, для гидротехнических сооружений, для которых характерны длительные сроки эксплуатации, значительные габариты сооружения, эксплуатация датчиков в условиях водно-воздушной среды, наиболее предпочтительным является дистанционная регистрация характерных перемещений конструкции. Отдельной задачей является определение числа и расположения локальных зон конструкции, измерения перемещений в которых наиболее эффективно.

Для обеспечения мониторинга требуется располагать процедурой, позволяющей на основе ограниченного объема информации, полученной в результате измерений дать оценку состояния конструкции. Процедура мониторинга, с одной стороны, должна быть как можно более простой и удобной для практического применения, а с другой позволять достоверно оценивать текущее напряженно-деформированное состояние объекта.

Для создания виртуальной модели объекта мониторинга рационально воспользоваться методом конечных элементов. В случае использования линейного статического описания объекта его *полная* (подробная) модель формулируется в виде системы линейных уравнений высокого порядка, решение которой в режиме реального времени затруднительно. Дополнительные сложности связаны с необходимостью коррекции вектора

узловых сил, поскольку действующие на объект актуальные нагрузки в процессе эксплуатации объекта могут изменяться. Для снижения времени расчета используется, реализуемый методом статической конденсации, переход от полной модели к *редуцированной* модели. Редукция исходной системы линейных алгебраических уравнений позволяет существенно понизить ее размерность и выбрать в качестве последних наиболее информативные параметры для последующего мониторинга объекта.

Для оценки НДС используется редуцированная модель объекта, которая предполагает выбор наиболее удобных и информативных параметров, характеризующих его состояние – обобщенных перемещений или других измеримых величин, называемых далее – *параметры идентификации*. Следует подчеркнуть, что качество и достоверность информации об объекте, восстановленной по результатам измерений, существенно зависит от выбора параметров идентификации. Поэтому, процедура рационального назначения параметров идентификации является одним из важнейших положений, обсуждаемых в работе.

В представленной работе:

1. Изложен подход, позволяющий проводить оценку напряженно-деформированного состояния конструкции, при ограниченном числе параметров идентификации, представляющих собой результаты измерения обобщенных перемещений в удобных для этого точках конструкции.
2. Разработан алгоритм выбора и предложен критерий назначения параметров идентификации, которые позволяют восстанавливать, априори неизвестные по величине, действующие на конструкцию нагрузки с минимальной погрешностью.
3. Предложена процедура, восстановления на основе замеренных перемещений реального напряженно-деформированное состояние конструкции и в необходимых случаях идентифицировать изменение используемого набора нагружения.

Литература

1. Гантмахер Ф.Р. Теория матриц. М.: Наука, 1988. 552с.
2. Канунникова Е.А., Мещихин И.А. Применение суперэлементов в прочностных расчетах космических аппаратов//Труды НПП ВНИИЭМ. Вопросы электромеханики, М.: 2011. № 121. С. 31-39.
3. Геча В.Я., Канунникова Е.А., Мещихин И.А. Бордадымов В.Е., Даниловский Н.Н. Создание редуцированных матриц жесткостей и масс для совместного анализа нагрузок//Труды НПП ВНИИЭМ. Вопросы электромеханики, М.: 2011. № 121. С. 39-45.
4. Зайцев Е. А., Мещихин И. А. Мониторинг прочности металлоконструкций запорных СГТС// Речной транспорт (XXI век), М.: –2011. – №4. С. 70-74.

ОПТИМАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ МНОГОСЛОЙНОЙ КОНИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ ПРИ ТЕРМОСИЛОВОМ НАГРУЖЕНИИ

Смердов А.А.¹, Тащиллов С.В.², МIRONIKHIN А.Н.²

1 - Московский Государственный Технический Университет им. Н.Э.

Баумана, Россия

2 - ОАО "Композит", Россия

amironikhin@mail.ru

OPTIMAL DESIGN OF MULTILAYERED CONICAL SHELL IN THERMALLY FORCED LOADING

Smerdov A.A.¹, Tashchilov S.V.², Mironikhin A.N.²

1 – Bauman State Technical University, Russia

2 – JSC «Kompozit», Russia

Проведено исследование задачи оптимального проектирования многослойной конической оболочки при воздействии неравномерного нагрева и наружного давления. Выбраны оптимальные параметры проектируемой оболочки.

Investigation of optimal design of multilayered shell under gradient heating and external pressure was performed. Optimal parameters of shell were chosen.

Конструкции из углерод-углеродных композиционных материалов (УУКМ) при условии защиты их поверхности от воздействия агрессивных сред, в частности, от сред с высоким окислительным потенциалом, способны функционировать в широком диапазоне температур (до 2500 °С и выше) и при наличии значительных температурных градиентов (200 °С/мм). Благодаря сочетанию жаропрочности, трещиностойкости и эрозионной стойкости композиционные материалы рассматриваемого семейства широко применяются при изготовлении теплонагруженных элементов конструкций. В то же время высокая стоимость УУКМ, длительность и сложность технологического процесса изготовления УУКМ обуславливают целесообразность использования при проектировании конструкций из УУКМ методов математического моделирования [1, 2].

В рамках данной работы исследовалась задача оптимального проектирования многослойной конической оболочки, нагруженной наружным давлением и подверженной неравномерному нагреву. Оболочка состоит из двух слоев: наружного, выполненного из высокоплотного УУКМ, и внутреннего, изготовленного из пористого УУКМ. Материал каждого из слоев ортотропный в цилиндрической системе координат.

Варьируемыми параметрами являются:

- толщины наружного h_1 и внутреннего h_2 слоев конической оболочки; в общем случае толщина каждого слоя может линейно изменяться вдоль длины оболочки ($h_1 = f_1(z)$ и $h_2 = f_2(z)$);
- материал внутреннего слоя и соответственно его плотность, теплофизические и механические свойства.

В качестве целевой функции принимается масса конической оболочки:

$$M = M^{(1)} + M^{(2)} \rightarrow \min \quad (1)$$

Область поиска оптимального решения определяется следующими ограничениями:

- геометрические ограничения на толщины слоев:

$$h^{(i)}_{\min} \leq h^{(i)}(z) \leq h^{(i)}_{\max}, \quad i = 1, 2 \quad (2)$$

- прочностными ограничениями для каждого слоя:

$$|\sigma^{(i)}_{\alpha\alpha}| < |[\sigma^{(i)}_{\alpha\alpha}(T)]|, \quad (3)$$

$$[\sigma^{(i)}_{\alpha\alpha}(T)] = F^{(i)-}_{\alpha}(T), \quad \sigma^{(i)}_{\alpha\alpha} < 0$$

$$[\sigma^{(i)}_{\alpha\alpha}(T)] = F^{(i)+}_{\alpha}(T), \quad \sigma^{(i)}_{\alpha\alpha} > 0$$

$$\alpha = 1, 2, 3; \quad i = 1, 2$$

$$\tau^{(i)}_{12} < [\tau^{(i)}_{12}(T)], \quad \tau^{(i)}_{13} < [\tau^{(i)}_{13}(T)], \quad \tau^{(i)}_{23} < [\tau^{(i)}_{23}(T)], \quad (4)$$

$$i = 1, 2$$

- ограничениями температуры на внутренней стенке конической оболочки:

$$T^* < [T], \quad (5)$$

$$T^* = \max T(r, z) \quad z^2 = R_{\text{вн}}^2$$

При определении напряженно-деформированного состояния конструкции численно решается задача пространственной термоупругости в геометрически и физически линейной постановке. Алгоритм поисковой оптимизации построен на базе метода случайного поиска с самообучением. Для оценки работоспособности и эффективности разработанного программного комплекса проведены решения тестовых задач.

Результаты исследования задачи оптимального проектирования многослойной конической оболочки при термосиловом нагружении представлены в виде графиков и таблиц. На основании полученных данных сделано заключение об оптимальном сочетании варьируемых параметров проектируемой оболочки.

Литература

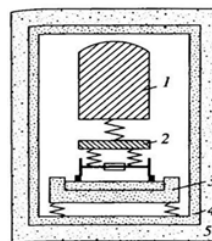
1. Расчет термонапряженных конструкций из композиционных материалов / В.В. Воробей, Е.В. Морозов, О.В. Татарников. – М.: Машиностроение, 1992. – 240 с.: ил. – (Б-ка расчетчика / Редкол.: В.А. Светлицкий (пред.) и др.).
2. Белозеров Л.Г., Киреев В.А. Композитные оболочки при силовых и тепловых воздействиях. – М.: Издательство физико-механической литературы, 2003. – 388 с.

ВОПРОСЫ СНИЖЕНИЯ ВИБРАЦИИ И ШУМА, ПЕРЕДАВАЕМОЙ ПОЕЗДАМИ МЕТРОПОЛИТЕНА В ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

Мугин О.О.

*Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия
omugin@yandex.ru*

Рассматривается проблема подавления вибрации, создаваемой поездами метрополитена. Снижение вибрации, возникающей при взаимодействии железнодорожного состава и рельсов в контакте "рельс-колесо" осуществляется посредством размещения под верхним строением пути упругоинерционных виброизоляторов с внутренними инерционными элементами. Прогнозируется усиление эффекта виброизоляции (на 6-14 дБ) при сохранении необходимой величины статической жесткости.



Проблема снижения уровня вибрации и шума транспортных средств в настоящее время приобретает все большую актуальность. Повышенный уровень шума ухудшает экологические показатели транспортных средств и увеличивает дискомфорт, поэтому в последнее время в нормативные документы вводятся все более жесткие нормы на вибрацию и шум [1].

Известно, что линии метрополитена мелкого заложения являются источником повышенной вибрации, которая распространяется по грунту и передается на фундаменты зданий [2]. Поэтому возникает необходимость снижения уровней вибрации и структурного шума в застройке, прилегающей к проектируемым и строящимся линиям метрополитена.

Основная задача - это снижение вибрации, возникающей при взаимодействии подвижного состава и верхнего строения пути (рельсов) в контакте "рельс-колесо" на станциях метрополитена и в тоннелях, а также при их последующем распространении по грунту и действии на расположенные вблизи наземные сооружения.

Литература

1. СНиП 23-03-2003. Защита от шума. М.: Госстрой России, 2003.
2. Гордеев Б.А., Ерофеев В.И., Синев А.В., Мугин О.О. Системы виброзащиты с использованием инерционности и диссипации реологических сред. М.: Физматлит, 2004. 176 с.
3. Мугин О.О. Методика проектирования и настройки на рабочую частоту гидроопоры по типу: «гидроопора с обечайкой»//Вестник научно - технического развития (<http://www.vntr.ru/ftpgetfile.php?id=598>) -№5 - 2012 г – С.36-40.
4. Сирил М. Харрис, Чарльз И. Крид. Справочник по ударным нагрузкам. Л.: Судостроение, 1980. 360 с.
5. Обморшев А.Н. Введение в теорию колебаний. М.: Наука, 1965. 276 с.

**ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТОВ НДС, ПРОЧНОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ
КОНСТРУКЦИЙ ФУТБОЛЬНЫХ СТАДИОНОВ К ЧЕМПИОНАТУ
МИРА 2018Г**

*Белостоцкий А.М.^{1,2}, Нагибович А.И.^{1,2}, Дмитриев Д.С.¹, Островский К.И.¹,
Павлов А.С.¹, Дядченко Ю.Н.¹, Аул А.А.¹, Щербина С.В.²*

1 - ЗАО НИЦ СтаДиО, Москва, Россия

*2 - ФГБУ ВПО «Московский государственный строительный
университет», Москва, Россия
nagibovich@yandex.ru*

**SPECIFIC ASPECTS OF NUMERICAL SIMULATION STRESS-STRAIN,
STRENGTH AND STABILITY OF THE STRUCTURES FOR FOOTBALL
STADIUMS FOR THE CHAMPIONSHIP OF THE WORLD CUP IN
RUSSIA IN 2018.**

*Belostotsky A.M.^{1,2}, Nagibovich A.I.^{1,2}, Dmitriev D.S.¹, Ostrovskiy K.I.¹,
Pavlov A.S.¹, Dydchenko J.N.¹, Aul A.A.¹, Scherbina S.V.²*

1 – StaDyO Ltd, Moscow, Russia

2 – Moscow State University of Civil Engineering, Russia

Представлены и проанализированы важные и наукоемкие особенности расчетов статического, температурного и динамического напряженно-деформированного состояния (НДС), прочности и устойчивости пространственных несущих конструкций стадионов, проектируемых, возводимых и реконструируемых для проведения чемпионата мира по футболу 2018г. – в Санкт-Петербурге («Зенит»), Самаре, Волгограде, Нижнем Новгороде, Ростове-на-Дону («Левбердон»), Екатеринбурге и Сочи («Фишт»).

Наиболее значимые особенности расчетного обоснования НДС, прочности и устойчивости несущих конструкций стадионов при основных и особых сочетаниях нагрузок и воздействий, выполненного по необходимости в сложных постановках с применением современных подходов численного моделирования в верифицированных программных комплексах:

1) моделирования неоднородного грунтового основания и свайного поля, содержащего несколько тысяч свай;

2) многоитерационный процесс дополнения и корректировки положения несущих конструкций стадиона на основании результатов статических и динамических расчетов для удовлетворения критериям зыбкости конструкции «гребенки» трибун;

3) расчет на прогрессирующее обрушение железобетонных конструкций с учетом продольного и поперечного армирования с использованием объемных нелинейных моделей железобетона, реализованных в верифицируемом программном комплексе DIANA;

4) уточненный трехмерный физически нелинейный КЭ-анализ НДС и прочности наиболее напряженных конструктивных узлов ж/б конструкций и металлических покрытий с учетом реальной диаграммы деформирования;

5) расчет на устойчивость металлических конструкций покрытий с учетом физической и геометрической нелинейностей и начальных несовершенств;

6) геометрически нелинейное моделирование преднапряженных вантовых элементов в составе конструкций покрытия с учетом последовательности монтажа;

7) сравнительный анализ НДС, собственных частот и форм колебаний полной модели конструкций стадиона и модели подсистемы “металлические конструкции покрытия”, показавшие слабое влияние податливости опорной подсистемы “основание – ж/б конструкции чаши” на статическое состояние, динамику и устойчивость упомянутой подсистемы “металлоконструкции покрытия”, позволяющее исследовать последнюю в рамках сепаратной модели;

8) сопоставление альтернативных результатов расчетов, выполненных согласно требованиям специальных технических условий (СТУ), в верифицированных/сертифицированных программных комплексах. Для моделей подсистем “металлические конструкции покрытия” – ANSYS, MIDAS Civil, Robot Structural, SCAD; для моделей подсистемы “основание – ж/б конструкции чаши” – ANSYS, SCAD, Лира;

9) оптимизационный процесс дополнения и корректировки конструкций сборно-разборных (временных) трибун для удовлетворения критериев прочности и устойчивости несущих элементов конструкции и динамической комфортности (зыбкости) трибун в целом при расчетах с учетом статических и динамических воздействий;

10) расчетное обоснование прочности и устойчивости конструкций временных трибун, установленных в уровне верхнего перекрытия, при сейсмическом воздействии с учетом податливости нижележащих железобетонных конструкций;

Смоделированы и решены статические и динамические задачи большой вычислительной размерности (до 12 000 000 неизвестных).

**ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
ТЕРМОПЛАСТИЧНОГО ПОЛИИМИДА Р-ООД ПОД ДЕЙСТВИЕМ
ОДНООСНОГО РАСТЯЖЕНИЯ. КОМПЬЮТЕРНОЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ**

*Назарычев В.М.¹, Люлин А.В.^{1,2}, Ларин С.В.¹, Гофман И.В.¹, Kenny J.M.¹,
Люлин С.В.^{1,3}*

1 - Институт высокомолекулярных соединений РАН, Россия

2 - Technische Universiteit Eindhoven, The Netherlands

3 - Санкт-Петербургский государственный университет, Россия

nazarychev@imc.macro.ru

**MOLECULAR DYNAMICS SIMULATION OF UNIAXIAL
DEFORMATION OF THERMOSTABLE POLYIMIDE R-BAPO**
*Nazarychev V.M.¹, Lyulin A.V.^{1,2}, Larin S.V.¹, Gofman I.V.¹, Kenny J.M.¹,
Lyulin S.V.^{1,3}*

1 - Institute of Macromolecular Compounds RAS, Russia

2 - Technische Universiteit Eindhoven, The Netherlands

3 - St. Petersburg State University, Russia

Исследована зависимость значения модуля упругости нового термопластичного полиимида Р-ООД от различных факторов (степени уравновешенности образца, размеров периодической ячейки, молекулярной массы, скоростей охлаждения и растяжения и др.) методом атомистической молекулярной динамики. Определены значения эксплуатационных характеристик при изменении температуры и внешнего давления. Показано, что данный термопластичный полиимид обладает хорошими механическими свойствами и перспективен для использования в качестве полимерного связующего для композиционных материалов.

Young's modulus dependence on different factors (equilibration degree, cooling and deformation rates, molecular weight, size of periodic box) was investigated for the new R-BAPO polyimide with help of fully-atomistic molecular dynamics simulation. The values of operation characteristics were defined in wide temperature range and under different external pressure. It was shown that this novel thermostable polyimide R-BAPO has good mechanical properties, thus can be used as polymer matrix in composite materials.

Полиимиды (ПИ) являются перспективными полимерными связующими при разработке новых конструкционных материалов и облегченных материалов для работы в экстремальных условиях [1], в том числе в различных областях машиностроения, включая авиа- и ракетостроение.

Синтез новых термопластичных ПИ обычно происходит путем введения в их химическую структуру шарнирных групп, повышающих гибкость полимерной цепи. Однако такая химическая модификация может приводить к ухудшению термостабильности и понижению механических свойств по сравнению с жесткоцепными полимерами [2]. Для определения эксплуатационных характеристик новых ПИ необходимо провести ряд экспериментальных исследований при различной температуре и внешнем

давлении. К сожалению, вследствие зависимости механических характеристик от начального состояния образцов (термической предыстории, молекулярной массы (ММ) и др.) и внешних факторов сравнение механических свойств новых полимеров по сравнению с существующими проще и эффективнее проводить с помощью методов компьютерного моделирования, основанных на использовании атомистических моделей.

В данной работе методом атомистической молекулярной динамики (МД) исследованы механические свойства термопластичного ПИ при одноосном растяжении. На примере нового аморфного термопластичного ПИ Р-ООД, повторяющееся звено которого состоит из диангидрида 1,3-бис-(3',4'-дикарбоксифенокси) бензола (диангидрида Р) и диамин 4,4'-бис-(4''-аминофенокси) бифенилоксида (диамин ООД), рис. 1, изучено влияние изменения различных факторов (степени уравновешенности образца, скоростей охлаждения и растяжения, ММ, размеров периодической ячейки) на значение модуля упругости.

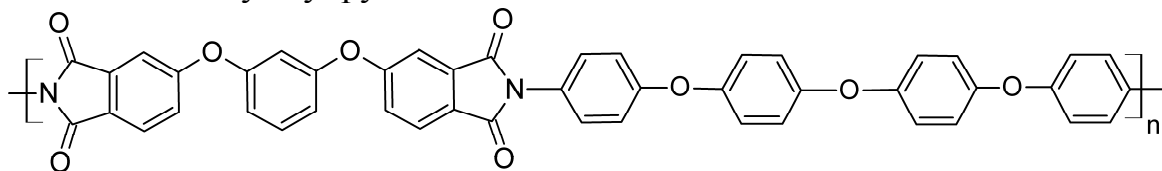


Рис. 1. Химическая структура повторяющегося звена ПИ Р-ООД.

Показано, что значение модуля упругости практически не зависит от степени уравновешенности, ММ и размеров периодической ячейки. В моделировании были воспроизведены наблюдаемые в эксперименте логарифмические зависимости модуля упругости от скоростей охлаждения и растяжения. При этом обнаружено, что нарушается логарифмическая зависимость модуля упругости от скорости растяжения при относительной скорости растяжения близкой к скорости звука ($\sim 10^{10} \text{ с}^{-1}$). Следовательно, в компьютерном моделировании методом атомистической МД исследование механических свойств термопластичных ПИ необходимо проводить при более медленных относительных скоростях растяжения.

Оценка эксплуатационных характеристик нового ПИ была выполнена путем изменения температуры и внешнего давления. Показано, что термопластичный ПИ Р-ООД сохраняет высокую прочность при повышении температуры вплоть до температуры стеклования. На основании анализа температурной зависимости модуля упругости была определена температура текучести ПИ Р-ООД $\sim 570 \text{ К}$, которая хорошо согласуется с экспериментальными данными. Интересно, что повышение внешнего давления до 200 МПа приводит к увеличению прочности исследуемого ПИ.

Результаты выполненной работы будут в дальнейшем использованы при изучении механических свойств нанокомпозитов, созданных на основе ПИ Р-ООД.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (Госконтракт № 14.Z50.31.0002). Компьютерное моделирование проведено с использованием вычислительных ресурсов кластера ИВС РАН, суперкомпьютеров СКИФ МГУ “Чебышев” и “Ломоносов” и суперкомпьютера MBK НИЦ “Курчатовский институт”.

Литература

1. Liaw D.-J., Wang K.-L., Huang Y.-C., Lee K.-R., Lai J.-Y., Ha C.-S., Prog. Polym. Sci., - 2012. - V. 37. - P. 907–974.
2. Bessonov M.I., Koton M.M., Kydryavtsev V.V. Laius L.A., Polyimides: Thermally Stable Polymers, NY: Plenum, 1987. 318pp.

УДК 624.04, 539.3

**ПРИМЕНЕНИЕ АППРОКСИМИРУЮЩИХ СЕТОК НЕРЕГУЛЯРНОЙ
СТРУКТУРЫ В ДИСКРЕТНО-КОНТИНУАЛЬНОМ МЕТОДЕ
КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ РАСЧЕТА СТРОИТЕЛЬНЫХ
КОНСТРУКЦИЙ**

Акимов П.А.^{1,2,3}, Негрозов О.А.^{1,2}

1 - Московский государственный строительный университет, Россия

2 - Российская академия архитектуры и строительных наук, Россия

3 - ЗАО «Научно-исследовательский центр «СтаДиО», Россия

genromgsu@gmail.com

**APPLICATION OF UNSTRUCTURED APPROXIMATING MESHES
IN DISCRETE-CONTINUAL FINITE ELEMENT METHOD
OF STRUCTURAL ANALYSIS**

Akimov P.A.^{1,2,3}, Negrozov O.A.^{1,2}

1 - Moscow State University of Civil Engineering, Russia

2 - Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Russia

3 - StaDyO Ltd, Russia

Излагаются актуальные вопросы применения различных типов сеток, используемых при аппроксимации сечений строительных конструкций, поперечных по отношению к направлению регулярности (постоянства или кусочного постоянства) их физико-геометрических параметров (характеристик). В частности, рассматриваются сетки нерегулярной структуры, связанные с использованием дискретно-континуальных конечных элементов с четырехугольным или треугольным поперечным сечением. Кроме того, описываются основные этапы реализации дискретно-континуального метода конечных элементов.

The distinctive paper is devoted to actual problems of application of various approximating meshes in discrete-continual finite element method of analysis of structures with regular (constant or piecewise constant) physical and geometrical parameters in one dimension (direction). Unstructured approximating meshes (with the use of discrete-continual finite elements with quadrilateral or triangular cross-sections). Besides, theoretical foundations of discrete-continual finite element method are under consideration as well.

Область применения дискретно-континуального метода конечных элементов (ДКМКЭ), совершенствованию и развитию которого посвящена настоящая статья, составляют конструкции, здания и сооружения, в которых имеется регулярность (постоянство или кусочное постоянство) физико-геометрических параметров (характеристик) по одному из координатных направлений (это направление условно называется основным). Для расчета таких объектов в рамках ДКМКЭ строится точное аналитическое решение вдоль направления регулярности (основного направления) при любых воздействиях и промежуточных закреплениях, стыковках и т.д. Под точным аналитическим решением понимается наличие явной формулы вычисления напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкции в произвольной точке сечения. Соответствующая формула в явном виде

демонстрирует характер поведения вычисляемых факторов (перемещений, их производных и т.д.). Метод является дискретно-континуальными в том смысле, что по выделяемому направлению постоянства и регулярности характеристик (основное направление) сохраняется континуальный характер задачи и соответственно аналитический (абсолютно точный) вид получаемого решения, в то время как по остальным производится дискретизация с использованием стандартной техники метода конечных элементов (МКЭ) и обоснованно контролируемой степенью точности.

При аппроксимации по неосновным направлениям в [1] использовались регулярные сетки, топологически эквивалентные прямоугольным и наилучшим образом соответствующие очертаниям поперечных (по отношению к основному направлению) сечений конструкций. Понятие топологической эквивалентности в данном случае означает, что такая сетка может быть получена из прямоугольной сетки в результате некоторой невырожденной деформации ячеек последней без их «перекручивания». Выбор такого класса сеток, с одной стороны, дает возможность аппроксимировать большое количество разнообразных конструкций, а с другой – позволяет использовать простую регулярную нумерацию узлов, что приводит к удобным математическим формулам, эффективным вычислительным схемам и алгоритмам, а также существенно упрощает сбор исходной информации и вывод результатов.

При аппроксимации поперечных (по отношению к основному направлению) сечений конструкции в практических приложениях нередко возникают ситуации, когда использование указанных аппроксимирующих сеток регулярной структуры сопряжено с определенными трудностями (в частности, в случае сложной геометрии соответствующего сечения) и необходимости введения дополнительных элементов, аппроксимирующих «пустоту», в соответствии с техникой метода расширенной (стандартной) области А.Б. Золотова. В таких ситуациях может оказаться предпочтительнее использовать, например, дискретно-континуальные конечные элементы с треугольным поперечным сечением, в том числе для снижения количества дискретно-континуальных конечных элементов, используемых при формировании дискретно-континуальной модели рассматриваемой конструкции.

Эффективность использования аппроксимирующих сеток нерегулярной структуры (при применении дискретно-континуальных конечных элементов с треугольным или четырехугольным поперечным сечением [2, 3]) демонстрируется авторами на представительном наборе трехмерных задач расчета строительных конструкций.

Исследования проводились в рамках Плана фундаментальных научных исследований Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации и Российской академии архитектуры и строительных наук на 2015 год (темы 7.1.7 и 7.1.8).

Литература

1. Акимов П.А., Мозгалева М.Л. Многоуровневые дискретные и дискретно-континуальные методы локального расчета строительных конструкций. Монография. – М.: МГСУ, 2014. – 632 с.
2. Akimov P.A., Negrozov O.A. On the Use of Discrete-continual Finite Element Method with Unstructured Meshes. // Procedia Engineering, Volume 111, 2015, pp. 8-13.
3. Akimov P.A., Negrozov O.A. On the Use of Discrete-continual Finite Elements with Triangular Cross-section for Semianalytical Structural Analysis. // Procedia Engineering, Volume 111, 2015, pp. 14-19.

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПРОЕКТИРОВАНИЯ УПРУГОГО ЭЛЕМЕНТА ТЕНЗОРЕЗИСТОРНОГО ДАТЧИКА СИЛЫ

Непочатов А.В.¹, Гаврюшин С.С.², Годзиковский В.А.³, Сенянский М.В.³

1 - Машиностроительный университет МГМУ (МАМИ), Россия

2 - МГУТ им. Баумана, Россия

3 - Весоизмерительная компания «Тензо-М», Россия

alex.nepochatov@gmail.com

1. Актуальности данной работы. Грузопоток, перевозимый автотранспортом в России, составляет примерно 6000 миллионов тонн в год. 70% грузоперевозок осуществляется с помощью автомобильного грузового транспорта. Для учета веса грузов используются различные весоизмерительные системы. Эти системы крайне важны, так как весы – это кассовый аппарат, считающий деньги в товарной форме, поэтому повышение их точности является крайне важной задачей.

2. Описание весоизмерительных Систем. Две основные разновидности весоизмерительных систем для определения веса автомобиля.

3. Основной компонент весоизмерительной системы - преобразователь силы в электрический сигнал – датчик.

4. Виды преобразователей силы в электрический сигнал

5. Тензорезисторные датчики силы с фольговыми тензорезисторами и преимущества перед другими типами преобразователей.

6. Виды упругих элементов для тензорезисторных датчиков.

7. Основные рабочие характеристики УЭ.

8. Температурный эффект. Несовершенство упругих свойств. Конструктивная. Динамические эффекты. Геометрическая нелинейность

9. Цель работы: Создание методики расчета и проектирования упругих элементов мембранных датчиков.

10. Задачи исследования:

- Провести анализ требований, проблем, источников погрешности.
- Создать параметрическую математическую модель, учитывающую основные параметры, влияющие на точность датчика.
- Разработать методику автоматизированного нахождения рациональной конструкции датчика на основе методов многокритериальной оптимизации
- Реализовать методику в форме прикладной программы для ЭВМ.
- Проверить экспериментально полученные результаты.

11. Постановка задачи расчета упругого элемента датчика М70. Описание упругого элемента и принципа его работы. Описание численной модели упругого элемента. Граничные условия. Выбор геометрических параметров, которые впоследствии можно варьировать.

12. С помощью численной модели получаем распределение деформаций, распределения напряжений, утрированный вид деформированного состояния. Исследовать трение в опоре.

13. Многопараметрический подход. Управляющие параметры.

Функциональные ограничения. Критерии качества.

14. Множество допустимых решений. Множество Парето допустимых решений.

15. Созданная параметрическая модель упругого элемента позволяет варьировать управляющие параметры и для каждого набора управляющих параметров получать значения для оценки критериев качества, находить наилучшее решение для каждого набора ограничений. Это позволяет, имея параметрическую модель одного представителя семейства УЭ распространить решение на все семейство и сократить время проектирования.

РАСЧЕТ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ТРУБЧАТОЙ МЕМБРАНЫ С НАНОПОРИСТОЙ СТЕНКОЙ

Неутов И.Д., Бакулин В.Н.

Институт прикладной механики РАН, Москва, Россия

vbak@yandex.ru

CALCULATION OF STRESS-STRAIN STATE OF THE NANOPOROUS TUBULAR MEMBRANE

Neutov I.D., Bakulin V.N.

Institute of applied mechanics of Russian Academy of Science, Russia

Рассматривается задача о расчете напряженно-деформированного состояния мембраны трубчатой формы, изготовленной из материала пористой структуры с наноразмерными диаметрами пор.

The problem of calculating the stress-strain state of the membrane of tubular shape made of a material of the porous structure with nanoscale pore diameters

1. Введение. Математическое и компьютерное моделирование в механике структурно сложных (микронеоднородных) сред является основным инструментом исследования этих сред. К этим средам можно отнести мембраны с диффузионным механизмом газоразделения, такие как половолоконные мембраны из материала пористой структуры с наноразмерными диаметрами пор. Мембраны с нанопористой стенкой широко используются в современных газоразделительных мембранных модулях. Движение флюида (жидкостей и газов) в пористой среде, в т.ч. в полых волокнах с проницаемой стенкой рассматривалось в работах [1-7].

2. Постановка и решение задачи. Предметом рассмотрения данной работы является анализ напряжённо- деформированного состояния (НДС) мембраны трубчатой формы из нанопористого термостойкого стекла, нагружаемой внешним или внутренним давлением. Расчет производится в упругой трехмерной постановке с заданием поля распределения давления в нанопорах по толщине мембраны и проводится методом конечных элементов, с использованием программно-вычислительного комплекса NASTRAN. Полагалось, что поры равномерно распределены по окружной координате и их число в окружном направлении равно 360; оси пор направлены в материале стенки мембраны вдоль радиального направления, т.е. нормально к срединной поверхности рассматриваемой трубчатой мембраны; отстоят друг от друга на расстоянии $10 d_p$ вдоль продольной оси трубчатой мембраны. Конечно-элементная модель строилась в предположении периодичности расположения пор как по длине, так и по окружности трубчатой мембраны. Из-за периодичности мезоструктуры нанопористого материала для расчета рассматривался сектор трубки длиной $10R$ (R – радиус поры) и с угловым размером $\pi/180$. Для моделирования стенки трубки были использованы трехмерные шестигранные восьмиузловые изопараметрические конечные

элементы с линейной аппроксимацией перемещений.

Давление от жидкости или газа передается на стенки мембраны с нанопористой структурой материала. При этом распределение давления газа в поре цилиндрической формы при больших перепадах давления является не линейным [1,3]

$$p(z) = \sqrt{p_2^2 - \frac{p_2^2 - p_1^2}{\delta} z} \quad (1)$$

p_2, p_1 – давление газа (смеси) во входном и выходном сечениях поры, соответственно, (входные и выходные сечения пор могут рассматриваться как на внутренней так и на внешней поверхности мембраны в зависимости от того, какое давление больше – внутренне или внешнее, всегда

$p_2 > p_1$), $p(z)$ – давление в сечении поры с координатой z , отсчитываемой от входного сечения поры вдоль ее продольной оси, δ – общая длина поры, которая берется равной толщине стенки мембраны в модели идеальной пористой среды [6].

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда фундаментальных исследований, проект 14-08-01048-а.

Литература

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. Теоретическая физика, Т.6. – М.: Наука, 1986. – 733 с.
2. Бакулин В.Н., Бошенятов Б.В., Попов В.В. Течение газа в длинной трубке с проницаемой пористой стенкой. Доклады РАН. 2015. т.461, № 3, С.281-285.
3. Бакулин В.Н., Бошенятов Б.В., Попов В.В. Модель течения газа в полых волокнах с проницаемыми стенками// ППМ, т.78, вып.2, 2014, С.179-185.
4. Бакулин В.Н., Бошенятов Б.В., Попов В.В. Движение газа по полому волокну с проницаемой стенкой // Всероссийская конференция с участием иностранных ученых Современные проблемы динамики разреженных газов: Сб. докл., Новосибирск, 26-29 июля 2013 г. – Новосибирск, Институт теплофизики СО РАН, 2013. С.48-51.
5. Бакулин В.Н., Бошенятов Б.В., Попов В.В. Одномерная модель течения газа в полых волокнах с проницаемой стенкой // Материалы XVIII Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам, 22-31 мая 2013 г., Алушта. – М.: Изд-во МАИ, 2013. С.490-492.
6. Лейбензон Л.С. Движение природных жидкостей и газов в пористой среде. – М.-Л.: ОГИЗ, 1947. 244 с.
7. Бакулин В. Н., Попов В. В. Течение вязкого газа в плоском узком канале с проницаемой пористой стенкой // Материалы XIX Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам, 22-31 мая 2015 г., Алушта. М.: Изд-во МАИ, 2015. С. 375-377

ЗАДАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ СЕЙСМОИЗОЛЯЦИИ

*Никонова Н. В., Уздин А. М.
ФГБОУ ВПО ПГУПС, Россия
lovelynataxa@inbox.ru*

Предложен метод задания опасных частот при генерации расчетных акселерограмм для расчета нелинейных систем сейсмоизоляции. Метод основан на представлении диаграммы деформирования нелинейных элементов сейсмоизоляции в виде суммы диаграмм вязкого и сухого трения. Для систем с сухим трением уравнения движения приводятся к безразмерному виду, и для них строится амплитудно-частотная характеристика (АЧХ). По ней определяется опасная частота колебаний в зависимости от относительного коэффициента трения.

A method of setting dangerous frequencies for generation of design accelerograms is proposed. The method uses the presentation of the deformation diagram as a sum of diagrams of viscous resistance and dry friction one. Motion equations for systems with dry friction are presented in dimensionless form. Amplitude-frequency characteristic (AFC) is built for these equations. Dangerous frequencies can be obtained depending on relative friction ratio using this AFC.

1. Введение. В условиях ограниченной информации о сейсмическом воздействии для расчета сейсмостойкости приходится генерировать воздействия наиболее опасное для сооружения. Для линейных систем такое воздействие должно иметь частоту, равную резонансной частоте сооружения. Для нелинейной системы такая частота отсутствует, и задача вызывает определенные сложности. В литературе рекомендуется строить АЧХ системы и выбирать на ней наиболее опасную точку. Однако в не сказано, что вид самой АЧХ зависит от амплитуды задаваемого воздействия, что детально описано в монографии Этот факт еще более усложняет задачу поиска опасной частоты для нелинейных систем сейсмоизоляции. Для решения задачи возникла необходимость унификации нелинейных сил сопротивления и приведения уравнений движения к безразмерному виду.

2. Приведение сил сопротивления к сумме вязкого и сухого трения
В системах сейсмоизоляции применяются устройства с нелинейным демпфированием, в которых сила сопротивления демпфера описывается зависимостью $Q = b|\dot{q}|^\alpha \text{sign}(\dot{q})$. Нелинейное сопротивление демпфера Q можно представить в виде суммы сил вязкого и сухого трения

$$Q = b|\dot{q}|^\alpha \text{sign}(\dot{q}) \cong (\beta|\dot{q}| + F)\text{sign}(\dot{q}), \quad (1)$$

здесь b и α – характеристики демпфера, β – коэффициент вязкого трения, F – сила сухого трения. Можно показать [1], что $\beta = \alpha b$; $F = b(1 - \alpha)$.

Тогда после и деления на массу m уравнение (1) примет вид:

$$\ddot{q} + \gamma\dot{q} + fg\text{sign}(\dot{q}) + k^2q = -\ddot{y}_0, \quad (3)$$

где k – частота колебаний системы, f – коэффициент сухого трения, γ –

коэффициент неупругого сопротивления; $\frac{\beta}{m} = \gamma k$; $\frac{F}{m} = fg$ и $\frac{c}{m} = k^2$

Аналогичное представление получается и для многомассных систем. В результате задача сводится к анализу кусочно-линейных систем с демпферами сухого трения (ДСТ)

3. Представление уравнений движения в безразмерном виде

Перейдем в уравнении (3) к безразмерным смещениям $\xi = \frac{q}{AgT^2}$ и безразмерному времени $\frac{d}{dt} = \frac{d}{d\tau} \cdot \frac{1}{T}$ (в приведенных зависимостях T – период колебаний, A – максимальное ускорение расчетного воздействия в долях ускорения свободного падения g).

$$\ddot{\xi} + 2\pi\gamma\dot{\xi} + 4\pi^2\xi - f_{отн} \cdot \text{sign}(\dot{\xi}) = -T^2\ddot{y}_0, \quad (4)$$

где $f_{отн} = \frac{f}{A}$ – относительный коэффициент сухого трения, $\ddot{y}_0 = \frac{\ddot{y}_0}{Ag}$ – безразмерное ускорение задаваемого воздействия.

Преимуществом предлагаемой формы записи уравнений колебаний является то, что она уже не зависит от амплитуды акселерограммы. В соответствии с безразмерным уравнением (4) можно построить АЧХ землетрясений в виде зависимости безразмерных ускорений или смещений от безразмерной частоты при различных значениях относительного коэффициента трения. По построенным АЧХ можно получить зависимость опасной частоты воздействия от единственного параметра - относительного коэффициента трения.

Приводятся примеры подбора частот, генерации воздействия и расчета моста на сейсмические воздействия для района г. Сочи.

Литература

1. Durseneva N.V., Indeykin A.V., Kuznetsova I.O., Uzdin A.M., Fedorova M.Yu. Peculiarities of Calculating Bridges with Seismic Isolation Including Spherical Bearings and Hydraulic Dampers in Russia. Journal of Civil Engineering and Architecture. Volume 9, Number 4, April, 2015, pp.401-409

ДЕФОРМИРОВАНИЕ, УСТОЙЧИВОСТЬ И РАЗРУШЕНИЕ НАНООБЪЕКТОВ

Кочнев А.С.^{1,2}, Овидько И.А.^{1,2,3}, Семенов Б.Н.^{1,2}

*1 - Санкт-Петербургский политехнический институт Петра Великого,
Россия*

2 - Санкт-Петербургский государственный университет, Россия

*3 - Институт проблем машиноведения РАН, Россия
bsemenov@rambler.ru*

DEFORMAION, STABILITY AND FRACTURE OF NANOOBJECTS

A.S.Kochnev^{1,2}, I.A.Ovidko^{1,2,3}, B.N.Semenov^{1,2}

1 - Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Russia

2 - St.Petersburg State University, Russia

3 - Institut of Problems of Engineering Mechanics of RAS, Russia

Проведен анализ деформирования, разрушения и устойчивости графеновых листов и пластин наноразмерной толщины при растяжении. Методами молекулярной динамики исследовано влияние 5-8-5 дефектов и их комбинаций на прочность графенового листа и характерные процессы разрушения, свойственные листу с дефектами в структуре. Наблюдается значительное снижение прочности образцов, содержащих дефекты, по сравнению с бездефектными листами. Исследовано влияние температуры на прочность графена с дефектами. Для пластин наноразмерной толщины исследовано влияние толщины листа на потерю плоской формы деформирования в окрестности вырезов и разрезов при растяжении.

Deformation, fracture and stability of graphene sheets containing defects and plates of nanometer thickness with cuts by tension are analyzed. With methods of molecular dynamics the influence of 5-8-5 defects and its combinations on strength characteristic of the graphene sheet and destruction processes inherent sheet with defects in the structure are investigated. A significant decrease in strength of the samples containing defects compared to defect-free sheets is observed. The effect of temperature on the strength of graphene containing defects is investigated. For plates of nanoscale thickness the effect of thickness of the sheet on the loss of flat shape deformation in the vicinity of notches and cuts by tension is studied.

В настоящее время наноразмерные объекты находят широкое применение в различных приборах и устройствах в качестве конструкционных элементов. Это обусловлено, прежде всего, их уникальными физико-механическими свойствами. Для обеспечения их работоспособности и сохранения функциональных характеристик требуется анализ деформационных, прочностных свойств и устойчивости этих элементов при нагружении.

Для расчета механического поведения наноразмерных объектов применяются как методы молекулярной динамики, так и методы механики деформируемого твердого тела, учитывающие порожденные наноразмерностью особенности.

В рамках этой работы исследованы методами молекулярной динамики

особенности деформирования и разрушения графеновых листов, имеющих дефекты структуры (как одиночные, так и ансамбли) при различных температурах. В настоящей работе для моделирования структурной геометрии графена с 5-8-5 дефектами и процесса его механического растяжения применялся пакет молекулярной динамики «Large-scale Atomic/Molecular Massively Parallel Simulator» (LAMMPS). При этом для описания характеристик межатомных связей мы использовали парный межатомный потенциал AIREBO, который обычно применяется в компьютерных моделях графеновых структур. Исследованы механические характеристики (предел прочности при растяжении, степень предельного растяжения до разрушения) листов графена, содержащих ансамбли дефектов типа 5-8-5 высокой плотности. Выявлено, что присутствие ансамблей 5-8-5 дефектов высокой плотности в графеновых листах при растяжении приводит значимому снижению их прочности (на десятки процентов) по сравнению с прочностью идеального (бездефектного) графена. Результаты компьютерного моделирования свидетельствуют о том, что предел прочности при растяжении и степень предельного растяжения до разрушения листов графена, содержащих ансамбли 5-8-5 дефектов высокой плотности, чувствительны к температуре. При увеличении температуры наблюдается почти линейное уменьшение предела прочности графенового образца, а также близкое к линейному уменьшение степени предельного растяжения до разрушения. Исследовано растяжение графеновых листов с 5-8-5 дефектом при произвольной ориентации его границы по отношению к направлению приложенной нагрузки. Показано, что 5-8-5 дефект при растяжении под углом в 15^0 сначала преобразуется в другую, более устойчивую структуру – комбинацию из трёх семиугольных и трёх пятиугольных ячеек, а затем эта структура продолжает распадаться, приводя к образованию трещины, которая и разрушает лист графена.

Методом конечных элементов проведен анализ устойчивости плоской формы деформирования при растяжении пластин наноразмерной толщины с дефектами типа вырезов и дана оценка влияния толщины пластины на критическую нагрузку. Показано, что учет поверхностных напряжений приводит к значительному росту изгибной жесткости при уменьшении ее толщины и, как следствие, к росту критической нагрузки.

Работа выполнена при поддержке Санкт-Петербургского государственного университета (грант № 6.37.671.2013), Российского научного фонда (грант № 14-29-00199) и Министерства образования и науки РФ (Задание №9.1964.2014/К).

УДК 539.3

**ДИНАМИКА ОТДЕЛЕНИЯ СПУСКАЕМОГО АППАРАТА ОТ
ОТДЕЛЯЕМОГО ГОЛОВНОГО БЛОКА ПРИ АВАРИИ РАКЕТЫ-
НОСИТЕЛЯ ПОСЛЕ СБРОСА ОСНОВНОГО ДВИГАТЕЛЯ СИСТЕМЫ
АВАРИЙНОГО СПАСЕНИЯ**

Овсянникова Н.Ю.¹, Бакулин В.Н.², Хомяков М.К.¹

1 - ОАО РКК «Энергия» им. С.П. Королева», Россия

*2 - Институт прикладной механики Российской академии наук, Россия
vbak@yandex.ru*

**DYNAMICS OF BRANCH LANDER SEPARATES HEADUNIT IN AN
ACCIDENT LAUNCH VEHICLE DURING ASCENT AFTER RESETTING
THE MAIN ENGINES EMERGENCY RESCUE SYSTEM**

Ovsyannikova N.Y., Bakulin V.N., Khomyakov M.K.

1 - OAO RSC Energiya them. S.P. Korolev ", Russia

2 - Institute of Applied Mechanics, Russia

Проведено исследование аварийного отделения спускаемого аппарата КК "Союз" от головного обтекателя на атмосферном участке полета РН после сброса основного двигателя системы аварийного спасения. Согласно проведенным расчетам выявлена возможность взаимодействия корпуса СА и элементов конструкции головного блока. Проведена оценка контактных сил с использованием различных моделей взаимодействия.

The dynamic of "Soyuz" spacecraft reentry module separation off launch shroud during launch abort was analyzed. The part of launch trajectory after abort motor jettisoning was considered. Due to performed calculations possibility of contact between reentry module and launch shroud elements was displayed. Evaluation of the contact forces was performed by means of different models.

Процессы отделения космических кораблей и их отсеков относятся к приоритетным полетным операциям особенно при аварии ракеты-носителя (РН) на участке выведения [1-3] и дальнейшей работе системы аварийного спасения (САС). Основная цель исследования этих процессов - оценка возможности соударения разделяемых объектов.

Отделение спускаемого аппарата (СА) от аварийной ракеты-носителя производится в составе отделяемого головного блока (ОГБ) с помощью ракетных двигателей головного обтекателя, которые уводят ОГБ из плоскости движения РН. Через 30-50с производится разделение стыка СА с бытовым отсеком, принадлежащим отделяемому головному блоку. Спускаемый аппарат отделяется под действием сил от толкателей, расположенных на этом стыке, и давления воздуха, истекающего из бытового отсека. При этом существенное заглубление в отделяемом головном блоке предполагает возможность контакта СА с ложементами опор САС.

В данной работе приведены результаты исследования процессов отделения в случае аварии на участке траектории выведения после сброса

основного твердотопливного двигателя САС. Модели процессов основываются на численном интегрировании уравнений движения твердых тел и направляющих косинусов матриц перехода [4, 5].

Расчеты отделения ОГБ от РН проводились в статистической постановке [6] и подтвердили безударность процесса даже для наиболее опасного типа аварии РН – потери управляемости. В ходе анализа были получены начальные условия отделения СА от ОГБ (угловая скорость вращения до 200 градус/с по модулю). Исследование процесса отделения СА от ОГБ показало возможность их контакта при начальных угловых скоростях более 30 градус/с. Для расчета контактных сил использовались различные модели взаимодействия: упругая (сила пропорциональная заглублению нижней опоры ложементу САС в корпус СА), упругая с учетом вязкости, ударное взаимодействие [7]. В точке контакта учитывалась сила трения, возникающая при относительном движении нижней опоры ложементу САС по поверхности СА. При проведении расчетов рассматривались крайние неблагоприятные сочетания параметров.

Анализ показал: значения контактных сил практически не зависят от принятой модели взаимодействия, определяются величиной начальной угловой скорости; оценка сил взаимодействия по теории удара и введение коэффициента вязкости практически не влияет на максимальные значения контактных сил; значение коэффициента трения слабо влияет на величину контактной силы, однако при больших значениях жесткости корпуса определяет возможность повторного контакта.

Работа выполнена при поддержке РФФИ - грант № 13-01-00853-а.

Литература

1. Анфалов А.С., Хомяков М.К., Кокушкин В.В., Петров Н.К., Борzych С.В. Анализ отделения кораблей-спасателей от нестабилизированной международной космической станции//Космонавтика и ракетостроение, 2008 №4, с. 33.
2. Бакулин В.Н., Борzych С.В., Решетников М.Н. Моделирование относительного движения возвращаемой капсулы и транспортного корабля при их разделении.// Вестник Московского авиационного института, 2011, т.18, №3, с. 287.
3. . Бакулин В.Н., Борzych С.В., Воронин В.В. Математическое моделирование процесса посадки космического аппарата на участке его контакта с поверхностью.// Вестник Московского авиационного института.2011. т. 18. №4. с.38-46
4. Виттенбург Й. Динамика систем твердых тел. М: Мир,1980 г, 292 с.
5. Борzych С.В., Петров Н.К., Николаев А.В., Панкова Н.В. Динамика разделения ступеней ракетно-космической системы//Новости техники. М.: изд-во КБТМ, 2003 г. с. 37.
6. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. – М. Государственное издательство физико-математической литературы, 1962 г, 564 с.
7. Бакулин В.Н., Кокушкин В.В., Борzych С.В., Воронин В.В., Щиблев Ю.Н. Исследование влияния свойств грунта посадочной поверхности на устойчивость процесса посадки космического аппарата с механическим посадочным устройством. //Вестник Московского авиационного института. 2014, т.21. № 1. С.25-32

**АНАЛИЗ ГИПЕРУПРУГОГО ПОВЕДЕНИЯ АРОЧНОГО
АМОРТИЗАТОРА**

Одинцов О.А.

МГТУ им. Н.Э.Баумана, Россия

odintsov@bmstu.ru

**ANALYSIS OF HYPER-ELASTIC BEHAVIOR OF ARCHED SHOCK-
ABSORBER**

Odintsov O.A.

Bauman State Technical University, Moscow, Russia

Рассмотрен процесс гиперупругого деформирования арочного амортизатора из полиуретана SKU-ПФЛ-100. Выполнена параметризация геометрии амортизатора. Получены оценки точности результатов при использовании модели плоского деформированного состояния в зависимости от глубины амортизатора. Изучено влияние трения в контакте на устойчивость амортизатора при больших деформациях. Расчет выполнен численно в комплексе Ansys с использованием языка APDL.

Large hyper-elastic deformations are considered for arched shock-absorber made of polyurethane SKU-PFL-100. Parametrization of geometry is performed. Estimations of accuracy are obtained for plane strain model and different values of the depth dimension. Influence of friction on the stability of the deformation process is considered. The analysis is performed numerically with the use of Ansys CAE-system and APDL programming language.

Арочные амортизаторы используются в промышленности и на транспорте для защиты механизмов и приборов от нежелательных вибраций. Использование в качестве материала амортизатора полиуретана вместо резины позволяет увеличить срок службы изделия и обеспечить возможность его эксплуатации в неблагоприятных условиях (агрессивные среды, значительные изменения нагрузок).

Однако ввиду значительного отличия механических свойств полиуретана от свойств резины, традиционно используемой для изготовления амортизаторов [1], необходимо проводить расчеты поведения амортизаторов как при статических, так и динамических нагрузках в различных режимах нагружения.

В работе рассмотрен процесс гиперупругого деформирования арочных амортизаторов двух типов: классического с двумя боковыми лепестками [2] и улучшенной конструкции с четырьмя лепестками. Для обоих вариантов конструкции амортизатора выполнена параметризация геометрии поперечного сечения (рис. 1).

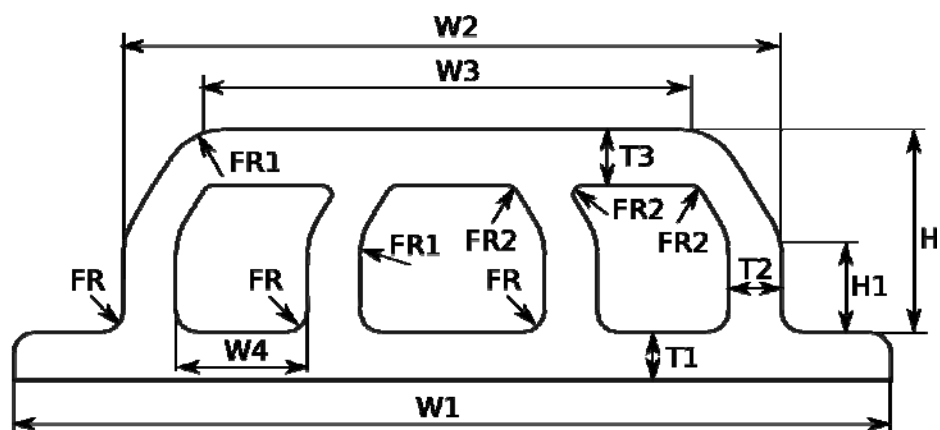


Рис. 1. Параметризованная геометрия амортизатора второго типа

Для материала использован 3-х константный потенциал Муни-Ривлина. Упругие постоянные материала определялись из эксперимента методом наименьших квадратов средствами комплекса Ansys.

Рассматривалась задача квазистатического нагружения амортизатора, у которого нижняя плоскость жестко прикреплена к недеформируемой плоской поверхности основания, а верхняя поверхность входит в контакт с недеформируемой металлической плитой с трением, вводимым с использованием модели трения Кулона.

Для анализа поведения амортизатора были построены две расчетные модели: плоская и объемная. Сравнение результатов расчета для плоского деформированного состояния и для объемной модели показало, что хотя качественно результаты совпадают (включая зоны расположения опасных точек), количественные результаты нуждаются в корректировке. Для этого была получена зависимость коэффициентов понижения максимальных напряжений и контактных сил от отношения глубины амортизатора к его ширине, позволяющая получать для рабочего диапазона нагрузок максимальную интенсивность напряжений и контактную силу с

использованием плоской модели по выражениям $\sigma_{max} = k_{\sigma} \left(\frac{B}{W} \right)^{pl} p_{max}$ и

$F_c = k_F \left(\frac{B}{W} \right)^{pl}_c$ соответственно.

Также представлены результаты анализа влияния коэффициента трения на устойчивость процесса деформирования амортизатора, показавшего, что амортизатор второго типа обладает устойчивостью при любых значениях коэффициента трения даже в закритических областях деформирования, в которых возникает эффект самоконтакта (рис. 2).

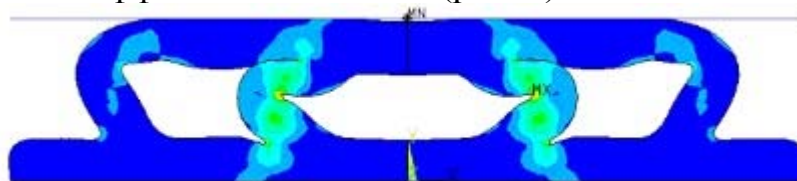


Рис. 2. Закритическое поведение амортизатора второго типа

Литература

1. Белкин, А.Е., Расчет больших деформаций арочного амортизатора с учетом объемной сжимаемости резины / А.Е. Белкин, Д.С. Хоминич // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение» – 2012. – № 2 – С. 3–11.
2. Белкин, А.Е., Численный анализ больших плоских деформаций арочного амортизатора / А.Е. Белкин, В.В. Семенов, В.К. Семенов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение» – 2011. – № 2 – С. 55–64.

**РАСЧЕТ УДАРНОЙ АДИАБАТЫ СИНТАКТИКА ПРИ НАЛИЧИИ
ГАЗА В ПОЛЫХ МИКРОСФЕРАХ**

Острик А.В., Уткин А.В.

Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка, Россия

ostrik@icp.ac.ru

**CALCULATION OF A SHOCK ADIABATIC CURVE FOR SYNTACTIC
HAVING GAZ LOCALIZED IN HOLLOW MICROSPHERES**

Ostrik A.V., Utkin A.V.

Institute of Problems of Chemical Physics RAS, Chernogolovka, Russia

Рассматриваются методы расчета и измерения в ударно-волновых экспериментах ударных адиабат синтактика. Приводятся результаты сравнения расчетных и экспериментальных данных по ударным адиабатам смесей твердых веществ. Исследуется влияние газовой компоненты на динамическую сжимаемость синтактика.

Calculation method and measurement by means of shock and wave experiments of shock adiabatic curves for a syntactic are considered. The comparison results of the calculated and experimental data for the shock adiabatic curve of solids mixtures are given. Influence of gas component on dynamic compressibility of syntactic is investigated.

1. Введение. Гетерогенные материалы (ГМ) на основе полых микросфер (ПМС), называемые синтактиками, нашли широкое применение при изготовлении элементов конструкций летательных аппаратов и подводных лодок, где требуются ГМ с высокими удельными деформационно-прочностными характеристиками. При этом преимущество синтактиков становится преобладающим при высоком объемном содержании ПМС (>50%). Работая в составе таких конструкций, синтактики подвергаются воздействию широкого спектра нагрузок, в том числе, и нестационарных. Кроме того, высокопористые материалы, содержащие многослойные ПМС, используются в качестве защитных слоев летательных аппаратов при механическом и тепловом действиях потоков излучений и частиц. Прогнозирование параметров волновых процессов, формирующихся в синтактиках при нестационарных воздействиях, требует знания ударно-волновых характеристик этих ГМ, в частности, их ударной адиабаты (УА).

2. Расчет ударной адиабаты пористой гетерогенной среды. Часто используемое при построении УА многокомпонентных смесей аддитивное приближение оказывается справедливым в отсутствие тепловой составляющей давления, которая с увеличением пористости среды также возрастает и не может не учитываться при ударном сжатии высокопористых материалов. Модель полного схлопывания пор Я.Б. Зельдовича при любом давлении, отличном от нуля, не позволяет рассмотреть наличие газа в порах и для его учета требуется более детальное описание процесса схлопывания пор. В то же время в некоторых случаях ПМС содержат газ высокой

плотности, и влияние газовой составляющей на УА может иметь место.

Прочность ПМС синтактика (порядка сотен бар) невысока по сравнению с давлениями в ударной волне (УВ), и при построении УА можно считать синтактик смесью материалов стенок разрушенных микросфер, связующего и газа, содержащегося в ПМС до их разрушения.

Смесь твердых частишек вещества с газом представляет частный случай пористой гетерогенной среды. Расчет её УА строится на основе односкоростной модели сплошной среды. Кроме того, предполагается, что после фронта УВ температура и давление успевают выровняться между компонентами ГМ. Это может иметь место, если фронт УВ в пористой гетерогенной среде реализуется в узкой, но достаточной для установления частичного термодинамического равновесия области.

3. Измерение ударной адиабаты синтактика. Для экспериментального определения УА синтактика использовались калиброванные взрывные метательные устройства, обеспечивающие плоское метание алюминиевых ударников диаметром 70–100мм и толщиной 0.4–7мм со скоростями 0.7–2.5км/с. Нагружение образцов осуществлялось через алюминиевые и медные экраны. Параметры УВ определялись лазерным интерферометром VISAR при ее выходе на границу с водяным окном. В каждом опыте, наряду с массовой скоростью U , измерялась скорость ударной волны D в образце.

4. Результаты. Ударные адиабаты синтактика представлены на рис. 1, 2 (крестики – эксперимент; начальные давления в ПМС: 1 – $P_p=0$, 2 – $P_p=50$ бар, 3 – $P_p=100$ бар, 4 – $P_p=500$ бар). Начальные объемные содержания компонентов ГМ (1 – SiO_2 – материала ПМС и 2 – ЕРС – эпоксидно-полиамидного связующего) принимались равными $\eta_{10} = 10,4\%$, $\eta_{20} = 23,7\%$, что соответствует измеренной исходной плотности синтактика 0.56 г/см^3 .

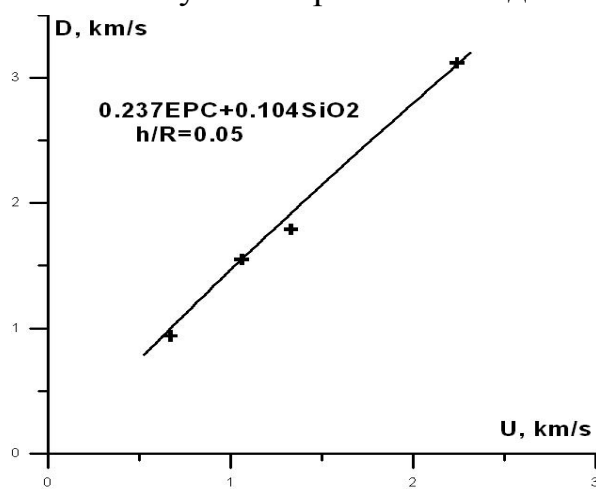


Рис. 1. Ударная адиабата $D-U$ ()

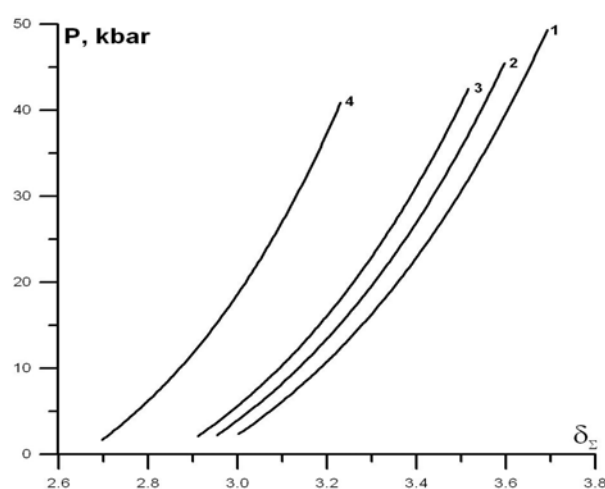


Рис. 2. Динамическая сжимаемость

Работа выполнена при поддержке РФФИ (13-08-12239офи_м, 13-08-01401а).

*Остропико Е.С., Разов А.И.**Санкт-Петербургский государственный университет, Россия
es-ostropiko@mail.ru*

TiNi ALLOY CONICAL WORKING ELEMENTS

*Ostropiko E.S., Razov A.I**St.-Petersburg State University, Russia*

Проведено экспериментальное исследование конических элементов из сплава TiNi для устройств удержания и расчеховки космического назначения. Предпринята попытка конечно-элементного моделирования процесса взведения и срабатывания такого рабочего элемента.

An experimental study of TiNi alloy conical elements for a holding and release devices for space applications was conducted. An attempt for finite element simulation of the working element arming and action processes was made.

1. Введение. Среди рабочих элементов из материалов с эффектом памяти формы наибольшей удельной мощностью и популярностью обладают проволоочные элементы [1, 2]. Основным недостатком проволоочных приводов являются их размеры. Для уменьшения размеров устройств можно применять, например, конические рабочие элементы. При небольших габаритах они обеспечивают значительные усилия и большой рабочий ход. В данном исследовании рассматривали конические элементы из сплава TiNi с характеристическими температурами мартенситных превращений $M_k=30^\circ\text{C}$, $M_n=45^\circ\text{C}$, $A_n=55^\circ\text{C}$, $A_k=75^\circ\text{C}$ (Рис. 1.).

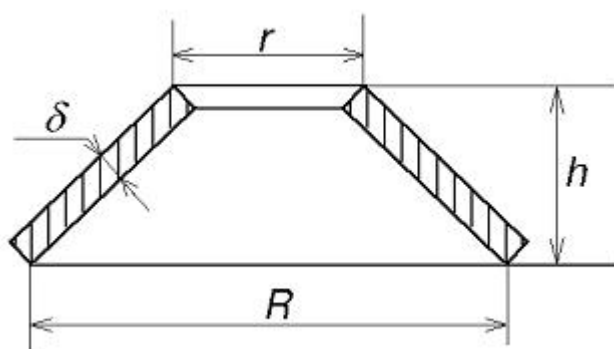


Рис. 1. Конический рабочий элемент из сплава TiNi:

$r=19,5$ мм, $R=45,5$ мм, $h=11.05$ мм, $\delta=2$ мм

2. Экспериментальные результаты. Функциональные характеристики конических элементов исследовали после деформирования сжатием. На рис. 2 приведена зависимость изменения высоты конического элемента от температуры при последующих нагреве и охлаждении в свободном состоянии.

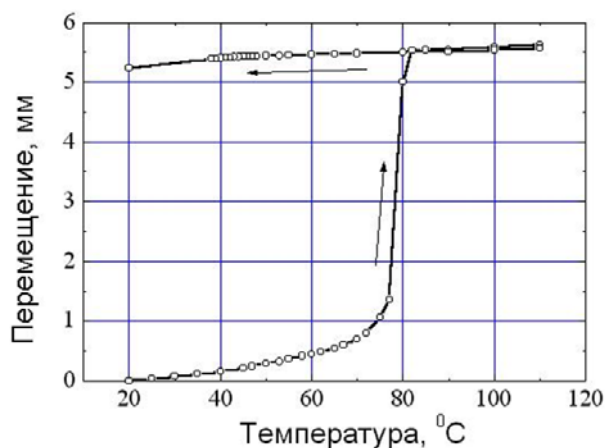


Рис. 2. Изменение высоты элемента при нагревании и охлаждении

Силовые характеристики тарельчатых элементов исследовали в макете реального устройства с электрическим нагревателем.

На рис. 3 показаны зависимости усилий, развиваемых коническим элементом, от температуры в четырех последовательных циклах «нагрев-охлаждение» при различных электрических напряжениях, подаваемых на нагреватель.

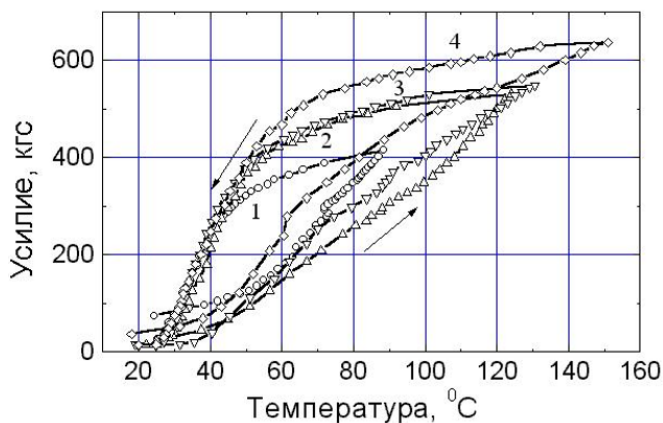


Рис. 3. Генерация реактивных усилий коническим элементом при нагреве при напряжении 20 (1); 25 (2) и 27В (3,4) на нагревающем устройстве и их релаксация при охлаждении.

3. Теоретические результаты. Предварительные расчеты, выполненные с использованием программного комплекса ANSYS, показали, что конечные характеристики процессов взведения и срабатывания конических рабочих элементов из сплава TiNi с эффектом памяти формы могут быть описаны с достаточной степенью точности.

Литература

1. Razov A. I. Application of Titanium Nickelide-Based Alloys in Engineering // The Physics of Metals and Metallography. 2004. V.97, Suppl.1. P.97-126.
2. Jani J.M., Leary M., Subic A., Gibson M.A. A review of shape memory alloy research, applications and opportunities // Materials and Design. 2014. V.56. P. 1078-1113.

УДК 539.3

ГРАНИЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ СЛОИСТОГО ПОРОУПРУГОГО ПОЛУПРОСТРАНСТВА С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ РУНГЕ-КУТТЫ

Игумнов Л.А.¹, Литвинчук С.Ю.¹, Петров А.Н.², Айзикович С.М.²

*1 - Научно-исследовательский институт механики Нижегородского
государственного университета им. Н.И. Лобачевского, Россия*

*2 - Донской государственный технический университет, Россия
andrey.petrov@mech.unn.ru*

BOUNDARY-ELEMENT MODELING OF THE LAYERED POROELASTIC HALF-SPACE DYNAMICS WITH THE HELP OF RUNGE-KUTTA METHODS

Igumnov L.A.¹, Litvinchuk S.Yu.¹, Petrov A.N.², Aizikovich S.M.²

*1 - Research Institute of Mechanics of Lobachevsky State University of Nizhni
Novgorod, Russia*

2 - Don State Technical University, Russia

Рассматривается проблема построения шаговых по времени гранично-элементных схем для компьютерного моделирования решений краевых задач динамики трехмерных пороупругих тел. Гранично-элементные схемы опираются на применение метода квадратур сверток и аппарат формализации схем Рунге-Кутты с помощью коэффициентов таблиц Бутчера. Шаговые гранично-элементные схемы применены для решения конкретных трехмерных краевых задач.

The issue of constructing time-step boundary-element schemes for computer modeling the analysis of dynamic boundary-value problems of 3-D poroelastic bodies is considered. Boundary-element schemes are based on using the convolution quadrature method and the apparatus for the formalization of Runge-Kutta schemes, using coefficients from Butcher's tables. Application of the step boundary-element schemes is illustrated by analyzing realistic 3-D boundary-value problems.

Представлена система гранично-интегральных уравнений (ГИУ) прямого подхода в изображениях по Лапласу и гранично-элементная методика решения ГИУ. Шаговая схема опирается как на теорему о свёртках оригиналов, так и на теорему об интегрировании оригинала. Для гранично-элементной дискретизации использованы четырёхугольные восьмиузловые биквадратичные элементы, применяется метод коллокации. Аппроксимация обобщённых граничных функций построена по согласованной модели. Приведено описание программного обеспечения. Решены задачи о действии вертикальной силы на поверхность однородного пороупругого полупространства и пороупругого полупространства с фиктивной границей; о действии вертикальной силы на полупространство, ослабленное полостью, двухслойное полупространство при различной толщине верхнего слоя, полупространство с выемкой в пороупругой постановке. Продемонстрирован эффект появления медленной волны. Результаты сравнивались с решениями других авторов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 15-08-02814, 15-48-02333, 15-08-02817, 14-08-31415_мол_а).

УДК 539.3

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УДАРНЫХ ВОЛН ПО ПОЛИМЕРНЫМ МАТЕРИАЛАМ

Попова Т.В.¹, Майер А.Е.¹, Хищенко К.В.²

1 - Челябинский государственный университет, Россия

2 - ОИВТ РАН, Россия

tatyana_maskaeva@mail.ru

NUMERICAL INVESTIGATION OF THE SHOCK WAVE PROPAGATION IN THE POLYMETHYLMETHACRYLATE

Popova T.V.¹, Mayer A.E.¹, Khishchenko K.V.²

1 - Chelyabinsk State University, Russia

2 - Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, Russia

На основе модели вязкоупругой среды Максвелла проводится исследование влияния вязкоупругих свойств полиметилметакрилата на изменение амплитуды ударной волны с глубиной.

Параметры модели Максвелла [1] выбраны исходя из сравнения с экспериментальными данными по высокоскоростному соударению пластин, подбор проводился для обеспечения совпадения результатов моделирования с экспериментально измеренными профилями [2, 4] скорости свободной поверхности. Для расчета зависимости давления от плотности и внутренней энергии использовано калорическое уравнение состояния [5, 6]. Показано, что в пределе слабых ударных волн учет вязкоупругих свойств позволяет добиться лучшего совпадения расчетных и экспериментальных данных по величине скорости ударной волны в сравнении с расчетами в гидродинамическом приближении. В вязкоупругом и гидродинамическом приближениях рассмотрена динамика ударных волн в полиметилметакрилате, возникающих при воздействии на поверхность образца импульсов давления микро-, нано- и пикосекундного диапазонов длительностей. Полученные результаты показали, что для гидродинамического и вязкоупругого случая изменения амплитуды ударной волны с глубиной примерно одинаковы. Также модель деформации полимерного материала обобщается на двумерный случай. Исследовано затухание амплитуды ударной волны при распространении от локализованного ударника.

Работа выполнена при поддержке грантов Президента Российской Федерации (№ МД-286.2014.1, НШ-6614.2014.2), Российского фонда фундаментальных исследований (№ 14-08-00967) и Министерства образования и науки РФ (проектная часть государственного задания, задание № 3.1334.2014/К).

Литература

1. Биргер И. А., Мавлютов Р. Р. Сопротивление материалов: Учебное пособие.— М.: Наука. 1986.— 560 с.
2. Kanel' G. I., Razorenov A. A., Utkin A. V., Baumung K., Experimental profiles of shock waves, Preprint of Scientific Association IVTAN of RAS (1996)
3. Barker L. M., Hollenbach R. E. Shock-Wave Studies of PMMA, Fused Silica, and Sapphire // J. Appl. Phys., 1970, 41, № 10
4. Канель Г.И. , Фортгов В.Е., Разоренов С.В. // УФН, 2007, 177, №8
5. Ломоносов И. В., Фортгов В. Е., Хищенко К. В. // Хим. физика. 1995. Т. 14. № 1. С. 47.
6. Khishchenko K. V., Lomonosov I. V., Fortov V. E. // Shock Compression of Condensed Matter — 1995. New York: AIP Press, 1996. P. 125.

ВЛИЯНИЕ ЦЕНТРА ИНЕРЦИИ И ЭФФЕКТОВ ДИСПЕРСИИ В МЕХАНИКЕ

Прозорова Э.В.

Санкт-Петербургский государственный университет, Россия

e.prozorova@spbu.ru

INFLUENCE THE CENTRE OF INERTIA AND DISPERSION ON MECHANICS

Prozorova E.V.

St.-Petersburg State State University, Russia

Предлагается включить в математическую модель механики сплошной среды три типа новых эффектов: влияния положения центра инерции, нелокальные эффекты и дисперсионные, т.е. рассматривается влияние нелокальности во времени и в пространстве и влияние момента количества движения, положения центра инерции. Каждый из эффектов рассматривается отдельно и иллюстрируется примерами.

1. Введение. Построена математическая модель механики сплошной среды, включающая два типа новых эффектов: нелокальные эффекты и дисперсионные. Предлагаемые уравнения имеют более высокий порядок и требуют дополнительных условий. В работе они обсуждаются. Безразмерными параметрами уравнений по-прежнему являются числа Рейнольдса и Маха. Это связано с тем, что рассматриваемая постановка задачи не включает новых размерных параметров. Анализируется влияние положения центра инерции и момента количества движения на функцию Лагранжа. Приводятся примеры, демонстрирующие это влияние в задачах пограничного слоя. При построении теории обычно неявно предполагается, что ось инерции всегда проходит через рассматриваемую точку, но это не так. Однако за счет поворота элементарного объема поток плотности через границу меняется на величину $\frac{d(\rho u)}{dr} \cdot (r' - r) + \dots$. Вклад остальных компонент мал, принимая во внимание малость объема и отсутствие вращения на оси. Здесь рассматриваются главные причины включения дополнительных эффектов.

2. Влияние влияния положения центра инерции, нелокальных и дисперсионных эффектов.

Получена функция Лагранжа с учетом положения центра инерции и влияния момента количества движения элементарного объема. На основании предложенной функции Лагранжа определяется новый вид уравнения Лиувилля. Указанные эффекты могут играть ключевую роль в расчетах сил при коллективном взаимодействии многих частиц.

Устанавливаются причины и необходимость учета запаздывания в кинетической теории, основанная на оценках производных по времени и по

координате с учетом определений производных и длины свободного пробега молекул, времен между столкновениями.

Получено ядро уравнения Навье-Стокса с учетом запаздывания для течения с большими градиентами. Устанавливаются приоритеты процессов в различных ситуациях. Получены простейшие точные решения кинетических задач. В качестве примера влияния момента количества движения рассмотрены задачи Фокнера-Скан с малыми значениями завихренности на внешней границе пограничного слоя. Получены вихревые течения внутри пограничного слоя. Решена задача о влиянии момента количества движения в задаче смешения двух параллельных потоков [1-5].

Литература

1. Э.В. Прозорова. О моделях механики сплошной среды. Международный научный журнал "Проблемы нелинейного анализа в инженерных системах", №2(42), т.20, 2014, 69-77.
2. Э.В.Прозорова."Влияние дисперсии в неравновесных задачах механики сплошной среды", МГУ, Электронный журнал "Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2012. Том 13,URL: <http://www.chemphys.edu.ru/pdf/2012-10-30-001.pdf>
3. Evelina V/ Prozorova/ Influence of the Delay and Dispersion In mechanics. Journalof Modern Physics, 2014, 5, 1796-1805
4. Evelina V. Prozorova, Aleksandr Shadrin. Influence dispersion in gas and solid for moving body. 5th European Conference for Aeronautics and Space Sciences 1-5 July 2013 / Holiday Inn Munich City Centre, Munich, Germany
5. Э.В. Прозорова. Влияние дисперсии в моделях механики сплошной среды. Санкт-Петербург, изд-во BBM, ISBN 978-5-9651-0797-1,2013. 96 с

**ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ И ДИНАМИЧЕСКАЯ
УСТОЙЧИВОСТЬ НАЗЕМНЫХ ТОНКОСТЕННЫХ ГАЗОПРОВОДОВ
БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА**

Разов И.О., Соколов В.Г.

*Тюменский Государственный Архитектурно-Строительный Университет,
Россия*

Razov1990@yandex.ru

**PARAMETRIC VIBRATIONS AND DYNAMIC STABILITY GROUND
THIN-WALLED LARGE DIAMETRE PIPELINE**

Razov I.O, Sokolov V.G.

Tyumen state university of architecture and civil engineering, Russia

Исследован вопрос параметрических колебаний тонкостенных газопроводов большого диаметра при наземной прокладке подверженных действию нестационарного внутреннего рабочего давления и продольной сжимающей силы. Получена разделяющаяся система дифференциальных уравнений Матье, решение которой позволило построить области динамической неустойчивости в виде модифицированных диаграмм Айнса-Стретта.

We have studied the parametric vibrations of thin-walled large-diameter gas pipelines in land strip exposed to unsteady internal working pressure and longitudinal compressive forces. Received divided the system of differential equations Mathieu, which allowed to construct the dynamic instability area in the form of modified diagrams of Insa-Stretta.

1. Введение. Магистральные трубопроводы в процессе эксплуатации подвергаются различного рода динамическим воздействиям и вибрациям способных привести к динамической потери устойчивости и усталостному разрушению металла. В результате колебательных процессов при определенных условиях в системе возникают параметрические колебания и как следствие параметрический резонанс. Основной задачей в исследовании параметрического резонанса является определение областей динамической неустойчивости конструкции. Построение таких областей позволит произвести отстройку система, и избежать опасных резонансных явлений.

2. Основные выражения для изучения вопроса параметрических колебаний и динамической устойчивости магистральных тонкостенных газопроводов большого диаметра при наземной прокладке.

Магистральные трубопроводы при наземной прокладке подвергаются действию нестационарного внутреннего рабочего давления $p(t)$ которое изменяется во времени по закону:

$$p(t) = p_0(1 + \mu \cos \gamma t)$$

(1)

Нестационарное внутреннее рабочее давление приводит стационарную продольную сжимающую силу к переменной, то есть изменяющаяся во времени по закону $F(t)$

$$F(t) = F_0(1 + \mu \cos \gamma t)$$

(2)

где γ – частоты возбуждения, определяемая технологией компрессорных станций; μ – параметр возбуждения, ограничивающий величину переменной составляющей давления (по данным [1] $\mu \leq 0,5$); p_0 – внутреннее рабочее давление; F – продольная сжимающая сила.

На основании геометрически нелинейного варианта полубезмоментной теории цилиндрических оболочек с учетом нестационарных воздействий (1), (2) получена разделяющаяся система однородных дифференциальных уравнений Матье [3]:

$$f''(t) + \omega_{mn}^2(1 - \delta_{mn} \cos \gamma t)f(t) = 0, \quad (3)$$

где: квадрат частоты свободных колебаний наземного газопровода имеет вид [4]:

$$\omega_{mn}^2 = \frac{\tilde{\lambda}_n^4 + m^4(m^2 - 1)(m^2 - 1 + p^*) + k^* m^4 - \tilde{\lambda}_n^4 m^4 P}{\rho^* R h [\tilde{\lambda}_n^2 h_v + m^2 + m^4]}, \quad (4)$$

$$\tilde{\lambda}_n = \frac{n \pi R}{L \sqrt{h_v}}, \quad p^* = p \frac{R}{E h h_v^2}, \quad \rho^* = \rho \frac{R}{E h h_v^2}, \quad \varepsilon_0^* = \frac{F}{E A h_v^2}, \quad k^* = \frac{R^2 k}{\pi E h h_v^2} z_m.$$

$$\text{Коэффициент возбуждения [3]: } \delta_{mn} = \frac{[P - p^*(m^2 - 1)/\lambda_n^4] \cdot m^4 \lambda_n^4}{\lambda_n^4 + m^4(m^2 - 1 + p^*) + k^* m^4 - \lambda_n^4 m^4 P} \cdot \mu \quad (5)$$

Определены границы области динамической неустойчивости, при помощи модифицированных диаграмм Айнса-Стретта с верхними и нижними границами [5].

$$1 - \frac{\delta_{mn}}{2} < \left(\frac{2\omega_{mn}}{\gamma} \right)^2 < 1 + \frac{\delta_{mn}}{2} \quad (6)$$

-верхняя граница, определена равенством:

$$\gamma^2 = 4\omega_{mn}^2 \left(1 - \frac{\delta_{mn}}{2} \right)^{-1} \quad (7)$$

-нижняя граница:

$$\gamma^2 = 4\omega_{mn}^2 \left(1 + \frac{\delta_{mn}}{2} \right)^{-1} \quad (8)$$

Литература

1. Болотин, В.В. Динамическая устойчивость упругих систем. – М.: Гостехиздат, 1956. – 600 с.
2. Разов, И. О. Параметрические колебания и динамическая устойчивость магистральных газопроводов при наземной прокладке / Разов И. О, Соколов В.Г. // Вестник гражданских инженеров. 2014 №2.
3. Разов, И. О. Свободные колебания наземных газопроводов, обжатых продольной силой, с учетом упругого основания грунта [Текст] / Соколов В. Г., Разов И. О. // Вестник гражданских инженеров. 2013. № 1(36).- С. 29–32.
4. Боголюбов, К.Н., Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний / Боголюбов К.Н., Митропольский Ю.А.. - М. : Наука, 1974, 503 с.

О МЕТОДЕ ОДНОРОДНЫХ РЕШЕНИЙ В ТРЕХМЕРНЫХ ЗАДАЧАХ ДЛЯ МНОГОСЛОЙНОГО ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ТЕЛА

Ревенко В.П.¹, Бакулин В.Н.²

*1 - Институт прикладных проблем механики и математики НАНУ,
Украина*

*2 - Институт прикладной механики Российской академии наук, Россия
vbak@yandex.ru*

METHOD HOMOGENEOUS SOLUTIONS IN THREE-DIMENSIONAL PROBLEMS FOR MULTILAYER CYLINDRICAL BODY

Bakulin V.N.¹, Revenko V.P.²

1 - Institute of applied mechanics of Russian Academy of Science, Russia

2 - Institute for applied problems of mechanics and mathematics NAS of Ukraine

Рассмотрено трехмерное напряженно-деформированное состояние конечного многослойного цилиндра. Для слоев цилиндра с ненагруженными торцами построены однородные решения. Решение краевой задачи сведено к минимизации обобщенной квадратичной формы. Установлены числовые критерии сходимости метода.

We consider the three-dimensional stress-strain state of the final laminated cylinder. For layers of the cylinder ends unloaded built homogeneous solutions. Solution of boundary value problems is reduced to minimize the generalized quadratic form. The numerical convergence criterion method was established.

1. Введение. Метод однородных решений оказался весьма эффективным для решения большого класса двумерных задач теории упругости [1]. В докладе этот метод развит для решения трехмерных задач.

2. Постановка задачи и метод решения. Найдем трехмерное напряженно-деформированное состояние (НДС) многослойного цилиндра, который находится в состоянии статического равновесия и имеет K слоев $D_j = \{(r, \varphi, z) \in ([R_{j-1}, R_j] \times [0, 2\pi] \times [-h, h])\}$, $R_0 = 0$, $R_{j-1} < R_j$ с упругими характеристиками материала $E_j, \nu_j, j = \overline{1, K}$. Для описания трехмерного НДС j -слоя используем представление общего решения уравнений Ляме в цилиндрической системе координат [2]

$$u_r^j = \frac{\partial P_j}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial Q_j}{\partial \varphi}, \quad u_z^j = \frac{\partial P_j}{\partial z} - 4(1 - \nu_j)\Phi_j, \quad u_\varphi^j = \frac{1}{r} \frac{\partial P_j}{\partial \varphi} - \frac{\partial Q_j}{\partial r}, \quad (1)$$

где $P_j = z\Phi_j + \Psi_j$, а Φ_j, Ψ_j, Q_j — независимые гармонические функции перемещений.

Использованы выражения для перемещений (1) и построено общее решение уравнений теории упругости через три гармонические функции. Напряженное состояние после разложения в ряды Фурье по $\{\cos n\varphi, \sin n\varphi\}$ и разделения переменных распалось для каждой гармоники n на независимые состояния. Показано, что построение трехмерных однородных решений приводит к характеристическому уравнению и поиску собственных значений, которые

совпадают с аналогичными в осесимметричном случае. Построены однородные решения для произвольной гармоники n и каждого слоя цилиндра с торцами свободными от нагрузжений. Перемещения и напряжения в слоях приведены в виде суммы рядов, которые определяются N однородными решениями от ненулевых комплексных собственных значений и четырьмя (для $n > 0, j > 0$) решениями от нулевых собственных значений. Неизвестные коэффициенты $c_k^n, n > 0$ определены из условия минимума интеграла от квадрата невязки найденного решения и заданных граничных усилий на боковой поверхности цилиндра и условий идеального контакта слоев. Аналогично [3], эти условия сведены к поиску минимума обобщенной квадратичной формы

$$\sum_{m=1}^{K_1} \|f_{m,N}^n(\gamma) - P_m^n(\gamma)\|^2 = \sum_{k,j=1}^M c_k^n c_j^n W_{kj} - 2 \sum_{k=1}^M c_k^n V_k + P^2, \quad (2)$$

где $M = (3N + 2)(2K - 1)$. Для заданных $N, n > 0$ обозначим минимум формы (2) – $F(N)$, а переменные c_k^n , на которых он осуществляется – c_k^N .

3. Численные расчеты. Предложенный подход апробирован на примере расчета однородного цилиндра $D = \{(r, \varphi, z) \in ([0, R] \times [0, 2\pi] \times [-h, h])\}$, нагруженного локальными осесимметричными нормальными усилиями обжатия $\sigma_g(\gamma)$, заданными только на площадке $\gamma \in [-\delta, \delta]$, где $\gamma = z/h, \delta < 1, 2\sigma_0 = \int_{-\delta}^{\delta} \sigma_g(\gamma) d\gamma$. На рис. 1а рассмотрено обжатие за локальным параболическим законом $\sigma_g(\gamma) = \sigma_M [\delta^2 - \gamma^2]/\delta^2$, а на рис. 1б – линейным $\sigma_g(\gamma) = \sigma_M (\delta - |\gamma|)/\delta$, где $\sigma_M = 30$.

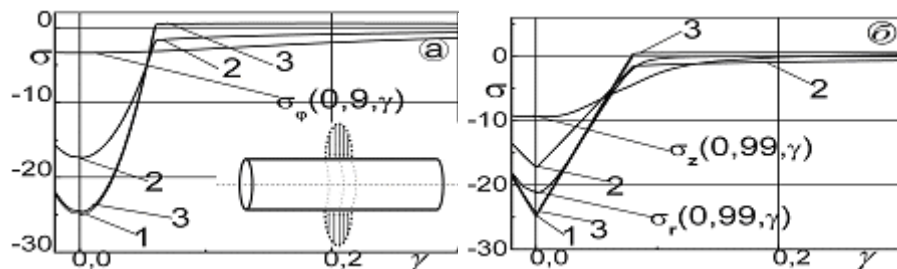


Рис. 1: 1 – $\sigma_r(1, \gamma)$; 2 – $\sigma_\phi(1, \gamma)$; 3 – $\sigma_z(1, \gamma)$, $\alpha = r/R, h/R = 0,5, \nu = 0,3$

Установлено, что распределение напряжений существенно зависит от отношения h/R , так что условно можно выделить три случая: длинный ($h/R > 3$), короткий ($h/R < 1$) и кубовидный цилиндр. В длинном цилиндре максимальные радиальные напряжения примерно равны максимальным круговым, а в коротком осевым напряжениям.

Литература

1. Лурье А.И. Теория упругости. М.: Наука, 1970. 940с.
2. Revenko V.P. Solving the three-dimensional equations of the linear theory of elasticity // Int. Appl. Mech. – 2009. – 45, № 7. – P. 730-741.
- 3 Бакулин В.Н., Ревенко В.П. Расчет методом конечных тел ортотропной цилиндрической оболочки с немалым прямоугольным отверстием // Материалы X Международной конференции по неравновесным процессам в соплах и струях (NPNJ 2014), 25-31 мая 2014 г., Алушта. М.: Изд-во МАИ, 2014., с. 324-326

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ

*Ренев С.А., Прокопов В.С.
МГТУ им.Н.Э.Баумана, Москва, Россия
chevrole59@mail.ru*

DEVELOPMENT OF AN ALGORITHM FOR SOLVING PROBLEMS OF FRACTURE MECHANICS

*Renev S.A., Prokopov V.S.
BMSTU, Moscow, Russia*

Рассматривается реализация основ механики разрушения в отечественной САПР. Представлена реализация двух алгоритмов, использующих основные параметры механики разрушения, главный из которых – коэффициент интенсивности напряжения (КИН). Используется аналитический метод расчета критического КИН. Разработанные алгоритмы используют концепцию метода конечных элементов (МКЭ). Имитации процесса разрушения расчетной модели осуществляется методом «Birth and Death». Разрабатываемый алгоритм исключает недостатки, присущие зарубежным САПР.

Discusses the implementation of the fundamentals of fracture mechanics in Russian CAx system. Presents the implementation of two algorithms that use the basic fracture mechanics parameters, the main of which is the stress intensity factor (SIF). Used analytical method for calculation of critical SIF. The algorithms use the concept of finite element method (FEM). Simulation of fracture process of the computational model is made by the method of "Birth and Death". The developed algorithm eliminates the disadvantages inherent in foreign CAx systems.

1. Введение. Рассматривается механика разрушения для решения линейных задач - линейная упругая механика разрушения (ЛУМР). ЛУМР характеризуется наличием небольшой зоны пластичности у вершины трещины относительно размеров самой трещины[1]. Для рассмотрения конструкции с трещиной используется однопараметрический подход. В качестве параметра выступает один из критериев механики разрушения. Основные критерии механики разрушения[2]: коэффициент интенсивности напряжения K (КИН) для трех типов деформации (KI, KII, KIII), инвариантный J -интеграл, интенсивность выделения энергии G для трех типов деформации (GI, GII, GIII).

Актуальность данной работы обосновывается отсутствием отечественных САПР, реализующих возможности ЛУМР. Зарубежные САПР имеют ряд недостатков:

- ограниченное использование конечных элементов (КЭ) для вычисления параметров механики разрушения;
- отсутствует автоматическое сгущение сетки в области концентратора напряжений;
- отсутствует процесс зарождения трещины;
- нет оценки критериев механики разрушения на каждом шаге продвижения трещины;

- требуется заранее задавать размеры и расположение фронта трещины;
- необходимо вводить критический КИН K_c .

Целью данной работы является разработка алгоритма, реализующего возможности ЛУМР.

2. Основная часть. Алгоритм, реализующий возможности ЛУМР состоит из двух частей. Первая часть реализует возможности для решения задач с расчетной моделью без трещины, а вторая - с наличием трещины.

Алгоритм использования теории прочности и ЛУМР в модели без трещины

Нагруженная расчетная модель без макроскопических дефектов рассматривается по теории наибольшего относительного удлинения, включающая в себя главные напряжения[3]. Блок-схема первой части алгоритма показана на Рис. 1.

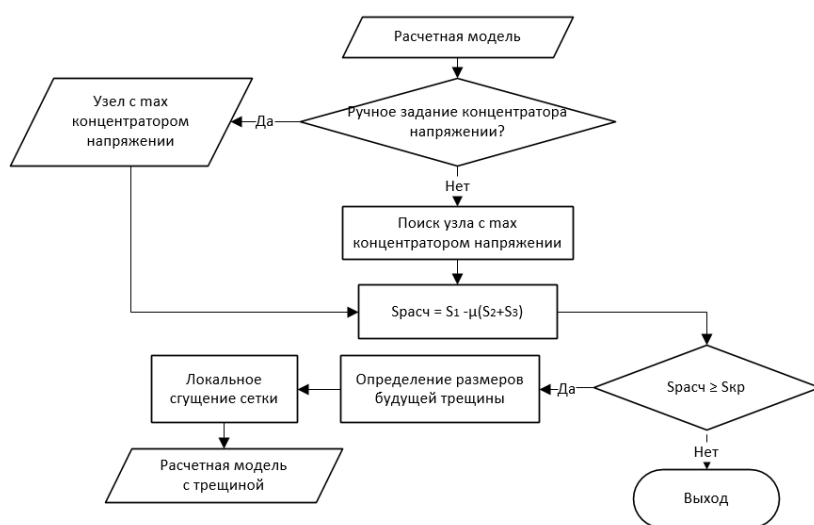


Рис.1. – Блок-схема первой части алгоритма

Алгоритм использования принципов ЛУМР в модели с трещиной

Позволяет рассмотреть две задачи. Первая - это продолжить реализацию первого алгоритма. Второе - это решить задачу, когда расположение и размеры фронта трещины известны. Размеры трещины находятся с использованием критического КИН (K_c), полученного аналитическим путем[4]. Блок-схема второй части алгоритма показана на Рис.2.

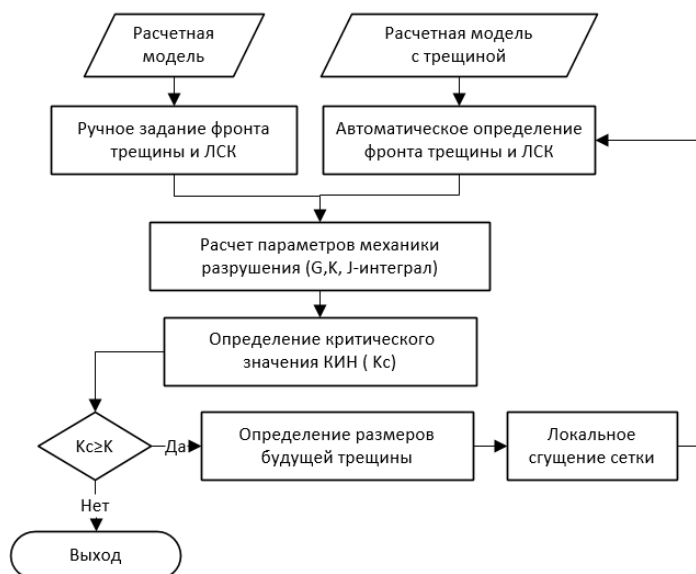


Рис.2. – Блок-схема второй части алгоритма

В качестве тестовой задачи рассмотрим ПДС пластины с трещиной, нагруженной равномерно растягивающей нагрузкой (Рис.3).

ГУ: распределенная нагрузка $p = 100$ МПа или эквивалентная осевая сила $P = 20$ МН.

Размеры $1/2$ части образца: ширина $b = 1000$ мм; длина $L = 3000$ мм; толщина $t = 100$ мм; длина трещины $l = 200$ мм; расстояние от края пластины до центра трещины $a = 1500$ мм.

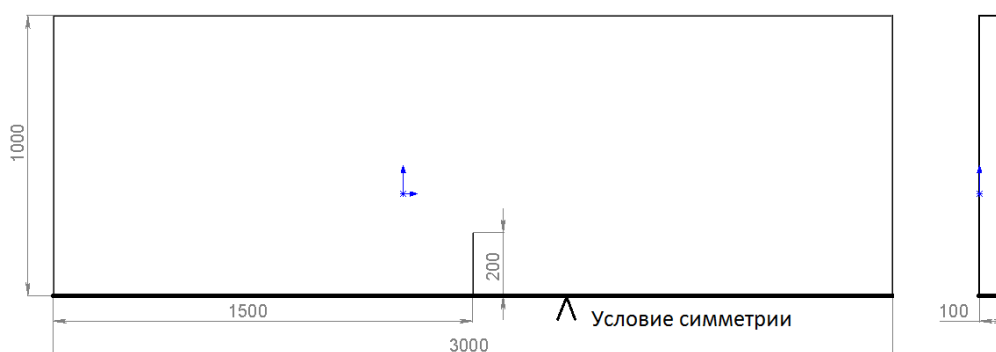


Рис.3. Геометрические размеры $1/2$ части пластины

Расчет КИН:

По ГОСТ 25.506-85

$$K_I = \frac{F}{b\sqrt{a}} Y_1 \quad (1)$$

где Y_1 – безразмерная функция, равная:

$$Y_1 = 0.38 \left[1 + 2.308 \left(\frac{2l}{b} \right) + 2.439 \left(\frac{2l}{b} \right)^2 \right] \text{ при } 0.3b \leq 2l \leq 0.5b$$

По ГОСТ 25.506-85

$$K_I = \frac{F\sqrt{a}}{b} Y_1 \quad (2)$$

$$Y_1 = 1.77 + 0.227 \left(\frac{2l}{b}\right) - 0.51 \left(\frac{2l}{b}\right)^2 + 2.7 \left(\frac{2l}{b}\right)^3$$

По Мураками[5], подраздел 1.1.1, формула 2.

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \left[1 - 0.025 \left(\frac{2l}{b}\right)^2 + 0.06 \left(\frac{2l}{b}\right)^4 \right] \sqrt{\sec \left(\frac{\pi a}{2b}\right)} \quad (3)$$

Результаты расчета КИН представлены в Таблица 1.

Таблица 1. Результаты расчета КИН аналитическим и численным методом

Методы расчета	K_I , МПа $\sqrt{мм}$
АРМ WinMachine, метод напряжений	2030.62
АРМ WinMachine, метод J-интеграла	2571.74
По формуле (1)	2779.64
По формуле (2)	2760.66
По формуле (3)	2498.19

3. Сравнение результатов с зарубежными САПР. Рассматриваемый алгоритм реализован авторами в отечественной САПР АРМ WinMachine в модуле АРМ Structure 3D. В качестве объекта исследования возьмем расчетную модель пластины с трещиной, полученную МКЭ[6].

Характеристика КЭ-модели: число узлов – 24850, число элементов – 19200, тип КЭ – 8-и узловые.

Полученные значения критериев разрушения представлены в Таблица 2.

Таблица 2. Сравнительная характеристика критериев разрушения

	САПР №1	САПР №2	АРМ Structure 3D
KI (МПа $\sqrt{мм}$)	471.4	-1230	2030.62
GI (МПа*мм)	-63.549	-	-60.57
J-интеграл (МПа*мм)	63.62	63	57.32

Как показано в Таблица 2, значение KI, полученное в модуле АРМ Structure 3D, ближе к значению, полученное выше аналитическим путем.

4. Выводы. Решения, заложенные в алгоритме, позволяют: снять ограничения на использование КЭ, вычислить параметры ЛУМР в вершине трещины как при решении динамической задачи, так и статической, автоматически перестраивать сетку в области концентратора напряжений. Динамическое решение задачи возможно благодаря методу «Birth and Death».

Значения КИН, получаемые на основе данного алгоритма, являются более достоверными, по сравнению с зарубежными САПР.

Недостатки данного алгоритма:

- отсутствуют инструменты для решения нелинейных задач механики разрушения;
- нет возможности для работы с композитами;

Приведенные недостатки являются перспективным направлением дальнейшего развития алгоритма.

Реализация данного алгоритма в программном модуле APM Structure 3D позволит проектировать безопасные технические системы, а также значительно снизить материальные издержки и сократить цикл «проектирование - производство».

Литература

- [1] М. Сиратори, Т. Миеси, Х. Мацусита, Вычислительная механика разрушения: Пер. с японск. – М.: Мир, 1986. – 334 с., ил
- [2] Д. Брок, Основы механики разрушения. – М.: Высшая школа, 1980. – 368 с.
- [3] Н.М. Беляев, Сопротивление материалов. – М.: Наука, 1976. – 608 с.
- [4] N. Gubeljaka, M. D. Chapettib, J. Predana, Variation of Fatigue Threshold of Spring Steel with Prestressing
- [5] Ю. Ито, Ю. Мураками, Н. Хасебэ, Р. Юуки, М. Тоя, К. Того, Х. Мията, Х. Терада, Н. Миядзаки, С. Аоки, Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений: В 2-х томах. Т. 1: Пер. с англ./Под ред. Ю. Мураками. – М.: Мир, 1990. – 448 с., ил.
- [6] Р. Галлагер, Метод конечных элементов. Основы. М.: Мир, 1984. – 428 с., ил

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ТРЕХСЛОЙНЫХ ПАНЕЛЕЙ

Родионов А.А., Коршунов В.А., Пономарев Д.А.

*Санкт-Петербургский государственный морской технический университет,
Россия*

rodionovsmk@yandex.ru

NONLINEAR STABILITY ANALYSIS OF SANDWICH PANELS

Rodionov A.A., Korshunov W.A., Ponomarev D.A.

St.-Petersburg State Marine Technical University, Russia

Исследование нелинейной устойчивости трехслойных сэндвич панелей на предварительном этапе может быть выполнено в упрощенной постановке, на основе рассмотрения поведения балки полоски. Что позволяет трехмерную задачу свести к двумерной путем введения некоторой системы допущений. В качестве инструмента исследования используется модели метода конечных элементов, которые позволяют учитывать геометрическую нелинейность больших деформаций и физическую нелинейность поведения материала. Разработанные модели метода конечных элементов позволили выявить различные формы потери устойчивости и сформулировать критерии идентификации критический нагрузок.

Как известно композитом в общем случае называется неоднородный материал, состоящий из двух и более компонент, которые не являются растворимыми друг в друге. Однако, среди композитных материалов можно выделить специфическую форму слоистых структур, которая называется сэндвичем. В этой структуре выделяют три основных слоя, это несущие слои и слой наполнителя, который располагается между несущими. Как правило изгибная жесткость наполнителя является намного меньше (более двух порядков) жесткости несущих слоев и, следовательно, он играет разносящую роль для несущих слоев, а также воспринимает сдвиговые усилия.

В работе в качестве трехслойной сэндвич конструкции рассматривается балка-полоска подверженная действию сжимающих усилий, то есть рассматривается задача потери устойчивости.

В отличие от большинства имеющихся аналитических решений, которые дают критические усилия лишь в линейной постановке, в работе разработаны численные алгоритмы, позволяющие в явном виде учесть геометрическую и физическую нелинейность конструкции. В качестве геометрической нелинейности рассматриваются большие перемещения системы, которые она получает после потери устойчивости. Под физической нелинейностью в работе понимается упругопластическое поведение материала наполнителя, при этом несущие слои считаются линейно упругими.

В отличие от классической формы потери устойчивости пластин, которая в настоящем исследовании обозначается как глобальная потеря

устойчивости, в сэндвич панелях обнаруживаются дополнительные формы: потеря устойчивости наполнителя, локальная потеря устойчивости несущих слоев, исчерпание прочности несущего слоя.

Критическую нагрузку потери устойчивости для указанных форм потери устойчивости предложено определять с помощью полученной в результате численного анализа кривой нагружения. Рассматриваются различные критерии оценки критической нагрузки.

В работе проведены исследования по влиянию свойств материала наполнителя на формы потери устойчивости конструкции. На рисунке 1 показаны формы потери устойчивости, полученные для трехслойных конструкций при различных характеристиках материала наполнителя с учетом пластических деформаций.

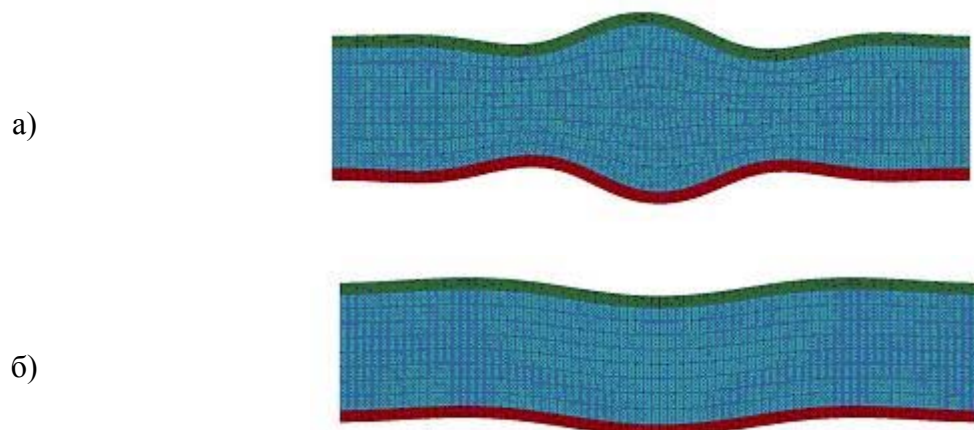


Рис. 1 – Формы потери устойчивости трехслойной балки полосы при различных свойствах наполнителя: а) симметричная форма потери устойчивости; б) антисимметричная форма потери устойчивости

Помимо указанных форм потери устойчивости, возможны формы, связанные с расслоением, то есть отделением несущих слоев от наполнителя. Полученные численные решения позволяют учесть эти эффекты (Рис.2).



Рис. 2 – Форма потери устойчивости трехслойной балки в результате отслоения несущих слоев от наполнителя

Для всех форм потери устойчивости в результате расчетов строится зависимость сжимающего напряжения в несущих слоях от продольной деформации с выраженным максимумом, который определяет критические нагрузки.

**АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
ТРЕХСЛОЙНЫХ ПАНЕЛЕЙ ПРИ ПОПЕРЕЧНОМ ИЗГИБЕ**

Родионов А.А., Коришунов В.А., Пономарев Д.А.

*Санкт-Петербургский государственный морской технический университет,
Россия*

rodionovsmk@yandex.ru

**ANALYSIS OF STRESS-STRAINED STATE OF SANDWICH PANEL
WITH THE LATERAL BENDING**

Rodionov A.A., Korshunov W.A., Ponomarev D.A.

St.-Petersburg State Marine Technical University, Russia

Анализ напряженно-деформированного состояния сэндвич панели в условиях поперечного изгиба выполняется с помощью одномерных моделей балки-полоски, что допустимо если панель в плане имеет длину существенно превосходящую ее ширину. Построены различные типы аналитических моделей балки-полоски, различающие системой допущений. Результаты аналитических расчетов сопоставлены с расчетами по методу конечных элементов, для чего получена специальная матрица жесткости балки полоски сэндвич панели.

В последние годы многослойные конструкции находят все большее применение в судостроении. Идея слоистых конструкций не нова, но, несмотря на это, при проектировании возникает целый ряд вопросов. Многослойная панель, используемая, в качестве несущего элемента, как правило, состоит из трех слоев: двух внешних и одного внутреннего. Для достижения общей несущей способности этой многослойной конструкции слои соединены между собой для образования монолитной системы – сэндвич панели.

Предполагается, что в плане сэндвич панель имеет длину в три и более раз превосходящую ее ширину. Этот факт позволяет использовать одномерную модель балки полоски.

Тонкие внешние слои выполнены из жесткого и прочного материала и связаны слоем маложесткого заполнителя. Основную часть изгибающего момента при поперечном изгибе балки воспринимают внешние слои. Заполнитель, имеющий малый модуль упругости, почти не воспринимает напряжений, направленных параллельно внешним слоям. Роль заполнителя состоит в том, что он препятствует взаимному сдвигу внешних слоев. В связи с этим, принимается допущение, что касательные напряжения возникают только в заполнителе и постоянны по высоте.

При расчете трехслойных балок полосок с заполнителем, имеющим малый модуль сдвига, гипотеза плоских сечений не может быть принята из-за существенного сдвига в заполнителе.

При анализе напряженно-деформированного состояния решается

система дифференциальных уравнений поперечного изгиба трехслойной балки с легким заполнителем и безмоментными внешними слоями. В качестве неизвестных функций предложено рассматривать функцию прогибов и функцию взаимного тангенциального перемещения внешних слоев.

Для решения задач поперечного изгиба балок уравнения должны быть дополнены граничными условиями, отражающими условия опирания концов балки. Дифференциальное уравнение изгиба имеет четвертый порядок, поэтому в решение будут четыре постоянные интегрирования, для определения которых на каждом конце балки должны быть заданы два условия. Эти условия отличаются от условий, формулируемых для обычных балок, так как в трехслойных балках отсутствует жесткая связь между прогибами и углами поворота сечений.

Допущение о безмоментности внешних слоев не всегда оказывается приемлемым. В связи с этим проведена оценка пределов применимости упрощенной теории, не учитывающей собственной изгибной жесткости внешних слоев. Для определения касательных напряжений и перерезывающих сил во внешних слоях закон Гука не может быть использован, так как гипотезе плоских сечений, принятой для внешних слоев, соответствует отсутствие сдвигов. Перерезывающая сила во внешнем слое определяется из условий равновесия элемента внешнего слоя с учетом изгибающего момента.

Установлено, что в практически важном диапазоне изменения отношения толщин и учет моментности внешних слоев оказывает незначительное влияние на величину прогиба балки. Принципиальное значение учета моментной работы внешних слоев может иметь при определении напряжений.

Используя аналитические зависимости для потенциальной энергии деформации конструкции с учетом сдвига заполнителя, вариационным методом получена матрица жесткости балочного конечного элемента. Конечный элемент является двух узловым с 8 степенями свободы.

На базе метода конечных элементов с использованием полученной матрицы жесткости проведены расчеты поперечного изгиба трехслойной балки, свободно опертой и жестко заделанной по торцам. Результаты расчетов сопоставлены с аналитическими решениями, проведена оценка погрешности вычислений.

ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА ПОЛИМЕРИЗУЮЩЕЙСЯ СМЕСИ С УЧЕТОМ ДИФФУЗИИ И УНОСА С ПОВЕРХНОСТИ

Русаков С.В., Моисеенков М.С.

Пермский государственный национальный исследовательский университет,

Россия

rusakov-edu@mail.ru

NUMERICAL METHOD OF CALCULATION POLYMERIZED MIXTURE WITH REGARD DIFFUSION AND TAKES AWAY FROM THE SURFACE

Rusakov S.V., Moiseenkov M.S.

Perm State National Research University, Russia

Рассматривается система диффузионно-кинетических уравнений, моделирующих полимеризацию амин-эпоксид смеси в тонком слое, состоящей из 10 компонент [1], с поверхности которого происходит унос вещества. Для численного моделирования предлагается схема метода прямых в сочетании со сплайн-аппроксимациями по пространственным переменным.

We consider a system of diffusion kinetic equations modeling amine-epoxide polymerization mixture in a thin layer consisting of 10 components [1], the surface of which there is entrainment of substance. For numerical simulation scheme is proposed the method of lines in conjunction with the spline-approximation to the spatial variables.

1. Введение. Создание надувных крупногабаритных оболочечных конструкций из тканного материала пропитанного полимеризующейся смесью, переходящей из жидкой в твердую фазу, является весьма перспективным направлением в том числе и в космических технологиях. Очевидно, что решение подобных задач невозможно без детального математического моделирование. Поэтому создание эффективных проблемно ориентированных численных методов является весьма актуальным.

2. Описание численного метода. Идею предлагаемого численного метода рассмотрим на модельной задаче:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D(u) \frac{\partial u}{\partial x} \right) - Ku + f, \quad x \in (0,1), \quad t > 0, \quad (1)$$

$$u(0, x) = u^{(0)}(x), \quad \frac{\partial u(t, 0)}{\partial x} = 0, \quad D(u(1)) \frac{\partial u(t, 1)}{\partial x} = -\alpha u(1). \quad (2)$$

Проведем дискретизацию по пространственной переменной $x_i = ih, h = 1/N$, а затем, проинтегрировав уравнение (1) по переменной $x \in [x_i, x_{i+1}]$, получим систему обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) вида:

$$\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial t} = \frac{1}{h} (D(u_{i+1})J_{i+1} - D(u_i)J_i) - \tilde{K}_i \tilde{u}_i + \tilde{f}_i, \quad i = 0, \dots, N-1 \quad (3)$$

$$\text{где } \tilde{u}_i = \frac{1}{h} \int_{x_i}^{x_{i+1}} u(t, x) dx, \quad J_i \cong \frac{\partial u(t, x_i)}{\partial x}. \quad (4)$$

Аппроксимация пространственной производной производилась с помощью параболического сплайна, приближающего в среднем [2], из условий гладкого сопряжения которого в узлах разностной сетки имеем систему линейных алгебраических уравнений для определения величин J_i :

$$J_{i-1} + 4J_i + J_{i+1} = 6 \frac{\tilde{u}_{i+1} - \tilde{u}_i}{h}, \quad j = 1, \dots, N-1 \quad (5)$$

Замыкание системы уравнений (5), с использованием граничных условий (2), принимает вид:

$$J_0 = 0, \quad J_{N-1} + \left(2 + \frac{6D(u_N)}{\alpha h} \right) J_N = -\frac{6}{h} \tilde{u}_N \quad (6)$$

Система ОДУ решается с помощью метода Рунге-Кутты четвертого порядка точности, при этом решение уравнений (5)-(6) находится экономичным алгоритмом скалярной прогонки. Преимущество предлагаемой пространственной аппроксимации по сравнению со стандартной конечно-разностной схемой [3] состоит в том, что она позволяет более эффективно приближать граничные условия второго и третьего рода и сохраняет второй порядок точности в непрерывной норме даже на неравномерных сетках. Проведенные тестовые расчеты подтвердили высокую работоспособность предлагаемой методики.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ №15-01-07946 и №14-08-96011 p_урал_a.

Литература

1. Kondyurin A, Komar L.A, Svistkov A.L. Combinatory model of curing process in epoxy composite// Composites: Part B (2011), 5 p. Journal homepage: www.elsevier.com/locate/compositesb
2. Русаков С.В. Разностные сплайн-схемы для задач тепло- и массопереноса. Иркутск: Изд-во Иркут. ун.-та, 1990. 125 с.
3. Самарский А.А. Теория разностных схем. М.: Наука, 1977. 656 с.

УДК 550.34.013.2: 624.042.7

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ОЦЕНОК СЕЙСМИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ, ПОСТУПИВШЕЙ В СООРУЖЕНИЕ

Рутман Ю.Л., Шивуа А.Дж.

*Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный
университет, Россия
605fractal@mail.ru*

A COMPARATIVE ANALYSIS OF METHODS FOR ESTIMATING SEISMIC INPUT ENERGY INTO STRUCTURE

Rutman Yu.L., Shiwua A.J.

Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

Разрушение сооружения при землетрясении связано с количеством энергии, которое сооружение поглощает и рассеивает в результате движения грунта. Для того, чтобы лучше понять поведение конструкции при сейсмических воздействиях и обеспечить надлежащую сейсмостойкость, необходимо оценить максимальную энергию, которая может поглощена сооружением. Существует ряд таких оценок. Эти оценки либо очень завышают возможную поглощенную энергию, либо занижают (т.е. неконсервативные). В статье предлагается новая оценка, которая дает разумный запас по отношению к реальной входной (поглощенной) энергии. Выполнен сравнительный анализ всех видов оценок.

The damage a structure during earthquake is related to the amount of energy that the structure absorbs and dissipates as a result of ground motion. In order to better understand the behaviour of structure under seismic action and provide adequate seismic resistance, it is essential to estimate the maximum energy that the structure may able to absorb. There are a number of proposals for such assessments. These estimates either significantly overestimate possible absorbed energy or underestimate it (i.e. not conservative). The paper proposes a new assessment, which gives a reasonable margin with respect to the real input (absorbed) energy. A comparative analysis of various proposals is presented.

Энергетический метод динамического анализа сейсмостойкости сооружений, становится все более и более популярным во всем мире. Идея метода состоит в установлении эффективной связи между энергией, поступившей в динамическую систему, и фактическим повреждением сооружения. В докладе рассматривается сравнение некоторых предложений по количественной оценке энергии, поступавшей в систему. Основное внимание уделено оценкам, предложенным Хаузнером и Ариасом, а также модифицированным вариантам этих оценок.

Анализ проводился на основе упругопластической системы с одной степенью свободы. Исследовалась поступившая в систему энергия при различных сейсмических воздействиях. Силовая упругопластическая характеристика системы взята в виде диаграммы Прандтля. Варьировалась упругая жесткость (основной период системы) и уровень пластического срабатывания.

Для упругопластической системы с одной степенью свободы (УПСОСС)

были произведены расчеты на воздействие десяти различных акселерограмм с целью установления максимальной энергии, приведенной к единичной массе и ее сравнении с оценками Хаузнера и Ариаса. Детальный анализ показывает, что во многих случаях эти оценки дают результат, который ниже реальной входной энергии. Поэтому желательно получить оценку, которая всегда оценивает входную энергию сверху, но с небольшим запасом.

Предложена новая оценка, позволяющая разумно консервативно оценить сейсмическую энергию, поступившую в УПСОСС. В предлагаемой оценке используется известная характеристика интенсивности сейсмического воздействия - удельная плотность энергии (*Specific Energy Density – SED*). Зная *SED* для данного сейсмического района и кривую несущей способности сооружения, с помощью предлагаемой оценки можно установить максимум поступившей в сооружение сейсмической энергии и сейсмостойкость сооружения. Оценка производится вне рамок динамического расчета и без учета спектральных характеристик сооружения.

Сейсмическая энергия, введенная в сооружение (систему) при движении его основания, является мерой потенциального повреждения. Проектирование сейсмостойких конструкций с использованием энергетических оценок позволяет устанавливать их сейсмостойкость сразу для целого класса воздействий и сооружений.

СОВРЕМЕННЫЕ КОНЦЕПЦИИ РАСЧЕТА СЕЙСМОСТОЙКОСТИ СООРУЖЕНИЙ

Рутман Ю.Л.¹, Уздин А.М.², Симборт Э.¹

1 - СПбГАСУ, Россия

2 - ПГУПС, Россия

e-simbort@mail.ru

В настоящее время в мире осуществляется переход к многоуровневому проектированию сейсмостойких зданий и сооружений. При этом, как минимум, рассматривается два уровня воздействия:

- частые слабые воздействия с повторяемостью раз в 25-500 лет в зависимости от степени ответственности сооружения и общих требований государства к сейсмостойкости сооружений
- редкие разрушительные землетрясения с повторяемостью раз в 500-10000 лет.

Следуя требованиям МАГАТЭ и сложившейся терминологии в энергетическом, гидротехническом и транспортном строительстве в России частые слабые воздействия называются проектными землетрясениями (ПЗ), а редкие разрушительные воздействия – максимальными расчетными землетрясениями (МРЗ).

Общее требование к проектированию сводится к необходимости обеспечить нормальную эксплуатацию сооружения при ПЗ и отсутствие его обрушения при МРЗ. При ПЗ сооружение работает в упругой области и не имеет повреждений. При МРЗ используется пластический ресурс сооружения. С точки зрения критериев расчет на ПЗ является силовым (по допустимым нагрузкам), а расчет на МРЗ – кинематическим (по допустимым перемещениям)

Расчет по нагрузкам обычно проводится на основе линейно-спектрального метода (ЛСМ). ЛСМ предполагает использование пиковых значений ускорений сейсмоземлетрясений. Действующие нормативы России не нормируют непосредственно уровни сейсмических воздействий с повторяемостью ПЗ. Нормы оперируют ускорениями МРЗ. Переход от пиковых ускорений при МРЗ к пиковым значениям при ПЗ возможно осуществить с помощью $K_{ПЗ}$ – коэффициента перехода от МРЗ к ПЗ . Он не зависит от типа и характера накопления повреждений в конструкции, поскольку расчет на ПЗ является чисто упругим. Однако этот коэффициент зависит от ситуационной сейсмичности, т.е. от сейсмичности по картам А, В и С. В докладе рассматриваются возможные варианты выбора $K_{ПЗ}$.

Зависимость пиковых ускорений от преобладающего периода воздействия имеет принципиальное значение в расчетах сооружений на сейсмические воздействия. При проектировании удобно считать, что воздействие будет наиболее опасным, т.е. резонансным. В этом диапазоне частот несложно задать расчетную амплитуду. При резонансе коэффициент динамики зависит только от затухания в системе. Поэтому очень важен учет

неоднородного демпфирования в системе, т.е. наличие кроме спектра частот и спектра демпфирования системы (показателей затухания по формам колебаний). При обсуждении проблемы возможностей и точности ЛСМ необходимо также детально рассмотреть

- методики учета корреляции форм колебаний, особенно при плотном спектре и сильном демпфировании;
- учет динамического взаимодействия сооружения с основанием;
- возможность задания воздействия под каждой опорой многоопорной конструкции;
- возможность приближенного учета нелинейности путем линеаризации системы и ее итерационного перерасчета.

В докладе рассмотрены подходы к учету всех перечисленных факторов.

Вторая часть доклада посвящена рассмотрению методов расчета конструкции на действие МРЗ с учетом пластической стадии ее работы. Выполнен анализ существующих значений коэффициентов редукции нагрузок K_I в российских нормах сейсмостойкого строительства. Предлагаются новые алгоритмы выбора этого коэффициента, учитывающие более широкое число факторов.

Рассмотрен вопрос об оценке максимальных деформаций в рамных конструкциях на основе данных о максимальных относительных перемещениях сооружения при сейсмовоздействиях. Эти относительные перемещения могут быть найдены на основе решения динамической задачи для упруго-пластической системы с одной степенью свободы. Предлагается алгоритм исследования возможности разрушения сооружения в результате циклического нагружения из-за малоциклового усталости.

Рассматриваются основы метода pushover, широко используемого в зарубежных исследованиях. Метод является обобщением упругопластического расчета системы с одной степенью свободы на систему со многими степенями свободы. Показано, что pushover не решает основной проблемы упругопластического расчета, возникающей при переходе от системы с одной степенью свободы к системам со многими степенями свободы. Проблема заключается в учете взаимодействия компонентов реакции упругопластической системы. Это взаимодействие оказывает большое влияние на характер процесса при сложном (непропорциональном по отдельным компонентам) нагружении. Для ее решения предлагается применять метод макромоделей.

Предлагаемый в докладе комплекс мер, методов и алгоритмов повышает надежность расчетов сейсмостойкости при сейсмовоздействиях различной интенсивности.

*Рыбина И.И.
ПГУПС, Россия
i.i.rybina@rambler.ru*

ON THE TEACHING OF STRUCTURAL MECHANICS

*Rybina I.I.
Petersburg State Transport University, Russia*

Reviews issues of teaching structural mechanics in institutes of higher education and teaching of application of modern software packages designed for complex structure analysis as disciplines of integrated mechanical cycle. Teaching experience from higher school and professional development courses is offered.

Обсуждаются вопросы преподавания строительной механики в вузах и обучения использованию современных программных комплексов, предназначенных для анализа сложных конструкций, как дисциплин единого механического цикла. Предлагается опыт преподавания в вузе и на курсах повышения квалификации.

Многие десятилетия классические методы строительной механики, становление которой как самостоятельной науки относится к началу 19 века, служили основными инструментами анализа работы конструкций. Как дисциплина, предлагаемая высшей школой, строительная механика сформировалась к середине 20 века.

Сегодня решение практических задач строительной механики базируется на численных методах с использованием вычислительной техники и современного программного обеспечения. Для выполнения расчетов в российских проектных организациях используется около 10 универсальных программных комплексов (ПК), предназначенных для анализа широкого класса конструкций (за рубежом это количество исчисляется сотнями). Рынок программного обеспечения постоянно пополняется. Сложность проектируемых объектов вынуждает организации не только оснащать рабочие места специалистов современными расчетными ПК (что представляет собой только финансовый вопрос), но и решать более трудную проблему - повышения квалификации своих сотрудников.

Процесс компьютеризации проектной деятельности ставит перед высшей школой задачу обучения будущих инженеров использованию программных комплексов для анализа строительных конструкций. Педагогической задачей подобного курса представляется не столько приобретение студентами навыков работы с конкретным ПК, сколько обобщение знаний, полученных при изучении дисциплин механического цикла, на новом уровне, т.е. создание расчетных моделей сложных систем в соответствии с технологией МКЭ и ответственная интерпретация результатов.

Преподавание классических дисциплин механического цикла также

следует ориентировать на новую реальность, соблюдая принципы преемственности и гибкости. Это ни в коем случае не означает отказ от изучения классических методов и объектов строительной механики (фермы, рамы, арки...). И, разумеется, не следует подменять выполнение заданий «вручную» расчетами с помощью ПК. Речь идет об усилении роли анализа расчетных моделей, тогда как сейчас центр тяжести работы студента лежит в области вычислений при наличии готовой расчетной схемы.

Программные комплексы отличаются друг от друга по функциональным возможностям и удобству пользовательского интерфейса, по эффективности реализованных расчетных алгоритмов, по простоте освоения, по скорости работы и другим признакам.

Отвлекаясь от рекламных целей, в процессе обучения следует указать и на общие принципы построения ПК. Так для расчета сложных конструкций ПК используют, как правило, различные формы метода конечных элементов, а конструктивные расчеты железобетонных и металлических конструкций реализуются в соответствии с действующими нормативными документами. Процедура работы с ПК состоит в задании исходных данных для формирования расчетной модели (обязательными являются геометрия схемы, характеристики материалов, связи и нагрузки), расчете (решении системы алгебраических уравнений) и анализе результатов (компонентов напряженно-деформированного состояния). Можно отметить общность специальных приемов, используемых различными ПК для построения адекватных моделей конструкций, таких как жесткие вставки, снятие связей, абсолютно твердые тела. Во всех ПК доступными способами генерации схем в графическом режиме являются разнообразные опции редактирования (копирование, перенос, удаление и т.д), экструзия, сборка.

Положения данного доклада используются автором при проведении занятий по дисциплине «Современные методы расчета искусственных сооружений» в ПГУПС. Актуальность затронутой темы подтверждается большим количеством слушателей на курсах повышения квалификации, читаемых инженерам по заявкам проектных организаций.

Рымкевич П.П.¹, Горшков А.С.², Романова А.А.³, Макаров А.Г.⁴

1 - Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского, Россия

*2 - Санкт-Петербургский политехнический университет Петра
Великого, Россия*

*3 - Санкт-Петербургский Государственный Экономический
Университет, Россия*

*4 - Санкт-Петербургский Государственный Университет Технологии и
Дизайна, Россия
alsgor@yandex.ru*

QUANTUM LOGIC OF THE WORLD

Rymkevich P.P.¹, Gorshkov A.S.², Romanova A.A.³, Makarov A.G.⁴

1 - Mozhaisky Military Space Academy, Russia

2 - Peter the Great St.-Petersburg Polytechnic University, Russia

3 - St.-Petersburg State University of Economics, Russia

4 - St.-Petersburg State University of Technology and Design, Russia

Большинство наблюдаемых явлений естественным образом квантованы. Для их описания следует использовать некоммутативную алгебру. Показан пример использования некоммутативного кольца.

Most of the observed phenomena are naturally quantized. To describe them one should use non-commutative algebra. An example of the use of non-commutative ring is demonstrated.

1. Введение. Для того, чтобы разобраться в окружающем нас мире, необходимо как-то его описать. Для необходимо наличие хотя бы двух событий или явлений. Далее требуется ввести некоторый базис, т.е. систему отсчета. Для описания различных событий нужно их упорядочить, т.е. ввести время. Далее следует построить логику событий: прошлое – будущее, и она, естественно, будет квантовая. Покажем это.

2. Некоммутативное кольцо. Пусть имеется последовательность событий $a, b, \dots$, образующих процесс. Процесс – это упорядоченная последовательность событий. Описывать события будем функциями $a(t, \tau)$, $b(t, \tau)$, ..., аналитическими по переменной t – время начала события и кусочно-непрерывной по длительности события τ . Например, $a(t, \tau)$ – плотность вероятности осуществления события a за время τ . Если построить кольцо $R_{\oplus}$ с естественным сложением и умножением [1, 2] в смысле

$$c(t, \tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} a(t, \tau_1) b(t + \tau_1, \tau - \tau_1) d\tau_1 = a \oplus b, \quad (1)$$

где $a, b, c \in R_{\oplus}$, то данное равенство означает, что событие c есть последовательное выполнение событий a и b . По такому принципу работает

большинство процессов в Природе.

В простейшем случае, если $a, b, \dots$ не зависят явно от времени начала события (система, например, не «старится»), то данное выражение представляет собой обычную свертку функций (умножение в смысле Микусинского), т.е. $c(\tau) = a(\tau) * b(\tau)$. Таким образом, $R_* \subset R_{\circ}$. Отметим, что в отличие от кольца Микусинского, кольцо $R_{\circ}$ может иметь делители нуля, т.е. не может быть расширено элементарным способом до поля отношений. Вместо кольца $R_{\circ}$ целесообразно использовать кольцо $R_{\circ}$. Изоморфизм между кольцом $R_{\circ}$ и $R_{\circ}$ устанавливается с помощью преобразования Фурье

$$A(t, E) = \int_{-\infty}^{+\infty} a(t, \tau) e^{-\frac{i}{\hbar} E \tau} d\tau, \quad (2)$$

где $A(t, E)$ – аналитическая функция по переменным t и E ; $\hbar$ – некоторая размерная постоянная.

Определим произведение функций $C = A \circ B$ следующим образом:

$$C(t, E) = A(t, E) \circ B(t, E) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-i\hbar)^n}{n!} \frac{\partial^n A}{\partial E^n} \frac{\partial^n B}{\partial t^n}, \quad (3)$$

где $A, B, C \in R_{\circ}$.

Если в вышеуказанном соотношении осуществить формальный переход $\hbar \rightarrow 0$, то данное произведение превращается в обычное коммутативное умножение, т.е.

$$C(t, E) = A(t, E) B(t, E). \quad (4)$$

В пространстве оригиналов этот переход означает, что

$$c(t, E) = \int_{-\infty}^{+\infty} a(t, \tau) b(t, \tau - \tau_1) d\tau_1 = a * b. \quad (5)$$

Последнее означает, что в данной задаче можно пренебречь зависимостью протекания события от текущего времени. Все вышесказанное указывает на то, что большинство встречающихся в Природе явлений естественным образом квантованы [1], так как для их описания необходимо использовать некоммутативное кольцо $R_{\circ}$.

Литература

1. Рымкевич П.П., Горшков А.С. Теория переноса. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2015. 122с.
2. Рымкевич П.П., Горшков А.С. Модели современного мира в механике, физике, технике и экономике: учеб. пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. 28с.

Рымкевич П.П.¹, Овчинников Д.Ю.¹, Горшков А.С.²

1 - Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского

*2 - Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
alsgor@yandex.ru*

UNCERTAINTY IN CLASSICAL MECHANICS

Rymkevich P.P.¹, Ovchinnikov Yu.D.¹, Gorshkov A.S.²

1 - Mozhaisky Military Space Academy, Russia

2 - Peter the Great St.-Petersburg Polytechnic University, Russia

В Природе не встречаются абсолютно гладкие кривые и гладкие поверхности. Однако в основе современной механики законы движения представляют собой гладкие кривые. Операция сглаживания представлена на основе ядра Гаусса.

Absolutely smooth functions not found in nature. However, the laws of motion at the modern mechanics are smooth curves. Smoothing operation is represented by a Gaussian function.

1. Введение. Одним из итогов физики XX века следует признать тот факт, что в Природе не встречаются абсолютно гладкие кривые и гладкие поверхности. Одним из подтверждением данного тезиса является появление так называемой фрактальной геометрии. Однако, в основе механики до сих пор лежит гипотеза о том, что закон движения, т.е. зависимость координат от времени представляет собой гладкую кривую [1]. В противном случае затруднительно будет обосновать понятие классической скорости, а тем более ускорения. Вышесказанное можно отнести и к большинству законов физики (например, дробовой эффект в электродинамике).

Таким образом, законы механики и физики справедливы и применимы только для сглаженных величин. Рассмотрим основные следствия данного утверждения.

2. Операция сглаживания с помощью ядра Гаусса. Пусть $X(t)$ – изучаемый закон движения, представляющий на всей числовой прямой собой кусочно-непрерывную функцию (в более общем случае можно воспользоваться теорией обобщенных функций). Определим сглаженный закон движения следующим образом:

$$\langle X(t) \rangle_\tau = \tilde{X}(t, \tau) \stackrel{Def}{=} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\tau} \int_{-\infty}^{+\infty} X(t) \exp \left[-\frac{(t-\Theta)^2}{2\tau^2} \right] d\Theta. \quad (1)$$

Операция сглаживания с помощью ядра Гаусса имеет глубинный физический смысл и обладает весьма удобными математическими свойствами.

Например,

$$X_1(t) \cdot X_2(t) = \tilde{X}_1(t, \tau) \circ \tilde{X}_2(t, \tau) \stackrel{Def}{=} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\tau^{2n}}{n!} \tilde{X}_1^{(n)}(t) \cdot \tilde{X}_2^{(n)}(t). \quad (2)$$

Здесь τ – время усреднения, $\tilde{X}(t, \tau)$ принадлежит классу гладких и бесконечное число раз дифференцируемых функций, т.е. как раз таких, которые удобны и в механике и в физике.

Определение коммутитвного умножения « $\circ$ » в смысле (2) лишь одно из возможных его представлений. Заметим, что если время сглаживания τ устремить к нулю, то умножение в смысле (2) перейдет в обычное умножение. Построенное таким образом кольцо функций R является кольцом с единицей $e(t) \equiv 1$. В связи с чем большинство законов физики и механики следует записывать на языке кольца R . [2, 3].

Литература

1. Пальмов В.А. Нелинейная механика деформируемых тел. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. 791с.
2. Рымкевич П.П, Горшков А.С. Теория переноса. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2015. 122с.
3. Рымкевич П.П., Горшков А.С. Модели современного мира в механике, физике, технике и экономике: учеб. пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. 28с.

**МЕХАНИКА НАДЕЖНОСТИ. ТЕРМИНОЛОГИЧЕСКИЙ АСПЕКТ.
МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЙ БАЗИС. ХАРАКТЕРНЫЕ ЗАДАЧИ**

Романов Ю.И., Рюмин М.Г.

*ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет путей сообщения»
МГУПС (МИИТ), Москва, Россия
averti@bk.ru*

**MECHANICS RELIABILITY. TERMINOLOGICAL ASPEKTS.
METODOLOGICAL BASIS. SPECIFIC CHALLENGES**

Romanov Yu.I., Riumin M.G.

Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Moscow, Russia

Рассматриваются вопросы, связанные с обоснованием термина «механика надежности», методологический базис данного научного направления и решение характерных задач.

The issues related to the justification of the term "mechanical reliability", the methodological basis of the scientific field and the decision of typical tasks.

1. Терминологический аспект

Основные задачи механики надежности связаны с определением функции надежности объектов различного назначения и прогнозирования их долговечности, с учетом их прочности, жесткости, устойчивости, трещиностойкости, износостойкости на протяжении всего жизненного цикла, т.е., исходя из стохастических критериев механического толка. Механика надежности находится на стыке строительной механики и теории вероятности, с использованием характеристического функционала, который доставляет полное вероятностное описание случайных процессов и полей [1]. Со времени первых работ по этому направлению прошло более полувека. Сам термин предложен более 25 лет назад одним из авторов настоящего доклада.

2. Методологический базис

Основные положения по данному вопросу излагаются в докладе с позиций системного анализа. При этом приняты во внимание методы по определению функции надежности ИССО, изложенные в работах [2,3].

3. Характерные задачи.

В докладе обосновываются расчетные стохастические системы, предназначенные для решения характерных задач, а именно:

- оценка меры надежности зданий и сооружений при сейсмических воздействиях;
- определение плотности вероятности случайной величины - долговечности зданий и сооружений, подверженных случайным нагрузкам с учетом накапливаемой во времени их повреждаемости.

Литература

1. Романов Ю.И. Характеристический функционал и его применение для исследования стохастических задач в строительной механике // Строительная механика и расчет сооружений. 1989 г., № 5. с. 3-6.
2. Болотин В.В. Ресурс машин и конструкций. М.: Машиностроение . 1990 г. 488 с.
3. Светлицкий В.А. Статистическая механика и теория надежности. М.: Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002 г. 504 с.

ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ НАПРЯЖЕННЫМ СОСТОЯНИЕМ СТЕРЖНЕВЫХ СИСТЕМ С ПОМОЩЬЮ КРАЕВЫХ НАГРУЗОК

Савченко А.В., Лалин В.В., Лалина И.И., Дьяков С.Ф.

*Санкт-Петербургский Политехнический Университет Петра Великого,
Россия*

Ya.int@yandex.ru

В отличие от большинства работ, в которых условие оптимальности принимается в виде квадратичного отклонения от оптимального решения, в настоящей работе предлагается условие оптимальности записывать в виде энергетической нормы отклонения от оптимального решения. В качестве управляющего воздействия рассматриваются краевые нагрузки. Доказывается существование и единственность оптимального решения.

Благодаря использованию энергетической нормы, нахождение оптимального решения сводится к решению статической задачи для исходной системы с другими граничными условиями.

Приводятся примеры решенных задач.

*Салмин И.А., Шестаков А.П., Боталов С.Н.
ООО «ИнжПроектСтрой», Пермь, Россия
info@geo-soft.ru*

SOIL WALL INTERACTION MODEL ANALYSIS

*Salmin I.A., Shestakov A.P., Botalov S.N.
«InzProektStroy» Llc, Perm, Russia*

Существует ряд программных комплексов для расчета ограждения котлована, которые построены на объединении аналитических решений и численных методов. Предельное состояние грунта оценивается аналитическими зависимостями [1] рис.1, упругая работа грунта аппроксимируют линейными функциями (через коэффициент постели или коэффициент пропорциональности), балка моделируется методом конечных элементов.

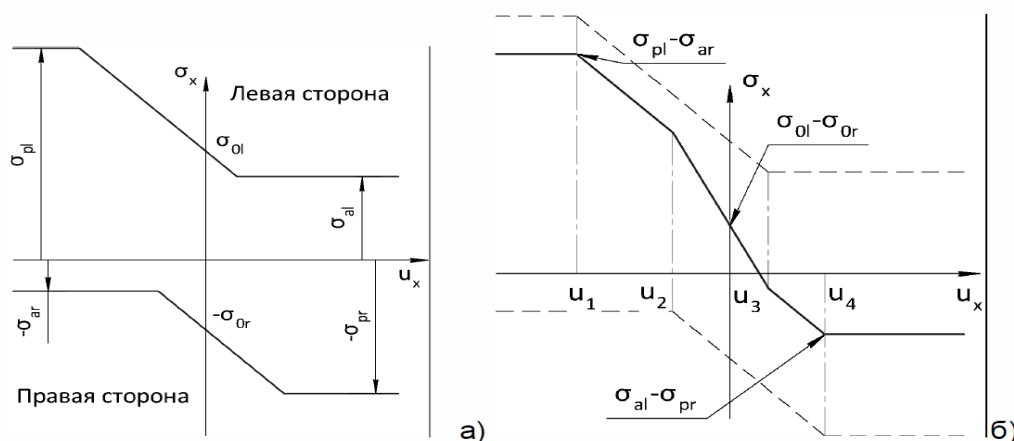


Рис. 1. График зависимости давления грунта на подпорную стену в зависимости от перемещения стены

а) эпюры эффективных давлений на ограждение слева и справа

б) эпюра результирующего давления на ограждение

В работе выполнен анализ поведения такой модели в сравнении с полным расчетом системы «грунт-ограждение» методом конечных элементов.

В результате получены графики зависимости суммарного усилия, которое оказывает грунт на ограждение в зависимости от горизонтально смещения ограждения рис. 2.

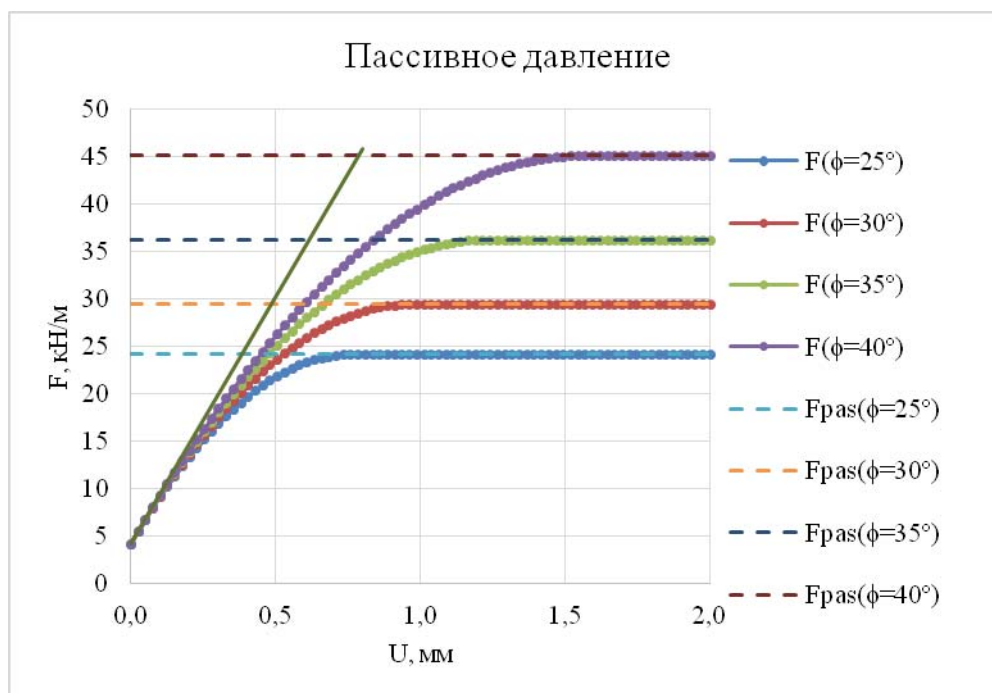


Рис. 2. График зависимости суммарного усилия грунта на подпорную стену в зависимости от перемещения стены при различных углах внутреннего трения (пунктиром показаны значения предельных давлений)

Эти графики позволяют дать интегральную оценку поведения модели при вариации различных параметров: угол внутреннего трения, коэффициент постели, коэффициент пропорциональности, модуль деформации.

Литература

1. СП 22.13330.2011 «Основания зданий и сооружений» актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83*.

УДК 624.131

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ СООРУЖЕНИЙ
НА ПРОМЕРЗАЮЩИХ И ОТТАИВАЮЩИХ ГРУНТАХ**

Сахаров И.И., Улицкий В.М., Парамонов В.Н.

ООО «Геореконструкция», Россия

i.sakharov2014@yandex.ru

**NUMERICAL SIMULATION OF DEFORMATIONS OF STRUCTURES AT
FREEZING AND THAWING SOILS**

Sakharov I.I., Ulickiy V.M., Paramonov V.N.

Georconstruction Llc, Russia

Рассматривается трехмерная математическая модель грунта, испытывающего промерзание и оттаивание, реализованная методом конечных элементов. Для расчетов создана программа «Termoground», реализованная на базе сертифицированного программного комплекса FEM Models. Модель включает два блока решения. Первый блок представляет собой решение теплофизической задачи, в которой учитывается теплота фазовых превращений в спектре отрицательных температур, а также изменение влажности грунта за счет миграции влаги к фронту промерзания. Второй блок предназначен для расчета напряженно-деформированного состояния грунта при промерзании и оттаивании, а также конструкций сооружений, контактирующих с грунтом. Приводятся примеры расчетов реальных сооружений на промерзающих и оттаивающих грунтах.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ БИОМЕХАНИКИ ХИРУРГИЧЕСКОГО
ЛЕЧЕНИЕ БОЛЕЗНИ ЛЕГГ-КАЛЬВЕ-ПЕРТЕСА**

*Саченков О.А.¹, Андреев П.С.², Хасанов Р.Ф.², Яшина И.В.², Коноплев Ю.Г.²,
Гарифуллин И.Р.¹, Султанов Л.У.¹*

1 - Казанский федеральный университет, Россия

*2 - ГАУЗ "Республиканская клиническая больница" Минздрава РТ, Россия
4works@bk.ru*

**MODELING BIOMECHANICS SURGICAL TREATMENT LEGG-CALVE-
PERTHES**

*Sachenkov O.A.¹, Andreyev P.S.², Khasanov R.F.², Yashina I.V.², Konoplev Yu.G.¹,
Garifullin I.R.¹, Sultanov LYu.¹,*

1- Kazan Federal University, Russia

2- GAUZ "Republican Clinical Hospital" the Ministry of Health of RT, Russia

В работе рассмотрена биомеханика тазобедренного сустава при проведении ротационной остеотомии. На основе трехкомпонентной модели мышц проведена оценка усилий, возникающих в них при различной тактике ротации.

The paper considers the biomechanics of the hip during a rotational ostetomii. On the basis of a three-component model of muscles evaluated efforts arising in them about the different tactics rotation.

Целью нашего исследования является определение направления и величины максимально возможного угла поворота при наличии очага деструкции эпифиза головки бедра с помощью компьютерного моделирования тазобедренного сустава на основе концепции трехплоскостной коррекции пространственной патологической ориентации проксимального отдела бедренной кости с учетом степени, локализации дегенеративно-дистрофического процесса и тяжести поражения у детей и подростков на примере болезни Легга-Кальве-Пертеса.

В рамках исследования была построена трехмерная параметрическая модель тазобедренного сустава. Расчет проводился на основе метода конечных элементов, при котором весь объем геометрии дискретизируется на упругие тетраэдры. Механические характеристики костной ткани брались согласно известным исследованиям равными, так Модуль Юнга (E) = 6 ГПа, коэффициент Пуассона (ν) = 0.3 [11]

При моделировании учитывалось влияние следующих мышц: mm. piriformis, rectus femoris, iliopsoas, obturator internus, gluteus minimus, medius et maximus. Для моделирования механического поведения мышц была использована модель Хилла, представляющая собой последовательно соединенные упругого и вязкого элементов, соединенные параллельно с ещё одним упругим элементом.

При моделировании остеотомии считалось, что проксимальный отдел соединен с бедренной костью неподвижной вращательной парой.

Моделирование проводилось для различных анатомических параметров: шейечно-диафизарный угол (ШДУ), угол антеторсии (АТ). Поворот производился в трех плоскостях относительно оси вращения, при этом определялись удлинения мышечных групп при изменении величины ШДУ, АТ и ротационного поворота проксимального отдела бедра.

Для контроля истинного угла поворота при ротационной флексии остеотомии был спроектирован и изготовлен датчик контроля угла поворота, который монтируется на аппарат внешней фиксации, что позволяет не только контролировать угол, на который происходит ротация, но и контролировать дозированную коррекцию угла поворота во время лечения в послеоперационном периоде.

Расчеты показали, что большие усилия от растяжения возникают в *m. obturator internus*, в меньшей степени *m. piriformis* (см. рис. 3). Так при мгновенном смещении на 10 мм. максимальные усилия в *m. obturator internus* достигли 467 Н, в *m. piriformis* – 233 Н; при мгновенном смещении на 15 мм. – 778 Н, в *m. piriformis* – 389 Н. Для восстановления нормального биомеханического состояния сустава, снижения напряжений в мышцах и вертлужной впадины необходимо изменения тактики остеотомии – частичный разворот проксимального участка бедренной кости, с постепенной коррекцией после операции.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 14-01-31291, 15-31-20602.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КОСТНОЙ
ТКАНИ ПОСЛЕ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕФИЦИТА CU**

*Коноплев Ю.Г.¹, Андреев П.С.¹, Саченков О.А.¹, Хасанов Р.Ф.², Яшина И.В.¹,
Харисламова Л.У.², Шигапова Ф.А.¹*

1 - Казанский федеральный университет, Россия

2 - Институт механики и машиностроения

Казанского научного центра РАН, Россия

4works@bk.ru

**DETERMINATION OF MECHANICAL PARAMETERS OF BONE TISSUE
AFTER THE RESTORATION DEFICIT CU**

*Konoplev Yu.G.¹, Andreyev P.S.², Sachenkov O.A.¹, Khasanov R.F.²,
Yashina I.V.², Kharislamova L.Yu.², , Shigapova F.A.²*

1- Kazan Federal University, Russia

*2- Institute of Mechanics and Machinery of Kazan Scientific Center of the Russian
Academy of Sciences, Russia*

В работе рассмотрено влияние механических характеристик костной ткани, подвергаемых биологическому воздействию, в частности дефициту и восстановлению Cu в организме.

The paper considers the influence of the mechanical characteristics of the bone subjected to biological effects, in particular Cu deficiency and restore the body.

В работе рассматривается оценка механических параметров костной ткани, таких как жесткость и прочность при дефиците Cu в организме и после восстановления путем внутримышечного введения наночастиц Cu. Были проведены исследования на костях крыс Wistar, которых подвергались полной диете с дефицитом Cu и диете с дефицитом меди с последующей реабилитационной диетой. Испытуемые животные были разделены на три группы: а) дефицит меди, б) дефицит меди в течение 5 недель и реабилитация, в) дефицит меди 8 недель и реабилитация г) контрольная группа.

В рамках экспериментальных исследований брались бедренные кости крыс, проводилось их взвешивание, оценка плотности, замер геометрических параметров, после чего проводились испытания на изгиб. Для проведения испытаний на изгиб была спроектирована и собрана экспериментальная оснастка, её схема приведена на рис. 1: извлеченная кость (позиция 1) устанавливалась проксимальными отделами в стаканы (позиция 2) и крепилась в них с помощью сплава Вуда, после чего производилась центровка крепежного кольца (позиция 3), которое крепилось к верхней траверсе пресса (позиция 5), чашки устанавливались на жесткую опору (позиция 4), которая крепилась к нижней неподвижной траверсе (позиция 5). При проведении испытаний верхней траверсе придавалось перемещение, и

через крепежное кольцо (позиция 3) это перемещение передавалось кости (позиция 1), при этом производились замеры прикладываемого усилия, перемещения и времени. После разрушения образцов производился замер стенок костей.

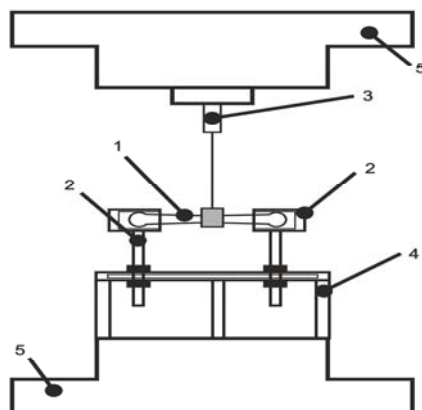


Рис. 1. Схема испытательного стенда.

В рамках исследования была произведена оценка влияния дефицита Си и восстановительной диеты с параллельным введением наночастиц Си организма на механические характеристики костной ткани. Было выявлено, что дефицит меди приводит к резкому снижению жесткости костной ткани, снижению прочности. При дефиците меди в организме в течение 5 недель и последующей реабилитации жесткость костной ткани восстанавливается, предельные касательные напряжения возрастают на 10% от нормы, допустимые нормальные напряжения - на 20%, то есть происходит упрочнение костной ткани. При дефиците меди в организме в течение 8 недель и последующей реабилитации жесткость костной ткани сильно повышается (до 40%), допустимые касательные напряжения также сильно возрастают (до 30%), а допустимые нормальные напряжения падают (до 40%), что может быть объяснимо необратимой структурной перестройкой костной ткани.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 14-01-31291, 15-41-02555.

**ОЦЕНКА НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ВЕРТЛУЖНОГО
КОМПОНЕНТА ПРИ НЕПОЛНОМ ПОКРЫТИИ ЭНДОПРОТЕЗА
ТАЗОБЕДРЕННОГО СУСТАВА**

Коноплев Ю.Г.¹, Мазуренко А.В.², Саченков О.А.¹, Тихилов Р.М.³

1 - Казанский федеральный университет, Россия

*2 - ФГБУ "Федеральный центр травматологии, ортопедии и
эндопротезирования" Минздрава России, Россия*

*3 - ФГБУ "Российский научно-исследовательский институт
травматологии и ортопедии им. Р.Р. Вредена" Минздрава России,
Россия
4works@bk.ru*

**EVALUATION OF CARRYING CAPACITY IN ACETABULAR
COMPONENT INCOMPLETE COVERAGE HIP ENDOPROSTHESIS**

Konoplev Yu.G.¹, Mazurenko A.V.², Sachenkov O.A.¹, Tikhilov R.M.³

1- Kazan Federal University, Russia

*2- FGBU "Federal center of traumatology, orthopedics and endoprosthesis"
Russian Ministry of Health, Russia*

*3- FGBU "Russian Research Institute of Traumatology and Orthopedics. R.R.
Vredena" Russian Ministry of Health, Russia*

В работе приведены результаты численного моделирования несущей способности чашки эндопротеза при различной степени недопокрытия. Получена зависимость допустимой массы пациента от степени недопокрытия.

The results of numerical modeling of the bearing capacity of the cup endoprosthesis at different degrees lack of coverage. The dependence of the permissible weight of the patient on the degree lack of coverage.

Существуют различные варианты установки вертлужного импланта, в том числе и с частичным недопокрытием вертлужного компонента. Существуют различные варианты установки вертлужного импланта. На сегодняшний день не существует оптимальной тактики при эндопротезировании тазобедренного сустава у пациентов с диспластическим коксартрозом и указывает на настоятельную необходимость поиска современных решений. Современные методы математического моделирования позволяют производить расчеты биомеханического поведения сустава как трехмерного тела, в том числе определять области применения различных тактик эндопротезирования на основе проведенных расчетов. Площадь недопокрытия оценивалась согласно методике, описанной в патенте на изобретение РФ №2412646 «Способ определения степени покрытия вертлужного компонента бесцементной фиксации в процентном соотношении после его имплантации в обработанную вертлужную впадину при первичных и ревизионных операциях эндопротезирования тазобедренного сустава».

Для оценки напряженно-деформируемого состояния костной ткани

важно учитывать контактное взаимодействие между имплантатом и костью, существуют различные подходы для реализации контактного взаимодействия, за основу был взят метод из работ, в котором для реализации контактного взаимодействия используются следующие соотношения: кинематические уравнения, условия контактного взаимодействия, уравнение статического равновесия. Для определения линейного контактного взаимодействия используется расширенный метод Лагранжа. Удовлетворение условия линейного контакта (нулевое взаимопроникновение) достигается корректировкой контактных сил на каждой итерации алгоритма линейного контакта.

Силы, действующие на вертлужный компонент, передаются через бедренный компонент имплантата, а значит, при движении изменяются, как количественно, так и по направлению действия (при ходьбе расчетное значение реакции, возникающей в суставе, превышает вес человека в 2-3 раза), в работе оценивалась статическая составляющая усилия. Для определения критического значения недопокрытия также необходимо определить закон распределения контактных напряжений между вертлужным компонентом и костной тканью, учитывая при этом натяг при посадке имплантата в костную ткань.

Для проведения численных исследований была построена трехмерная модель тазобедренного сустава, а также ацетабулярного компонента. Ацетабулярный компонент моделировался как двухкомпонентный объект, внешняя чашка титановая ($E = 112$ ГПа, $\nu = 0.3$), внутренняя чашка керамическая ($E = 102$ ГПа, $\nu = 0.26$, где E – модуль Юнга, ν – коэффициент Пуассона). Характеристики кости $E = 6$ ГПа, $\nu = 0.3$, коэффициент трения между костной тканью и имплантатом принимался равным 0.95, между титановым и керамическим компонентами задавалось условие прилипания. Диаметр титановой чашки брался на 4 мм больше диаметра вертлужной впадины, проводились расчеты для чашек диаметром 52 мм., 54 мм., 56 мм. Дисплазия вертлужной впадины моделировалась сферическом вырезом.

Была определена нижняя граница для критических величин массы тела в зависимости от процента недопокрытия: $y = 302,09e^{-0,0508x}$, достоверность аппроксимации составила $R^2 = 0,9839$. Допустимые соотношения веса пациента и степени дисплазии для операции эндопротезирования должны лежать ниже нижней границы экспоненциальной кривой.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 14-01-31291, 15-41-02555.

*Галимов А.Ф., Карамов А.В., Секаева Л.Р.
Казанский Федеральный Университет, Россия
Galimof.aidar@yandex.ru*

CALCULATION OF SOIL MASS WITH REGARD DILATANCY

*Galimov A.F., Karamov A.V., Sekaeva L.R.
Kazan (Volga Region) Federal University, Russia*

В настоящей работе используется модель, аналогичная модели идеально пластического тела. Построение вычислительного алгоритма основано на дискретизации расчетной области в рамках конечно-элементной методики. В процессе моделирования грунтов использовались специальные характеристики прочности, которые определяют их несущую способность. К ним кроме сцепления и угла внутреннего трения относят и коэффициент дилатансии, который характеризует разрыхление или уплотнение грунта при девиаторном нагружении. Решен ряд модельных задач упругопластического деформирования грунтовой насыпи, исследовалась сходимость решения. Можно отметить, что учет дилатансии замедляет переход насыпи в предельное состояние, причем при этом образуется вторая полоса скольжения. Реализованная методика позволяет проводить расчет упругопластического деформирования грунтовых массивов, подчиняющихся закону сухого трения с учетом и без учета дилатансии.

In the present study we use a model similar to the model perfectly ductile-ray body. Building a computational algorithm based on the estimated sampling area within the finite element method. The modeling used primers specific strength characteristics which determine their bearing capacity. These apart the clutch and the angle of internal friction and the coefficient referred dilatancy that characterizes or loosening soil compaction during deviatoric loading. We resolved a number of model problems of elastic-plastic deformation dirt embankment The convergence solutions. It may be noted that taking into account dilatancy transition slows the mound in the limit state, and thereby forming a second strip of sliding. The implemented methodology allows the calculation of elastoplastic deformation of soil masses obeying the law of dry friction with and without dilatation.

Известно, что в зависимости от режимов и условий нагружения и свойств геоматериала развитие деформации может протекать в режимах дилатансии и уплотнения. На определенном интервале давлений больших различий в особенностях поведения геологических сред не проявляется. В условиях сдвига прочность грунта сильно зависит от гидростатического давления, а сдвиговая деформация обычно сопровождается изменением объема. С ростом давления происходит увеличение эффективной прочности. В ходе сдвиговой деформации имеет место дилатансия, рассеянное накопление микротрещин с увеличением эффективного объема. Разрушение в основном протекает по межзеренным границам, а в полосах локализации заметно разрыхление среды. Различие в поведении плотных и пористых пород проявляется при давлениях, превышающих некоторую пороговую величину. Тогда с ростом давления эффективная прочность пористых пород начинает снижаться. Чем выше пористость, тем ниже этот порог. При таких

давлениях в пористых средах начинается интенсивное разрушение зерен, скелета породы, в результате чего поровое пространство сокращается, имеет место уплотнение, или контракция, например. В этом случае могут формироваться не только полосы локализованного сдвига с уплотнением, но и зоны локализованного уплотнения, в которых сдвиговая составляющая мала.

В зоне локализации иногда можно выделить несколько слоев, различающихся по степени поврежденности и пористости. При одних условиях пористость и поврежденность среды растут от краев к центру полосы. В других условиях в центральном слое наблюдается уплотнение, при котором пористость оказывается ниже, а в слоях по краям полосы локализации пористость оказывается выше, чем в окружающем материале. Различие в поведении плотных и высокопористых сред при большом давлении проявляется также в ориентации полос локализации деформации. В плотных, а также в высокопористых материалах при давлении ниже порогового полосы локализации образуют угол менее 45° к оси наибольшего сжатия. В высокопористых средах при больших давлениях этот угол превышает 45° .

В процессе моделирования грунтов вводят специальные характеристики прочности, которые определяют их несущую способность. К ним кроме сцепления и угла внутреннего трения относят и коэффициент дилатансии, который характеризует разрыхление или уплотнение грунта при девиаторном нагружении. Был проведен модельный расчет грунтовой насыпи. Расчетная область нагружалась собственным весом (число шагов по нагрузке было выбрано равным 100), информация о координатах была подготовлена в расчете на откос высотой в 30 м, предельная высота определялась умножением начальной высоты на достигнутое число шагов по нагрузке (в процентном соотношении). Для насыпи из гравелистого песка (с учетом и без учета дилатансии) исследовалась сходимость конечно-элементного решения. При расчетах с учетом дилатансии принималось, что угол дилатансии на 30° меньше угла внутреннего трения.

Можно отметить, что учет дилатансии замедляет переход насыпи в предельное состояние, причем при этом образуется вторая полоса скольжения, а реализованная методика позволяет проводить расчет упругопластического деформирования грунтовых массивов, подчиняющихся закону сухого трения с учетом и без учета дилатансии.

Издание тезисов доклада осуществлено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Республики Татарстан в рамках научных проектов № 15-41-02555, № 15-31-20602.

ПОВЕДЕНИЕ ПРЕДЕЛА ТЕКУЧЕСТИ МЕТАЛЛОВ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ НА ОСНОВЕ РЕЛАКСАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ПЛАСТИЧНОСТИ

Селютин Н.С.

Санкт-Петербургский государственный университет, Россия

nina.selutina@gmail.com

1. Введение. Процесс релаксации напряжений при пластическом деформировании материала в классических подходах (критерий Мизеса, критерий Треска) происходит мгновенно. Эксперименты с нитевидными кристаллами при квазистатических нагрузках [1] показывают аномально высокое напряжение при малых скоростях деформации. Согласно подходу [2-8], пластическое деформирование материала является динамическим процессом, и упругие напряжения релаксируют с течением некоторого времени. Как показано в [7-8], характерное время релаксации, как постоянная материала, не зависит от модели пластичности и связано со свойствами процесса деформирования. В этой работе рассматривается подход [2-8] для случая пластического деформирования Ni-Cr стали и никеля (микрокристаллического и нанокристаллического) при квазистатических и динамических условиях нагрузки.

2. Интегральный критерий текучести. Интегральный критерий текучести [2-8] определяется в общем виде:

$$Int_p \leq 1, \quad (1)$$

где интеграл $Int_p = \frac{1}{\tau} \cdot \int_{t-\tau}^t \left(\frac{\Sigma(s)}{\sigma_y^0} \right)^\alpha ds$.

Здесь $\Sigma(t)$ – функция напряжений от времени, τ – характерное время релаксации напряжений, σ_y^0 – статический предел текучести, α – коэффициент чувствительности к уровню напряжений. Здесь $\Sigma(t) = 2G\dot{\epsilon}t \cdot H(t)$ – функция, совпадающая с напряжением до момента наступления макроскопического пластического течения t_* , соответствующий равенству в (1) (таким образом, предполагается линейный рост деформации при упругом деформировании). Введем безразмерную функцию релаксации $0 < \gamma(t) \leq 1$ из условия:

$$\gamma(t) = \begin{cases} 1, & \text{при } Int_p \leq 1 \\ \frac{1}{(Int_p)^{\frac{1}{\alpha}}}, & \text{при } Int_p > 1 \end{cases} \quad (2)$$

Будем считать, что в последующие моменты времени $t \geq t_*$, отвечающие пластическому деформированию материала, выполняется условие

$$\frac{1}{\tau} \cdot \int_{t-\tau}^t \left(\frac{\gamma(s)\Sigma(s)}{\sigma_y^0} \right)^\alpha ds = 1. \quad (3)$$

Реальные напряжения в деформируемом образце среде при $t \geq t_*$ будем определять из соотношения:

$$\sigma(t) = 2g(t)\epsilon(t), \quad (4)$$

где $g(t) = G \cdot \gamma^{1-\beta}(t)$, β – скалярный параметр ($0 \leq \beta \leq 1$), характеризующий степень деформационного упрочнения.

3. Пластическая деформация металлов. На рис.1 показано моделирование деформации для Ni-Cr стали [9] ($\sigma_y^0 = 610 \text{ МПа}$, $\tau = 0.76 \text{ }\mu\text{s}$, $\alpha = 20$) по релаксационной модели (1)-(4). На рис.2 сплошными линиями без символов показаны построенные по модели (1)–(4) для разных скоростей деформаций диаграммы по экспериментальным данным [10] для микrokристаллического никеля ($\sigma_y^0 = 438 \text{ МПа}$, $G = 76 \text{ ГПа}$, $\tau = 0.575 \text{ }\mu\text{s}$ размер зерна $48.44 \text{ }\mu\text{m}$) и $3.3 \text{ }\mu\text{s}$ нанокристаллического никеля ($\sigma_y^0 = 2072 \text{ МПа}$, $G = 25 \text{ ГПа}$, размер зерна 17 nm) соответственно. Хорошее соответствие с экспериментальными данными наблюдается на классических кривых пластического деформирования стали (рис.1) и микrokристаллического никеля и явлением зубом текучести нанокристаллического никеля на скоростях деформации порядка 10^3 s^{-1} .

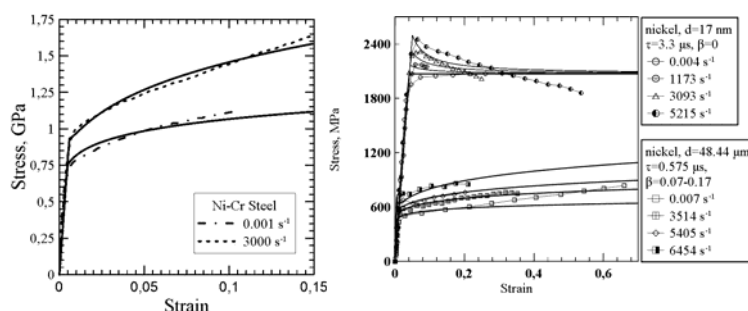


Рис.1. Диаграмма деформации Ni-Cr стали по интегральному критерию пластичности (1)-(4) и экспериментальным точкам [10].

Рис.2. Явление зуба текучести для нанокристаллического никеля и микrokристаллического никеля на основе модели (1)-(4) и экспериментальных данных [11].

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 14-01-00814 и грантов СПбГУ №6.38.243.2014 и 6.39.319.2014

Литература

1. Хоникомб Р., Пластическая деформация металлов. 1972, с.408
2. Груздков А.А., Петров Ю.В. Докл. Акад. наук., 1999 Т.364, No.6, с.766-768.
3. Gruzdkov, Petrov, Smirnov. Physics of Solid State. Invariant Form of Criterion for Yield of Metals. V44, N11, 2002, 2080–2082
4. Petrov, Sitnikova. Tech Phys, Spall Strength & Melting Temperatures Anomaly 2005, 50 (8), 1034–1037
5. Petrov, Gruzdkov, Sitnikova. Doklady Physics, Anomalous Behavior of Yield Stress upon an Increase in Temperature, 2007.
6. A.A. Gruzdkov, E.V. Sitnikova, N.F. Morozov, Y.V. Petrov // Math. Mech. Solid. 2009. V. 14. № 1-2. P.72-87.
7. Бородин, И.Н., Майер, А.Е., Петров, Ю.В., Груздков А.А., 2014. Физика твердого тела. 56 (12) 2384-2393.
8. Петров, Ю.В., Бородин И.Н., 2015. Физика твердого тела. 57 (2) 336–341.
9. P.R. Guduru, P.R. Singh, G. Ravichandran, A. J. Rosakis. Dynamic crack initiation in ductile steels, J Mech Phys Solids. 1998, 46 (10), 1997-2016
10. Rajaraman, S., Jonnalagadda, K.N., Ghosh, P., 2012. //V. Chalivendra et al. (eds.), Dynamic Behavior of Materials, Volume 1: Proceedings of the 2012 Annual Conference on Experimental and Applied Mechanics.

ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА ПРОЧНОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ ПОДКРЕПЛЕННЫХ ОРТОТРОПНЫХ ОБОЛОЧЕК

Карпов В.В., Семенов А.А.

*Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный
университет, Россия
sw.semenov@gmail.com*

NUMERICAL METHODS FOR CALCULATING THE STRENGTH AND STABILITY OF STIFFENED ORTHOTROPIC SHELLS

Karpov V.V., Semenov A.A.

St.-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

В строительстве большепролетных сооружений композиционные материалы еще не получили должного применения, хотя и являются перспективными. Одна из причин этого – недостаточно полное исследование прочности и устойчивости строительных конструкций из таких материалов. В данной работе изложен подход к проведению таких исследований, основанный на методе Ритца и методе продолжения решения по наилучшему параметру.

1. Введение. Чтобы использовать численные методы для расчета строительных конструкций необходимо:

- разработать математическую модель деформирования данной конструкции;
- разработать алгоритм исследования этой модели на основе комбинации нескольких численных методов;
- составить программный продукт для решения данного вида задач на ЭВМ.

2. Математическая модель. В данной работе использована математическая модель деформирования оболочечных конструкций, которая комплексно учитывает геометрическую нелинейность, поперечные сдвиги, ортотропию материала, дискретное введение ребер жесткости с учетом их сдвиговой и крутильной жесткости [1]. Для часто подкрепленных ребрами жесткости оболочечных конструкций используется специально разработанный метод конструктивной анизотропии, но с учетом сдвиговой и крутильной жесткости ребер. Такая математическая модель деформирования оболочек является наиболее точной.

Математическая модель может быть представлена в виде системы дифференциальных уравнений 10 порядка в частных производных. Решение таких уравнений вызывает определенные математические трудности, поэтому в нашем случае математическая модель представляет собой функционал полной потенциальной энергии деформации данной оболочки.

2. Алгоритм исследования и программная реализация. Алгоритм исследования этой математической модели основан на применении нескольких численных методов – метода Ритца для сведения вариационной

задачи к системам нелинейных алгебраических уравнений; метода продолжения решения по наилучшему параметру, когда за параметр продолжения берется длина дуги кривой равновесных состояний, позволяющий свести решение системы нелинейных алгебраических уравнений к последовательному решению систем линейных алгебраических уравнений [2]; метода Гаусса для решения систем линейных алгебраических уравнений; метода Симпсона для вычисления определенных интегралов.

Такой алгоритм позволяет исследовать прочность и устойчивость различных оболочечных конструкций и их закритическое поведение [3].

По разработанному алгоритму составлен программный модуль в среде аналитических вычислений Maple с возможностью распараллеливания процессов вычислений и с использованием графических интерфейсов.

3. Об исследованиях прочности и устойчивости. Для исследования прочности оболочечных конструкций из различных материалов используется несколько критериев прочности и находится нагрузка начального невыполнения условий прочности. Кроме того, исследуется развитие областей деформаций текучести или хрупкого разрушения при дальнейшем нагружении.

Для определения нагрузок потери устойчивости строится кривая зависимости «нагрузка – прогиб» в характерных точках конструкции. Точки экстремумов на этой кривой соответствуют верхним и нижним критическим нагрузкам, этим нагрузкам соответствует переход на новое равновесное состояние [4]. Также здесь может наблюдаться последовательность локальных потерь устойчивости, приводящих к образованию вмятин в различных частях оболочки (местные и общие формы потери устойчивости оболочки). В том случае, если потеря устойчивости произошла до потери прочности материала, то при снятии нагрузки конструкция может вернуться в свое исходное состояние. Совместное исследование прочности и устойчивости оболочечных конструкций позволит оптимально подбирать параметры подкрепления оболочки ребрами жесткости и ее материал для безопасной работы конструкции.

На основе разработанного программного продукта проведено исследование прочности и устойчивости различного вида подкрепленных оболочечных конструкций. Проведен анализ взаимосвязи прочности и устойчивости рассматриваемых оболочек.

Литература

1. Карпов В.В., Семенов А.А. Математическая модель деформирования подкрепленных ортотропных оболочек вращения // Инженерно-строительный журнал. – № 5. – 2013. С. 100–106. doi:10.5862/MCE.40.11
2. Шалашилин В.И., Кузнецов Е.Б. Метод продолжения решения по параметру и наилучшая параметризация (в прикладной математике и механике). – М.: Эдиториал УРСС, 1999. 224 с.
3. Семенов А.А. Алгоритмы исследования прочности и устойчивости подкрепленных ортотропных оболочек // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – № 1. – 2014. – С.49–63.
4. Карпов В.В. Прочность и устойчивость подкрепленных оболочек вращения: в 2 ч. Ч.2: Вычислительный эксперимент при статическом механическом воздействии. – М.: Физматлит, 2011. – 248 с.

**ОБРАТНАЯ КВАДРАТИЧНАЯ ЗАДАЧА НА СОБСТВЕННЫЕ
ЗНАЧЕНИЯ И НЕКОТОРЫЕ ЧИСЛЕННЫЕ АЛГОРИТМЫ ЕЕ
РЕШЕНИЯ**

*Семенов В.А., Трубников С.А.
ООО Техсофт, Москва, Россия
vas@tech-soft.ru*

**INVERSE QUADRATIC EIGENVALUE PROBLEM AND SOME
NUMERICAL ALGORITHMS FOR ITS SOLUTION**

*Semenov V.A., Trubnikov S.A.
Techsoft Ltd., Moscow, Russia*

Рассмотрены эффективные численные алгоритмы решения обратной квадратичной задачи на собственные значения. Алгоритмы реализованы в программном комплексе MicroFe и могут применяться для анализа собственных значений и собственных векторов свободных колебаний конструкций как с пропорциональным, так и с непропорциональным демпфированием.

В настоящей работе рассматривается вариант обратной квадратичной задачи на собственные значения заключающийся в задании новых значений небольшому числу нежелательных собственных значений квадратичного матричного пучка, оставляя оставшееся большое количество собственных значений и соответствующих собственных векторов без изменений. Необходимость в этом возникает при борьбе с нежелательными резонансами в колеблющихся конструкциях, при стабилизации системы управления, при корректировке матриц жесткости и демпфирования по результатам измерения частот и/или форм свободных демпфированных колебаний и т.п. Один из современных подходов для решения задачи гашения демпфированных колебаний конструкций заключается в использовании управления и требует вычислений двух матриц обратной связи. Для практической эффективности, эти матрицы обратной связи должны быть вычислены таким образом, чтобы их нормы и число обусловленности матрицы собственных векторов замкнутой задачи были как можно меньше. В результате применения такого подхода получаются несимметричные матрицы демпфирования и жесткости. Для корректировки матриц жесткости и демпфирования по результатам измерения частот и/или форм свободных демпфированных колебаний обычно используют подходы к решению обратных задач на собственные значения без использования управления, ориентированные на получение симметричных матриц жесткости и демпфирования.

Алгоритмы, построенные на основе первого подхода, могут быть эффективно применены при решении задач гашения колебаний конструкций при сейсмических воздействиях. Вторая группа алгоритмов может быть использована при решении задач мониторинга конструкций для

корректировки матриц жесткости и демпфирования по результатам измерений частот свободных колебаний.

Мы реализовали четыре алгоритма, основанных на использовании спектра частот и форм демпфированных свободных колебаний конструкции. Построение такого спектра называют прямой квадратичной задачей на собственные значения. Этот спектр представляет основные исходные данные для алгоритмов. В результате работы алгоритмов мы получаем две матрицы обратной связи для гашения колебаний или уточненные симметричные матрицы масс, жесткости и демпфирования, для задачи мониторинга. С учетом полученных матриц прямая квадратичная задача в качестве результата дает новый (желаемый) спектр частот и форм. Этот новый спектр является еще одной группой исходных данных. Таким образом, реализованные нами алгоритмы основаны на решении прямых и обратных квадратичных задач на собственные значения. Уточненные матрицы жесткости и демпфирования для задач мониторинга должны удовлетворять еще некоторым условиям. Обычно в качестве такого условия используется минимум взвешенного отклонения уточненных матриц от исходных матриц в смысле нормы Фробениуса. Важной особенностью данных алгоритмов является то, что для их использования не требуется вычислять полный набор собственных значений и векторов исходной системы. Поэтому они могут быть применены для анализа достаточно больших систем.

ОПТИМАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ РАМ С УЧЕТОМ ОГРАНИЧЕНИЙ ПО ПРОЧНОСТИ И КРАТНЫМ ЧАСТОТАМ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ

Сергеев О.А.¹, Киселев В.Г.², Сергеева С.А.¹

*1 - Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е. Алексеева, Россия*

*2 - НИИ механики Нижегородского государственного университета
им. Н.И. Лобачевского, Россия
nnsoa@rambler.ru*

Рассматривается задача определения оптимальных координат узлов и размеров поперечных сечений упругих пространственных рам с ограничениями на напряжения и кратные частоты собственных колебаний. Учитывается несколько независимых условий нагружения рамы, включая собственный вес и температуру. Анализ напряженного состояния включает в себя растяжение (сжатие), изгиб, сдвиг и кручение балочных элементов. Деформация балочных элементов в данной задаче не учитывается. Оптимальный проект достигается путем решения последовательности задач квадратичного программирования. Анализ чувствительности простых и кратных частот проводится через аналитическое дифференцирование частот по варьируемым параметрам.

1. Введение. Рассматривается задача оптимального проектирования рамных конструкций с варьируемыми координатами узлов и размерами поперечных сечений элементов. На оптимальный проект наложены ограничения на напряжения и частоты собственных колебаний. Ограничения на напряжения в элементах рамы обеспечивают надлежащие уровни напряжений при заданных условиях нагружения, а ограничения на частоты собственных колебаний необходимы для получения правильного отклика рамы при динамическом возбуждении, для которого исключается резонанс, и получается подходящий спектр частот.

Цель этого исследования – расширить проведенные предыдущие анализы и рассмотреть одновременно варьирование координат узлов конструкции и размеров поперечных сечений. Важно отметить, что рамные конструкции являются более чувствительными к варьированию координат узлов. Таким образом, одновременное варьирование координат узлов и размеров поперечных сечений дает более эффективные проекты, а использование ограничений на напряжения в элементах рамы и частоты собственных колебаний гарантирует практически оптимальные проекты, для которых контролируются статические и динамические отклики.

Появление кратных или почти равных частот является характерной чертой оптимального проектирования конструкций с ограничениями на частоты собственных колебаний. Такое совпадение частот связывается с симметрией конструкции или наводится в результате развития спектра частот из-за процесса перепроектирования к оптимальной точке с ограничением на фундаментальную частоту. Известно, что кратные частоты являются недифференцируемыми. Производные от кратных частот можно вычислить

только по направлению. Этот факт создает трудности в нахождении производных кратных частот по варьируемым параметрам конструкции и в применении эффективных градиентных методов оптимизации.

Настоящее исследование посвящено разработке эффективного метода анализа чувствительности и оптимизации рамных конструкций с простыми и кратными частотами. Задача оптимизации решается с помощью алгоритма приведенного квадратичного программирования.

2. Постановка задачи оптимизации. Рассмотрим линейно-упругую раму, для которой статическое уравнение равновесия имеет вид:

$$[K]\{U\} = \{P_1\} + \{P_2\} + \{P_3\},$$

где $[K]$ – глобальная матрица жесткости рамы, $\{U\}$ – вектор узловых перемещений, и $\{P_1\}$ – внешние узловые нагрузки, $\{P_2\}$, $\{P_3\}$ – узловые нагрузки от распределенной, температурной нагрузки по элементам рамы.

Частоты собственных колебаний определяются с помощью уравнения

$$([K] - \omega_j^2 [M]) \{\Phi_j\} = 0, \quad j = 1, \dots, n,$$

где $[M]$ – глобальная матрица масс рамы, ω_j – j -ая частота собственных колебаний, $\{\Phi_j\}$ – j -ая мода собственных колебаний, n – число степеней свободы рамы. Частоты являются действительными числами и могут быть упорядочены

$$0 < \omega_1 \leq \omega_2 \leq \dots \leq \omega_j \leq \dots \leq \omega_n.$$

Задача оптимизации может быть сформулирована следующим образом. Требуется определить из заданного диапазона $[\{X\}_{min}, \{X\}_{max}]$ координаты узлов (параметры формы) и размеры поперечных сечений $\{X^j\}$, для которых масса W рамы принимает минимальное значение:

$$W(\{X^j\}) = \min_{\{X\} \in F} W(\{X\}).$$

Допустимая область F определяется ограничениями на напряжения и частоты собственных колебаний, ограничениями на варьируемые параметры конструкции:

$$\begin{aligned} F = \{ \{X\}: \sigma_{eff}(\{X\}) &\leq \sigma_{eff}^a, \\ \omega(\{X\}) &\geq \omega_j^a, \quad j = 1, 2, \dots, k, \\ \{X\}_{min} &\leq \{X\} \leq \{X\}_{max} \}, \end{aligned}$$

σ_{eff} – эквивалентное напряжение в каждой точке конструкции; σ_{eff}^a , ω_j^a – допустимые напряжение, частота; k – количество учитываемых частот.

УДК 519.86

МЕХАНИЗМ ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ КАК СПОСОБ РАЗВИТИЯ АРКТИЧЕСКОГО РЕГИОНА

Скрипнюк Д.Ф.

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Россия
djamilyas@mail.ru*

THE MECHANISM OF IMPORT SUBSTITUTION AS A WAY OF ARCTIC REGION PROGRESS

Skipnuk D.

Peter the Great St.-Petersburg Polytechnic University, Russia

В докладе рассматривается возможность применения импортозамещения на региональном уровне (на примере Архангельской области). Предполагается, что в сложившейся ситуации, когда сокращается объём импортируемой в Россию продукции, необходимо использовать стратегию импортозамещения. Стратегия импортозамещения имеет большой потенциал в качестве драйвера для регионального экономического развития. Способом применения политики импортозамещения является создание механизма активного импортозамещения, ключевыми элементами которого является модель спроса на импортируемый товар и Целевая Комплексная Программа создания конкурентных преимуществ предприятий. В докладе обосновывается необходимость институционального развития государства в рамках радикальной трансформации экономической политики в направлении импортозамещения, создания новых институтов эффективной стратегии импортозамещения.

The report examines the possibility of import substitution at the regional level (in the example of the Arkhangelsk region). It is assumed that in the current situation where declining volume of imported products in Russia, it is necessary to use the strategy of import substitution. The strategy of import substitution has great potential as a driver for regional economic development. Methods of application of import substitution policies is to create a mechanism of active import substitution. The elements of the mechanism are the model of import goods demand and target complex program to create competitive advantages of the enterprises. The necessity of the institutional development of the state as part of a radical transformation in the direction of economic policy of import substitution, the creation of new institutions of an effective strategy of import substitution.

1. Введение. В сложившейся ситуации развития глобальной экономики для России важно иметь собственные конкурентоспособные производства, способные изготавливать качественную продукцию. Результатом импортозамещения должно стать повышение конкурентоспособности отечественной продукции, стимулирование технологической модернизации производства, повышения производительности труда и производство новых конкурентоспособных продуктов с относительно высоким качеством. Импортозамещение в условиях слабеющего рубля имеет потенциал, чтобы стать альтернативой ориентированной на рост и экономическое развитие. Участие органов местного самоуправления в разработке, эксплуатации и управления программой импортозамещения является существенным

фактором[1]. Целью механизма импортозамещения является замещение определенной доли импортируемой зарубежной продукции машиностроительной отрасли на продукцию отечественного производства, имеющую конкурентоспособную цену схожую по качествам и свойствам с импортными аналогами. В связи с этим, на базе разработанной модели импортопотребления Архангельской области вычисляются прогнозные значения для эндогенных переменных.

2. Модель импортопотребления. Модель импортопотребления построена по пяти видам продукции: древесина и изделия из неё; продовольственные товары; машины; оборудование; транспортные средства. Строится модель, отражающая зависимость объёма импортируемой продукции от внутренних ресурсов региона, таких как ВРП, доля произведенной продукции в ВРП, сальдо торгового баланса, объём произведенной продукции, а также от темпов роста производства и темпов роста цен производителей продукции. Модель предлагается строить на базе авторегрессионной модели распределенного лага [2,3]. Такой выбор обусловлен тем, что при построении модели необходимо учесть влияние текущих и предыдущих значений показателей, используемых для построения модели импортопотребления Архангельской области. На первом этапе дается обоснование выбора переменных. В качестве эндогенных переменных для построения модели были взяты: объём импортируемой древесины и изделий из неё для первого уравнения; объём импортируемых продовольственных товаров для второго уравнения; объём импортируемых машин для третьего уравнения; объём импортируемого оборудования для четвертого уравнения; объём импортируемых транспортных средств для пятого уравнения. Предполагается, что на объём импортируемой продукции оказывают влияние такие показатели как объём валового регионального продукта, доля произведенной продукции, сальдо торгового баланса Архангельской области, индекс цен производителей, индекс промышленного производства в предыдущем периоде и объём импортируемой продукции в предыдущем периоде.

3. Подходы к решению модели. Каждое уравнение системы (1), в отдельности представлено в виде модели авторегрессии с распределённым лагом (autoregressive distributed lags, ADL-model), в которой текущие значения ряда зависят как от прошлых значений этого ряда, так и от текущих и прошлых значений других временных рядов. Основную сложность для эмпирической оценки модели с распределённым лагом представляет наличие мультиколлинеарности, так как в экономических данных соседние значения одного и того же ряда данных обычно высоко коррелированы друг с другом. В докладе представлено решение модели.

Благодарность: Доклад подготовлен по результатам исследования, выполненного при финансовой поддержке гранта Российского Научного Фонда (проект 14-38-00009) «Программно-целевое управление комплексным развитием Арктической зоны РФ» (Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого).

Литература

1. Romashkina G.F. Modernization processes in the regions of Urals federal district//Sociological Studies. 2015. № 1 (369).
2. Didenko N., Kunze K. (2014) Relationship between Energy Policies and Quality of Life in Russia. WIT Transactions on Ecology and the Environment, Vol 186, WIT Press, 2014, ISSN 1743-3541.
3. Pogodaeva T.V., Rudenko, D.Y., Skripnuk D. Innovations and Socio-Economic Development: Problems of the Natural Resources Intensive Use Regions. Mediterranean Journal of Social Sciences, 2015, 6 (1), C.129.

ДИАГРАММА РАЗРУШЕНИЯ УПРУГОГО ТЕЛА С КРУГОВОЙ ТРЕЩИНОЙ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СОСРЕДОТОЧЕННЫХ СИЛ

Смирнов В.И.

*Петербургский государственный университет путей сообщения, Санкт-Петербург, Россия
vsmirnov1@gmail.com*

FRACTURE ASSESSMENT DIAGRAM FOR SOLID WITH CIRCULAR CRACK SUBJECTED TO POINT FORCES

Smirnov V.I.

Petersburg State Transport University, St.-Petersburg, Russia

Structural criterion of fracture is used to evaluate the ultimate load for solid weakened by circular crack deformed by the action of two point forces applied to the crack faces at its center. Estimation of the risk of failure is based on the two-criterion approach under linear elastic conditions.

Известно, что классические критерии Гриффитса и Ирвина неприменимы в области «коротких» трещин, так как приводят к неограниченной разрушающей нагрузке. Обойти эту трудность позволяет силовой структурный критерий прочности, который для дисковидной трещины в осесимметричном поле напряжений записывается следующим образом [1]

$$\frac{2}{2ad + d^2} \int_a^{a+d} \sigma_z(r) r dr \leq \sigma_c, \quad (1)$$

где a – радиус трещины, (r, z) – цилиндрические координаты, σ_z – нормальное растягивающее напряжение на продолжении трещины ($z = 0, r > a$)

$$\sigma_z(r, 0) = \frac{Pa}{\pi^2 r^2 \sqrt{r^2 - a^2}}, \quad r > a,$$

σ_c – предел прочности при растяжении, d – структурный параметр прочности размерности длины, часто трактуемый как зона предразрушения.

Рассматривается дисковидная трещина в упругом пространстве к берегам которой в ее центре симметрично приложены две сосредоточенные силы величиной P каждая. Оценивается критическая нагрузка, при достижении которой трещина начинает устойчиво развиваться.

Предельная нагрузка, согласно (1), равна (рис.1, кривая 1)

$$\frac{p_*}{\sigma_c} = \frac{\pi(1+\eta)}{2(1-\eta)\arccos\eta}, \quad 0 \leq \eta \leq 1, \quad (2)$$

где $\eta = a / (a + d)$ – безразмерный радиус трещины, p_* – разрушающая

нагрузка (напряжение) $p_* = P_*/(\pi d^2)$. При $\eta \rightarrow 0$ (бесконечно малая трещина) имеем физически естественный предельный переход к телу без трещины: $p_*/\sigma_c \rightarrow 1$. Структурная ячейка разрушения в этом случае представляет площадь круга радиуса d . При $\eta \rightarrow 1$ (бесконечно большая трещина) имеем обычное для устойчивых трещин следствие: $p_*/\sigma_c \rightarrow \infty$, то есть, большая по размерам трещина требует для распространения большей нагрузки.

Коэффициент интенсивности напряжений (КИН) найдем из выражения

$$K_I = \lim_{r \rightarrow a} \sqrt{2\pi(r-a)} \sigma_z(r, 0),$$

откуда $K_I = P/(\pi a)^{3/2}$. Применение критерия Ирвина $K_I \leq K_{Ic}$, где K_{Ic} – критический КИН, показывает, что при $a \rightarrow 0$ сила $P_* \rightarrow \infty$. Бесконечная прочность тела при отсутствии трещины указывает на ограниченность критерия Ирвина в области коротких трещин. Из условия согласования критериев Ирвина и структурного получаем: $d = (2/\pi)(K_{Ic}^\infty/\sigma_c)^2$, где $K_{Ic}^\infty = K_{Ic}|_{\eta \rightarrow 1}$ – т.н. «истинная» вязкость разрушения, то есть критический КИН при бесконечно большой трещине.

Применительно к асимптотическому выражению разрывающего напряжения на продолжении трещины $\sigma_z \approx K_I/\sqrt{2\pi(r-a)}$ структурный критерий прочности позволяет получить следующее соотношение (рис.1, кривая 2)

$$\frac{K_{Ic}}{K_{Ic}^\infty} = \frac{(1+\eta)\sqrt{1-\eta}}{\eta\sqrt{2\eta \arccos \eta}}. \quad (3)$$

Уравнения (2) и (3) совместно задают т.н. двухпараметрическую диаграмму разрушения (рис.1, кривая 3), которая удобна для представления результатов испытаний материалов на трещиностойкость [2].

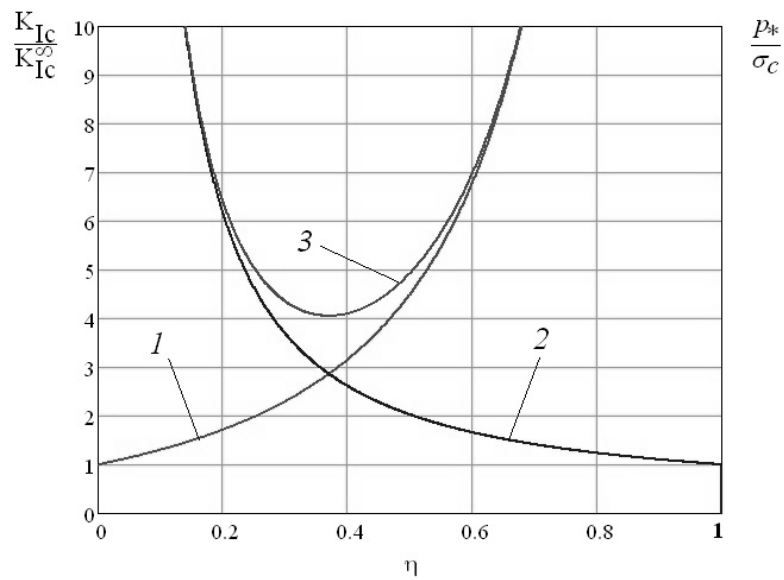


Рис.1. Диаграмма разрушения.

Литература

1. Смирнов В.И. Структурный подход в задачах предельного равновесия хрупких тел с концентраторами напряжений // Прикладная механика и техническая физика. 2007. Т.48, № 4. С.162-172.
2. Петров Ю.В., Тарабан В.В. Двухкритериальный анализ хрупкого разрушения образцов с малыми поверхностными повреждениями // Вестник СПбГУ. Сер.1, 1999. Вып.1. С.101-106.

*Смоляков А.А., Упвалов В.В.
ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ", Россия
a.a.smolyakov@gmail.com*

LINK LEVER MOTION
*Smolyakov A.A., Upovalov V.V.
RFNC-VNIEF, Russia*

Предложен полученный аналитическим решением кулисно-рычажный механизм, способный сохранять форму передачи движения при любом изменении положения самой конструкции.

Proposed analytical solutions echelon-lever mechanism, capable of maintaining the shape of motion in any change in the position of the design.

Предлагается к рассмотрению кулисно-рычажный механизм, в котором осуществляется преобразование вращательного движения кулачка в качание кулисы. Механизм может быть реализован двумя способами. Устройство состоит из кулачка, вращающегося вокруг постоянной оси, и кулисы с двумя направляющими. Кулиса, с жестко заделанными направляющими, качается вдоль своей оси качания, перпендикулярной оси вращения кулачка. В каждый момент времени кулачок касается обеих направляющих (каждой в одной точке) за счет выбора формы кулачка (в первом варианте) или направляющих (во втором варианте). В первом варианте направляющие имеют форму цилиндров, а во втором варианте кулачок выполнен в форме цилиндра.

Для нахождения функции, описывающей форму кулачка для первого варианта, и форму кулис для второго варианта, были решены соответствующие системы дифференциальных уравнений.

Данная конструкция обладает способностью сохранять форму передачи движения при любом изменении положения самой конструкции за счет постоянного касания кулачка с каждой направляющей в одной точке. При этом не требуется использования дополнительных деталей, например подшипников, что позволяет изготовить подобные кулисно-рычажные механизмы малых размеров. Это дало возможность использования описанного механизма в приборостроении.

Степашкина А.С.¹, Коцкович А.В.², Алтухов А.И.²

1 - Санкт-Петербургский Государственный Университет Технологии и Дизайна, Россия

*2 - Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского, Россия
stepashkina.anna@yandex.ru*

HEAT DISTRIBUTION WITH STRUCTURE IN SOLID STATES

Stepashkina A.S.¹, Kotskovich A.V.², Altukhov A.I.²

1 - Saint-Petersburg State University of Technology and Design, Russia

2 - Mozhaisky Military Space Academy, Russia

The concept of the heat stream structure was introduced. It is considered that heat transfer is carried out on N channels each of which has the own heat distribution speed and frequency. The integral equation describing heat transfer process in a one-dimensional crystal was offered.

В работе введено понятие структуры теплового потока. Считается, что перенос тепла осуществляется по N каналам, каждый из которых обладает своей скоростью распространения тепла и частотой. Предложено интегральное уравнение, описывающее процесс переноса тепла в одномерном кристалле.

Распространения тепла в большинстве материалов описывается законом Фурье, согласно которому тепловой поток пропорционален градиенту температуры. Закон Фурье хорошо описывает процесс переноса тепла на макроскопическом уровне для систем, находящихся вблизи термодинамического равновесия. Однако распространение тепла, например в одномерном кристалле, описать с помощью закона Фурье затруднительно. Кроме того, закон Фурье не может описать мгновенное распространение тепла в системе, за счет чего на малых временных интервалах наблюдаются отклонения. Еще одной проблемой, с которой сталкиваются при описании процесса теплопроводности в многослойных материалах, является задание граничных условий на границе раздела сред. Кроме того, с развитием нанотехнологий становится возможным получение идеальных кристаллов, которые обладают уникальными, в том числе и теплопроводящими, свойствами. В связи с вышеперечисленными проблемами вопрос о распространении тепла в системах считается открытым.

В работе предложено интегральное уравнение, описывающее процесс переноса тепла в одномерном кристалле. Введено понятие структуры потока. Считается, что перенос тепла осуществляется по N каналам, каждый из которых обладает определенным значением скорости переноса тепла и частоты.

Тепловой поток может отразиться и за счет этого изменить направление на противоположенное. Также поток может принять другую форму за счет ухода на другие каналы, имеющие другие значения частот. Составим

уравнение теплового баланса:

$$\frac{1}{c_{\omega}} \frac{\partial q_{\rightarrow}(\omega)}{\partial t} = - \frac{\partial q_{\rightarrow}(\omega)}{\partial x} - q_{\rightarrow}(\omega) \left[\int_0^{\infty} A(\omega|\Omega) d\Omega + \int_0^{\infty} K(\omega|\Omega) d\Omega \right] + \\ + \int_0^{\infty} q_{\leftarrow}(\Omega) A(\Omega|\omega) d\Omega + \int_0^{\infty} q_{\rightarrow}(\Omega) K(\Omega|\omega) d\Omega$$

где c_{ω} — скорость распространения тепла в некотором канале i , $q_{\rightarrow}$ и $q_{\leftarrow}$ — тепловой поток слева направо и справа налево соответственно.

Первое интегральное слагаемое $\int_0^{\infty} A(\omega|\Omega) d\Omega$ отвечает за отражение, т.е. изменение направления потока с прямого на обратное. $A(\omega|\Omega)$ — показатель рассеивания, т.е. доля теплового потока, которая перешла с канала i на некоторый канал j , при этом изменив направление. Считается, что изменение направления может происходить и в рамках канала, без перехода теплового потока на другой канал. Частота ω соответствует тепловому потоку, распространяющемуся в прямом направлении, после отражения теплового потока, перехода на другой канал с одновременным изменением его направления на противоположенное, частота потока будет иной: Ω_j .

Второе интегральное слагаемое соответствует уходу теплового потока с канала i с частотой ω на канал j с частотой Ω_j без изменения направления распространения теплового потока. Коэффициент $K(\omega|\Omega)$ отвечает за вероятность перехода потока тепла с одного канала на другой, другими словами коэффициент K — это доля теплового потока, которая перешла с канала i на некоторый канал j без изменения направления распространения потока.

Третье и четвертое интегральные слагаемые отвечают за приход теплового потока за счет отражений внутри канала, а также приходу тепла с других каналов. Третье слагаемое $\int_0^{\infty} q_{\leftarrow}(\Omega) A(\Omega|\omega) d\Omega$ отвечает за отражение, аналогично первому, однако учитывает уже «приход» тепла за счет изменения направления потока с обратного на прямое. Четвертое слагаемое $\int_0^{\infty} q_{\rightarrow}(\Omega) K(\Omega|\omega) d\Omega$ отвечает за «приход» тепла с некоторого канала j , обладающего частотой Ω , на поток i , обладающий частотой ω .

О ПРЕДЕЛЬНОМ РАВНОВЕСИИ ПЛОСКОЙ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ МОДЕЛИ МОМЕНТНОЙ СРЕДЫ КОССЕРА

Строганова О.С., Фрумен А.И., Миронов М.Ю.

СПбГМТУ, Россия

kafedra_smk@mail.ru

ON THE LIMITING EQUILIBRIUM OF A PLANAR FINITE ELEMENT MODEL OF COSSERAT CONTINUA

Stroganova O.S., Frumen A.I., Mironov M.J.,

Saint-Petersburg State Marine Technical University, Russia

С помощью итерационного метода теории предельного равновесия решается задача о предельном локальном давлении на жестко-пластичную моментную полуплоскость с нестесненным вращением частиц. Анализируется влияние на результаты моделирования новых реологических параметров и уравнений предельной поверхности. Моделирование выполняется численно, с использованием изопараметрических конечных элементов.

The iterative method of limit equilibrium theory is used to solve problem of limiting the local pressure on the rigid-plastic Cosserat half-plane. The impact of new rheological parameters and limit surfaces on the simulation results is examined. Numerical modeling is performed using isoparametric finite elements.

Особенность сыпучего грунта и разрушенного мелкодисперсного льда в зоне соприкосновения с конструкцией – высокая относительная подвижность частиц среды, требующая сложных реологических моделей, учитывающих и пластичность, и зернистость сред, оставаясь при этом в рамках гипотезы сплошности. Для несимметричных теорий, помимо повышенной математической сложности, характерно использование дополнительных реологических параметров среды, далеко не всегда определяемых экспериментально. Эти параметры могут быть независимыми характеристиками свойств материала или функциями известной реологии и характерных размеров задачи [1], [2], [4]. Использование МКЭ как средства исследования возможностей несимметричной теории упругости представляется перспективным.

В работе используется модель нестесненного континуума (Коссера), основные соотношения теории для приведены, например, в [5], [1]. В рамках теории, на основе принципа Лагранжа получен изопараметрический четырехугольный элемент с билинейными аппроксимациями узловых перемещений и поворотов. Элемент дает безмоментные решения при обнулении соответствующих констант - изгибно-крутильного модуля $B^* B^*$ и моментно-сдвигового модуля $\alpha\alpha$.

Применить полученные численные модели среды в упругой статической форме можно в задачах теории предельного равновесия (ТПР). Перспективный метод оценки предельных уровней нагружения по

жесткопластическим моделям – разработанный Р.А. Каюмовым и Ю.Л. Рутманом итерационный метод вариации упругих параметров (МВУ, МПЖ) [6], [7], применяемый не только в механике конструкций [3], но и в механике грунтов [8], состоящий в перераспределении дискретного поля фиктивных жесткостей упругой модели, которое дает те же внутренние усилия, что и наблюдаемые в предельном состоянии.

Для классической модели среды МВУ дает устойчивое и быстросходящееся решение, легко проверяемое прямым нелинейным расчетом. В условиях несимметричной теории сформулировать единый критерий пластичности, переводимый в матричную форму с симметричной матрицей, без предварительных исследований не представляется возможным. В разных работах предлагается использование в критерии либо только силовых [9], либо только моментных [4] компонентов несимметричных тензоров. Комплексный критерий в [9] предполагает однозначную линейную связь силового и моментного тензора в предельном состоянии, осуществляемую при помощи оператора, содержащего моментные реологические параметры, сведенные к масштабным.

Очевидно, что изменяя параметры упругой реологии и вид поверхности текучести, можно в анализе предельных состояний добиваться разных предельных конфигураций среды и критических нагрузок, в том числе – наблюдаемых в эксперименте, то есть способствовать идентификации набора реологических констант. С использованием конечно-элементной модели моментной нестесненной среды рассмотрено влияние выбора разных вариантов поверхности текучести и набора констант материала на результаты решения задачи о предельном равновесии.

Литература

1. Белостоцкий А.З., Сутурин И.М. Построение конечного элемента плоского напряженного состояния на основе моментной теории упругости, реализация для тонких оболочек // Математическое моделирование в механике сплошных сред. Методы конечных и граничных элементов. Труды XIX Международной конференции. – 2001. – т.2. – с. 66-71.
2. Буланов Э.А. Моментные напряжения в механике твердого, сыпучего и жидкого тела. – М.: Вузовская книга, 2012. – 140 с.
3. Миронов М.Ю., Родионов А.А., Пономарев Д.А. Метод вариации упругих характеристик в расчетах несущей способности балочных идеализаций судовых конструкций // Морские интеллектуальные технологии. – 2011. №4 (спецвыпуск). – с.38-44
4. Морозов Н.Ф. Математические вопросы теории трещин. – М.: Наука, 1984. – 256 с.
5. Новацкий В. Теория упругости. – М.: Мир, 1975. – 872 с.
6. Рутман Ю.Л. Метод псевдожесткостей для решения задач о предельном равновесии жесткопластических конструкций. – СПб: БГТУ, 1998. – 53 с.
7. Терегулов И.Г. Расчет конструкций по теории предельного равновесия / И.Г. Терегулов, Р.А. Каюмов, Э.С. Сибгатуллин. – Казань: ФЭН, 2003. – 150 с.
8. Шакирзянов Ф.Р. Оценка несущей способности системы «конструкция-грунт»: Автореф. дисс. ... канд.тех.наук.:01.02.04 / Шакирзянов Фарид Рашитович; КГАСУ. – Казань, 2012. – 22 с.
9. Makarov V.P. The fundamental function of rotation at the meso-level in deformation and fracture of solids // 11th International Conference on Fracture 2005. – 2005. – С. 4348-4353

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ И КОМПЬЮТЕРНЫЕ МОДЕЛИ ПЛАСТИН И ОБОЛОЧЕК ИЗ КОМПОЗИТОВ И НАНОМАТЕРИАЛОВ

Галилеев С.М.¹, Табаков П.Ю.², Салихова Е.А.³, Орлов О.А.¹, Назаров Р.А.¹

*1 - Санкт-Петербургский государственный экономический университет,
Санкт-Петербург, Россия*

2 - Дурбанский технологический университет, Дурбан, Южная Африка

*3 - Конструкторское бюро специального машиностроения, Санкт-Петербург, Россия
galiley1010@gmail.com*

MATHEMATICAL AND COMPUTER MODELS OF PLATES AND SHELLS MADE OF COMPOSITES AND NANOMATERIALS

Galileev SM¹, Tabakov PY², Salikhova EA³, Orlov OA¹, Nazarov RA¹

1 - St. Petersburg State University of Economics, St. Petersburg, Russia

2 - Durban University of Technology, Durban, South Africa

3 - Design Department of Special Machinery, St. Petersburg, Russia

The problem of developing mathematical and computer models of laminated rectangular anisotropic plates and cylindrical pressure vessels using both the method of initial functions and stress function approach is considered. No limitations are placed on the thickness, rigidity, number and/or sequence of the layers. Thus, the structure of the shell through the thickness can be arbitrarily defined and is heterogeneous. Loads are applied on the outer and inner surfaces of the laminate and, depending on the problem, can be local, distributed, static or dynamic. The use of three-dimensional models allows us to reveal such features of the stress-strain state which are not possible to obtain with the help of numerical methods and the approximate non-classical theories. The analysis and design optimisation of laminated inhomogeneous plates and shells is considered.

1. Method of initial functions. The application of the method of initial functions (MIF) [1] to the analysis of anisotropic plates and shells made of composites and nanomaterials, allows one to avoid limitations of numerous classical and non-classical models. In these models no limitations are placed on the thickness and structure of the layered package, the elastic properties of anisotropic material as well as the loading conditions (local, distributed, static, and dynamic).

The methods of computer algebra makes possible to obtain the basic relations of MIF in curvilinear orthogonal coordinate system α, β, γ as

$$\mathbf{U} = \mathbf{L} \mathbf{U}^0, \quad (1)$$

where $\mathbf{L} = [L_{ij}]$, $i = 1, 2, \dots, 9$, $j = 1, 2, \dots, 6$ is the matrix of differential operator-valued functions of the method; $\mathbf{U}^0 = \{u_\alpha^0, u_\beta^0, u_\gamma^0, \tau_{\gamma\beta}^0, \tau_{\gamma\alpha}^0, \sigma_\gamma^0\}$ are initial functions; $\mathbf{U} = \{u_\alpha, u_\beta, u_\gamma, \tau_{\gamma\alpha}, \tau_{\gamma\beta}, \sigma_\gamma, \sigma_\alpha, \sigma_\beta, \tau_{\alpha\beta}\}$ are the unknown stresses and displacements.

Mathematical models were derived for the plates, spherical shells, and the shells with an open profile.

The stresses and displacements in the k -th layer of the laminated body are

expressed by the initial functions as $U^k = L^k L_0^{k-1} \dots L_0^2 L_0^1 U^0$, where in the matrix L^k the operator-valued functions L_{ij} are calculated for $z \in [0, h_k]$ with physical and mechanical characteristics of the k -th layer given as: A_{ij}^k, ρ_k ; $L_0^n = [L_{ij}^n]$, $n = (k-1) \dots 1, i = 6 \dots 1, j = 1 \dots 6$ are the matrix-operator functions with $\gamma = h_m, m = (k-1) \dots 1$.

When expressing the initial functions via the double trigonometric series the relations of MIF take an algebraic form, afterwards the stress-strain state can be obtained on the basis of the developed stable algorithms.

The stress-strain state was studied in detail for different models of plates and shells. The spectra of natural frequencies of composite beams and nanomaterials (graphene), including the higher harmonics, are also investigated.

As an example, a 10-layered cylindrical shell subjected to the moving exponential load was analysed. The nature of the deformation of the shell wall at a load speed of 1000 m/sec is shown in Fig. 1.

2. Stress function approach. The stress function approach is used to obtain exact elasticity solutions for multi-layered anisotropic cylinders and pressure vessels [2]. The radial, circumferential and shear stresses are determined taking into account the closed ends of the cylindrical shell. The system of the governing algebraic equations is derived to accurately analyse a multi-layered pressure vessel with an arbitrary number of layers and any thickness. The approach used is straight-forward compared to other three-dimensional solutions found in the literature.

The design of multi-layered composite pressure vessels is accompanied using the genetic algorithm, particle swarm optimization and the big bang – big crunch optimization method, and subjected to the Tsai-Wu failure criterion. The optimization problem is particularly complicated due to high complexity of the fitness function and enormously high number of possible combinations of the fibre orientations. As an example, the distribution of the critical pressure in the cylinder with two layers is shown in Fig. 2. In the most complex case a near-optimum solution was found for the 20-layered pressure vessel (91^{20} combinations) within half a minute.

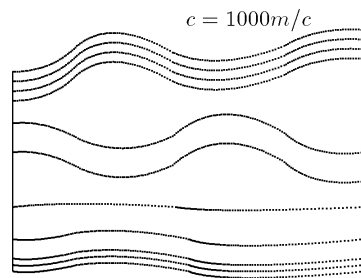


Fig. 1. The nature of the deformation of the shell wall at a load speed of 1000 m/sec

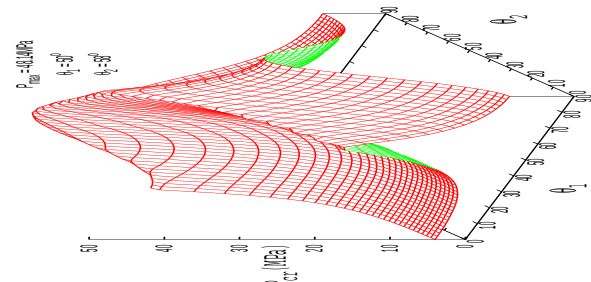


Fig. 2. The distribution of the critical pressure in the cylinder with two layers

Reference

1. Galileev SM. The method of initial functions in the mechanics of anisotropic plates: monograph. St. Petersburg, SPb FGOU SPGUVK, 2007, 212p.
2. Tabakov PY. Lay-up optimization of multi-layered anisotropic cylinders based on 3-d elasticity solution. Computers & Structures. 84, 2006, pp. 374-384.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПАКЕТА ANSYS ДЛЯ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ МАССИВНЫХ КОНСТРУКЦИЙ, НАХОДЯЩИХСЯ ПОД СЕЙСМИЧЕСКОЙ НАГРУЗКОЙ

Терпугов В.Н.^{1,2}

1 - Пермский государственный национальный исследовательский университет, Россия

*2 - ООО "Лаборатория АРГУМЕНТ", Россия
TERPUGOV@psu.ru*

USING THE ANSYS FOR THE FINITE-ELEMENT MODELING OF THE MASSIVE CONSTRUCTIONS ON THE GROUND UNDER THE SEISMIC LOADING

Terpugov V.N.^{1,2}

1 - Perm State University, Russia

2 - "Argument Laboratory" Llc, Russia

Рассматривается внедрение в пакет ANSYS конечно-элементных постановок теории упругости с заданными скачками искомых функций. Это дает возможность с помощью ANSYS решать задачи, в которых существенными являются такие факторы как моделирование удаленных динамических источников типа сейсмических и моделирование оттока волн «на бесконечность».

1. Введение. Расширение возможностей пакета ANSYS включением в него новых алгоритмов, представляется наиболее привлекательной формой использования данного пакета для исследовательских целей. Рассматривается внедрение в пакет ANSYS конечно-элементных алгоритмов решения задач теории упругости с заданными скачками искомых функций. Подобные задачи возникли в теории сейсмостойкости массивных сооружений, где они были получены путем математически строгих преобразований. Этих постановок нет в пакете и их реализация дает возможность решения «на ANSYS-овском уровне» целого класса задач, в которых существенными являются такие факторы как моделирование удаленных динамических источников типа сейсмических и моделирование оттока волн «на бесконечность». Особенно эффективно использование рассматриваемой модели, когда в задаче существенными являются оба фактора одновременно, т.е. моделирование задачи, которая известна как «задача сейсмостойкости массивного сооружения на основании».

2. Описание модели. Расчетная модель для определения напряженно-деформированного состояния (НДС) массивного сооружения (возможно с прилегающей областью основания), находящегося под сейсмической нагрузкой, предполагает одновременное решение двух взаимосвязанных проблем: задание источника возмущения, моделирующего сейсмическую активность района, и обеспечение в расчетной схеме оттока волн от исследуемой области в основание.

Первое означает, что в качестве возмущения необходимо использовать известные, например, смоделированные, сейсмограммы дневной поверхности будущего района строительства сооружения, как наиболее достоверную информацию о (возможном) сейсмическом источнике. Часто для задания возмущений такие сейсмограммы используются в виде краевых условий на границе расчетной области. В результате эта граница становится источником вторичных волн, которые существенно изменяют реальную волновую картину в исследуемой области.

Второе предполагает, что в расчетную схему заложен механизм взаимодействия с полубесконечным основанием, и тем самым обеспечен отток волновой энергии. Для массивных сооружений, геометрические размеры которых, как правило, сопоставимы с длинами входящих в возмущение волн, это весьма существенно, так как позволяет получить правильную картину волнового движения в сооружении и, тем самым, исключить излишние запасы прочности. В настоящее время известно несколько способов «моделирования бесконечности» при численных расчетах. *Однако для задач, подобных задаче моделирования сейсмостойкости массивных сооружений проблема состоит в том, чтобы обеспечить **одновременное** использование какого-либо из этих способов вместе с адекватным моделированием сейсмического источника.*

Расчетная модель, приводящая к задачам с заданными скачками искомых функций на некоторых границах внутри расчетной области, является, по-видимому, *самой адекватной механической постановкой, позволяющей учитывать оба отмеченных фактора одновременно.* В работе описано построение такой модели в рамках нестационарной линейной теории упругости. Для поставленной задачи получена вариационная постановка в свертках и выполнена ее конечно-элементная дискретизация, реализованная в виде программного комплекса. Обсуждается реализации подобных моделей в пакете ANSYS.

3. Реализация и описание результатов. Полученная постановка и ее конечно-элементная программная реализация позволяют решать задачу определения НДС «сооружения на основании», учитывая отток энергии в основание как при возмущении, вызванном сейсмическим источником, так и другими видами динамических источников. Реализованная схема расчета позволяет также решать любые другие задачи, где учет оттока волн от исследуемой области в окружающее пространство имеет существенное значение, например, в задаче о распространения поверхностной волны через карьер треугольной формы.

В докладе кратко приводится математический вывод постановок задач определения сейсмонапряженного состояния сооружений и конструкций как волновых задач теории упругости, что приводит к постановкам задач с заданными скачками искомых функций. Обсуждаются особенности конечно-элементной реализации, а также примеры тестовых и содержательных расчетов, выполненных в пакете ANSYS в рамках статических и динамических задач теории упругости с заданными скачками искомых функций.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ №13-08-96069-р_Урал_а.

**КОМПЬЮТЕРНОЕ И СТРАТОСФЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
КОСМИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ОТВЕРЖДЕНИЮ
ЭПОКСИДНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Демин А.А.¹, Кондюрин А.В.^{1,2}, Терпугов В.Н.^{1,3}

*1 - Пермский государственный национальный исследовательский
университет, Россия*

2 - Сиднейский университет, г.Сидней, Австралия

*3 - ООО "Лаборатория АРГУМЕНТ", Россия
TERPUGOV@psu.ru*

**COMPUTER AND STRATOSPHERIC MODELING OF THE SPACE
EXPERIMENTS ON THE CURED EPOXY COMPOSITES**

Diymin A.A.¹, Kondyurin A.V.^{1,2}, Terpugov V.N.^{1,3}

1 - Perm State University, Perm, Russia

2 - Sydney university, Sydney, Australia

3 - "Argument Laboratory" Llc, Russia

Рассматривается компьютерное моделирование (ANSYS) технологии создания больших космических объектов на орбите Земли посредством полимеризации композиционных материалов непосредственно в открытом космическом пространстве. Обсуждается возможность замены необходимого космического эксперимента стратосферным.

1. Введение. Использование технологии полимеризации композиционных материалов непосредственно в открытом космическом пространстве должно позволить создавать большие космические объекты на орбите Земли, на поверхности Луны и т.д. Однако структура и свойства полимерного материала зависят от процесса его формирования, а полимеризация в открытом космосе будет происходить в условиях высокого вакуума, резких перепадов температур и жесткого космического излучения. Перечисленные, а также некоторые другие отличия, характерные для околоземных орбит способны значительно изменить пути химических реакций и итоговые свойства полученного материала. Установление этих отличий является одной из целей настоящего исследования.

Выбор и экспериментальная проверка компонентов материала и условий полимеризации непосредственно в космосе на ранних стадиях исследований не представляется возможным вследствие высокой стоимости подобных экспериментов. Основным путем исследований является виртуальное моделирование. Необходимые для такого моделирования оценочные экспериментальные данные предлагается получать в экспериментах на земле и в стратосфере (30-40 км).

2. Описание результатов. В работе обсуждаются вычислительные и экспериментальные задачи, возникающие при создании технологии разворачивания крупногабаритных конструкций в открытом космосе путем ее

раздувания и последующей полимеризации. Обсуждается возможность установления количественных оценок необходимых параметров в экспериментах на земле, и формулируются условия на замену космического эксперимента по отверждению материала в открытом космосе стратосферным экспериментом. Описываются ряд экспериментов в стратосфере с предварительно незаполимеризованным препрегом (осуществлено несколько запусков). Впервые достигнута полная полимеризация препрега в условиях стратосферы, т.е. в условиях, имитирующих открытый космос. Проведено сравнение данного заполимеризованного в стратосфере препрега с его аналогом заполимеризованным в обычных условиях. Исследовано содержание гель фракции, сняты ИК-спектры, проведены динамические и статические испытания на изгиб и растяжение.

Исследования проводятся при поддержке грантов РФФИ №№ 15-01-07946 и 14-08-96011 р_урал_а.

**ЧИСЛЕННЫЕ ПРОЦЕДУРЫ НЕЛИНЕЙНОГО АНАЛИЗА
СТАТИЧЕСКОЙ И ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ
ИЗОТРОПНЫХ И ОРТОТРОПНЫХ МНОГОСЛОЙНЫХ ОБОЛОЧЕК**

Трушин С.И.¹, Сысоева Е.В.², Мокин Н.А.¹

1 - Московский государственный строительный университет, Россия

*2 - Московский государственный академический художественный
институт имени В.И.Сурикова, Россия
trushin2006@yandex.ru*

**NUMERICAL PROCEDURES FOR NONLINEAR ANALYSIS OF STATIC
AND DYNAMIC STABILITY OF ISOTROPIC AND ORTHOTROPIC
LAMINATED SHELLS**

Trushin S.I.¹, Sysoeva E.V.², Mokin N.A.¹

1 – Moscow State University of Civil Engineering, Russia

2 - Moscow State Academic Art Institute named after V.I. Surikov, Russia

Предложены численные процедуры для анализа статической и динамической устойчивости нелинейно деформируемых оболочек. Для дискретизации задачи используется вариационно-разностный метод. Интегрирование уравнений движения выполняется методами Ньюмарка и Вилсона, нелинейная задача решается с помощью метода Ньютона-Рафсона. Разработанная теория оболочек и численные алгоритмы используются для статического и динамического анализа гибких пластин и пологих цилиндрических оболочек, оценки динамической устойчивости сферических оболочек.

Some numerical procedures for nonlinear analysis of vibration and dynamic buckling of shells are proposed. The finite difference energy method of discretization is used for reducing the initial continuum problem to finite dimensional problem. Newmark and Wilson methods are used for integration of dynamic equations, in nonlinear analysis Newton-Raphson method is used for the correction of results. The theory of shells and numerical methods have been used for investigation of nonlinear static and dynamic behavior of plates and shallow cylindrical shells, dynamic buckling of spherical shells.

В работе построены исходные геометрические соотношения нелинейной теории оболочек с учетом деформаций поперечного сдвига и обжатия по толщине для тонких и средней толщины оболочечных конструкций [1].

Для решения нелинейных задач статической устойчивости теории пластин и оболочек, определения предельных и бифуркационных точек на кривой равновесных состояний и изучения поведения конструкций в закритической стадии разработаны эффективные схемы метода продолжения по параметру [2], основанные на процедурах Ньютона-Рафсона, Рунге-Кутта, самокорректирующейся схемы метода Рунге-Кутта.

Предложена методика решения задач о колебаниях и динамической устойчивости оболочечных конструкций в геометрически нелинейной постановке. Дискретизация функции Лагранжа осуществляется на основе вариационно-разностного подхода.

Для решения системы нелинейных уравнений движения построен

эффективный алгоритм, базирующийся на методах прямого интегрирования Ньюмарка и Вилсона в сочетании с методом Ньютона-Рафсона. Исследованы свободные колебания пластинки и цилиндрических панелей при больших амплитудах колебаний. Решены задачи динамической устойчивости нелинейно деформируемых пологих сферических оболочек.

Условие стационарности дискретного аналога действия по Гамильтону записывается в виде уравнений Эйлера:

$$\mathbf{M}\mathbf{u} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{u} = \mathbf{P}, \quad (1)$$

где $\mathbf{u}$ – вектор узловых перемещений; $\mathbf{M}$ – матрица масс; $\mathbf{C}$ – матрица демпфирования; $\mathbf{K}$ – матрица жесткости (матрица Гессе дискретного аналога потенциальной энергии деформации системы); $\mathbf{P}$ – вектор узловых нагрузок. В данной постановке матрица масс включает в себя слагаемые, связанные с углами поворота поперечных сечений оболочки.

Для решения уравнений (1) применен метод Ньюмарка в форме безусловно устойчивой схемы постоянного среднего ускорения ($\delta = 1/2$, $\alpha = 1/4$). Учет нелинейного характера геометрических соотношений в рамках метода Ньюмарка при решении задачи динамики осуществляется корректировкой решения по методу Ньютона-Рафсона на каждом шаге по времени:

$$\left(\frac{4}{\Delta t^2} \mathbf{M} + \frac{2}{\Delta t} \mathbf{C} + \nabla^2 W(\mathbf{u}_m^{(k)}) \right) \Delta \mathbf{u}_m^{(k+1)} = \boldsymbol{\delta}_m^{(k)}; \quad \mathbf{u}_m^{(k+1)} = \mathbf{u}_m^{(k)} + \Delta \mathbf{u}_m^{(k+1)}; \\ \text{где } \boldsymbol{\delta}_m^{(k)} = \Delta p_m \mathbf{Q} - \bar{\mathbf{Q}}_m^{(k)}; \quad \bar{\mathbf{Q}}_m^{(k)} = \mathbf{K}^* (\mathbf{u}_m^{(k)} - \mathbf{u}_m^0) + \nabla W(\mathbf{u}_m^{(k)}) - \nabla W(\mathbf{u}_m^{(k)}); \quad (2) \\ \mathbf{K}^* = \left(\frac{4}{\Delta t^2} \mathbf{M} + \frac{2}{\Delta t} \mathbf{C} \right); \quad \mathbf{Q} = 2\mathbf{M}\mathbf{u}_1^{(0)} + \left(\frac{4}{\Delta t} \mathbf{M} + 2\mathbf{C} \right) \dot{\mathbf{u}}_1^{(0)} + \Delta \mathbf{P}(t).$$

В формулах (2) ∇W – градиент потенциальной энергии деформации; $\nabla^2 W$ – матрица Гессе; Δt – шаг по времени; Δp – приращение параметра нагрузки; k – номер итерации; m – номер шага нагружения.

Дана оценка сходимости методов Ньюмарка и Вилсона на примере решения уравнений динамики гибкой полой оболочкой. Отмечен эффект искусственного затухания колебаний при использовании алгоритма метода Вилсона в случае превышения соотношением $\Delta t/T$ (T – период колебаний) определенного критического значения.

Литература

1. Mileikovskii I.E., Trushin S.I. Analysis of Thin-Walled Structures. Rotterdam: A.A. Balkema Publishers, 1994. 187 pp.
2. Crisfield M.A. A Fast Incremental/Iterative Solution Procedure that Handles “Snap-Through” // Computers & Structures, 1981, Vol.13, N1, pp.55-62.

УЧЕТ ДЕМПФИРОВАНИЯ В ЗАДАЧАХ ОЦЕНКИ СЕЙСМОСТОЙКОСТИ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

*Уздин А.М.¹, Воробьева К.В.¹, Нестерова О.П.¹, Никонова Н.В.¹,
Федорова М.Ю.²*

*1 - Петербургский государственный университет путей сообщения,
Россия*

*2 - Санкт-Петербургский государственный университет, Россия
uzdin@mail.ru*

DAMPING ACCOUNTING FOR TASKS OF STRUCTURE EARTHQUAKE STABILITY

*Uzdin A.M.¹, Vorobyova K.V.¹, Nesterova O.P.¹, Nikonova N.V.¹,
Fedorova M.Yu.²*

1 - Petersburg Transport University, Russia

2 – St.Petersburg State University, Russia

Рассматриваются методы построения матриц демпфирования для расчета сооружений, разложение уравнений движения по формам колебаний и способы решения собственной проблемы с учетом специфики структуры матрицы собственных векторов систем с линейным демпфированием

Methods of building damping matrixes for estimating earthquake structure stability are considered. Mode expansion and eigenvalue problem taking into account the structure of eigen vector matrixes are analyzed.

1. Введение. В задачах сейсмостойкого строительства приходится сталкиваться с проблемой учета демпфирования. Даже для обычных зданий надо, как минимум, учитывать затухание в здании и грунтах основания. На практике наиболее часто возникают следующие задачи: учет внутреннего трения в материале сооружения и основания, учет геометрического рассеяния энергии в основании за счет ее уноса упругими волнами и учет рассеяния энергии в специальных демпфирующих устройствах.

2. Построение матрицы демпфирования и уравнения колебаний.

Наиболее просто учесть этот вид демпфирования с использованием обобщенной гипотезы Е.С.Сорокина о пропорциональности матриц демпфирования и жесткости элементов конструкции. В этом случае, если задать вместо модуля упругости E_s s -го элемента соответствующее произведение $\gamma_s E_s$, то на выходе вместо матрицы жесткости $\mathbf{R}$ получим матрицу демпфирования по Сорокину $\mathbf{B}_c$. Уравнение движения по Сорокину представляется в комплексной форме и имеет вид

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}}^* + (\mathbf{B}_c \mathbf{i} + \mathbf{R})\dot{\mathbf{q}}^* = -\mathbf{M}\ddot{\mathbf{Y}}_0^* \quad (1)$$

Здесь $\mathbf{B}_c$ – матрица гистерезисного демпфирования по Е.С.Сорокину; символом $*$ обозначены комплексные значения обобщенных перемещений и возмущений, $\mathbf{M}$ – матрица инерции системы, $\mathbf{R}$ – матрица жесткости.

Известны недостатки уравнения (1), поэтому затухание по Е.С.Сорокину

заменяют эквивалентным вязким. Рассмотрено два вида такой замены

$$\mathbf{B}_{\text{экв}} = \mathbf{B}_c \mathbf{X}^{-1} \mathbf{K} \mathbf{X} \quad \text{и} \quad \mathbf{B}_{\text{пр}} = \mathbf{M} \mathbf{X}^{-1} \chi \mathbf{X} = \mathbf{M} \mathbf{X}^{-1} \mathbf{\Gamma} \mathbf{K} \mathbf{X} \quad (2)$$

где $\mathbf{X}$ —матрица собственных векторов недемпфированной системы,

$\mathbf{K}^2 = [\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n] = \mathbf{\Lambda}$ - диагональная матрица собственных чисел матрицы $\mathbf{M}^{-1} \mathbf{R}$, $\mathbf{\Gamma} = [\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n]$ - матрица модальных коэффициентов неупругого сопротивления..

С учетом (2) получаем вещественную систему уравнений, эквивалентную (1):

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{B}_{\text{экв}} \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{R} \mathbf{q} = -\mathbf{M} \ddot{\mathbf{Y}}_0 \quad (3)$$

Т.о., для учета внутреннего трения в материале, базовым является использование обобщенной гипотезы Сорокина, позволяющей построить матрицу $\mathbf{B}_c$ и переход к матрицам вязкого демпфирования по формулам (2).

Рассеяние энергии за счет ее геометрического излучения в основание. при вертикальных и сдвиговых колебаниях является частотно зависимым и удовлетворительно описывается вязким демпфированием. Для поворотных колебаний зависимость от частоты оказывается более сложной, но в приемлемом диапазоне частот может рассматриваться как частотно независимое. В рамках МКЭ геометрическое рассеяние учитывается постановкой по контуру расчетной области основания демпфирующей границы. Обычно матрица демпфирования оказывается непропорциональной и ее элементы приводят к затуханиям, значительно превосходящим величину 0.3. В результате формулы (2) могут приводить к разным результатам.

Ограниченная возможность применения формул (2) характерна и при использовании специальных демпферов.

3. Разложение уравнений движения по формам колебаний

Только для внутреннего трения в материале допустимо приближенное разложение уравнений по формам колебаний недемпфированной системы. В связи с этим в практике строительных расчетов стали появляться методики и программы вычисления комплексных собственных чисел и векторов рассматриваемых систем. При этом приходится работать с полными матрицами $\mathbf{A}$ систем (1) и (3). В распространенных программных комплексах, кроме ПК «Микрофе», решения комплексной собственной проблемы не предусматриваются.

В докладе рассмотрено два метода определения комплексных собственных чисел и векторов. Оба метода исходят из начального приближения собственных чисел λ и собственных векторов $\mathbf{x}$ для недемпфированной системы. Первый метод исходит из того, что начальное приближение имеет малую погрешность, которая итерационно уточняется. Второй подход использует известный метод Лавренье. В случае систем с разряженным спектром каждое начальное приближение обеспечивает сходимость к соответствующему собственному вектору.

Критерием применимости приближенного способа учета демпфирования могут служить коэффициенты корреляции форм колебаний ε_{ij} . Если $\varepsilon_{ij} < 0.2$ можно пренебречь влиянием демпфирования на формы колебаний.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В
МЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ В УСЛОВИЯХ ПОТЕПЛЕНИЯ КЛИМАТА**

Улитин В.В.

*Санкт-Петербургский национальный университет Информационных
технологий, точной механики и оптики, Россия
vvulitin@mail.ru*

**MODELLING OF THERMOMECHANICAL PROCESSES IN FROZEN
SOILS IN THE FACE OF GLOBAL WARMING**

Ulitin V.,

*Saint Petersburg National Research University of Information Technologies,
Mechanics and Optics, Russia*

Рассматривается криолитозона России в условиях потепления климата и влияние деградации мерзлоты на состояние строительных сооружений, мостов, автомобильных железных дорог и трубопроводов. Дается методика моделирования термомеханических процессов и прогнозирования результатов. Рассматриваются методы термостабилизации мерзлых грунтов.

1. Криолитозона России в условиях потепления климата. Криолитозона представляет собой сезонно протаивающие многолетнее мерзлые грунты, которые в летнее время протаивают на некоторую глубину. Различают сплошную мерзлоту и мерзлоту островного характера [1]. Общая характеристика мерзлоты определяется двумя параметрами: толщиной слоя и температурой на глубине 10 м. В районах сплошной мерзлоты глубина колеблется от 100 до 1500 м., а температура от – 3 до -10 С°. Глубина протаивания в зависимости от среднегодовой температуры колеблется от 0.5 до 2.0 м. Потепление климата влияет на глубину протаивания. Однако это влияние, как правило, незначительно и тем меньше, чем больше толщина и ниже температура слоя. Потепление климата существенно интенсифицирует местные процессы деградации мерзлоты на южных склонах, на берегах рек, озер и морей. В зависимости от местного строения грунтов возникают просадки и пучения грунтов, термокарст и талики.

В районах, примыкающих к северным морям, выделяют морской тип мерзлоты, который отличается большим количеством сильно засоленных грунтов. В большом числе встречаются криопэги – водоносные горизонты с высоким содержанием солей, которые не замерзают при окружающих низких температурах.

В районах с островным характером мерзлоты при потеплении климата деградация мерзлоты происходит наиболее интенсивно. При потеплении климата южная граница криолитозоны сдвигается и необходимо учитывать деградацию мерзлоты с учетом дрейфа границы. Проектирование необходимо вести с учетом изменения состояния мерзлоты вплоть до полного её

исчезновения.

2. Моделирования процессов в мерзлых грунтах. Многолетнее мерзлые грунты представляет собой сложные гетерогенные структуры. Их физические свойства зависят от температуры и агрегатного состояния. Фазовые переходы являются неизотермическими и происходят в некотором диапазоне температур. Таким образом, математическая модель представляет собой нестационарную физически нелинейную задачу теплопроводности с неизотермическими фазовыми переходами.

Известные методы моделирования задач геокриологии основываются на решении линейных задач теплопроводности с изотермическими фазовыми переходами типа известной задачи Стефана. При этом делается целый ряд допущений, и результат не позволяет отразить реальные свойства грунтов и надежно прогнозировать их поведение [2].

. Поэтому для моделирования процессов в геокриологии используется метод элементарных объемов (МЭО) - это универсальный шаговый метод решения нестационарных физически нелинейных задач [3]. Суть метода состоит в том, что рассматриваемая часть пространства разбивается на столь малые части (ячейки), а время на столь малые промежутки, что для описания процессов, в каждой ячейке в каждом промежутке времени, можно использовать элементарные физические законы. Эти законы могут быть описаны любыми аналитическими выражениями, алгоритмами, таблицами или графиками.

3. Термостабилизации мерзлых грунтов в условиях потепления климата. Для предотвращения деградации мерзлоты применяются те или иные методы термостабилизации путем охлаждения грунта за счет искусственного или естественного холода. Последнее предпочтительно, поскольку не требует затрат энергии. Наиболее широкое применение нашли парожидкостные сезонные охлаждающие устройства (СОУ). Поэтому оптимизация их конструкции представляет собой весьма актуальную задачу. Однако теория работы СОУ разработана недостаточно. Концепция приведенного коэффициента теплопередачи зачастую приводит к весьма противоречивым результатам [4]. На основе метода элементарных объёмов разработана термомеханическая модель СОУ [1] и создана теоретическая основа для надежного расчета подобных устройств с достаточно адекватным описанием всех теплофизических процессов, как протекающих внутри, так при взаимодействии с окружающим грунтом, и разработана методика расчета и создания оптимальных конструкций СОУ.

Литература

1. Цытович Н.А. Механика мерзлых грунтов. – М.: Высшая школа, 1973. 448 с.
2. Общее мерзлотоведение (геокриология), изд. 2, переработанное и дополненное. Учебник. Под ред. В.А. Кудрявцева, М.: Изд-во МГУ. 1979. 564 с.
3. Улитин В.В. Метод элементарных объемов при решении нелинейных задач теплопроводности и геокриологии: монография. – СПб.: Изд-во «Парк Ком», 2013. 170 с.
4. Макаров В.И. Термосифоны в северном строительстве. – Новосибирск: Наука. 1985. 167 с.

**ТЕХНИЧЕСКОЕ И ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ
ТЕХНОЛОГИИ ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИИ МЕРЗЛОТЫ В УСЛОВИЯХ
ПОТЕПЛЕНИЯ КЛИМАТА**

Скрипнюк Д.Ф.¹, Улитин В.В.²

*1 - Санкт-Петербургский политехнический университет Петра
Великого, Россия*

*2 - Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет
информационных технологий, механики и оптики, Россия
vvulitin@mail.ru*

**TECHNICAL AND ECONOMIC FEASIBILITY OF PERMAFROST
THERMAL STABILIZATION TECHNOLOGY UNDER THE
CONDITIONS OF CLIMATE WARMING**

Skripnuk D.¹, Ulitin V.V.²

1 - Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia

*2 - Saint Petersburg National Research University of Information Technologies,
Mechanics and Optics, Russia*

Статья посвящена технико-экономическому обоснованию технологии температурной стабилизации вечномёрзлых грунтов в условиях потепления климата. В статье анализируются основные методы термостабилизации мерзлоты и предлагается методика технико-экономической оценки выбора технологии термостабилизации мерзлоты с включением вероятностных величин в условиях потепления климата.

The article is dedicated to the feasibility of temperature stabilization technology of permafrost under the conditions of climate warming. The article analyzes the basic methods of thermal stabilization of permafrost and gives the technique of technical and economic assessment of the choice of permafrost technology thermal stabilization with the inclusion of probability values under the conditions of climate warming.

Потепление климата существенно интенсифицирует процессы деградации мерзлоты [1]. В зависимости от местного строения грунтов возникают просадки и пучения грунтов, термокарст, талики. Всё это нарушает работу дорог, трубопроводов зданий и сооружений. Для предотвращения деградации мерзлоты применяются те или иные методы термостабилизации путем охлаждения грунта за счет искусственного или естественного холода.

Охлаждение грунта искусственным холодом требует источник энергии, холодильную установку, хладоноситель, насосы и трубопроводы для перекачки хладоносителя и колонки для охлаждения грунта. Для установки колонок пробуриваются специальные скважины. Источником энергии может служить внешняя сеть или любая мобильная установка. Искусственный холод в большинстве случаев применяется для решения кратковременных задач на период строительства. При необходимости длительной

термостабилизации он применяется для периодической подкачки холода в грунт.

Таким образом, для термостабилизации искусственным холодом требуется достаточно большое число различных технических устройств и затраты энергии. Требуемый объем замороженного грунта может быть получен при любых климатических условиях.

Охлаждение грунта естественным холодом производится передачей в грунт атмосферного холода, когда температура воздуха существенно ниже температуры грунта. Для этого используются различные термосифоны [2]. Наиболее широкое применение нашли парожидкостные сезонные охлаждающие устройства (СОУ). Они представляют собой тонкую трубу, большая часть которой погружена в грунт. Надземная часть естественно обдувается воздухом. Для улучшения теплообмена в верхней части трубы имеются ребра. Труба заполняется хладагентом, который при положительных температурах находится в виде газа, а при охлаждении до температуры конденсации верхней части трубу конденсируется и в виде пленки стекает вниз, где нагревается от грунта и испаряется, отдавая свой холод грунту. Поэтому верхнюю часть называют конденсатором, а нижнюю – испарителем.

Таким образом, затраты на установку СОУ складываются из стоимости трубы, хладагента, бурения и установки трубы в грунт.

Использование искусственного холода позволяет замораживать грунт в любое время с любой интенсивностью и позволяет существенно снизить сроки строительства. Естественный холод возникает только в зимнее время. Поэтому результат замораживания зависит от зимней температуры и проявляется в полной мере весной. Качественная термостабилизация обеспечивает достаточный объем замороженного грунта вплоть до новой зимы. Результат зависит от годового климатического цикла. Кроме того, необходимо обеспечить необходимую долговечность и надежность СОУ.

В целом применение данных технологий позволяет сократить сроки и стоимость возведения нулевого цикла строительства, сократить площадь застройки, а также обеспечить надежную эксплуатацию объектов месторождения.

Методика технико-экономической оценки выбора технологии термостабилизации мерзлоты базируется на вычислении модифицированных показателей NPV, MIRR и PBP с включением вероятностных величин.

NPV (Net Present Value, Чистая приведенная стоимость) рассчитывается с использованием прогнозируемых денежных потоков, связанных с планируемыми инвестициями, дисконтируя денежный поток на вероятность потепления климата и на фактор влияния времени. MIRR (Модифицированная внутренняя норма рентабельности) определяется как норма дохода, при которой все ожидаемые доходы, приведённые к концу проекта, имеют текущую стоимость, равную стоимости всех требуемых затрат. PBP (Срок окупаемости проекта) - время, требуемое для покрытия начальных инвестиций за счет чистого денежного потока, генерируемого инвестициями, показывает срок, необходимый для того, чтобы доходы,

генерируемые инвестициями, с учетом дисконтирования, покрыли затраты на инвестиции. Этот показатель определяется последовательным расчетом NPV для каждого периода проекта, точка, в которой NPV станет положительным, будет являться точкой окупаемости

Литература

1. Arctic Climate Impact Assessment.(ACIA). Программа по оценке климатических воздействий в Арктике. Изд-во Кембриджского университета, Эдинбург Билдинг, Кембридж, CB2 2RU, Великобритания, 40, 20-я Западная стрит, Нью-Йорк, 10011-4211, США.- 2004.
2. Макаров В.И. Термосифоны в северном строительстве. – Новосибирск: Наука. 1985. 167 с.

УДК 539.4

ЭФФЕКТЫ ОТКОЛЬНОГО РАЗРУШЕНИЯ И СТРУКТУРНО-ВРЕМЕННОЙ ПОДХОД

Уткин А.А.^{1,2}

*1 - ФГБУН Институт проблем машиноведения Российской академии,
Россия*

*2 - Санкт-Петербургский государственный университет, Россия
A.Utkin51@gmail.com*

**EFFECTS OF SPALL FRACTURE AND STRUCTURAL-TIME
APPROACH**

Utkin A.A.^{1,2}

1 - Institute of Problems of Mechanical Engineering Russia

2 - Saint Petersburg State University, Russia

Рассмотрены некоторые эффекты откольного разрушения, наблюдаемые в экспериментальных исследованиях. Среди них стабилизация прочности. По достижению некоторой скорости нагружения значение динамической прочности перестает увеличиваться. При увеличении скорости деформирования динамическая прочность образует «горизонтальную площадку». Далее было обнаружено, что напряжение в сечении откола может линейно нарастать вплоть до момента разрушения, или происходит быстрое растяжение материала с последующим его разрушением при почти постоянной нагрузке. Иногда разрушение происходит в момент когда локальные напряжения в сечении откола начинают уменьшаться. Для каждого из этих эффектов авторами дается свое объяснение.

Показано, что применение структурно-временного подхода к анализу откола позволяет объяснить все эти эффекты с единой точки зрения.

Работа выполнена при поддержке грантов 13-01-00598-а и 14-01-00814-а и гранта СПбГУ 6.38.243.2014.

МЕТОДИКА ЧИСЛЕННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ БОЛЬШИХ ДЕФОРМАЦИЙ ГИПЕРУПРУГИХ ТЕЛ

*Абдрахманова А.И., Саченков О.А., Султанов Л.У., Фахрутдинов Л.Р.,
Шакирова А.Т.*

*Казанский Федеральный Университет, Россия
bishchumbek@gmail.com*

METHODS OF NUMERICAL INVESTIGATION OF LARGE DEFORMATIONS OF HYPERELASTIC SOLIDS

*Abdrakhmanova A.I., Sachenkov O.A., Sultanov L.U., Fakhrutdinov L.R.,
Shakirova A.T.*

Kazan Federal University, Russia

В данной работе рассматривается методика исследования конечных деформаций гиперупругих материалов с использованием меры деформации Фингера. Приводится кинематика движения среды. Большое внимание уделяется алгоритму получения линеаризованных определяющих соотношений в напряжениях Коши-Эйлера. Численная реализация приводится в рамках инкрементального метода. Рассматривается пример нахождения определяющих соотношений для модели гиперупругого материала.

In the present paper the technique of investigation of large deformations using the Finger strain measure is considered. The kinematics of motion of continua is given. Great attention is paid to obtain the algorithm of the linearized constitutive equations in terms of the Cauchy - Euler stresses. Numerical implementation is given within the framework of incremental method. There is an example of obtaining the linearized physical ratio for hyperelastic material model.

Тензор градиента деформаций (F) играет ключевую роль в кинематике конечных деформаций. Данный тензор определяет связь элементарных отрезков в деформированном и недеформированном состояниях.

В качестве тензоров, описывающих деформацию и скорость деформации, используются: левый тензор Коши – Грина (мера деформации Фингера) $(B) = (F) \cdot (F)^T$, тензор пространственного градиента скорости $(h) = (\dot{F}) \cdot (F^{-1})$, тензор деформации скорости $(d) = \frac{1}{2}[(h) + (h)^T]$.

Напряженное состояние описывается с помощью тензора истинных напряжений $(\Sigma) = \sigma_{ij}(\vec{e}_i \vec{e}_j)$, определенного в актуальном состоянии.

Вводится функция потенциальной энергии деформации, зависящая от компонент тензора меры деформации Фингера: $W = W_0(J) + W'(I_{1\hat{B}}, I_{2\hat{B}})$. Здесь $(\hat{B}) = J^{-2/3}(B)$ – меры деформации, которые не сопровождаются изменением объема, $J = dV/dV_0$ – относительное изменение объема. С учетом этого тензор напряжений Коши-Эйлера принимает вид: $(\Sigma) = \frac{2}{J}(B) \cdot \left(\frac{\partial W}{\partial B} \right)$.

Выражение для скоростей изменения напряжений Коши-Эйлера:

$$(\dot{\Sigma}) = (\Lambda_{\Sigma}) \cdot (d) + (h) \cdot (\Sigma) + (\Sigma) \cdot (h)^T - (\Sigma) I_{1d}.$$

$$\text{Здесь } (\Lambda_{\Sigma}) = (\Lambda_{\Sigma'}) + (\Lambda_{\sigma_0}), \Lambda_{\Sigma'} = \frac{4}{J}(B) \cdot \left(\frac{\partial^2 W'}{\partial B \partial B} \right), \Lambda_{\sigma_0} = \frac{4}{J}(B) \cdot \left(\frac{\partial^2 W_0}{\partial B \partial B} \right).$$

Задача нахождения вектора перемещений решается методом последовательных нагружений. В качестве базового уравнения используется уравнение виртуальных мощностей, записанного для $(k+1)$ шага:

$$\iiint_{V_{k+1}} ({}^{k+1}\Sigma) \cdot (\delta {}^{k+1}d) dV = \iiint_{V_{k+1}} {}^{k+1}\vec{f} \cdot \delta \vec{v} dV + \iint_{S_{k+1}^{\sigma}} {}^{k+1}\vec{t}_n \cdot \delta \vec{v} dS,$$

где V_{k+1} – текущий объем; S_{k+1}^{σ} – часть его поверхности, на которой заданы усилия $\vec{f}, \vec{t}_n$ – векторы массовых и поверхностных сил.

Переходя к приращениям в базовом уравнении $({}^{k+1}\Sigma) = ({}^k\Sigma) + (\Delta {}^k\Sigma)$, и решая его, получаем вектор перемещений для текущего шага $\Delta {}^k\vec{u} = \Delta {}^k x_i \vec{e}_i$, с помощью которого определяется конфигурация следующего шага: ${}^{k+1}\vec{R} = {}^k\vec{R} + \Delta \vec{u}$. Напряженное состояние находится по соотношению:

$$({}^{k+1}\Sigma) = \frac{2}{J}({}^{k+1}B) \cdot \left(\frac{\partial W}{\partial {}^{k+1}B} \right).$$

Рассмотрен пример построения физических соотношений для гиперупругого материала, описанного при помощи потенциала упругих деформаций вида: $W = U_1(I_{1B} - 3) + U_2(I_{2B} - 3) + \frac{K}{2}(J - 1)^2$.

Здесь $W_0(J) = \frac{K}{2}(J - 1)^2$, $W'(I_{1B}, I_{2B}) = U_1(I_{1B} - 3) + U_2(I_{2B} - 3)$, где U_1, U_2 – постоянные материала. Тензор напряжений Коши-Эйлера, в этом случае, принимает вид:

$$(\Sigma) = 2U_1 J^{-\frac{5}{3}} \left[(B) - \frac{1}{3} I_{1B}(I) \right] + 2U_2 J^{-\frac{7}{3}} \left[I_{1B}(B) - \frac{1}{3} I_{1B}^2(I) - \frac{2}{3} (B^2) \right] + K(J - 1)(I).$$

Для заданного материала:

$$\begin{aligned} (\Lambda_{\Sigma}) &= (\Lambda_{\Sigma'}) + (\Lambda_{\sigma_0}) = \frac{4}{3} J^{-\frac{5}{3}} U_1 \left\{ \frac{1}{3} I_{1B}(I)(I) - (I)(B) - (B)(I) + I_{1B}(C_{II}) \right\} + \\ &+ \frac{4}{3} J^{-\frac{7}{3}} U_2 \left\{ \frac{2}{3} I_{1B}^2(I)(I) - 2I_{1B}(I)(B) + \frac{4}{3} (I)(B^2) + 3(B)(B) - 2I_{1B}(B)(I) - \right. \\ &\left. - I_{1B}^2(C_{II}) - 2(B) \cdot (C_{II}) \cdot (B) \right\} + K \{ (J - 1)(I)(I) + J(I)(I) + 2(J - 1)(C_{II}) \}. \end{aligned}$$

После подстановки приведенных выше данных в выражение для скорости изменения напряжений Коши – Эйлера получена система уравнений, для определения напряженного состояния заданного материала, которая может быть дискретизирована методом конечных элементов для получения численных решений.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов №: 15-41-02557, 15-31-20602.

ХРОНОМЕХАНИКА ДЕФОРМИРОВАНИЯ И ПРОЧНОСТИ НАНОМАТЕРИЛОВ

Федоровский Г.Д.

Санкт-Петербургский государственный университет, Россия

g.fedorovsky@spbu.ru

THE CHRONOMECHANICS OF DEFORMATION AND STRENGTH OF NANOMATERIALS

Fedorovsky G.D.

The Saint-Petersburg State University, Russia

На основе системного феноменологического эндохронного метода, построены новые определяющие аналитические зависимости физико-механо-временных деформативных и прочностных свойств ряда наноматериалов и исходных структур.

1. Введение. Оценку и сопоставление упруговязкопластических характеристик наноматериалов [1, 2 и др.] и исходных структур чаще всего проводят ограничено, фрагментарно: по отдельным точечным характеристикам (пределу текучести, временному сопротивлению и т.д.) условных или истинных диаграмм разрушения при постоянной скорости деформации, отражающих релаксацию напряжения при этой скорости. Для многих научных задач такие исследования недостаточны.

Развитие применения современного, интенсивно используемого во всех передовых странах, фундаментального феноменологического эндохронного подхода [3] ко всем точкам диаграмм разрушения или к их континуальным отрезкам, как и к непрерывным кривым характеристик других видов испытания (ползучесть, немонокотное деформирование), дает возможность получить более полную и эффективную системную оценку определяющих свойств наноматериалов.

2. Построение эндохронных аналитических моделей взаимосвязи определяющих деформативных и прочностных свойств исходных и наноструктурированных сред по данным диаграмм разрушения и параметров структуры. Зависимости напряжения σ от времени t диаграмм при $\dot{\varepsilon}(t) = \text{const}$ (ε - деформация) имеют вид:

$$\sigma(t) = D_i(t), \quad \sigma(t) = D_n(t). \quad (1)$$

Здесь D_i и D_n - определяющие функции диаграмм исходного и наноструктурированного материала. Введем определяющий параметр структуры S со значениями $s_0 = s_i, s_1, s_2, \dots, s_k = s_n$ при разных степенях структурирования. Тогда (1) можно представить в форме:

$$\sigma(t) = D_{s_i}(t), \quad \sigma(t) = D_{s_n}(t) \text{ или } \sigma(t) = D_{s_k}(t). \quad (2)$$

Сравнение диаграмм исходного и наноструктурированных материалов показывает их существенное различие по оси ординат и абсцисс. Для расширенного описания диаграмм, а также их отдельных участков, по

эндохронной (собственного, внутреннего, обобщенного времени) концепции предлагается введение и поэтапное применение «сложных», зависящих от двух параметров, вертикального $g_k^v(s_k, t)$ и горизонтального $g_k^h(s_k, t)$ масштабов или «простых» масштабов $g_k^v(s_k)$ и $g_k^h(s_k)$, зависящих только от одного (первого) параметра. Применена следующая нормировка масштабов. $g_k^v(s_k, 0) = g_k^h(s_k, 0) = 1$, $g_i^v(s_i, t) = g_i^h(s_i, t) = 1$. Вертикальный масштаб g_k^v предназначен для получения значений ординат промежуточной фиктивной диаграммы D_{ik} по ординатам исходной диаграммы D_i путем умножения последних на этот масштаб. g_k^v определяют из условия, чтобы значение преобразованной последней ординаты диаграммы D_{ik} совпадало со значением последней ординаты диаграммы D_k . Таким образом

$$D_{ik}(t) = g_{s_k}^v(s_k, t) \cdot D_i(t). \quad (3)$$

Следующим шагом является преобразование аргумента t фиктивной функции (диаграммы) D_{ik} посредством его горизонтального масштабирования: заменой t на обобщенное время вида $\xi_k^v(t) = g_k^v \cdot t$. g_k^h находят из условия, чтобы фиктивная диаграмма D_{ik} была преобразована в диаграмму D_k :

$$D_k(t) = D_{ik}[\xi_k^v(t)]. \quad (4)$$

Значения масштабов g_k^v и g_k^h математически характеризуют величины превышения или уменьшения ординат и абсцисс участков диаграммы D_k по сравнению с характеристиками D_i . Их, как D_i и D_k , можно считать емкими определяющими параметрами структуры и механических свойств наносред.

Рассмотренный подход подтверждается данными статьи [4].

Благодарности. Работа выполнена при частичной поддержке грантов РФФИ 13-01-00598, 14-01-00823, а также по гранту Правительства РФ по Постановлению 220, Договору 14.В.25.31.0017.

Литература

1. Nanostructures: Physics and Technology. – Proceedings of the 3rd International Symposium (Saint-Petersburg, Russia, June 22-26, 2015). – St.-Petersburg: Academic University Publishing, 2015. – 254 p.
2. Валиев Р.З., Александров И.В. Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. – 398 с.
3. Кадашевич Ю.И., Помыткин С.П. Этапы развития эндохронной теории неупругости // Упругость и неупругость (Материалы Международного научного симпозиума по проблемам механики деформируемых тел, посвящ. 100-летию со дня рожд. А.А. Ильюшина. Москва, 20–21 января 2011 г.). – М.: Изд. Моск. ун-та, 2011. – С. 232-235.
4. Федоровский Г.Д. Математические модели зависимости деформативных, прочностных и временных свойств полимерного нанокомпозита от содержания наполнителя фуллерена C60. // Вестник ИНЖЭКОНА, серия «Технические науки», 2013, вып. 8 (67). – С. 23-26.

**ПРИРОДА И ВОЗМОЖНЫЕ МЕХАНИЗМЫ ВОЗНИКНОВЕНИЯ
ФОНА ДИССИПАТИВНЫХ ПОТЕРЬ НА СПЕКТРАХ ВНУТРЕННЕГО
ТРЕНИЯ АМОРФНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Бугаев Н.М.¹, Горшков А.А.², Ломовской В.А.², Фомкина З.И.²

1 - Московский авиационный институт (НИИ), Россия

*2 - Московский государственный университет тонких химических
технологий имени М.В. Ломоносова, Россия
ag60341@gmail.com*

**NATURE AND POSSIBLE MECHANISMS OF DISSIPATIVE LOSSES
BACKGROUND OCCURRENCE ON SPECTRA OF AMORPHOUS
POLYMERIC MATERIALS INTERNAL FRICTION**

Bugaev N.M.¹, Gorshkov A.A.², Lomovskoy V.A.², Fomkina Z.I.²

1 - Moscow Aviation Institute (NRU), Russia

2 - Lomonosov Moscow University of Fine Chemical Technology, Russia

Рассмотрены механизмы и природа возникновения фона амплитудно и частотно независимого участка диссипативных потерь гистерезисного типа на спектре внутреннего трения аморфных полимерных материалов. Теоретический анализ проведен на основе модели слабоветвленного линейного полимера при отсутствии межмолекулярного взаимодействия между цепями.

Mechanisms and nature of amplitude and frequency independent region of hysteretic type dissipative losses background on the spectrum of amorphous polymeric materials internal friction is considered. Theoretical analysis is carried out on the basis of low-branched linear polymer in absence of intermolecular interaction between the chains.

Анализ диссипативных процессов по спектрам внутреннего трения в различных по химической природе кристаллических и аморфных полимерных материалах показывает, что на этих спектрах наблюдается фон потерь и пики потерь различной интенсивности, которые накладываются на этот фон при разных температурах. Теоретический анализ температурной зависимости фона показывает, что общим явлением для этого фона у различных материалов является наличие участка диссипативных потерь в низкотемпературной области, интенсивность потерь на котором (в гуковской области деформирования) не зависит от амплитуды и частоты внешнего деформирующего воздействия. Для кристаллических систем этот участок фона очень слабо и монотонно возрастает при низких значениях гомологической температуры. Для аморфных полимерных систем нет такого термодинамического параметра, как гомологическая температура, т.к. в данных системах нет фонового перехода первого рода. Эти системы характеризуются температурой структурного и механического стеклования. Температура структурного стеклования зависит от скорости охлаждения, а температура механического стеклования – от частоты (периода) внешнего деформирующего воздействия, выводящего исследуемую систему из

состояния термодинамического и механического равновесия. Поэтому предельной температурой низкотемпературного амплитудно и частотно независимого участка фона потерь для полимерных материалов может быть принята некая условная безразмерная относительная температура, до достижения которой повышение интенсивности фона описывается линейной зависимостью с малым коэффициентом наклона. Однако, следует отметить, что данная относительная температура для некоторых полимерных аморфных материалов может не быть определена вследствие отсутствия амплитудно и частотно независимого участка фона диссипативных потерь на спектре внутреннего трения. В данной работе рассматриваются возможные механизмы и природа возникновения амплитудно и частотно независимого участка фона потерь. Исследование данного участка в кристаллических системах при низких гомологических температурах показало, что появление фона обусловлено диссипацией части энергии внешнего деформирующего воздействия в той или иной степени от всех подвижных структурно-кинетических элементов различных подсистем, образованных дефектами структуры (точечные дефекты: вакансии, атомы внедрения, замещения, примеси; линейные дефекты: дислокации; объёмные дефекты: межкристаллитные границы и т.п.) Этот участок в кристаллических структурах характеризуется гистерезисным механизмом внутреннего трения, одной из форм проявления которого являются дислокационные потери. Механизм гистерезисного дислокационного внутреннего трения при колебательных движениях сегментов дислокаций в рельефе потенциала Пайерлса при взаимодействии дислокаций с полем внутренних напряжений и с различными точечными дефектами кристаллической структуры был теоретически проанализирован. Анализ проводился на базе моделей незакреплённых дислокаций, закреплённых дислокаций без отрыва от фиксирующих атомов облака Котрелла и с отрывом их от фиксаторов с диффузионной подвижностью (и без неё) дефектов данного облака. При этих расчётах было выявлено, что вклад данного механизма подвижности в спектр внутреннего трения низкотемпературного участка фона значительно меньше экспериментально наблюдаемого. Для аморфных полимерных систем данные модельные представления в первом приближении являются неприемлемыми. Однако, если рассматривать слаборазветвлённые линейные полимерные аморфные системы, то можно предположить, что возникновение диссипативных потерь гистерезисного механизма на низкотемпературном участке фона обусловлено двумя факторами: потерей части энергии внешнего деформирующего воздействия на деформацию каждой полимерной цепи и потерей энергии на преодоление взаимодействий между боковыми привесками различных смежных цепей. Кроме того, возможными являются и потери на локальное изменение конформации макромолекул с обратимым и необратимым изменением степени тактичности цепи полимера. В данной работе рассматривается модель отсутствия межмолекулярного взаимодействия между линейными цепями полимера без разрыва последних в результате внешнего деформирующего воздействия, а также модель упруго

и обратимо деформируемых цепей в совокупности с необратимо деформируемыми цепями макромолекул, где данная механическая необратимость локализуется в малых объёмах, не приводящих к необратимой деформации всего полимера в целом. Проведенный теоретический анализ возможного возникновения фона на спектре для данных моделей позволяет предположить, что гипотеза о внешнем трении между цепями макромолекул качественно может быть заменена на гипотезу о внутреннем трении в цепях макромолекул на базе предположения о выходе (в первом приближении) элементов структурной подсистемы макромолекулы или её сегмента на более пологий уровень потенциальной ямы. При этом степень асимметричности потенциальной ямы может служить характеристикой диссипации процесса независимо от того, определяется или нет степень асимметрии потенциальной ямы от амплитуды внешнего деформирующего воздействия.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ № 14–08–00806-а).

УДК 624.042

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ
СООРУЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИНАМИЧЕСКИХ
СУПЕРЭЛЕМЕНТОВ**

Цейтлин Б.В.

*ВНИИГ им. В.Е. Веденеева, Санкт-Петербург, Россия
tseitlinbv@mail.ru*

**MATHEMATICAL MODELING OF THE STRUCTURAL
VIBRATIONS USING DYNAMIC SUPERELEMENTS**

Tseytlin B.V.

“Vedeneev VNIIG” JSC, Saint-Petersburg, Russia

Рассматриваются вопросы численной реализации методов динамических жесткостей, податливостей и методов синтеза форм колебаний со свободной и неподвижной границами. Выполнен анализ точности и устойчивости рассмотренных методов. Сопоставлены полученные с использованием различных методов результаты расчета колебаний конструкций.

We consider the problems of numerical implementations of the methods of dynamic rigidities, dynamic flexibilities, and component mode synthesis with free and fixed boundaries. We analyze the methods with respect to their precision and stability, and compare the results of their application to vibration analysis.

Использование метода конечных элементов приводит к необходимости решения систем уравнений с чрезвычайно большим числом (до десятков миллионов) неизвестных. Это предъявляет столь жесткие требования к объемам оперативной и дисковой памяти и быстродействию ЭВМ, что во многих случаях делает решение задачи расчета колебаний невыполнимым. При использовании методов динамических суперэлементов упругие тела разбиваются на части (подструктуры), для каждой из которых аналитически или численно строится система базисных функций, позволяющая удовлетворительно аппроксимировать решение в пределах подструктуры. В большинстве случаев указанными базисными функциями являются формы собственных колебаний подструктур при различных граничных условиях, или векторы Ланцоша. Решения в пределах каждой из подструктур разыскиваются в виде отрезков рядов по построенным базисным функциям. В некоторых случаях присутствуют дополнительные слагаемые. Они либо учитывают вклад отброшенных членов (остаточные податливости в методе синтеза форм колебаний со свободной границей), либо необходимы, чтобы выполнялись условия совместности перемещений, если используемые базисные функции не позволяют этого (метод синтеза форм колебаний с неподвижной границей). Учет условий совместности перемещений (скоростей) и динамического равновесия на границах между подструктурами позволяет сформировать уравнения движения относительно модальных переменных, которыми являются неизвестные коэффициенты разложения по

базисным функциям. Указанные уравнения обладают рядом существенных преимуществ по сравнению с уравнениями движения относительно физических переменных (перемещений, скоростей, напряжений). Главное из преимуществ - существенно более низкий порядок. В ряде случаев удается построить систему уравнений движения, которая не является жесткой и допускает использование явных разностных схем. Для формирования уравнений движения используется рекуррентный многоуровневый алгоритм сборки. Показано, что использование слабой зависимости остаточных матриц от частоты приводит к экономичным алгоритмам построения быстро и медленно меняющиеся с частотой слагаемых. Приведенные результаты показывают, что использование разложения по формам собственных колебаний без учета остаточных членов может приводить к существенным ошибкам даже при прогнозировании внутренних динамических усилий и перемещений в элементах конструкции при действии заданных нагрузок. Погрешности определения внутренних динамических усилий обычно выше, чем погрешности определения перемещений. Учет остаточных членов оказывается еще более существенным, если разложения по формам собственных колебаний подструктур для расчета конструкции, состоящей из нескольких подструктур. При этом и построение матриц динамических податливостей подструктур должно производиться с учетом остаточных членов. Во всех рассмотренных тестовых задачах учет остаточных податливостей позволяет с высокой точностью определять как перемещения, так и внутренние динамические усилия в элементах подструктур. Использование уточненных выражений, аппроксимирующих зависимости матриц остаточных податливостей $G_d^*(\omega)$ от частоты, позволяет существенно повысить точность определения динамических усилий и перемещений, а также построить эффективные алгоритмы формирования матриц динамических жесткостей и податливостей суперэлементов.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ В СИСТЕМЕ БЕТОННАЯ ПЛОТИНА-СКАЛЬНОЕ ОСНОВАНИЕ ПРИ ВЗАИМНЫХ СМЕЩЕНИЯХ БЕРЕГОВ СЕЙСМОГЕННЫХ РАЗРЫВОВ

*Витохин Е.Ю., Ле-Захаров С.А., Федоров И.В., Цейтлин Б.В.
ВНИИГ им. В.Е. Веденеева, Санкт-Петербург, Россия
tseitlinbv@mail.ru*

MATHEMATICAL MODELING THE STRESS-STRAIN STATES OF CONCRETE DAMS AND ROCK FOUNDATIONS CAUSED BY FAULT BREAKING

*Vitokhin E.Ju., Le-Zakharov S.A., Fedorov I.V., Tseytlin B.V.
“Vedeneev VNIIG” JSC, Saint-Petersburg, Russia*

В работе рассмотрены вопросы определения напряженно-деформированного состояния (НДС) в системе плотина-основание, вызванного взаимными перемещениями берегов сейсмогенного разрыва. Используется рекуррентный многоуровневый конечно-элементный алгоритм. Выполнены расчеты напряженно-деформированного состояния плотины Саяно-Шушенской ГЭС, вызванного возникновением сейсмогенного разрыва в Борусском разломе.

The multilevel finite element technique of computational determination of the dam-foundation system's stress-strain state under the fault breaking is expounded. The computational model includes the active fault, dam and foundation. The methodology was used for calculating stress-strain state of concrete structures and foundation of Sayano-Shushenskaya HPP under the Borussky fault breaking.

Возникающие при землетрясениях дислокации перемещений берегов разрыва вызывают изменение НДС Земной коры, следствием которого является изменение НДС массива пород в основании плотины, что может привести к нарушению условий ее прочности и устойчивости. Для определения возникающего НДС используется рекуррентный многоуровневый конечно-элементный алгоритм, заключающийся в последовательном определении напряженно-деформированного состояния для набора вложенных моделей. Первая из них - участок Земной коры, вмещающий как рассматриваемый сейсмогенерирующий разлом, так и плотину с примыкающей областью основания. В качестве воздействия, используемого при расчете модели 1, используются величины взаимного смещения берегов сейсмогенерирующего разрыва. Поля перемещений, полученные при выполнении расчета модели i , используются при формировании краевых условий для расчета вложенной модели $i+1$ с измельченной сеткой конечных элементов. При этом перемещения в граничных узлах модели $i+1$ формируются в результате аппроксимации узловых перемещений модели i с более грубой сеткой конечных элементов.

Последней из рассматриваемых моделей (модель n) является детальная расчетная модель системы плотина-основание.

Указанный метод был использован для исследования влияния возможного возникновения разрыва в Борусском разломе на напряженно-деформированное состояние системы плотина-основание Саяно-Шушенской ГЭС. Борусский разлом - ближайший к плотине сейсмогенный разлом. Он расположен от плотины на расстоянии 12 км; магнитуа возможного землетрясения $M_w = 6$, глубина очага 10 км. Реализация метода включала 3 этапа. Первый – определение геометрических характеристик сейсмогенерирующего разрыва и величины взаимного смещения его берегов. Сначала определялись следующие величины: максимальное $D_{\max}$ и среднее D_{av} перемещения на поверхности; максимальное перемещение ниже поверхности D^* ; протяженность разрыва на поверхности L , наибольшая протяженность разрыва ниже поверхности $L_{\max}$, глубина разрыва W , площадь разрыва S . Для определения указанных величин использовались эмпирические зависимости огибающих сверху для смещений и размеров разрыва от магнитуды землетрясения M_w , а также эмпирические регрессионные соотношения, связывающих геометрические размеры разрыва и взаимные смещения его берегов. Детальное построение формы разлома производилось после определения величин L , $L_{\max}$, W , S и с использованием данных о глубине очага землетрясения.

Второй этап – построение набора вложенных моделей. В данном случае была использована система из трех моделей. Модель 1 представляла собой участок Земной коры размером 70х70 км и глубиной 40 км, вмещающий как рассматриваемый сейсмогенерирующий разлом, так и плотину с примыкающей областью основания. Модель 2 – “промежуточная модель”, включающая трещины и разломы, проходящие через основание плотины. Ее размеры: 5,5х6 км в плане, глубина 2,5 км. При построении моделей 1 и 2 предполагалось, что материал основания обладает линейно-упругими свойствами. Модель 3 – детальная расчетная модель системы плотина-основание, ее размеры в плане: 1,5 *2 км, глубина 1 км. При построении модели учитывались структурные нарушения IV порядка, проходящие непосредственно под сооружением. Модель 3 содержит 850000 элементов, причем сетка сгущается в секциях, расположенных над разломами. Зоны тектонических нарушений моделируются упруго-пластическим материалом Друкера-Прагера, ненарушенная область моделируется линейно упругим материалом; упругие константы заданы отдельно для каждого структурно-геологического блока.

Третий этап – выполнение рекуррентного алгоритма последовательного определения полей напряжений и перемещений. Проведенные расчеты позволили оценить влияние взаимных смещений берегов Борусского разлома на напряженно-деформированное состояние плотины. Показано, что указанные тектонические воздействия не могут привести к нарушению условий прочности и устойчивости плотины.

**ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ТРЕХМЕРНЫХ ЗАДАЧ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
КВАЗИСТАЦИОНАРНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В
НЕОДНОРОДНЫХ СРЕДАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЖУРНОЙ
СХЕМЫ МКЭ**

Калинин А.В., Чекмарев Д.Т.

*Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского
4ekm@mm.unn.ru*

**NUMERICAL SOLUTION OF 3D QUASISTATIONARY PROBLEMS OF
FINDING THE MAGNETIC FIELDS IN HETEROGENEOUS
ENVIRONMENT USING RARE MESHES FEM SCHEMES**

Kalinin A.V., Chekmarev D.T.

Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod, Russia

Рассматривается эффективная методика численного решения трехмерных квазистационарных задач электромагнитной теории на основе новой численной схемы МКЭ. Методика основывается на новой вариационной формулировке задачи.

An effective method of 3D quasi-stationary electromagnetic problems numerical solution based on a new numerical FEM scheme is considered. The method is based on a new variational formulation of the problem.

1. Введение. Ажурные вариационно-разностные и КЭ схемы решения трехмерных задач механики сплошных сред [1-4] хорошо зарекомендовали себя при решении задач теории упругости и пластичности, показали свою высокую эффективность по сравнению с традиционными схемами МКЭ. В данной работе рассматривается применение ажурных схем к решению квазистационарных задач электромагнитной теории. Актуальность этого связана с активно развивающимися в последнее время методами численного моделирования электромагнитных процессов [5]. Соответствующая стационарная задача рассмотрена в [6].

2. Вариационная формулировка задачи. Задача об определении векторов напряженности магнитного и электрического полей формулируется в виде вариационного равенства относительно векторного магнитного потенциала [7]. При этом используются оригинальные калибровочные соотношения, применимые для неоднородных сред.

3. Численная схема. Технология построения схемы в точности совпадает с описанной в [8]. В результате получаем систему линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных узловых значений векторного магнитного потенциала. Схема строится на основе традиционной схемы линейного 4-узлового конечного элемента в виде тетраэдра с линейной аппроксимацией функций в элементе. При интегрировании в элементе используется одна точка интегрирования, что соответствует известному приему сокращенного интегрирования О.Зенкевича [9]. Исходная КЭ сетка

составлена из гексаэдров, а элементы вписаны в центр каждого гексаэдра таким образом, что ребра тетраэдра являются диагоналями граней гексаэдра. В результате в каждом гексаэдре базовой сетки находится только один расчетный элемент. Незаполненный объем гексаэдра и содержащиеся в нем экстенсивные параметры задачи присоединяются к расчетному элементу. Явный вид численной схемы для стационарной задачи в случае равномерной сетки приведен в [6]. Приводятся результаты решения ряда тестовых задач.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта МОН РФ (соглашение от 27 августа 2013 г. № 02.В.49.21.0003 между МОН РФ и ННГУ); гранта Правительства Российской Федерации (договор № 11.G34.31.0048) и РФФИ (грант 14-01-00660 а).

Литература

1. Чекмарев Д.Т. Численные схемы метода конечного элемента на «ажурных» сетках // Вопросы атомной науки и техники, Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2009. Вып. 2. С. 49-54.
2. Жидков А.В., Зефиоров С.В., Кастальская К.А. Спирин С.В., Чекмарев Д.Т. Ажурная схема численного решения трехмерных динамических задач теории упругости и пластичности// Вестник ННГУ. Н. Новгород: Изд-во ННГУ. 2011. № 4, часть 4. С. 1480-1482.
3. Жидков А.В., Спирин С.В., Чекмарев Д.Т. Ажурная схема метода конечных элементов решения статических задач теории упругости // Учен. зап. Казан. Ун-та. Сер. Физ.-матем. науки. 2012.- Т. 154, Кн. 4.- С. 26-32.
4. Крутова К.А. Численное решение трехмерных динамических задач теории упругости и пластичности на основе ажурной вариационно-разностной схемы: Автореф. дис... канд. физ-мат. наук: 01.02.04. – Н.Новгород, 2015. – 19 с.
5. Rodriguez A.A., Valli A. Eddy Current Approximation of Maxwell Equations. Springer-Verlag Italia, 2010. 347 p.
6. Калинин А.В., Чекмарев Д.Т. Ажурная схема МКЭ решения трехмерной задачи магнитостатики // Сеточные методы для краевых задач и приложения. Материалы Десятой Международной конференции /сост. В.В. Бандеров, отв. редактор И.Б.Бадриев. – Казань: Казанский университет, 2014. – С. 356-360.
7. Калинин А.В. Оценки скалярных произведений векторных полей и их применение в математической физике. Нижний Новгород, изд-во ННГУ, 2007. 302 с.
8. Баженов В.Г., Чекмарев Д.Т. Решение задач нестационарной динамики пластин и оболочек вариационно-разностным методом. Учебное пособие. Нижний Новгород, изд-во ННГУ, 2000. 118 с.
9. Zienkiewicz O.C., Too J., Taylor R.L. Reduced integration technique in general analysis of plates and shells // Int.J. Num.Meth.Engng.1971.V.3.No.2.p.275-290

**ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДОВ
СТРОИТЕЛЬСТВА НА МЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ В УСЛОВИЯХ
ПОТЕПЛЕНИЯ КЛИМАТА**

Улитин В.В.¹, Черногорский С.А.², Швецов К.В.²

1 - Санкт-Петербургский национальный университет информационных технологий, точной механики и оптики

*2 - Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
m39098@mail.ru*

**TECHNICAL AND ECONOMIC SUBSTANTIATION CONSTRUCTION
METHODS ON FROZEN SOILS IN THE FACE OF GLOBAL WARMING**

Ulitin V.V.¹, Chernogorskiy S.A.², Shvetsov K.V.²

*1 - Saint Petersburg National Research University of Information Technologies,
Mechanics and Optics, Russia*

2 - Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Russia

Статья посвящена технико-экономическому обоснованию методов строительства на мерзлых грунтах в условиях потепления климата. В статье с помощью современных компьютерных методов анализируются принципы использования грунтов в качестве основания сооружений, и предлагается методика технико-экономической оценки выбора наиболее целесообразных и эффективных методов строительства.

The article is devoted to the substantiation of construction methods on frozen soils in the face of global warming. In the article with the help of modern computer methods, we analyze the principles of the use of soils as foundation structures, and proposes a methodology for techno-economic substantiation of the choice of the most appropriate and effective of construction methods.

Поскольку при потепление климата существенно интенсифицируется процессы деградации мерзлоты [1] требуется комплексный подход к обоснованию строительства, включающий специальную программу инженерно-геологических изысканий, прогноз состояния оснований и фундаментов проектируемого объекта с учетом всех возможных видов воздействия, прогноз влияния строительства на окружающую застройку, геологическую среду и экологическую обстановку, и применение современных компьютерных методов [2].

Для проектирования и строительства в условиях Севера также важной проблемой является разработка системы технико-экономических показателей, которые бы адекватно отражали реальные затраты на производство строительных работ, и совершенствование методики технико-экономической оценки выбора наиболее целесообразных и эффективных решений.

При проектировании оснований на многолетнемерзлых грунтах применяется один из следующих принципов использования грунтов в качестве основания сооружений:

Принцип I - многолетнемерзлые грунты основания используются в

мерзлом состоянии, сохраняемом в процессе строительства и в течение всего периода эксплуатации сооружения. Этот принцип рекомендуется применять, если грунты основания можно сохранить в мерзлом состоянии при экономически целесообразных затратах на мероприятия, обеспечивающие сохранение такого состояния, а также на участках с твердомерзлыми грунтами и при повышенной сейсмичности района.

Принцип II - многолетнемерзлые грунты основания используются в оттаянном или оттаивающем состоянии (с их предварительным оттаиванием на расчетную глубину до начала возведения сооружения или с допущением их оттаивания в период эксплуатации сооружения). Этот принцип рекомендуется применять при наличии в основании малосжимаемых грунтов, деформации которых при оттаивании не превышают предельно допустимых значений, при несплошном распространении мерзлых грунтов, а также в тех случаях, когда при сохранении мерзлого состояния грунтов основания не обеспечивается требуемый уровень надежности строительства.

В обоих случаях необходимо в том или ином объеме производить термостабилизацию грунта: в первом случае для сохранения несущей способности на весь период эксплуатации, во втором случае для обеспечения строительства, поскольку невозможно производить любые работы не нарушая температуры грунта.

В районах с островным характером мерзлоты при потеплении климата деградация мерзлоты происходит наиболее интенсивно. При потеплении климата южная граница криолитозоны сдвигается и необходимо учитывать деградацию мерзлоты с учетом дрейфа границы. Проектирование необходимо вести с учетом изменения состояния мерзлоты вплоть до полного её исчезновения.

ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМА КОМБИНИРОВАННОГО СПОСОБА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ТЕОРИИ УПРУГОСТИ В БЕСКОНЕЧНЫХ ОБЛАСТЯХ

*Чернышева Н.В., Розин Л.А.
ФГАОУ ВО СПбПУ, Россия
chernat0000@mail.ru*

ALGORITHM OF COMBINED METHOD OF 3D ANALYSIS FOR THE BOUNDARY PROBLEMS IN INFINITE MEDIUM

*Chernysheva N.V., Rozin L.A.
St.Petersburg State Polytechnic University, Russia*

Рассматривается комбинированный алгоритм решения пространственных задач теории упругости в бесконечных областях на базе сочетания МКЭ и формулы Сомильяны. Приводится также модифицированный вариант алгоритма для областей, содержащих физические неоднородности. Обсуждается численная реализация рассмотренного алгоритма и его тестирование для внешних и внутренних пространственных областей.

Algorithm of the 3d analysis developed for solution of boundary problem by combined method based on incorporating the FEM and Somigliana's integral formula is considered. The algorithm is modified for the case of inhomogeneous medium. Efficiency of software implementations of both algorithms has been tested.

1. Введение. Численное решение пространственной задачи теории упругости может проводиться в рамках традиционных алгоритмов метода конечных элементов (МКЭ) или метода граничных элементов (МГЭ), которые при наличии бесконечной области имеют некоторые особенности, обуславливающие определенные трудности при их реализации. Эффективность расчетов может быть повышена за счет использования различных формулировок законов теории упругости и применения упомянутых численных методов в сочетании. Например, возможно построение численного алгоритма решения пространственной задачи теории упругости в бесконечных областях на базе сочетания МКЭ и интегральной формулы Сомильяны.

2. Алгоритм комбинированного метода (КС). Пусть в упругой области Ω , ограниченной поверхностью S , требуется определить вектор перемещений $u(\xi)$, удовлетворяющий при $\xi \in \Omega$ уравнениям Навье и граничным условиям

$$t_i(\xi) = \sigma_{ij}(\xi)n_j(\xi) = p_i(\xi), \quad \xi \in S_1;$$

$$u_i(\xi) = u_{iS}(\xi), \quad \xi \in S_2; \quad S_1 \cup S_2 = S. \quad (1)$$

В соответствии с алгоритмом внутри области Ω выделяется подобласть

Ω_0 , ограниченная вспомогательной поверхностью S_0 . Итерационный процесс строится следующим образом. На K -том шаге на поверхности S_0 имеется $(k-1)$ -ое приближение к решению

$$u_i(\xi) = u_i^{(k-1)}, \quad \xi \in S_0 \quad (2)$$

(нулевое приближение $u_i^{(0)}$ выбирается произвольно), и в подобласти Ω_0 с границей $S \cup S_0$ методом конечных элементов решается краевая задача с граничными условиями (1)-(2). Используя это решение, можно доопределить $u_i^{(k)}(\xi), \xi \in S_1$ и $t_i^{(k)}(\xi), \xi \in S_2$. Это позволяет применить интегральную формулу Соммильяны

$$u_j(\xi) = \int_S (t_i(\eta)G_{ij}(\eta, \xi) - F_{ij}(\eta, \xi)u_i(\eta))dS(\eta) \quad (3)$$

и найти K -тое приближение $u_i^{(k)}(\xi), \xi \in S_0$, и так далее.

3. Модификация алгоритма для неоднородных областей. Пусть область Ω неоднородна. Предполагается, что в ней можно выделить подобласть, ограниченную замкнутой поверхностью L , внутри которой заключены все неоднородности, существенно влияющие на напряженно-деформированное состояние изучаемого объекта. В оставшейся однородной области Ω_L выбирается поверхность S_0 , и рассматривается подобласть Ω_0 , ограниченная поверхностями S и S_0 .

На поверхности S_0 задается нулевое приближение для вектора перемещений $u^{(0)}$, и в области Ω_0 методом конечных элементов решается краевая задача с граничными условиями (1)-(2). Применить формулу (3) для вычисления значений $u^{(1)}$ на поверхности S через значения перемещений $u^{(0)}$ и усилий на поверхности S_0 нельзя, поскольку для этого требуется однородность области Ω_0 . Поэтому на втором шаге алгоритма интегрирование в формуле (3) проводится по поверхности L (область Ω_L однородна). На третьем шаге в области Ω_0 методом конечных элементов вновь решается краевая задача, и находится второе приближение $u^{(2)}$ для вектора перемещений на поверхности L , и так далее.

4. Результаты численного тестирования алгоритмов. Приведенный алгоритм, реализованный в виде компьютерного программного комплекса, тестировался на ряде модельных задач. Проведено сравнение с результатами МКЭ и точными решениями, подтверждена сходимость итерационного процесса и эффективность предложенного метода.

ЭКСПРЕСС ОЦЕНКА ОТКЛИКА КОНСТРУКЦИИ СИЛОВОГО ГИРОСКОПА НА ДЕЙСТВИЕ СЛУЧАЙНОЙ ВИБРАЦИИ

Шевченко С.А.

*АО "Научно-исследовательский институт командных приборов", Россия
shevchenko.sergei.a@yandex.ru*

EXPRESS-EVALUATION OF POWERED GYRO RESPONSE IN CASE OF RANDOM VIBRATION

Shevchenko S.A.¹

JSC "Command Devices Research Institute", Russia

Представлены оценка отклика конструкции силового гироскопа на действие случайной вибрации, а также получение амплитудно-частотной характеристики конструкции. Сопоставление результатов расчета и экспериментальных данных указывает на их удовлетворительное соответствие.

Express-evaluation of powered gyro response in case of random vibration and receiving of frequency-response characteristic are represented. Comparison of calculation results and test data indicates their satisfactory conformity.

1. Введение. Гироскопические приборы – это сложные механизмы, требующие основательного подхода на этапе разработки конструкции. Но в современном мире наряду с качеством не менее ценным фактором является и скорость разработки, а как следствие поставки приборов. Это в свою очередь влечет за собой постоянное сокращение сроков на проведение расчетов. В таких условиях приходится искать компромисс между скоростью и точностью в решении поставленной задачи.

В работе проведена экспресс оценка отклика конструкции силового гироскопа на случайную вибрацию в местах крепления гиromотора с целью получения режимов для автономных испытаний гиromотора. Проведено сравнение полученных данных с экспериментальными.

2. Расчетная модель силового гироскопа. Для проведения расчета в поставленные сроки была построена упрощенная конечно-элементная модель силового гироскопа. В ее состав вошли основные несущие элементы конструкции – ротор гиromотора, силовые крышки, корпус гиromотора, цапфы оси подвеса гиromотора. Корпус силового гироскопа принимался абсолютно жестким. Работа над сеткой не проводилась, она получена в автоматическом режиме при стандартных настройках. Шарикоподшипники оси подвеса ротора и оси подвеса гиromотора заменялись упругими элементами с соответствующей жесткостью. Исключенные из модели детали заменялись точечными массами.

3. Получение амплитудно-частотной характеристики и отклика на случайную вибрацию. Первоначально был проведен расчет на собственные частоты расчетной модели. Далее для проверки коэффициента динамичности

конструкции был выполнен расчет на гармоническое воздействие вблизи области полученных собственных частот. Для этого в качестве нагрузки, к местам установки (упругим элементам, моделирующим шарикоподшипники оси подвеса гиromотора) прибора прикладывалось гармоническое воздействие с амплитудой 9.81 м/с^2 . АЧХ определялась на цапфах оси подвеса гиromотора в точках, соответствующих местам установки датчиков при проведении эксперимента. Для оценки отклика на случайную вибрацию в качестве нагрузки задавался режим СПМ ШСВ в частотном диапазоне от 20 до 2000 Гц. Режимы СПМ на выходе определялись на цапфах оси подвеса гиromотора и на роторе гиromотора. Проведено сравнение полученных результатов с экспериментальными данными.

4. Заключение. Проведенная в условиях сжатых сроков оценка отклика конструкции на случайную вибрацию в виде полученного режима СПМ ШСВ на цапфах оси подвеса гиromотора показала удовлетворительное соответствие с экспериментальными данными. Разница между режимами не превышает 15-20%. Стоит отметить, что работа над сеткой конечно-элементной модели не проводилась, за счет чего удалось сократить время расчета. В то же время, в случае проведения оценки напряженного состояния конструкции такая конечно-элементная модель будет давать большие погрешности.

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫЙ АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ СТЕРЖНЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СКАЧКООБРАЗНОЙ ПРОДОЛЬНОЙ НАГРУЗКИ

*Шурпатов А.О., Беляев А.К.
СПбПУ Петра Великого, Россия
a.shurpatov@gmail.com*

FINITE ELEMENT DYNAMIC STABILITY ANALYSIS OF ROD UNDER JUMP AXIAL LOAD

*Shurpatov A.O., Belyaev A.K.
Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russia*

С помощью метода конечных элементов выполняется анализ потери устойчивости шарнирно опертого стержня в случае скачкообразной осевой нагрузки. К одному из концов стержня скачкообразно прикладывается третья и четвертая критическая сила Эйлера. Показано, что номер формы потери устойчивости и номер силы Эйлера не совпадают. Объяснение подкреплено соответствующим теоретическим анализом.

Finite element method is applied for analyzing dynamic stability of simply supported beam subjected to jump axial load. One end of the rod is loaded by a discontinuous force equal to the third and fourth Euler force. It is shown that the numbers of buckling mode and the vibration mode do not coincide. The explanation is given and the corresponding theoretical analysis is provided.

Доклад посвящен численному моделированию знаменитой задачи Лаврентьева-Ишлинского [1], в которой было теоретически предсказано несовпадение номеров формы потери устойчивости и силы Эйлера в случае скачкообразной осевой нагрузки. Проведен полный динамический расчет слабо искривленной шарнирно опертой балки. Для МКЭ выбрана модель, включающая в себя порядка 50 000 узлов и обладающая приблизительно 150 000 степенями свободы. Стержень изготовлен из абсолютно упругого материала (сталь) со следующими параметрами: модуль Юнга $2.1 \cdot 10^{11}$ Н/м², коэффициент Пуассона 0,3, плотность $7,8 \cdot 10^3$ кг/м³. Геометрия стержня: длина: 1,73 м, поперечное сечение: 2 см × 5 см. В начальный момент времени к одному из концов стержня скачкообразно прикладывается n-я сила Эйлера

$P_{nE} = n^2 \frac{\pi^2}{l^2} EI$. Как видно из Рис.1, при приложении третьей силы Эйлера потеря устойчивости происходит по второй форме изгибных колебаний, а при приложении четвертой силы Эйлера – по третьей, что полностью подтверждает выводы работы [1].

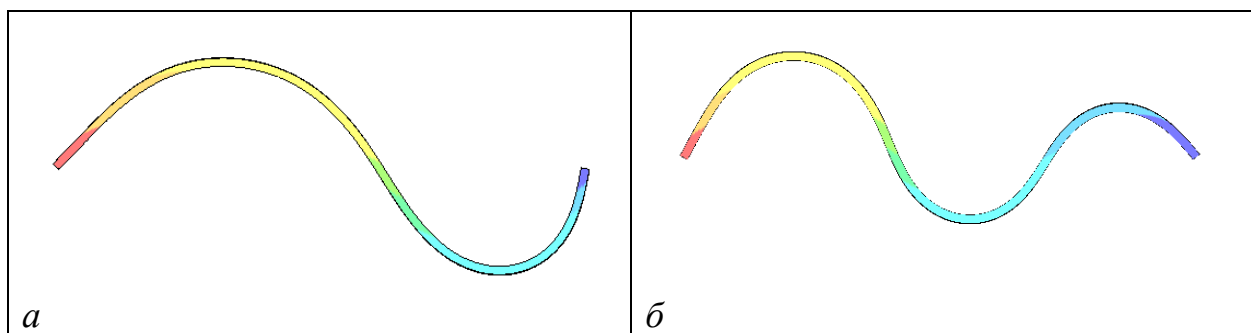


Рис. 1 Зависимость формы потери устойчивости от приложенной силы: *a* – третья сила Эйлера, *б* – четвертая сила Эйлера.

Литература

1. Лаврентьев М.А., Ишлинский А.Ю. Динамические формы потери устойчивости упругих систем // Докл. АН СССР. 1949. Т. 64. № 6. С. 779-782.

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПОЛЕЙ
ТЕМПЕРАТУР В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ***Щербина С.В., Белов В.А.**Московский государственный строительный университет, Россия**scherbine@mail.ru***FINITE ELEMENTS SIMULATION OF NONSTATIONARY
TEMPERATURE FIELDS IN WELDED JOINTS***Scherbina S.V.¹, Belov V.A.¹**Moscow State University of Civil Engineering, Russia*

Показано численное моделирование нестационарных полей температур в сварных соединениях с использованием универсального конечноэлементного комплекса ANSYS Mechanical. Приведены основные теоретические сведения, показана реализация существующих методов задания теплового потока и граничных условий. Показана разработанная математическая модель произвольно-эллипсоидной и произвольной формы сварочной ванны, для концентрированных источников нагрева, на основе модели двойного эллипсоида Голдака.

1. Введение. Определение остаточных напряжений и деформаций в строительных конструкциях является весьма актуальной задачей. Для решения подобных задач необходимо знать распределение температур в процессе сварки. Учет произвольных тепловых воздействий и граничных условий в нестационарной постановке, с учетом нелинейных свойств материала и сложной геометрии конструкций, возможен только в современных универсальных конечноэлементных ПК. В данной работе использовался ПК ANSYS, верифицированный в системе RAACH.

2. Численное моделирование распределения тепловой мощности.

Эффективная тепловая мощность при дуговой сварке $q=UI\eta$ (Вт), где U – падение напряжения на дуге (В), I – ток (А), η – эффективный КПД процесса нагрева. Самым простым, с точки зрения ввода тепла, является модель точечного источника, не имеющая физического размера. В действительности для поверхностных источников экспериментально установлено, что тепловой поток действует на область по закону нормального распределения (модель Гаусса). Для верификации модели распределенного источника из учебника Рыкалина [1] была выбрана тестовая задача, в которой показано влияние различных режимов сварки на температурное поле предельного состояния в пластине толщиной 1 см. Применялись КЭ типа SOLID70, теплоемкость C и теплопроводность λ принимались постоянными и равными 4.8 Дж/(кг·°C) и 26 Вт/(м·°C) соответственно, на границах учитывался конвективный теплообмен равный 8 Вт/(м²·°C). Коэффициент сосредоточенности теплового потока равен 2 м⁻².

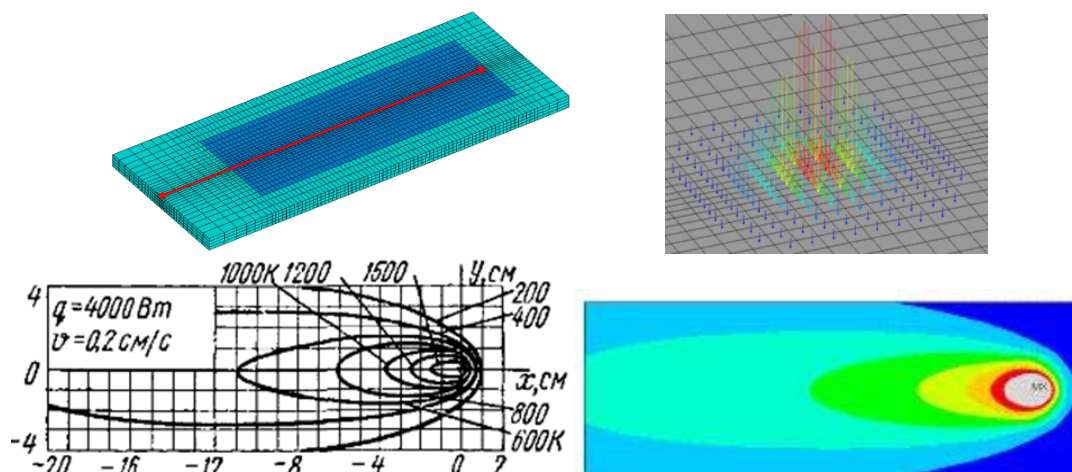


Рис. 1. КЭ модель, нормальное распределение теплового потока и результаты сопоставления

Из-за невозможности учета глубины сварной ванны эта модель обладает низкой точностью. Для более точного описания формы сварочной ванны, Голдаком была предложена модель двойного эллипсоида [2], позволяющая учитывать эллиптические формы сварного шва.

3. Разработанная математическая модель распределения тепловой мощности.

Для получения сварных швов произвольной формы (рис.2) разработана математическая модель произвольно-эллиптической и произвольной формы как сварочной ванны, так и теплового потока, для концентрированных источников нагрева, на основе модели Голдака, позволяющая более точно определять распределение температур в процессе сварки. Разработанная математическая модель итерационным способом подбирает, по нормальному закону, распределение теплового потока по объему произвольной формы с сохранением суммарной тепловой мощности.

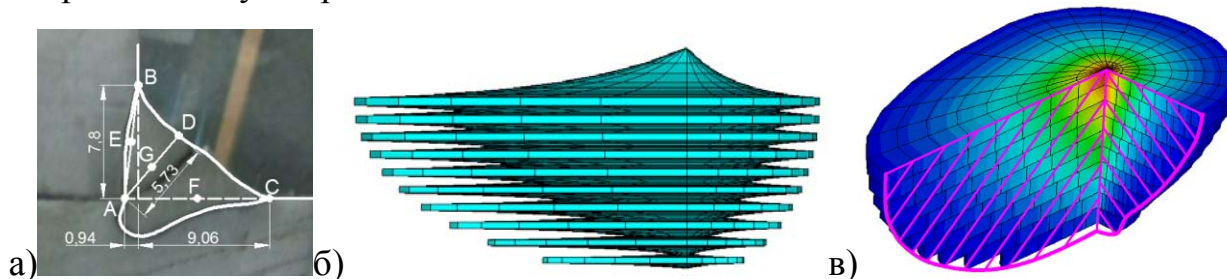


Рис. 2. Форма сварного шва с размерами в мм (а), объемная визуализация нормального распределение теплового потока (б), изополя нормального теплового потока с вырезом 1/4 с эллиптической формой в продольном направлении и с произвольной в поперечном(в)

Литература

1. Рыкалин Н.Н. Расчеты тепловых процессов при сварке: Учебное пособие для машиностр. вузов. М.: Машгиз, 1951
2. Bibby M., Chakravarti A., Goldak J. A new finite element model for welding heat source // Metallurgical transactions. 1994. Vol. 15 B.
3. Tanaka M., Kanemaru S. Study for TIG-MIG hybrid welding process // Weld World. 2014. Vol.58. P. 1-8.

**АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ ИЗМЕНЕНИЙ СТРУКТУРНОЙ
НЕОДНОРОДНОСТИ В КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ,
ПРИМЕНЯЕМЫХ В ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТАХ**

Юргенсон С.А.¹, Васильев С.Л.¹, Бакулин В.Н.²

*1 - Московский авиационный институт (национальный
исследовательский университет), Россия*

*2 - Институт прикладной механики Российской академии наук, Россия
sjurg@yandex.ru*

**ANALYSIS OF CHANGES STRUCTURAL HETEROGENEITY IN
COMPOSITE MATERIALS USED IN AIRCRAFT**

Jurgenson S.A.¹, Vasilyev S.L.¹, Bakulin V.N.²

1 - Moscow Aviation Institute National Research University, Russia

2 - Institute of Applied Mechanics of the Russian Academy of Sciences, Russia

Аннотация: В докладе представлено описание стендового приспособления и рассмотрены контролируемые параметры при проведении исследования изменений в структуре образцов из полимерных композиционных материалов под нагрузкой методом вычислительной рентгеновской томографии.

Abstract: The report describes the device of the bench and controlled parameters in the study of changes in the structure of the sample of polymer composite materials under stress by X-ray computer tomography.

1. Введение. Специфика композиционного материала заключается в том, что технологические процессы формообразования материала и готового изделия совмещены. Следовательно оценка эксплуатационных характеристик усложняется в следствии многообразия схем армирования, типов материалов и их конструктивно-технологической реализации. Для контроля состояния структуры полимерных композиционных материалов наибольшее распространение получили ультразвуковой и рентгеновский методы контроля [1]. Одним из наиболее перспективных методов рентгеновского контроля является вычислительная рентгеновская томография (ВРТ) [2].

2. Методика анализа развития повреждений Предлагаемый метод исследования основан на получении информации об изменении томографических параметров, фиксируемых в объеме образца на различных этапах приложения нагрузки. Применение метода ВРТ в качестве базового метода лабораторного контроля обусловлено высокой точностью данного метода и наличием количественных характеристик, позволяющих проводить сравнение различных типов материалов и композиций. Для получения данных под нагрузкой был спроектирован специальный стенд, позволяющий проводить нагружение и удерживать заданную нагрузку непосредственно на рабочем столе томографа. При этом конструктивные особенности позволяют снизить влияние приспособления на результаты сканирования.

Основные этапы исследования включают в себя сканирование исходного состояния материала (фиксируются технологические дефекты), состояния под нагрузкой и после ее снятия. Такой подход позволяет получить новую информацию о поведении материала и проследить динамику развития структурной неоднородности.

В качестве параметров, характеризующих состояние структуры материала, приняты следующие томографические характеристики:

1. Среднее значение линейного коэффициента ослабления (ЛКО) - количественно характеризует структурную плотность в отсканированном сечении и прямо пропорционально уменьшается с ростом количества вторичных (эксплуатационных) повреждений на единицу площади сечения;

2. Максимальное и минимальное значения ЛКО, характеризующие процессы роста отдельных дефектов и локальное уплотнение в структуре материала.

3. Среднеквадратичное отклонение (СКО) значения ЛКО в отсканированном сечении характеризует амплитуду абсолютного отклонения ЛКО от наиболее вероятного значения. Увеличение абсолютного значения СКО подтверждает увеличение количества вторичных повреждений на единицу площади.

По итогам сканирования снимается количественная информация и строятся качественные графики развития внутренних аномалий плотности в зависимости от этапа приложения и наличия нагрузки, по которым проводится оценка поведения материала.

3. **Результаты эксперимента и выводы.** Исследование образцов из полимерных композиционных материалов (ПКМ) по предлагаемой методике показывает высокую сходимость результатов по всему объему материала при наличии технологических дефектов (неоднородности базового материала по длине изделия), что позволяет минимизировать трудоемкость. Полученные результаты коррелируют с принятыми расчетными моделями поведения ПКМ и дают новую информацию об эксплуатационном (нагруженном) состоянии композиционных материалов, которые могут быть использованы для анализа результатов дальнейших прочностных расчетов методом конечных элементов и разработки технологических процессов неразрушающего контроля после изготовления и на этапах эксплуатации летательного аппарата.

Литература

1. Бойцов Б.В., Громашев А. Г., Юргенсон С. А., Васильев С.Л. Методы неразрушающего контроля, применяемые для конструкций из перспективных композиционных материалов, журнал «Труды МАИ», 2011, вып. 49. 2
2. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник / В.В. Клюев, Ф.Р. Сосин, А.В. Ковалев, Э.И. Вайнберг и др. 2-е изд. М. Машиностроение, 2003. 656 с.

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ КОНЕЧНЫХ
ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ НЕЛИНЕЙНОГО РАСЧЕТА СТЕРЖНЕВЫХ
СИСТЕМ ПО ПРЕДЕЛЬНЫМ СОСТОЯНИЯМ**

Ермакова А.В.

*Южно-Уральский государственный университет, Россия
ermakovaav@susu.ac.ru*

**USE OF ADDITIONAL FINITE ELEMENT METHOD FOR NONLINEAR
ANALYSIS OF BAR SYSTEMS AT LIMIT STATES**

Ermakova A.

South Ural State University, Russia

В данной статье рассмотрены некоторые вопросы, связанные с описанием предельных состояний плоских и пространственных стержневых конечных элементов для нелинейного расчета по предельным состояниям стержневых железобетонных конструкций с помощью разрабатываемого метода дополнительных конечных элементов. Эти вопросы связаны с необходимостью учета арматуры и постепенно меняющихся физически нелинейных свойств этих конечных элементов при применении данного метода.

This paper considers some problems connected with description of limit states of the plane bar FE and special bar one for nonlinear analysis of reinforced concrete structures by means of developed AFEM [1]. These problems are connecting with necessary of taking account of reinforcement and changing physical nonlinear properties of these FEs when this method is used.

1. Limit state of the finite element. There is its own stress-strain state at each point of the structure during operating under load. The failure begins in the point with ultimate limit state. The degree of inclusion of each point in general behavior of the structure is determined by the degree of reaching of ultimate limit state in it. The separate finite element is considered instead of the point in analysis of structure by finite element method. The structure is considered as an assembly of such elements where each finite element is the separate small structure of simple form fixed in nodes. This finite element has its own limit state in operating under load. The contribution of each finite element in behavior of the structure is determined by the degree of limit state reaching in it too. It means that rigid properties of the main finite element introducing in analysis ought to be formed in connection with the degree of limit state reaching stage in all its points.

2. Finite elements “Bar of general attitude” and “Plane bar”. The finite element “Bar of general attitude” is destined for analysis of spatial bar systems. Each node has six degrees of freedom, i.e. three possible linear displacements along coordinate axes and tree angular displacements around the same axes. The

next system of stresses characterizes this finite element: N – longitudinal force; M_y – bending moment relative to one axis of inertia; M_z – bending moment relative another axis of inertia; M_k – twisting moment relative longitudinal axis of bar; Q_y – shear force acting along one axis of inertia; Q_z – shear force acting along another axis of inertia. The finite element “Plane bar” is destined for analysis of plane bar systems. Each node has three degrees of freedom, i.e. two possible linear displacements along coordinate axes and one angular displacement around the third axis. This element has next system of stresses: N – longitudinal force; M_y – bending moment relative to one axis of inertia; Q_z – shear force acting along another axis of inertia.

3. Limit states of the concrete bar of general attitude and concrete plane bar. Each stress of “The bar of general attitude” has its own limit states which are determined by the properties of a finite element material, concrete in this case. Concrete is characterized by two types of strength (compressive and tensile). It is a determining fact for limit states of this finite element [1, 2]. Three limit states appear due to action of longitudinal force N : tension, compression and lost of stability. Every bending moment M_y or M_z may be caused two limit states for each moment: failure of tensile or compressive zone of section. Torsion moment M_k gives one limit state. Shear forces Q_y or Q_z give two limit states for each force: failure because of diagonal crack and shear. Thus this FE has twelve limit states. Plane concrete bar has seven limit states: three for longitudinal force N , two for bending moment M_y and two for shear forces Q_z . Behavior of the concrete bar finite elements at each limit state demands a special theoretical research. In particular, since we may come across the proper shear in reinforced concrete rarely, the appearance of shear limit state is low-probability.

4. Limit states of the concrete bar of general attitude and concrete plane bar with reinforcement. Reinforcement in bar finite elements adds number of limit states. Eleventh limit states appear for concrete “The bar of general attitude” and seven limit states appear for concrete “The plane bar”. These limit states connected with behavior of reinforcement in failure moment [2].

5. Properties of additional finite elements “Bar of general attitude” and “Plane bar”. In nonlinear analysis of bar reinforced concrete structures by limit states it is necessary to define of the way for formation of corresponded additional finite elements (AFEs). Scheme of formation and action of concrete bar AFE: concrete bar FE with nonlinear property = concrete bar FE with linear property + concrete bar AFE for the allowance of the nonlinear property. In the beginning of nonlinear analysis by limit states the scheme of formation and action of reinforced concrete AFE: concrete bar FE with reinforcement = concrete bar FE with linear property without reinforcement + bar AFE for taking account for reinforcement.

Conclusions. Bar AFEs for taking account of reinforcement open possibility for nonlinear analysis of bar reinforced concrete structures by limit states. Different models of behavior of reinforced concrete structures may be include in analysis.

[3, 4]. Efficiency of AFEM is proved by analysis of space shell [5].

References

1. Ermakova A.V. Additional finite element method for analysis of reinforced concrete structures at limit states. Ермакова А.В. М., АСВ, 2012 – 114 p.
2. Ермакова А.В. Особенности применения метода дополнительных конечных элементов к нелинейному расчету стержневых систем по предельным состояниям. Строительная механика и расчет сооружений. 2014. № 6, с. 35 – 40.
3. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона. М., Стройиздат, 1996– 416 с.
4. Шугаев В.В. Инженерные методы в нелинейной теории предельного равновесия оболочек. – М.: Готика, 2001 – 368 с.
5. Maximov I., Ermakova A. Necessity of Allowance for Daily Temperature Difference in Design and Operation of Long-Span Shells // Proceedings of the Third International Conference on Concrete under Severe Conditions, CONSEC'01, June 18-20 2001. – Vancouver, BC, Canada, vol. 1, p. 1017 – 1023.

**УРАВНЕНИЕ ДВИЖЕНИЯ ДИССИПАТИВНОЙ СИСТЕМЫ С
УЧЕТОМ ДЕЙСТВИЯ СИЛ ВНЕШНЕГО СОПРОТИВЛЕНИЯ**

Пономаренко С.А.

Волгоградский государственный университет, Россия

svetlanaponomarenko@yandex.ru

**THE MOTION EQUATION OF DISSIPATIVE SYSTEM TAKING INTO
ACCOUNT EFFECT OF EXTERNAL RESISTANCE FORCES**

Ponomarenko S.A.

Volgograd State University, Russia

Рассмотрена расчетная схема и уравнение движения системы «мост - гидродинамический гаситель колебаний». Приведено уравнение движения диссипативной системы с учетом действия сил внешнего сопротивления. Дано обоснование параметров уравнения. Приведены результаты численного эксперимента.

The design scheme and the motion equation of the system «bridge - hydrodynamic damper of oscillations» are considered. The motion equation of dissipative system taking into account external resistance forces is showed. The substantiation of the equation parameters is given. The results of numerical experiment are submitted.

1. Введение. Последние 30 лет эксплуатации мостов балочного неразрезного типа были отмечены рядом случаев возникновения на них критических колебаний [1]. Это обстоятельство продиктовало необходимость проведения защитных мероприятий по обеспечению стабилизации и безопасной эксплуатации мостов данного типа.

Один из вариантов стабилизации пролетных строений балочных неразрезных мостов – использование гидродинамического гасителя колебаний, принцип работы которого заключается в безвозвратном отводе энергии колебаний конструкции во внешнюю (водную) среду (патент РФ на изобретение № 2475586).

2. Расчетная схема и уравнение движения диссипативной системы с учетом действия сил внешнего сопротивления. Рассмотрим однопролетную балку с установленным гидродинамическим гасителем. На балку действует синусоидальная сила $F = F_0 \sin \theta t$. Гидродинамический гаситель колебаний представим в виде присоединенной массы M с внешним вязким сопротивлением с коэффициентом вязкости λ_0 . Действие сил внутреннего неупругого сопротивления не учитываем. Расчетная схема гасителя представлена на рис. 1.

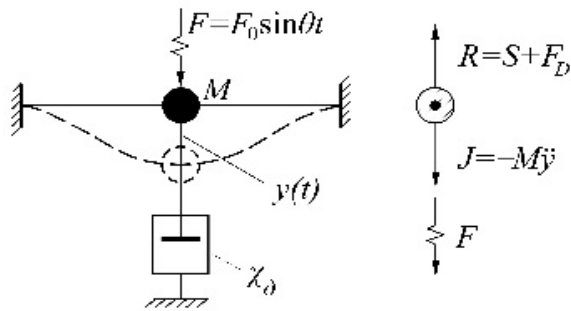


Рис. 1. Расчетная схема гидродинамического гасителя колебаний

На основе гипотезы вязкого трения Фойгта с учетом принципа Даламбера уравнение движения диссипативной системы представлено в соответствии с [2]:

$$y^{**} + 2n y^* + \omega_0^2 y = \frac{F_0}{M} \sin \theta t, \quad (1)$$

$$\text{где } \omega_0^2 = \frac{r_{11}}{M}; \quad 2n = \chi_0 \omega_0^2.$$

Множитель n отражает влияние сил внешнего сопротивления на параметры колебаний системы и имеет размерность собственной частоты колебаний системы ω_0 . Величина демпфирующей силы F_D определяется как сумма силы гидродинамического сопротивления движению поршня гасителя в воде и веса столба воды над плитой поршня гасителя, ввиду чего параметр n в уравнении (1) напрямую связан с геометрическими размерами плиты поршня гасителя.

Методика аналитического определения величины площади плиты гидродинамического гасителя приведена в [1].

Аналитически полученное значение площади плиты гидродинамического гасителя вводится в расчет системы «мост-гаситель», реализуемый на базе процессора «Динамика плюс» ПК «Ли́ра». На рис. 2 приведены результаты численного расчета, демонстрирующие скорость гашения колебаний в системе.

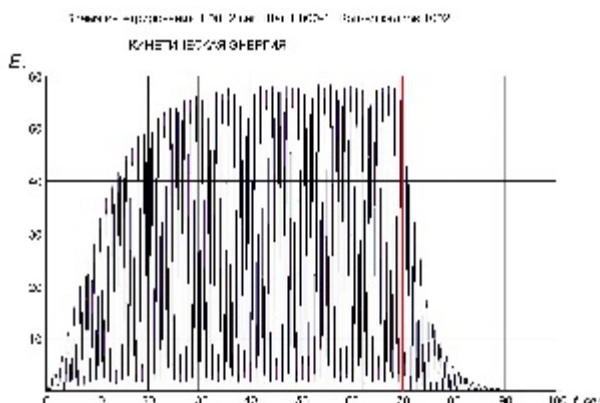


Рис. 2. График распределения кинетической энергии колебаний в системе «мост-гаситель» при установленном гидродинамическом гасителе

Полное гашение колебаний происходит в течение 30 секунд от момента прекращения действия возбуждающей силы.

Результаты численных экспериментов подтверждают корректность выбранной расчетной схемы.

Литература

1. Наумова Г.А., Пономаренко С.А. Гидродинамический способ гашения колебаний мостовых пролетов // Вестник гражданских инженеров. 2012. № 6(35). С. 51-59.
2. Александров А.В., Потапов В.Д., Зылев В.Б. Строительная механика. В 2 кн. Кн. 2. Динамика и устойчивость упругих систем. М.: Высш. шк., 2008. 384 с.

АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

Chekmarev D.T.....	6	Борzych C.B.	94
Galileev S.M.....	4, 9	Бородин И.Н.	70, 73, 76, 79
Jaghmaidze A.....	4	Боталов С.Н.	295
Kenny J.M.	239	Брагов А.М.	183, 185
Konakov Ya.V.....	178	Братов В.А.	79
Miau Jiun-Jih.....	150	Брезгин Н.А.	56
Ovid'ko I.A.	178	Бугаев Н.М.....	346
Sheinerman A.G.....	178	Бугай И.В.....	82
Spirin S.V.....	6	Валиев Х.Х.	84
Tabakov P.Y.	4, 9	Васильев С.Л.	365
Zangi O.....	11	Ватин Н.И.	150
Абдрахманова А.И.	12, 342	Вершинин В.В.....	40, 42, 60
Абжалимов Р.Ш.....	14	Видюшенков С.А.	86
Авдеева А.В.....	16	Виноградов Ю.И.	88
Айзикович С.М.	262	Витохин Е.Ю.....	351
Акимов П.А.	18, 28, 40, 60, 242	Волков Е.Н.....	90
Аллахвердов Б.М.	20	Воробьев А.В.....	92
Алтухов А.И.	321	Воробьева К.В.	334
Аменицкий А.В.....	212	Воронин В.В.....	94
Ананьев В.В.	22	Воронова Г.А.	62
Андреев П.С.	298	Высоковский Д.А.	98
Антуфьев Б.А.	182	Габибова А.К.....	106
Арутюнян А.Р.....	26	Габсаликова Н.Ф.	96
Арутюнян Р.А.....	24, 26	Гаврюшин С.С.....	230, 245
Аскинази В.Ю.....	64	Гайджуров П.П.....	98
Аслами М.....	28	Гайнулина Л. Р.....	100
Атрошенко С.А.	31, 33, 35, 73, 76	Галилеев М.Д.	102
Аул А.А.....	60, 62, 237	Галилеев С.М.	102, 104, 325
Афанасьева И.Н.	40, 42, 60	Галимов А.Ф.....	106, 304
Баженов В.Г.....	165	Гарифуллин И.Р.	125, 298
Бакулин В.Н.44, 46, 48, 82, 88, 90, 94, 121, 146, 195, 247, 253, 269, 365		Гецов Л. Б.	113
Бакулин Д.В.....	48, 54	Годзиковский В. А.	245
Балафендиева И.С.....	50	Голоскоков Д.П.....	108
Балонишников А.М.	52	Горшков А.А.....	187, 346
Барченко Ф.Б.....	54	Горшков А.С.....	288, 290
Белашова И.С.....	66, 187	Гофман И.В.....	239
Белкин А.Е.....	56	Грибанов Д.А.....	31
Белов А.А.	148	Гришин Ю.А.....	44, 111
Белов В.А.....	363	Грищенко А. И.....	113
Белов Д.Е.....	84	Груздков А.А.	115
Белостоцкий А.М.....40, 42, 58, 60, 62, 237		Гузевич С.Н.	117, 119
Белый Г.И.....	64	Гусев Е.Л.....	121, 123
Беляев А.К.....	158, 361	Давыдов Р.Л.....	125
Беляев М.О.....	194	Демидова И.И.....	127
Бережной Д.В.....	50, 96, 100	Демин А.А.	330
Бобылёв А.А.....	66	Денисов Г.В.....	129
Боденкова Е.О.	68	Диваков А.К.....	227
Бозняков Е.И.	42	Диденко Н.И.	35, 131
		Дмитриев Д.С.....	60, 237
		Додонов П.А.....	134

Дорожинский Р.К.	44, 111	Кочуров Н.Л.	84
Дьяков С.Ф.	294	Крупенин А. М.	214
Дядченко Ю.Н.	60, 237	Крыжевич С.Г.	154
Евстифеев А.Д.	136	Кузнецов Е.Б.	203
Елисеев В.В.	158	Кузнецов С.Ф.	190
Ермакова А.В.	367	Кухарева А.С.	192
Ершова А.Ю.	216	Лалин В.В.	144, 194, 294
Жигачева Н.И.	227	Лалина И.И.	294
Жигилий В.С.	138	Ланцова И.Ю.	42
Жигилий С.В.	138	Лапшин Д.А.	165
Зайцев В.Н.	141	Ларин А.А.	195
Зайченко О.К.	143	Ларин С.В.	239
Зданчук Е.В.	144	Лебедев В.Л.	197, 199
Зенкин В.А.	44, 111	Лебига В.А.	150
Игумнов Л.А.	148, 183, 185, 212, 262	Ле-Захаров С.А.	201, 351
Инфлянскас В.В.	146	Леонов С.С.	203
Ипатов А.А.	148	Лисицын П.Б.	173
Исаев С.А.	150	Литвинчук С.Ю.	148, 262
Каган-Розенцвейг Л. М.	152	Ломовской В.А.	138, 187, 346
Кадашевич Ю.И.	154	Ломунов А.К.	183, 185
Кадисов Г.М.	156	Лукин А.А.	143
Кайдалов В.Б.	165	Люлин А.В.	239
Кайтуков Т.Б.	60	Люлин С.В.	239
Калашников С.В.	158	Мазуренко А.В.	302
Калинин А.В.	353	Майер А.Е.	16, 70, 73, 76, 263
Каличава Д.К.	58	Макаров А.Г.	288
Карамов А.В.	50, 304	Мамутов В. С.	205
Карнет Ю.Н.	84	Мангушева А.Р.	207
Карпов В.В.	308	Маняк И. С.	210
Кашеварова Г.Г.	92, 218	Марков В.Г.	48
Каюмов Р.А.	161, 163, 207	Марков И.П.	212
Кибец А.И.	165	Мартиросов М.И.	214, 216
Киккас К.Н.	167	Мартиросян А.С.	218
Киселев В.Г.	312	Матросов А.В.	220
Китаева Д.А.	170	Маяцкая А.П.	98
Клованич С.Ф.	171	Мелешко В.А.	223
Козьминская О.В.	173	Мельников Б.Е.	201, 210, 225
Колесников А.В.	175	Мещеряков Ю.И.	227
Конаков Я.В.	178	Мещихин И.А.	230
Кондратьева Л.Н.	180	Миронихин А.Н.	233
Кондюрин А.В.	330	Миронов М.Ю.	323
Коновалов А.В.	182	Мозгалева М.Л.	18
Коновалов Г.В.	227	Моисеенков М.С.	280
Коноплев Ю.Г.	300, 302	Мокин Н.А.	332
Константинов А.Ю.	183, 185	Морозов В.А.	143
Корнев Ю.В.	84	Мугин О.О.	235
Коровайцева Е.А.	187	Мухамедова И.З.	163, 207
Королёв И.А.	35	Нагибович А.И.	60, 237
Коршунов В.А.	276, 278	Назаров Р.А.	325
Костриченко А.Б.	141	Назарычев В.М.	239
Коцкович А.В.	321	Негрозов О.А.	60, 242
Кочнев А.С.	251	Недбай А.Я.	90

Непочатов А. В.	245	Салихова Е. А.	325
Нестерова О. П.	334	Салмин И. А.	295
Неутов И. Д.	247	Санжаровский А. Ю.	48
Никонова Н. В.	249, 334	Сапарова Г. Б.	170
Новиков П. И.	58	Сахаров И. И.	297
Носиков А. И.	225	Саченков О. А.	298, 300, 302, 342
Овидько И. А.	178, 251	Секаева Л. Р.	50, 304
Овсянникова Н. Ю.	253	Селютина Н. С.	70, 306
Овчинников Д. Ю.	290	Семенов А. А.	308
Одинцов О. А.	255	Семенов А. С.	113, 201, 225
Орлов О. А.	325	Семенов Б. Н.	251
Осипов Ю. Г.	104	Семенов В. А.	197, 199, 310
Острик А. В.	82, 258	Семенов Н. А.	84
Островский К. И.	58, 60, 190, 237	Сенянский М. В.	245
Остропико Е. С.	260	Сергеев О. А.	312
Павлов А. С.	60, 237	Сергеева С. А.	312
Панич А. Е.	104	Симборт Э.	284
Парамонов В. Н.	297	Скрипнюк Д. Ф.	314, 338
Паршина М. С.	84	Смердов А. А.	233
Пеньковой С. Б.	60	Смирнов В. И.	317
Петров А. Н.	262	Смоляков А. А.	320
Петров Ю. В.	70	Соколов В. Г.	267
Петряшев Н. О.	60	Соколов Е. В.	86
Петряшев С. О.	60	Солдатов А. Ю.	197, 199
Поварова И. Б.	180	Степашкина А. С.	321
Погорелко В. В.	16	Строганова О. С.	323
Половцев С. В.	104	Султанов Л. У.	12, 50, 125, 298, 342
Помыткин С. П.	154	Сысоева Е. В.	332
Пономарев Д. А.	276, 278	Табаков П. Ю.	325
Пономаренко С. А.	370	Тащилов С. В.	233
Попова Т. В.	263	Терпугов В. Н.	328, 330
Потапенко А. Л.	62	Тихилов Р. М.	302
Потопахин В. А.	48	Травуш В. И.	218
Прозорова Э. В.	265	Трубников С. А.	197, 199, 310
Прокопов В. С.	271	Трушин С. И.	332
Разов А. И.	260	Уздин А. М.	249, 284, 334
Разов И. О.	267	Улитин В. В.	336, 338, 355
Раимбердиев Т. П.	225	Улицкий В. М.	297
Ревенко В. П.	269	Уповалов В. В.	320
Ренев С. А.	271	Усманов А. Р.	40, 42
Репинский В. В.	48	Уткин А. А.	341
Родионов А. А.	276, 278	Уткин А. В.	258
Розин Л. А.	357	Фахрутдинов Л. Р.	12, 342
Романов Ю. И.	292	Федонюк Н. Н.	134
Романова А. А.	288	Федоров И. В.	351
Рудаев Я. И.	170	Федорова М. Ю.	334
Русаков С. В.	280	Федоровский Г. Д.	344
Рутман Ю. Л.	223, 282, 284	Фомина О. В.	227
Рыбина И. И.	286	Фомкина З. И.	346
Рымкевич П. П.	288, 290	Фрумен А. И.	323
Рюмин М. Г.	292	Харжавина В. С.	12
Савченко А. В.	194, 294	Харисламова Л. У.	300

Хасанов Р.Ф.	298	Шевченко С.А.	359
Хищенко К.В.	263	Шейнерман А.Г.	178
Хоминич Д.С.	56	Шестаков А.П.	295
Хомяков М.К.	253	Шивуа А. Дж.	282
Цейтлин Б.В.	349, 351	Шигапова Ф.А.	300
Чекмарев Д.Т.	353	Ширунов Г.Н.	220
Черногорский С.А.	355	Шурпатов А.О.	361
Чернышева Н.В.	357	Щербина С.В.	40, 42, 237, 363
Шакирзянов Ф.Р.	161	Юмашев О.Б.	84
Шакирова А.Т.	106, 342	Юргенсон С.А.	365
Швецов К.В.	355	Яновский Ю.Г.	84

ОГЛАВЛЕНИЕ

PROPERTIES OF OPERATORS AND OPERATOR-VALUED FUNCTIONS IN THE ANALYSIS OF INHOMOGENEOUS LAYERED ELASTIC SYSTEMS <u>Galileev S.M., Tabakov P.Y., Jaghmaidze A.</u>	4
RARE MESH SCHEME FOR SOLVING THREE-DIMENSIONAL PROBLEMS OF ELASTICITY THEORY ON THE BASIS OF 10-NODE FINITE ELEMENT <u>Spirin S.V., Chekmarev D.T.</u>	6
AN APPLICATION OF EVOLUTIONARY ALGORITHMS FOR THE DESIGN OPTIMISATION OF COMPLEX ENGINEERING STRUCTURES <u>Tabakov P.Y., Galileev S.M.</u>	9
DIGITAL IMAGE CORRELATION <u>Zangi O.</u>	11
ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ ТРЕХМЕРНЫХ ТЕЛ ИЗ НЕСЖИМАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ <u>Абдрахманова А.И., Султанов Л.У., Харжавина В.С., Фахрутдинов Л.Р.</u>	12
ЗАКОНОМЕРНОСТЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НАБУХАНИЯ ГРУНТА ПОД ФУНДАМЕНТАМИ И ПОДЗЕМНЫМИ СООРУЖЕНИЯМИ <u>Абжалимов Р.Ш.</u>	14
МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ СОУДАРЕНИЙ МЕДНЫХ И АЛЮМИНИЕВЫХ НАНОЧАСТИЦ С ПОВЕРХНОСТЯМИ МЕДНЫХ И АЛЮМИНИЕВЫХ ПОДЛОЖЕК <u>Авдеева А.В., Погорелко В.В., Майер А.Е.</u>	16
ДИСКРЕТНЫЕ И ДИСКРЕТНО-КОНТИНУАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ МНОГОУРОВНЕВОГО РАСЧЕТА СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АППАРАТА ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА <u>Акимов П.А., Мозгалева М.Л.</u>	18
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА ФЛАНЦЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ <u>Аллахвердов Б.М.</u>	20
СИСТЕМЫ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИИ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ И ГОРНЫХ ПОРОД <u>Ананьев В.В.</u>	22
ПРИЛОЖЕНИЕ КОНЦЕПЦИИ РАЗРЫХЛЕНИЯ К ПРОБЛЕМЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПОЛЗУЧЕСТИ И ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ МЕТАЛЛОВ <u>Арутюнян Р.А.</u>	24
УСЛОВИЕ ПЕРЕХОДА В НЕСТАБИЛЬНОЕ СОСТОЯНИЕ (ШЕЙКООБРАЗОВАНИЕ) СЖИМАЕМОЙ УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКОЙ СРЕДЫ <u>Арутюнян А.Р., Арутюнян Р.А.</u>	26
ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ПРИЛОЖЕНИЯ МНОГОУРОВНЕВЫХ ДИСКРЕТНЫХ И ДИСКРЕТНО-КОНТИНУАЛЬНЫХ ПОДХОДОВ К ЛОКАЛЬНОМУ РАСЧЕТУ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ <u>Акимов П.А., Аслами М.</u>	28
МЕТОДИКА КВАЛИМЕТРИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ СОПРОТИВЛЕНИЯ РАЗРУШЕНИЮ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ УДАРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ <u>Атрошенко С.А., Грибанов Д.А.</u>	31
МАСШТАБНЫЕ УРОВНИ МЕХАНИЗМОВ ДИНАМИЧЕСКОГО ТРАНСЛЯЦИОННОГО РАЗРУШЕНИЯ <u>Атрошенко С.А.</u>	33

ОЦЕНКА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ ВЫСОКОХРОМИСТЫХ СТАЛЕЙ МОДИФИЦИРОВАННЫМ МЕТОДОМ ХАРРИНГТОНА	
<u>Атрошенко С.А.</u> , Королёв И.А., Диденко Н.И.	35
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ РЕЗЕРВУАРА С ЖИДКОСТЬЮ ПРИ СЕЙСМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ. ГИДРОУПРУГАЯ ПОСТАНОВКА	
Белостоцкий А.М., Акимов П.А., <u>Афанасьева И.Н.</u> , Вершинин В.В., Щербина С.В., Усманов А.Р.	40
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАДАЧ СТРОИТЕЛЬНОЙ АЭРОГИДРОУПРУГОСТИ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ	
<u>Афанасьева И.Н.</u> , Белостоцкий А.М., Вершинин В.В., Щербина С.В., Ланцова И.Ю., Бозняков Е.И., Усманов А.Р.	42
ПРИМЕНЕНИЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВПУСКНОЙ СИСТЕМЫ ДВИГАТЕЛЯ	
Гришин Ю.А., Зенкин В.А., Дорожнинский Р.К., <u>Бакулин В.Н.</u>	44
ТРЕХМЕРНАЯ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ АНАЛИЗА НАПРЯЖЕННО- ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СЛОЯ ЗАПОЛНИТЕЛЯ СЛОИСТО- НЕОДНОРОДНЫХ НЕРЕГУЛЯРНЫХ ОБОЛОЧЕК ВРАЩЕНИЯ	
<u>Бакулин В.Н.</u>	46
АНАЛИЗ СХОДИМОСТИ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫХ МОДЕЛЕЙ ТОНКИХ МОМЕНТНЫХ ОБОЛОЧЕК	
<u>Бакулин Д.В.</u> , Бакулин В.Н., Репинский В.В., Марков В.Г., Потопахин В.А., Санжаровский А.Ю.	48
МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ПРОЦЕССОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СУХИХ И ВОДОНАСЫЩЕННЫХ ГРУНТОВЫХ СРЕД С ДЕФОРМИРУЕМЫМИ КОНСТРУКЦИЯМИ	
<u>Балафендиева И.С.</u> , Бережной Д.В., Карамов А.В., Секаева Л.Р., Султанов Л.У.	50
ЗАКОНЫ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДЛЯ ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕЧЕНИЯ ТЕЙЛОРА-КУЭТТА ПРИ ОЧЕНЬ БОЛЬШИХ ЧИСЛАХ ТЕЙЛОРА	
<u>Балонишников А.М.</u>	52
РАСЧЕТ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ ТЕПЛОВОГО НАГРУЖЕНИЯ ЦИЛИНДРО- ПОРШНЕВОЙ ГРУППЫ В ЖИЗНЕННОМ ЦИКЛЕ АВТОМОБИЛЬНОГО ДИЗЕЛЯ	
<u>Барченко Ф.Б.</u> , Бакулин Д.В.	54
АНАЛИЗ РАБОТЫ ПОЛИУРЕТАНОВЫХ АМОРТИЗАТОРОВ ТОННЕЛЬНОГО ТИПА ПРИ БОЛЬШИХ ДЕФОРМАЦИЯХ В УСЛОВИЯХ СТАТИЧЕСКОГО И ДИНАМИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ	
<u>Белкин А.Е.</u> , Брезгин Н.А., Хоминич Д.С.	56
АДАПТИВНЫЕ ДИНАМИЧЕСКИЕ КОНЕЧНОЭЛЕМЕНТНЫЕ МОДЕЛИ В ОСНОВЕ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА КОНСТРУКЦИЙ УНИКАЛЬНЫХ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ	
<u>Белостоцкий А.М.</u> , Каличава Д.К., Островский К.И., Новиков П.И.	58
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРУЗОК И ВОЗДЕЙСТВИЙ, НДС, ПРОЧНОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ УНИКАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ, ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ. ОПЫТ 2013-2015 ГГ.	
<u>Белостоцкий А.М.</u> , Акимов П.А., Кайтуков Т.Б., Павлов А.С., Пеньковой С.Б., Аул А.А., Афанасьева И.Н., Вершинин В.В., Дмитриев Д.С., Дядченко Ю.Н., Нагибович А.И., Негрозов О.А., Островский К.И., Петряшев С.О., Петряшев Н.О.	60

СОВРЕМЕННЫЕ ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И САПР-ТЕХНОЛОГИИ В ПРОЧНОСТНЫХ РАСЧЕТАХ ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМ. ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС АСТРА-НОВА'2015	
<u>Белостоцкий А.М.</u> , Воронова Г.А. , Потапенко А.Л., Аул А.А.	62
ПРОСТРАНСТВЕННАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ СТЕРЖНЕВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПЕРЕМЕННОЙ ЖЕСТКОСТИ	
<u>Белый Г.И.</u> , Аскинази В.Ю.	64
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ ПРИ КОНТАКТНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ УПРУГОГО ТЕЛА С ЖЕСТКИМ ШТАМПОМ	
<u>Бобылёв А.А.</u> , Белашова И.С.	66
ЗАДАЧА О ВЗАИМОДЕЙСТВИИ БИООБЪЕКТОВ	
<u>Боденкова Е.О.</u>	68
ЗАВИСИМОСТЬ ХАРАКТЕРНЫХ ВРЕМЕН РЕЛАКСАЦИИ ОТ СТРУКТУРЫ МАТЕРИАЛА ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ МЕХАНИЗМОВ ПЛАСТИЧНОСТИ	
<u>Бородин И.Н.</u> , Селютина Н.С., Петров Ю.В., Майер А.Е.	70
ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДВОЙНИКОВАНИЯ В СТАЛИ 12Х18Н10Т ПРИ РАЗЛИЧНОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ ДИНАМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ	
<u>Бородин И.Н.</u> , Атрошенко С.А., Майер А.Е.	73
ИССЛЕДОВАНИЕ ОТКОЛЬНОГО РАЗРУШЕНИЯ МЕДИ И АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА Д16 В СЛАБЫХ И СИЛЬНЫХ УДАРНЫХ ВОЛНАХ	
Майер А.Е., <u>Бородин И.Н.</u> , Атрошенко С.А.	76
СРАВНЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ПОДХОДОВ ДЛЯ ПРЕДСКАЗАНИЯ ЭВОЛЮЦИИ ДИСЛОКАЦИОННОЙ СТРУКТУРЫ И ДИНАМИЧЕСКОЙ РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ В МЕДИ И АЛЮМИНИИ ПОДВЕРГНУТЫХ РКУП	
<u>Братов В.А.</u> , Бородин И.Н.	79
НЕСТАЦИОНАРНОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННЫХ ОБОЛОЧЕК ПЕРЕМЕННОЙ ТОЛЩИНЫ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИИ	
<u>Бугай И.В.</u> , Бакулин В.Н., Острик А.В.	82
АТОМНО - СИЛОВАЯ МИКРОСКОПИЯ И ФИЗИКО - МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НОВЫХ ЭЛАСТОМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ	
<u>Валиев Х.Х.</u> , Карнет Ю.Н., Корнев Ю.В., Кочуров Н.Л., Паршина М.С., Семенов Н.А., Юмашев О.Б., Белов Д.Е., Яновский Ю.Г.	84
О РЕШЕНИИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ПЛАСТИНКИ МЕТОДОМ РАЗДЕЛЕНИЯ ПЕРЕМЕННЫХ	
<u>Видюшенков С.А.</u> , Соколов Е.В.	86
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЁННО ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ ПРИ ДЕЙСТВИИ СОСРЕДОТОЧЕННЫХ РАДИАЛЬНЫХ СИЛ	
<u>Виноградов Ю.И.</u> , Бакулин В.Н.	88
ДИНАМИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ОРТОТРОПНОЙ ОБОЛОЧКИ С ЗАПОЛНИТЕЛЕМ, ПОДКРЕПЛЕННОЙ РЕБРАМИ ПРИ ДЕЙСТВИИ ОСЕВЫХ СИЛ	
<u>Волков Е.Н.</u> , Бакулин В.Н., Недбай А.Я.	90
МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ДЕФОРМАЦИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА УНИКАЛЬНОЕ ЗДАНИЕ И СПОСОБОВ ЕГО ЗАЩИТЫ	
<u>Воробьев А.В.</u> , Кашеварова Г.Г.	92

АЛГОРИТМ ФОРМИРОВАНИЯ УНИВЕРСАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ПОСАДКИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА КАК СТРУКТУРНО-СЛОЖНОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С ВНУТРЕННИМИ СВЯЗЯМИ	
<u>Воронин В.В., Бакулин В.Н., Борzych С.В.</u>	94
ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ СЫПУЧИХ СПЛОШНЫХ СРЕД НА ОСНОВЕ МЕТОДА ЧАСТИЦ	
<u>Бережной Д.В., Габсаликова Н.Ф.</u>	96
КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРЕДНАПРЯЖЕННЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ	
<u>Гайджуров П.П., Высоковский Д.А., Маяцкая А.П.</u>	98
ОЦЕНКА УДЕЛЬНОЙ ЭНЕРГОЕМКОСТИ МАХОВИЧНЫХ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ, НАХОДЯЩИХСЯ В ПОТЕНЦИАЛЬНОМ ПОЛЕ	
<u>Бережной Д.В., Гайнулина Л. Р.</u>	100
МЕТОД КОНТАКТНОЙ ДИСКРЕТИЗАЦИИ	
<u>Галилеев М.Д., Галилеев С.М.</u>	102
ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МЕТОДЫ МАСШТАБНОГО ПОЛУЧЕНИЯ НАНОПРОДУКТОВ ДЛЯ ШИРОКОГО ПРОМЫШЛЕННОГО ПРИМЕНЕНИЯ	
<u>Половцев С.В., Осипов Ю.Г., Панич А.Е., Галилеев С.М.</u>	104
ТЕРМОПЛАСТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ РЕЗЕРВУАРОВ СЛОЖНОЙ ГЕОМЕТРИИ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В ХИМИЧЕСКОМ ПРОИЗВОДСТВЕ	
<u>Габибова А.К., Галимов А.Ф., Шакирова А.Т.</u>	106
К АНАЛИТИЧЕСКОМУ РАСЧЕТУ ПОЛОГОЙ ОБОЛОЧКИ, ПОДКРЕПЛЕННОЙ РЕБРАМИ ПЕРЕМЕННОЙ ЖЕСТКОСТИ	
<u>Голоскоков Д.П.</u>	108
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕЧЕНИЯ ЧЕРЕЗ ВПУСКНОЙ КЛАПАН ПОРШНЕВОГО ДВИГАТЕЛЯ	
<u>Гришин Ю.А., Дорожинский Р.К., Зенкин В.А.</u>	111
МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕУПРУГОЙ ДЕФОРМАЦИИ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СУПЕРСПЛАВОВ С УЧЕТОМ ЭВОЛЮЦИИ Г/Г' ФАЗ	
<u>Грищенко А. И., Семенов А. С., Гецов Л. Б.</u>	113
НЕЛОКАЛЬНЫЕ КРИТЕРИИ РАЗРУШЕНИЯ И ПРОБЛЕМА УНИВЕРСАЛЬНОСТИ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК	
<u>Груздков А.А.</u>	115
ПАРНЫЕ ОТОБРАЖЕНИЯ ОБЪЕКТА, ОСНОВА ТОЧНЫХ ДЕТЕРМИНИРОВАННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ	
<u>Гузович С.Н.</u>	117
ДЕТЕРМИНИРОВАННОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ И ИЗМЕРЕНИЕ ОТОБРАЖЕНИЙ ОБЪЕКТА	
<u>Гузович С.Н.</u>	119
ВАРИАЦИОННАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ТРЕБУЕМЫМ И РЕГУЛИРУЕМЫМ КОМПЛЕКСОМ СВОЙСТВ ПРИ ВОЛНОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ	
<u>Гусев Е.Л., Бакулин В.Н.</u>	121
ПРИМЕНЕНИЕ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ПРОЦЕДУР ПОИСКА ЭКСТРЕМУМА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ	
<u>Гусев Е.Л.</u>	123

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНЕЧНЫХ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ	
<u>Давыдов Р.Л., Султанов Л.У., Гарифуллин И.Р.</u>	125
О ВОЗМОЖНОСТЯХ ПРИМЕНЕНИЯ ПРИВЕДЕННОГО ВРЕМЕНИ ДЛЯ БИОСИСТЕМ	
<u>Демидова И.И.</u>	127
ОСНОВНАЯ ЧАСТОТА СОБСТВЕННЫХ ПРОДОЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ КОНСОЛЬНОГО СТЕРЖНЯ, РАСПОЛОЖЕННОГО НА УПРУГОМ ОСНОВАНИИ С ДВУМЯ УЧАСТКАМИ РАЗЛИЧНОЙ ЖЕСТКОСТИ	
<u>Денисов Г.В.</u>	129
КОНЦЕПЦИЯ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛИ АРКТИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ	
<u>Диденко Н.И.</u>	131
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА В УСЛОВИЯХ МНОГООСНОГО НАГРУЖЕНИЯ	
<u>Додонов П.А., Федонюк Н.Н.</u>	134
ВРЕМЕННЫЕ ЭФФЕКТЫ РАЗРУШЕНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ	
<u>Евстифеев А.Д.</u>	136
ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЛАКСАЦИОННЫХ ЯВЛЕНИЙ В ПОЛИМЕТИЛМЕТАКРИЛАТЕ	
<u>Ломовской В.А., Жигилий С.В., Жигилий В.С.</u>	138
ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КОМПОЗИТНОЙ ОБОЛОЧКИ С ГЕРМЕТИЧНЫМ СЛОЕМ ИЗ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ	
<u>Зайцев В.Н., Костриченко А.Б.</u>	141
ДИНАМИЧЕСКОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ И РАЗРУШЕНИЕ ТОНКИХ МЕТАЛИЧЕСКИХ КОЛЬЦЕВЫХ ОБРАЗЦОВ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНЫМ МЕТОДОМ	
<u>Зайченко О.К., Лукин А.А., Морозов В.А.</u>	143
УСЛОВИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ РАЗРЫВА ДЛЯ РЕДУЦИРОВАННОЙ СРЕДЫ КОССЕРА	
<u>Лалин В.В., Зданчук Е.В.</u>	144
ПОСТРОЕНИЕ КРИТЕРИЯ АДАПТАЦИИ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ СЕТКИ	
<u>Инфлянскас В.В., Бакулин В.Н.</u>	146
ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ГРАНИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ ДИНАМИКИ В ПОРОВАЗКОУПРУГОЙ ПОСТАНОВКЕ	
<u>Игумнов Л.А., Ипатов А.А., Белов А.А., Литвинчук С.Ю.</u>	148
РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ МНОГООБЛОЧНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ АЭРОДИНАМИКИ ВЫСОТНЫХ СООРУЖЕНИЙ С УЧЕТОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С ВИХРЕВЫМИ ВОЗМУЩЕНИЯМИ	
<u>Исаев С.А., Ватин Н.И., Miao Jiun-Jih, Лебига В.А.</u>	150
О ВЫЧИСЛЕНИИ ЧАСТОТ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ СЖАТЫХ СТЕРЖНЕЙ ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ	
<u>Каган-Розенцвейг Л. М.</u>	152
МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАОТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ ДЛЯ ОДНОМЕРНОЙ ДИНАМИКИ С СУХИМ ТРЕНИЕМ	
<u>Кадашевич Ю.И., Крыжевич С.Г., Помыткин С.П.</u>	154
ДИНАМИКА СИСТЕМЫ «ВАНТОВЫЙ МОСТ + РЕГУЛЯРНАЯ КОЛОННА ГРУЗОВЫХ АВТОМОБИЛЕЙ»	
<u>Кадисов Г.М.</u>	156

ВРАЩЕНИЕ УПРУГОГО ВАЛА В ЖЕСТКОЙ ТРУБКЕ <u>Калашников С.В.</u> , Елисеев В.В., Беляев А.К.	158
ВЫЧИСЛЕНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ ПОЛЗУЧЕСТИ ГРУНТОВ ПО НАСЛЕДСТВЕННОЙ ТЕОРИИ ПРИ ПОСТОЯННЫХ И ЦИКЛИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ <u>Каюмов Р.А.</u> , Шакирзянов Ф.Р.	161
МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ПЛЕНОЧНО-ТКАНЕВЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ ТЕМПЕРАТУРЫ И СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ <u>Каюмов Р.А.</u> , Мухамедова И.З.	163
КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЧНОСТИ ВНУТРИОБЪЕКТОВЫХ ТРАНСПОРТНЫХ КОНТЕЙНЕРОВ РЕАКТОРОВ ТИПА БН ПРИ АВАРИЙНОМ ПАДЕНИИ Баженов В.Г., Кайдалов В.Б., <u>Кибец А.И.</u> , Лапшин Д.А.	165
МЕЖДУНАРОДНЫЙ ТРАНСПОРТНЫЙ КОРИДОР В МОРСКОМ ПРОСТРАНСТВЕ АРКТИКИ <u>Киккас К.Н.</u>	167
О ДЕФОРМИРОВАНИИ ТОЛСТОСТЕННЫХ ТРУБ В УСЛОВИЯХ СВЕРХПЛАСТИЧНОСТИ <u>Китаева Д.А.</u> , Рудаев Я.И., Сапарова Г.Б.	170
ТЕРМОПОЛЗУЧЕСТЬ БЕТОНА ПРИ РЕЖИМНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ <u>Клованич С.Ф.</u>	171
ПРИМЕНЕНИЕ КОМПОЗИТНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ АВТОМОБИЛЬНЫХ И ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ, А ТАКЖЕ ДРУГИХ ТРАНСПОРТНЫХ КОММУНИКАЦИЙ <u>Козьминская О.В.</u> , Лисицын П.Б.	173
СОВРЕМЕННЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ И РАСЧЕТА ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ В ПК ЛИРА 10.4 <u>Колесников А.В.</u>	175
ВЛИЯНИЕ НЕКОГЕРЕНТНЫХ НАНОВКЛЮЧЕНИЙ НА МИГРАЦИЮ ГРАНИЦ ЗЕРЕН В НАНОКОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛАХ <u>Конаков Я.В.</u> , Овидько И.А., Шейнерман А.Г.	178
ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА ВЕЛИЧИНУ КРИТИЧЕСКОЙ СИЛЫ И ЧАСТОТЫ СВОБОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ СКЛАДЧАТЫХ ОБОЛОЧЕК <u>Кондратьева Л.Н.</u> , Поварова И.Б.	180
ДИНАМИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ ПОДКРЕПЛЕННОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПОДВИЖНОЙ НАГРУЗКИ <u>Коновалов А.В.</u> , Антуфьев Б.А.	182
ПРИМЕНЕНИЕ ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ АНАЛИЗА НОВЫХ МЕТОДИК ДИНАМИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ <u>Константинов А.Ю.</u> , Брагов А.М., Игумнов Л.А., Ломунов А.К.	183
СОВРЕМЕННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К РАЦИОНАЛЬНОМУ ПРОЕКТИРОВАНИЮ ОБЪЕКТОВ НОВОЙ ТЕХНИКИ <u>Константинов А.Ю.</u> , Брагов А.М., Игумнов Л.А., Ломунов А.К.	185
ВКЛАД ЛИНЕЙНЫХ И ТОЧЕЧНЫХ ДЕФЕКТОВ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ В АМПЛИТУДНО НЕЗАВИСИМУЮ ВЕТВЬ ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ Белашова И.С., Горшков А.А., <u>Коровайцева Е.А.</u> , Ломовской В.А.	187
ИТЕРАЦИОННЫЙ МЕТОД РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ФИЗИЧЕСКИ НЕЛИНЕЙНОЙ ЗАДАЧИ ДЛЯ СИСТЕМЫ БАЛКА – УПРУГОЕ ОСНОВАНИЕ <u>Кузнецов С.Ф.</u> , Островский К.И.	190

РЕШЕНИЕ КРАЕВЫХ ЗАДАЧ ДЛЯ ЦИЛИНДРА И ПЛАСТИНЫ ИЗ СПЛАВА С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ <u>Кухарева А.С.</u>	192
НОВАЯ ПОСТАНОВКА ЛИНЕЙНЫХ ЗАДАЧ МЕХАНИКИ С МОМЕНТНЫМИ ВОЗДЕЙСТВИЯМИ <u>Лалин В.В.</u> , Савченко А.В., Беляев М.О.	194
ОЦЕНКА СНИЖЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СЛОИСТЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПОМОЩЬЮ КОМПЬЮТЕРНОЙ РЕНТГЕНОВСКОЙ ТОМОГРАФИИ <u>Ларин А.А.</u> , Бакулин В.Н.	195
КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УТОЧНЕНИЯ КОНЕЧНОЭЛЕМЕНТНЫХ МОДЕЛЕЙ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИЗМЕРЕНИЙ ИХ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК <u>Лебедев В.Л.</u> , Семенов В.А., Солдатов А.Ю., Трубников С.А.	197
КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРАВЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ <u>Лебедев В.Л.</u> , Семенов В.А., Солдатов А.Ю., Трубников С.А.	199
МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОГО ПОВЕДЕНИЯ НАСЫЩЕННЫХ ГРУНТОВЫХ И СКАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ СЛОЖНОМ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОРОПЛАСТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ <u>Ле-Захаров С. А.</u> , Мельников Б. Е., Семёнов А. С.	201
ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСТАНОВИВШЕГОСЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ В СПЛОШНЫХ ВРАЩАЮЩИХСЯ ДИСКАХ <u>Кузнецов Е.Б.</u> , <u>Леонов С.С.</u>	203
ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВОЛНЫ СЖАТИЯ СО СЛОЕМ КАВИТИРОВАННОЙ ВОДЫ ПРИ ЭЛЕКТРОГИДРОИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКЕ <u>Мамутов В. С.</u>	205
УЧЕТ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ ОЦЕНКЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ ПЛЕНОЧНО-ТКАНЕВОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА <u>Каюмов Р.А.</u> , <u>Мангушева А.Р.</u> , Мухамедова И.З.	207
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ БИАКСИАЛЬНОЙ СТЕКЛОТКАНИ <u>Мельников Б. Е.</u> , <u>Маняк И. С.</u>	210
МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАТИКИ И ДИНАМИКИ ТРЕХМЕРНЫХ СОСТАВНЫХ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ТЕЛ МЕТОДОМ ГРАНИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ <u>Игумнов Л.А.</u> , <u>Марков И.П.</u> , Аменицкий А.В.	212
КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УДАРА КРУГОВОЙ ТРЕХСЛОЙНОЙ ПЛАСТИНЫ НЕСИММЕТРИЧНОГО СТРОЕНИЯ ПО ТОЛЩИНЕ О ЖИДКОСТЬ <u>Крупенин А. М.</u> , <u>Мартиросов М.И.</u>	214
ДЕФОРМИРОВАНИЕ И РАЗРУШЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ АВИАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ С УГЛЕРОДНЫМ НАПОЛНИТЕЛЕМ <u>Мартиросов М.И.</u> , Ершова А.Ю.	216
ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ СВЯЗЕЙ СЦЕПЛЕНИЯ ПРИ ВДАВЛИВАНИИ СТЕРЖНЯ ЖЕСТКОЙ АРМАТУРЫ В БЕТОН <u>Кашеварова Г.Г.</u> , <u>Мартиросян А.С.</u> , Травуш В.И.	218
МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДОМ НАЧАЛЬНЫХ ФУНКЦИЙ ИЗГИБА ПЛИТ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СОБСТВЕННОГО ВЕСА <u>Матросов А.В.</u> , Ширунов Г.Н.	220

ОБОБЩЕНИЕ МЕТОДА СИЛ ДЛЯ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО РАСЧЕТА СТЕРЖНЕВЫХ СИСТЕМ	
Рутман Ю.Л., Мелешко В.А.	223
ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ КОРОТКОЙ УСТАЛОСТНОЙ ТРЕЩИНЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЛОКАЛЬНОГО КРИТЕРИЯ РАЗРУШЕНИЯ	
Семенов А.С., Носиков А.И., Мельников Б.Е., Раимбердиев Т.П.	225
О СТРУКТУРНОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ УДАРНО-ДЕФОРМИРУЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ	
Мещеряков Ю.И., Жигачева Н.И., Диваков А.К., Коновалов Г.В., Фомина О.В.	227
МОНИТОРИНГ ТЕХНИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ РЕДУЦИРОВАННЫХ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫХ МОДЕЛЕЙ	
Мещихин И.А., Гаврюшин С.С.	230
ОПТИМАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ МНОГОСЛОЙНОЙ КОНИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ ПРИ ТЕРМОСИЛОВОМ НАГРУЖЕНИИ	
Смердов А.А., Тащилов С.В., Миронихин А.Н.	233
ВОПРОСЫ СНИЖЕНИЯ ВИБРАЦИИ И ШУМА, ПЕРЕДАВАЕМОЙ ПОЕЗДАМИ МЕТРОПОЛИТЕНА В ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ	
Мугин О.О.	235
ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТОВ НДС, ПРОЧНОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ КОНСТРУКЦИЙ ФУТБОЛЬНЫХ СТАДИОНОВ К ЧЕМПИОНАТУ МИРА 2018Г.	
Белостоцкий А.М., Нагибович А.И., Дмитриев Д.С., Островский К.И., Павлов А.С., Дядченко Ю.Н., Аул А.А., Щербина С.В.	237
ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТЕРМОПЛАСТИЧНОГО ПОЛИИМИДА Р-ООД ПОД ДЕЙСТВИЕМ ОДНООСНОГО РАСТЯЖЕНИЯ. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ	
Назарычев В.М., Люлин А.В., Ларин С.В., Гофман И.В., Kenny J.M., Люлин С.В.	239
ПРИМЕНЕНИЕ АППРОКСИМИРУЮЩИХ СЕТОК НЕРЕГУЛЯРНОЙ СТРУКТУРЫ В ДИСКРЕТНО-КОНТИНУАЛЬНОМ МЕТОДЕ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ РАСЧЕТА СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ	
Акимов П.А., Негрозов О.А.	242
РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПРОЕКТИРОВАНИЯ УПРУГОГО ЭЛЕМЕНТА ТЕНЗОРЕЗИСТОРНОГО ДАТЧИКА СИЛЫ	
Непочатов А. В., Гаврюшин С. С., Годзиковский В. А., Сенянский М. В.	245
РАСЧЕТ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ТРУБЧАТОЙ МЕМБРАНЫ С НАНОПОРИСТОЙ СТЕНКОЙ	
Неутов И.Д., Бакулин В.Н.	247
ЗАДАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ СЕЙСМОИЗОЛЯЦИИ	
Никонова Н. В., Уздин А. М.	249
ДЕФОРМИРОВАНИЕ, УСТОЙЧИВОСТЬ И РАЗРУШЕНИЕ НАНООБЪЕКТОВ	
Кочнев А.С., Овидько И.А., Семенов Б.Н.	251
ДИНАМИКА ОТДЕЛЕНИЯ СПУСКАЕМОГО АППАРАТА ОТ ОТДЕЛЯЕМОГО ГОЛОВНОГО БЛОКА ПРИ АВАРИИ РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ ПОСЛЕ СБРОСА ОСНОВНОГО ДВИГАТЕЛЯ СИСТЕМЫ АВАРИЙНОГО СПАСЕНИЯ	
Овсянникова Н.Ю., Бакулин В.Н., Хомяков М.К.	253
АНАЛИЗ ГИПЕРУПРУГОГО ПОВЕДЕНИЯ АРОЧНОГО АМОРТИЗАТОРА	
Одинцов О.А.	255
РАСЧЕТ УДАРНОЙ АДИАБАТЫ СИНТАКТИКА ПРИ НАЛИЧИИ ГАЗА В ПОЛЫХ МИКРОСФЕРАХ	
Острик А.В., Уткин А.В.	258

КОНИЧЕСКИЕ РАБОЧИЕ ЭЛЕМЕНТЫ ИЗ СПЛАВА TiNi <u>Остропики Е.С., Разов А.И.</u>	260
ГРАНИЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ СЛОИСТОГО ПОРОУПРУГОГО ПОЛУПРОСТРАНСТВА С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ РУНГЕ- КУТТЫ <u>Игумнов Л.А., Литвинчук С.Ю., Петров А.Н., Айзикович С.М.</u>	262
ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УДАРНЫХ ВОЛН ПО ПОЛИМЕРНЫМ МАТЕРИАЛАМ <u>Попова Т.В., Майер А.Е., Хищенко К.В.</u>	263
ВЛИЯНИЕ ЦЕНТРА ИНЕРЦИИ И ЭФФЕКТОВ ДИСПЕРСИИ В МЕХАНИКЕ <u>Прозорова Э.В.</u>	265
ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ И ДИНАМИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ НАЗЕМНЫХ ТОНКОСТЕННЫХ ГАЗОПРОВОДОВ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА <u>Разов И.О., Соколов В.Г.</u>	267
О МЕТОДЕ ОДНОРОДНЫХ РЕШЕНИЙ В ТРЕХМЕРНЫХ ЗАДАЧАХ ДЛЯ МНОГОСЛОЙНОГО ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ТЕЛА <u>Ревенко В.П., Бакулин В.Н.</u>	269
РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ <u>Ренев С.А., Прокопов В.С.</u>	271
ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ТРЕХСЛОЙНЫХ ПАНЕЛЕЙ <u>Родионов А.А., Коршунов В.А., Пономарев Д.А.</u>	276
АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ТРЕХСЛОЙНЫХ ПАНЕЛЕЙ ПРИ ПОПЕРЕЧНОМ ИЗГИБЕ <u>Родионов А.А., Коршунов В.А., Пономарев Д.А.</u>	278
ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА ПОЛИМЕРИЗУЮЩЕЙСЯ СМЕСИ С УЧЕТОМ ДИФФУЗИИ И УНОСА С ПОВЕРХНОСТИ <u>Русаков С.В., Моисеенков М.С.</u>	280
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ОЦЕНОК СЕЙСМИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ, ПОСТУПИВШЕЙ В СООРУЖЕНИЕ <u>Рутман Ю. Л., Шивуа А. Дж.</u>	282
СОВРЕМЕННЫЕ КОНЦЕПЦИИ РАСЧЕТА СЕЙСМОСТОЙКОСТИ СООРУЖЕНИЙ <u>Рутман Ю.Л., Уздин А.М., Симборт Э.</u>	284
К ВОПРОСУ ПРЕПОДАВАНИЯ СТРОИТЕЛЬНОЙ МЕХАНИКИ <u>Рыбина И.И.</u>	286
КВАНТОВАЯ ЛОГИКА ОКРУЖАЮЩЕГО МИРА <u>Рымкевич П.П., Горшков А.С., Романова А.А., Макаров А.Г.</u>	288
ПРИРОДА НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ В КЛАССИЧЕСКОЙ МЕХАНИКЕ <u>Рымкевич П.П., Овчинников Д.Ю., Горшков А.С.</u>	290
МЕХАНИКА НАДЕЖНОСТИ. ТЕРМИНОЛОГИЧЕСКИЙ АСПЕКТ. МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЙ БАЗИС. ХАРАКТЕРНЫЕ ЗАДАЧИ <u>Романов Ю.И., Рюмин М.Г.</u>	292
ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ НАПРЯЖЕННЫМ СОСТОЯНИЕМ СТЕРЖНЕВЫХ СИСТЕМ С ПОМОЩЬЮ КРАЕВЫХ НАГРУЗОК <u>Савченко А.В., Лалин В.В., Лалина И.И., Дьяков С.Ф.</u>	294
АНАЛИЗ МОДЕЛИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГРУНТА С ОГРАЖДЕНИЕМ КОТЛОВАНА <u>Салмин И.А., Шестаков А.П., Боталов С.Н.</u>	295

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ СООРУЖЕНИЙ НА ПРОМЕРЗАЮЩИХ И ОТТАИВАЮЩИХ ГРУНТАХ <u>Сахаров И.И., Улицкий В.М., Парамонов В.Н.</u>	297
МОДЕЛИРОВАНИЕ БИОМЕХАНИКИ ХИРУРГИЧЕСКОГО ЛЕЧЕНИЯ БОЛЕЗНИ ЛЕГКО-КАЛЬВЕ-ПЕРТЕСА <u>Саченков О.А., Андреев П.С., Хасанов Р.Ф., Гарифуллин И.Р., Султанов Л.У.</u>	298
ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КОСТНОЙ ТКАНИ ПОСЛЕ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕФИЦИТА СУ Коноплев Ю.Г., <u>Саченков О.А.</u> , Харисламова Л.У., Шигапова Ф.А.	300
ОЦЕНКА НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ВЕРТЛУЖНОГО КОМПОНЕНТА ПРИ НЕПОЛНОМ ПОКРЫТИИ ЭНДОПРОТЕЗА ТАЗОБЕДРЕННОГО СУСТАВА Коноплев Ю.Г., Мазуренко А.В., <u>Саченков О.А.</u> , Тихилов Р.М.	302
РАСЧЕТ ГРУНТОВЫХ МАССИВОВ С УЧЕТОМ ДИЛАТАНСИИ Галимов А.Ф., Карамов А.В., <u>Секаева Л.Р.</u>	304
ПОВЕДЕНИЕ ПРЕДЕЛА ТЕКУЧЕСТИ МЕТАЛЛОВ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ НА ОСНОВЕ РЕЛАКСАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ПЛАСТИЧНОСТИ <u>Селютина Н.С.</u>	306
ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА ПРОЧНОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ ПОДКРЕПЛЕННЫХ ОРТОТРОПНЫХ ОБОЛОЧЕК Карпов В.В., <u>Семенов А.А.</u>	308
ОБРАТНАЯ КВАДРАТИЧНАЯ ЗАДАЧА НА СОБСТВЕННЫЕ ЗНАЧЕНИЯ И НЕКОТОРЫЕ ЧИСЛЕННЫЕ АЛГОРИТМЫ ЕЕ РЕШЕНИЯ <u>Семенов В.А., Трубников С.А.</u>	310
ОПТИМАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ РАМ С УЧЕТОМ ОГРАНИЧЕНИЙ ПО ПРОЧНОСТИ И КРАТНЫМ ЧАСТОТАМ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ <u>Сергеев О.А., Киселев В.Г., Сергеева С.А.</u>	312
МЕХАНИЗМ ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ КАК СПОСОБ РАЗВИТИЯ АРКТИЧЕСКОГО РЕГИОНА <u>Скрипнюк Д.Ф.</u>	314
ДИАГРАММА РАЗРУШЕНИЯ УПРУГОГО ТЕЛА С КРУГОВОЙ ТРЕЩИНОЙ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СОСРЕДОТОЧЕННЫХ СИЛ <u>Смирнов В.И.</u>	317
ОБ ОДНОМ КУЛИСНО-РЫЧАЖНОМ МЕХАНИЗМЕ <u>Смоляков А.А., Уповалов В.В.</u>	320
РАСПРОСТРАНЕНИЕ ТЕПЛА СО СТРУКТУРОЙ В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ <u>Степашкина А.С., Коцкович А.В., Алтухов А.И.</u>	321
О ПРЕДЕЛЬНОМ РАВНОВЕСИИ ПЛОСКОЙ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ МОДЕЛИ МОМЕНТНОЙ СРЕДЫ КОССЕРА <u>Строганова О.С., Фрумен А.И., Миронов М.Ю.</u>	323
МАТЕМАТИЧЕСКИЕ И КОМПЬЮТЕРНЫЕ МОДЕЛИ ПЛАСТИН И ОБОЛОЧЕК ИЗ КОМПОЗИТОВ И НАНОМАТЕРИАЛОВ Галилеев С.М., <u>Табаков П.Ю.</u> , Салихова Е.А., Орлов О.А., Назаров Р.А.	325
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПАКЕТА ANSYS ДЛЯ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ МАССИВНЫХ КОНСТРУКЦИЙ, НАХОДЯЩИХСЯ ПОД СЕЙСМИЧЕСКОЙ НАГРУЗКОЙ <u>Терпугов В.Н.</u>	328

КОМПЬЮТЕРНОЕ И СТРАТОСФЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОСМИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ОТВЕРЖДЕНИЮ ЭПОКСИДНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ	
Демин А.А., Кондюрин А.В., Терпугов В.Н.	330
ЧИСЛЕННЫЕ ПРОЦЕДУРЫ НЕЛИНЕЙНОГО АНАЛИЗА СТАТИЧЕСКОЙ И ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ИЗОТРОПНЫХ И ОРТОТРОПНЫХ МНОГОСЛОЙНЫХ ОБОЛОЧЕК	
Трушин С.И., Сысоева Е.В., Мокин Н.А.	332
УЧЕТ ДЕМПФИРОВАНИЯ В ЗАДАЧАХ ОЦЕНКИ СЕЙСМОСТОЙКОСТИ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ	
Уздин А.М., Воробьева К.В., Нестерова О.П., Никонова Н.В., Федорова М.Ю.	334
МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В МЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ В УСЛОВИЯХ ПОТЕПЛЕНИЯ КЛИМАТА	
Улитин В.В.	336
ТЕХНИЧЕСКОЕ И ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИИ МЕРЗЛОТЫ В УСЛОВИЯХ ПОТЕПЛЕНИЯ КЛИМАТА	
Скрипнюк Д.Ф., Улитин В.В.	338
ЭФФЕКТЫ ОТКОЛЬНОГО РАЗРУШЕНИЯ И СТРУКТУРНО-ВРЕМЕННОЙ ПОДХОД	
Уткин А.А.	341
МЕТОДИКА ЧИСЛЕННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ БОЛЬШИХ ДЕФОРМАЦИЙ ГИПЕРУПРУГИХ ТЕЛ	
Абдрахманова А.И., Саченков О.А., Султанов Л.У., Фахрутдинов Л.Р., Шакирова А.Т.	342
ХРОНОМЕХАНИКА ДЕФОРМИРОВАНИЯ И ПРОЧНОСТИ НАНОМАТЕРИАЛОВ	
Федоровский Г.Д.	344
ПРИРОДА И ВОЗМОЖНЫЕ МЕХАНИЗМЫ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ФОНА ДИССИПАТИВНЫХ ПОТЕРЬ НА СПЕКТРАХ ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ АМОРФНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ	
Бугаев Н.М., Горшков А.А., Ломовской В.А., Фомкина З.И.	346
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ СООРУЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИНАМИЧЕСКИХ СУПЕРЭЛЕМЕНТОВ	
Цейтлин Б.В.	349
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ В СИСТЕМЕ БЕТОННАЯ ПЛОТИНА-СКАЛЬНОЕ ОСНОВАНИЕ ПРИ ВЗАИМНЫХ СМЕЩЕНИЯХ БЕРЕГОВ СЕЙСМОГЕННЫХ РАЗРЫВОВ	
Витохин Е.Ю., Ле-Захаров С.А., Федоров И.В., Цейтлин Б.В.	351
ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ТРЕХМЕРНЫХ ЗАДАЧ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КВАЗИСТАЦИОНАРНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В НЕОДНОРОДНЫХ СРЕДАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЖУРНОЙ СХЕМЫ МКЭ	
Калинин А.В., Чекмарев Д.Т.	353
ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДОВ СТРОИТЕЛЬСТВА НА МЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ В УСЛОВИЯХ ПОТЕПЛЕНИЯ КЛИМАТА	
Улитин В.В., Черногорский С.А., Швецов К.В.	355
ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМА КОМБИНИРОВАННОГО СПОСОБА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ТЕОРИИ УПРУГОСТИ В БЕСКОНЕЧНЫХ ОБЛАСТЯХ	
Чернышева Н.В., Розин Л.А.	357
ЭКСПРЕСС ОЦЕНКА ОТКЛИКА КОНСТРУКЦИИ СИЛОВОГО ГИРОСКОПА НА ДЕЙСТВИЕ СЛУЧАЙНОЙ ВИБРАЦИИ	
Шевченко С.А.	359

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫЙ АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ СТЕРЖНЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СКАЧКООБРАЗНОЙ ПРОДОЛЬНОЙ НАГРУЗКИ	
<u>Шурпатов А.О., Беляев А.К.</u>	361
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПОЛЕЙ ТЕМПЕРАТУР В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ	
<u>Щербина С.В., Белов В.А.</u>	363
АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ ИЗМЕНЕНИЙ СТРУКТУРНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ В КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТАХ	
<u>Юргенсон С.А., Васильев С.Л., Бакулин В.Н.</u>	365
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ НЕЛИНЕЙНОГО РАСЧЕТА СТЕРЖНЕВЫХ СИСТЕМ ПО ПРЕДЕЛЬНЫМ СОСТОЯНИЯМ	
<u>Ермакова А.В.</u>	367
УРАВНЕНИЕ ДВИЖЕНИЯ ДИССИПАТИВНОЙ СИСТЕМЫ С УЧЕТОМ ДЕЙСТВИЯ СИЛ ВНЕШНЕГО СОПРОТИВЛЕНИЯ	
<u>Пономаренко С.А.</u>	370
АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ	373

**XXVI Международная конференция
Математическое и компьютерное моделирование
в механике деформируемых сред и конструкций**

**28 сентября – 30 сентября 2015
Санкт-Петербург, Россия**

Тезисы докладов – Proceedings

**XXVI International Conference
Mathematical and Computer Simulation
in Mechanics of Solids and Structures
September 28 - September 30, 2015
Saint Petersburg, Russia**

ISBN 978-5-91753-107-6

Отпечатано в типографии ООО «Айсинг»
ИД «ФАРМиндекс»
199106, Санкт-Петербург, Средний пр., 99/18 лит. А
Тел / факс (812) 327-05-12 www.icing.ru
Тираж 200 экз. Заказ № 207 / 2015