

На правах рукописи

Дорожинский Владимир Богданович

**ВЕРОЯТНОСТНЫЙ РАСЧЕТ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ  
НА СЛУЧАЙНОЕ ВЗРЫВНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ  
В НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ ПОСТАНОВКЕ**

Специальность: 05.23.17 – Строительная механика

**Автореферат**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2012

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский государственный строительный университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
**Мкртычев Олег Варганович**

Официальные оппоненты: **Белостоцкий Александр Михайлович**  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВПО «Московский  
государственный строительный  
университет», профессор кафедры  
«Информатика и прикладная математика»

**Аругюнян Марат Владимирович**  
кандидат технических наук,  
ОАО «НИЦ «Строительство» ЦНИИСК  
им. В.А. Кучеренко», заведующий  
лабораторией динамики сооружений

Ведущая организация: **ОАО «Центральный научно-исследовательский и проектно-экспериментальный институт промышленных зданий и сооружений» (ОАО «ЦНИИПромзданий»)**  
г. Москва

Защита диссертации состоится «14» декабря 2012 г. в 14.30 часов на заседании диссертационного совета Д 212.138.12 при ФГБОУ ВПО «Московский государственный строительный университет» по адресу: 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д.26, ауд. № 9 «Открытая сеть».

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Московский государственный строительный университет».

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2012 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

**Анохин Николай Николаевич**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** В настоящее время все большее развитие получает строительство уникальных высотных зданий и большепролетных спортивных сооружений вместимостью несколько десятков тысяч человек. Для зданий и сооружений должны выполняться требования Федерального закона №68 «О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера».

Безопасность людей при аварийных взрывных воздействиях следует обеспечивать не только средствами охраны и контроля, но и соответствующими конструктивными решениями для зданий и сооружений, позволяющими противостоять возможному прогрессирующему обрушению конструкций при особых динамических воздействиях, возникающих вследствие взрывов конденсированных взрывчатых веществ (ВВ).

При взрывах большой мощности имеют место большие давления в ударной волне, и, как следствие, возможны значительные разрушения строительных конструкций. Взрывное воздействие имеет непостоянные и неопределенные параметры, что следует из экспериментальных данных, в которых расхождения по величине давления доходят до 30%. При этом место и мощность взрыва могут быть спрогнозированы лишь с определенной долей вероятности. Для сохранения жизни людей, находящихся вне зоны непосредственного поражения взрыва, необходимо использовать методики, позволяющие оценивать надежность зданий и сооружений в целом.

Взрывные нагрузки относятся к особому виду воздействий. В большинстве случаев они имеют локальный характер, но могут в десятки раз превышать те, на которые запроектированы здания и сооружения. При этом строительные конструкции испытывают воздействия в направлениях, по которым работа элементов не предусмотрена.

При проектировании зданий и сооружений выполняются расчеты на устойчивость к прогрессирующему обрушению, которое может возникнуть при локальных разрушениях несущих конструкций в результате взрывного воздействия.

Эффективное проектирование взрывобезопасных строительных конструкций должно производиться при достаточном расчетном обосновании и математическом моделировании, опирающемся на возможности современных быстродействующих компьютеров и расчетных комплексов.

Взрывное воздействие является быстротекущим высоконелинейным случайным процессом. Расчет конструкций необходимо выполнять с помощью динамических методов, которые позволяют учесть физическую, геометрическую и конструктивную нелинейности. Задачу следует решать во временной области путем прямого интегрирования уравнений движения.

**Целью диссертационной работы** является исследование надежности отдельных железобетонных элементов и конструктивных систем в целом при случайном взрывном и силовом воздействиях и случайных прочностных характеристиках материала.

**Научная новизна работы** представлена следующими результатами:

- произведен сравнительный анализ экспериментальных данных для воздушной ударной волны и численных решений, основанных на явной схеме интегрирования уравнений движения;
- получено детерминированное решение для железобетонной стены при действии взрывной нагрузки с помощью различных динамических методов;
- выполнен расчет многоэлементной статически неопределимой системы на взрывное воздействие в нелинейной динамической постановке;
- проведены исследования взрывобезопасности различных железобетонных зданий;
- построена вероятностная модель случайного взрывного воздействия;
- выполнена оценка надежности отдельной железобетонной стены и железобетонного здания перекрестно-стеновой конструктивной схемы при детерминированном силовом и случайном взрывном воздействиях, а также случайных прочностных характеристиках материала с учетом физической, геометрической и конструктивной нелинейностей.

**Практическая значимость работы** заключается:

- в расчете многоэлементной модели на взрывное воздействие с учетом различных нелинейностей;
- в разработке методик, позволяющих рассматривать различные сценарии локальных разрушений с возможным последующим прогрессирующим обрушением конструкций, разворачивающимся во времени;
- в возможности повышения взрывобезопасности зданий и сооружений;
- в возможности оценки надежности отдельных строительных конструкций и конструктивных систем зданий в целом при случайном взрывном воздействии.

**Личный вклад соискателя.**

Все исследования, изложенные в диссертационной работе, расчеты, вычислительные эксперименты, их анализ, численное моделирование работы конструкций, зданий и сооружений, а также обработка полученных результатов были выполнены автором работы лично.

**На защиту выносятся:**

- основные принципы и методы расчета на взрывное воздействие и подходы к оценке надежности строительных конструкций и систем при динамических воздействиях;
- результаты сравнения численного решения задачи о воздушной ударной волне с экспериментальными данными;
- результаты исследования взрывобезопасности многоэтажного железобетонного здания;
- вероятностная методика моделирования случайного взрывного воздействия и прочностных характеристик материала;
- результаты произведенной оценки надежности отдельной железобетонной стены при случайном взрывном, детерминированном силовом воздействиях и случайных прочностных характеристиках материала;

– результаты произведенной оценки надежности здания перекрестно-стеновой конструктивной схемы при случайном взрывном, детерминированном силовом воздействии и случайных прочностных характеристиках материала.

**Достоверность результатов** достигается:

- использованием при постановке задач гипотез, принятых в механике деформируемого твердого тела и теории надежности строительных конструкций;
- сравнением полученных результатов с экспериментальными данными и аналитическими решениями;
- применением современных апробированных численных методов расчета строительных конструкций.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы были доложены на:

– пленарном заседании IX всероссийской научно-практической и учебно-методической конференции «Фундаментальные науки в современном строительстве», Москва 2012;

– XVIII всероссийской научно-практической и учебно-методической конференции «Фундаментальные науки в современном строительстве», Москва 2011;

– XIV Международной межвузовской научно-практической конференции молодых ученых, докторантов и аспирантов «Строительство – формирование среды жизнедеятельности», посвященной 90-летию МГСУ, Москва 2011;

– II Всероссийской конференции с элементами научной школы для молодежи «Устойчивость, безопасность и энергоресурсосбережение в современных архитектурных, конструктивных, технологических решениях и инженерных системах зданий и сооружений», Москва 2011.

**Публикации.** По теме диссертации опубликованы 8 статей, из них 4 в рецензируемых журналах, рекомендуемых ВАК для публикации результатов по кандидатским диссертациям.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения с основными результатами и выводами, списка литературы из 128 наименований. Общий объем диссертации – 125 страниц, 55 рисунков и 5 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** отражена актуальность темы проводимой работы, поставлены основные цели и задачи исследований, описаны научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

**В первой главе** выполнен обзор литературы по проблемам исследований. Проанализированы последствия взрывов зданий и сооружений. Рассмотрены основные положения теории надежности и методы расчета строительных конструкций на взрывное воздействие.

Анализировались следующие случаи взрывов конденсированных ВВ.

– 19.05.1995 г. Взрыв снаружи федерального здания в г. Оклахома, США. Масса заряда в тротиловом эквиваленте составила  $m=2300$  кг. Разрушены две наружные секции. Погибло 166 человек.

– 4.09.1999 г. Взрыв снаружи жилого пятиэтажного дома в г. Буйнакск. Масса заряда  $m=2700$  кг. В результате полностью обрушились два подъезда и два соседних двухэтажных дома. Погибло 64 человека.

– 9.09.1999 г. Взрыв внутри жилого девятиэтажного дома в г. Москве на ул. Гурьянова. Масса заряда в тротиловом эквиваленте  $m=350$  кг. Полностью разрушены два подъезда. Погибло более 100 человек.

– 13.09.1999 г. Взрыв внутри жилого одноподъездного восьмизэтажного дома в г. Москве на Каширском шоссе. Масса заряда в тротиловом эквиваленте  $m=300$  кг. Здание полностью разрушено. Погибло 124 человека.

В случае, когда вероятность обрушения конструкций высока, необходимо оценивать взрывобезопасность и надежность конструктивной схемы здания или сооружения как единой системы с учетом всех видов нелинейностей.

Основные вопросы применения вероятностных методов для анализа надежности строительных конструкций получили развитие в работах В.В. Болотина, А.Я. Дривинга, В.Д. Костюкова, А.П. Кудзиса, О.В. Лужина, В.Д. Райзера, А.Р. Ржаницына, Н.Н. Складнева, Б.И. Снарскиса, Д.Н. Соболева, К.Э. Таля, В.П. Чиркова, и др. Среди зарубежных работ стоит отметить исследования Г. Аугусти, А. Баратта, Ф. Кашиати, Л. Ламберсона, М. Кастанеты, И. Мужевского, Г. Шпете.

На сегодняшний день развитием, совершенствованием и внедрением методов теории надежности активно занимаются И.Д. Грудев, М.Б. Краковский, О.В. Мкртычев, В.Л. Мондрус, В.П. Радин, А.Е. Саргсян, А.Г. Тамразян, О.В. Трифонов и др.

Основной задачей вероятностных расчетов является вычисление вероятности отказа. В общем случае вероятность отказа конструкции  $P_f$  при исходных параметрах, представленных случайными величинами, равна многомерному интегралу:

$$P_{rob} \{g(x_1, x_2, \dots, x_n) < 0\} = \int \dots \int_{\Omega_n} f(x_1, x_2, \dots, x_n) dx_1 dx_2 \dots dx_n, \quad (1)$$

где  $\Omega_n$  – область отказов состояний в  $n$ -мерном пространстве всех случайных величин  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , граница которой определяется условием  $g = 0$ ;  $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  – совместная плотность вероятности всех случайных величин;  $g(x_1, x_2, \dots, x_n)$  – функция работоспособности или резерв прочности.

Поведение конструкции в процессе эксплуатации описывается конечным числом независимых параметров. Если все расчетные величины разделить на две группы, где первая описывает свойства конструкции, а вторая характеризует внешние воздействия, то вероятность отказа есть вероятность реализации неравенства:

$$P_f = P_{rob} \{g = R - Q < 0\} = \int_{-\infty}^0 f_g(g) dg, \quad (2)$$

где  $P_f$  – вероятность отказа;  $P_{rob}(A)$  – вероятность реализации события  $A$ ;  $f_g(g)$  – плотность распределения резерва прочности.

В общем случае несущая способность и нагрузочный эффект являются случайными функциями времени, однако в данной постановке  $R$  и  $Q$  рассматриваются как случайные величины.

Если  $R$  и  $Q$  взаимно независимые величины, то вероятность отказа можно определить по формулам:

$$P_f = \int_{-\infty}^{\infty} f_Q(Q)F_R(Q)dQ \text{ или } P_f = 1 - \int_{-\infty}^{\infty} f_R(R)F_Q(R)dR, \quad (3)$$

где  $F_R, F_Q$  – функции распределения несущей способности и нагрузочного эффекта соответственно.

Более строгий подход к оценке надежности основан на описании поведения конструкции в ходе эксплуатации с помощью случайного процесса. Отказ в этом случае представляет случайный выброс из области допустимых состояний.

Для выполнения вероятностных расчетов необходимо иметь детерминированное решение.

Взрыв – процесс выделения значительного количества тепловой и кинетической энергии за короткий промежуток времени. При этом образуется ударная волна, во фронте которой происходит резкое скачкообразное изменение давления, плотности, скорости движения частиц и температуры. Физика взрыва, теория детонации и ударных волн рассмотрены в работах А.А. Гриба, А.Н. Дремина, Э. Жуге, Я.Б. Зельдовича, Л.Д. Ландау, В.А. Михельсона, М.А. Садовского, К.П. Станюковича, Ю.Б. Харитона, Д. Чепмена и др.

На рис. 1 приведен закон изменения давления в точке пространства при взрыве. В общем случае для расчета конструкций должны быть известны перепад давления во фронте ударной волны  $\Delta p_\phi$  (превышение давления  $p_\phi$  над атмосферным  $p_0$ ) и время действия фазы сжатия  $\tau_+$ , в течение которого текущее давление в волне  $p(t)$  превышает атмосферное  $p_0$ .

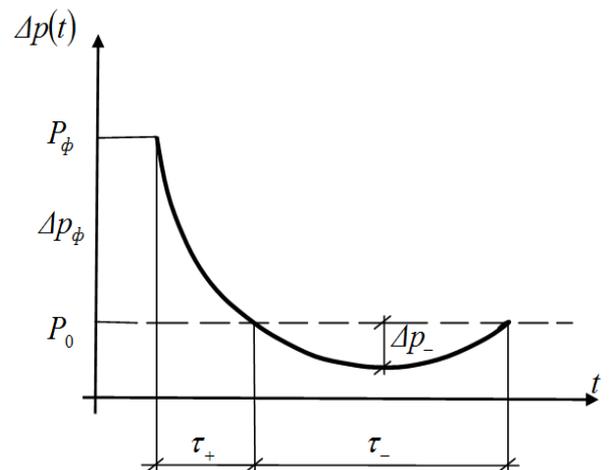


Рис.1 Изменение давления

Расчет строительных конструкций на взрывные нагрузки проводится методами динамики сооружений, в которых можно выделить приближенные и численные методы высокой точности.

В приближенных методах расчета, рассмотренных в работах М.Ф. Барштейна, У. Бейкера, Н.Н. Белова, Д.Г. Копаницы, Б.Г. Коренева, А.И. Плотникова, Н.Н. Попова, И.М. Рабиновича, Б.С. Расторгуева, Д.З. Хуснутдинова и др., прикладывается статическая нагрузка, эквивалентная динамическому действию взрыва. Либо конструкции рассматриваются в виде системы с конечным числом

динамических степеней свободы, количество которых ограничивается путем выбора форм перемещений, вносящих основной вклад в рассматриваемый процесс. Однако эти методы имеют ряд ограничений, и их применение к расчету сложных статически неопределимых систем является трудной задачей, которая еще больше усложняется при учете нелинейностей различных видов.

В расчетах могут использоваться численные методы, реализованные в современных программных комплексах на основе метода конечных элементов (А.М. Белостоцкий, А.С. Городецкий, О. Зенкевич, А.В. Перельмутер, Л. Сегерлинд, В.И. Сливкер, С.И. Трушин и др.) с применением неявных и явных схем интегрирования уравнений движения, которые в матричной форме имеют вид:

$$\mathbf{M}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{u} = \mathbf{f}^a, \quad (4)$$

где  $\mathbf{u}$  – вектор узловых перемещений;  $\dot{\mathbf{u}} = \mathbf{v}$  – вектор узловых скоростей;  $\ddot{\mathbf{u}} = \mathbf{a}$  – вектор узловых ускорений;  $\mathbf{M}$  – матрица масс;  $\mathbf{C}$  – матрица демпфирования;  $\mathbf{K}$  – матрица жесткости;  $\mathbf{f}^a$  – вектор приложенных нагрузок.

Анализ показывает, что наиболее эффективным при решении рассматриваемых задач оценки надежности конструкций при взрывном воздействии является применение явных схем, в которых узловые ускорения  $\mathbf{a}$  и скорости  $\mathbf{v}$  в расчете являются неизвестными и вычисляются напрямую (а не путем дифференцирования перемещений как в неявных схемах), что позволяет уменьшать время проводимых расчетов.

Явные методы используют рекуррентные соотношения, которые выражают перемещения, скорости и ускорения на данном шаге через их значения на предыдущих шагах. Вектор ускорений тогда будет выражаться:

$$\mathbf{a}_t = \mathbf{M}^{-1}(\mathbf{f}_t^{ext} - \mathbf{f}_t^{int}), \quad (5)$$

где  $\mathbf{f}_t^{ext}$  – вектор внешних сил;  $\mathbf{f}_t^{int}$  – вектор внутренних сил.

Векторы скоростей и перемещений на соответствующем шаге определяются следующим образом:

$$\mathbf{v}_{t+\Delta t/2} = \mathbf{v}_{t-\Delta t/2} + \mathbf{a}_t \Delta t, \quad \mathbf{u}_{t+\Delta t} = \mathbf{u}_t + \mathbf{v}_{t+\Delta t/2} \frac{\Delta t_t + \Delta t_{t+\Delta t}}{2}. \quad (6)$$

**Во второй главе** производится численное решение задачи о взрывном воздействии с использованием программного комплекса LS-DYNA, в котором реализованы явные схемы интегрирования уравнений движения (метод центральных разностей). Расчет на взрывное воздействие для отдельного элемента стены проводился в различных постановках: в лагранжевой, лагранжево-эйлеровой, а также с применением метода гидродинамики сглаженных частиц (SPH-метод).

Основные исследования взрывобезопасности и надежности конструкций проводились в лагранжево-эйлеровой постановке, т.к. она лишена ряда недостатков других подходов и позволяет решать задачи с большим формоизменением. Данная постановка основана на уравнениях газовой динамики, которые в прямоугольной системе координат имеют вид:

$$\left. \begin{aligned}
 \frac{\partial \rho}{\partial t} + u \frac{\partial \rho}{\partial x} + v \frac{\partial \rho}{\partial y} + w \frac{\partial \rho}{\partial z} + \rho \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) &= 0, \\
 \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} &= 0, \\
 \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} &= 0, \\
 \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} &= 0, \\
 \frac{\partial E}{\partial t} + u \frac{\partial E}{\partial x} + v \frac{\partial E}{\partial y} + w \frac{\partial E}{\partial z} - \frac{p}{\rho^2} \left( \frac{\partial \rho}{\partial t} + u \frac{\partial \rho}{\partial x} + v \frac{\partial \rho}{\partial y} + w \frac{\partial \rho}{\partial z} \right) &= 0,
 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

где  $u, v, w$  – проекции вектора скорости  $\mathbf{v}$  на оси координат;  $p$  – давление;  $E$  – внутренняя энергия, отнесенная к единице массы;  $\rho$  – плотность.

При заданных начальных и граничных условиях параметры  $\mathbf{v}$ ,  $p$ , и  $E$ , которые являются функциями координат и времени, характеризуют движение и состояние идеального газа. Для получения замкнутой системы, систему уравнений (7) необходимо дополнить уравнением состояния, которое характеризует сжимаемость материала:

$$p = p(\rho, E). \quad (8)$$

На рис. 2 приведена расчетная схема задачи о взрывном воздействии для железобетонной стены.

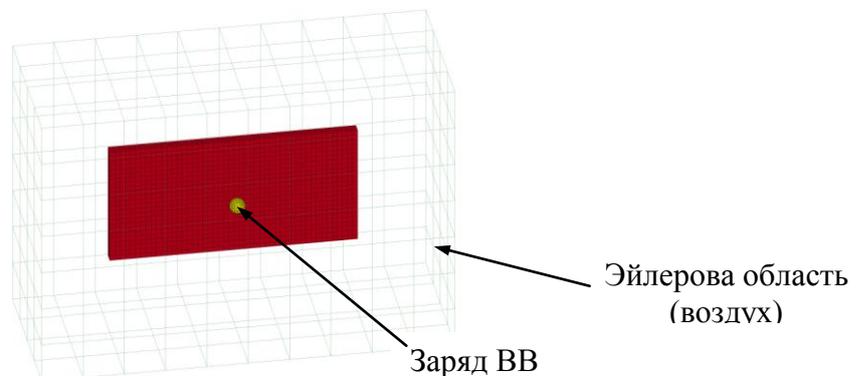


Рис.2 Расчетная модель в лагранжево-эйлеровой постановке

В данной постановке необходимо описать область, заполненную материалом с низкой плотностью – воздухом. Для описания сжимаемости воздушной области было выбрано линейное полиномиальное уравнение состояния:

$$p = C_0 + C_1 \cdot \mu + C_2 \cdot \mu^2 + C_3 \cdot \mu^3 + (C_4 + C_5 \cdot \mu + C_6 \cdot \mu^2) \cdot E_0, \quad (9)$$

где  $C_0, \dots, C_6$  – коэффициенты уравнения состояния;  $\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1$ .

В качестве уравнения состояния (8) для описания детонационных процессов было использовано уравнение Джонса–Уилкинса–Ли (JWL), позволяющее с высокой точностью описывать свойства продуктов детонации и имеющее широкую базу исходных данных для различных ВВ:

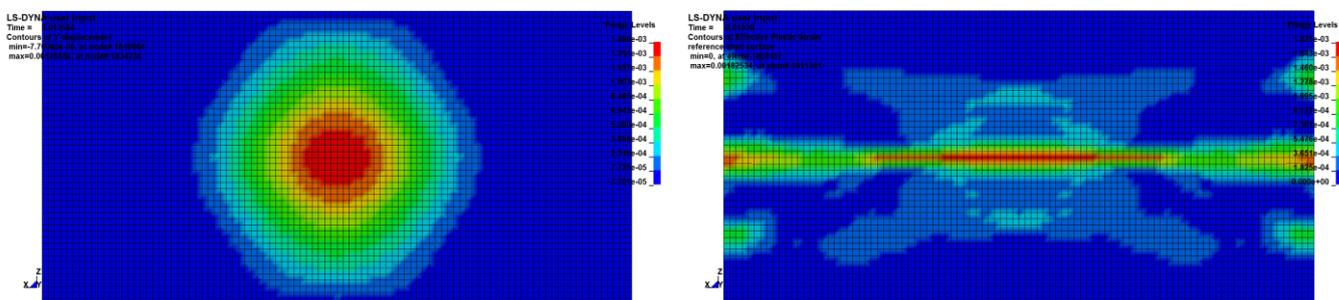
$$p = A \cdot \left(1 - \frac{\omega}{R_1 \cdot V}\right) \cdot e^{R_1 \cdot V} + B \cdot \left(1 - \frac{\omega}{R_2 \cdot V}\right) \cdot e^{R_2 \cdot V} + \frac{\omega \cdot E_0}{V}, \quad (10)$$

где  $V = \frac{\rho_0}{\rho} = \frac{v}{v_0}$  – относительный удельный объем;  $A, B, C, R_1, R_2, \omega$  –

эмпирические константы;  $E_0$  – внутренняя энергия на единицу объема.

Физическая нелинейность учитывалась с помощью билинейной диаграммы работы бетона с пределом текучести, равным нормативному сопротивлению бетона на сжатие, и предельными пластическими деформациями  $\varepsilon$ .

Для моделирования конструкции использовались лагранжевые объемные и оболочечные (пространственные) конечные элементы, для заряда ВВ и воздушной области – эйлеровые объемные конечные элементы.

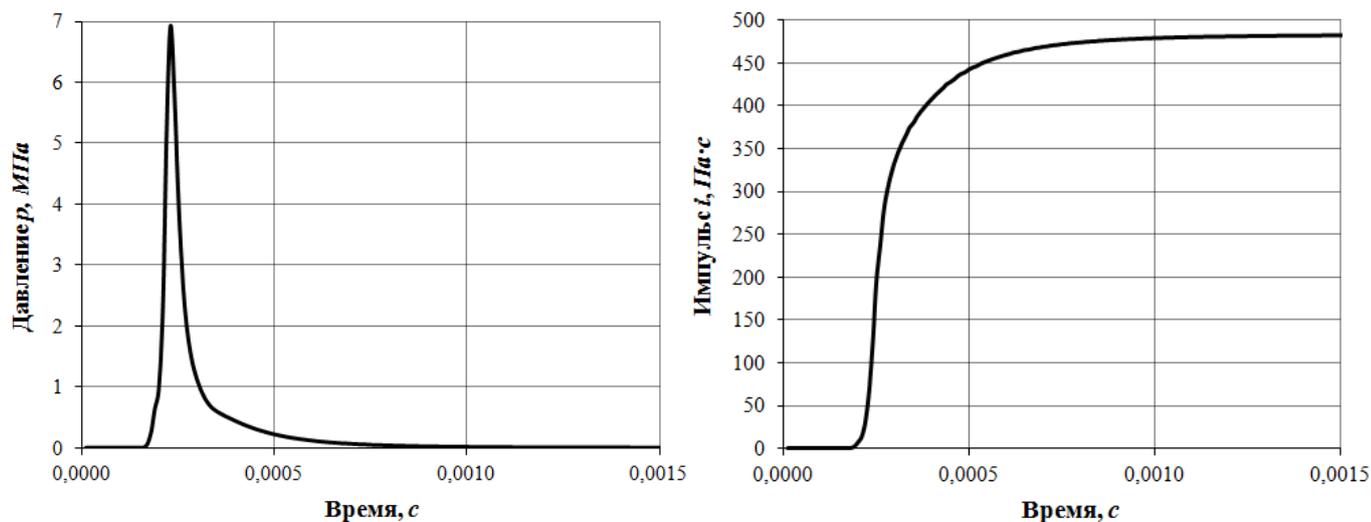


а) горизонтальные перемещения  $u$ , м

б) пластические деформации  $\varepsilon_i$

Рис.3 Результаты расчета стены

Графики изменения давления и импульса в фиксированной точке пространства при прохождении через нее ударной волны, получаемые при численном расчете, приведены на рис. 4. Виден резкий скачок при прохождении ударной волны через рассматриваемую точку. Фаза разрежения не учитывалась, т.к. ее воздействие на конструкцию значительно меньше пикового давления.

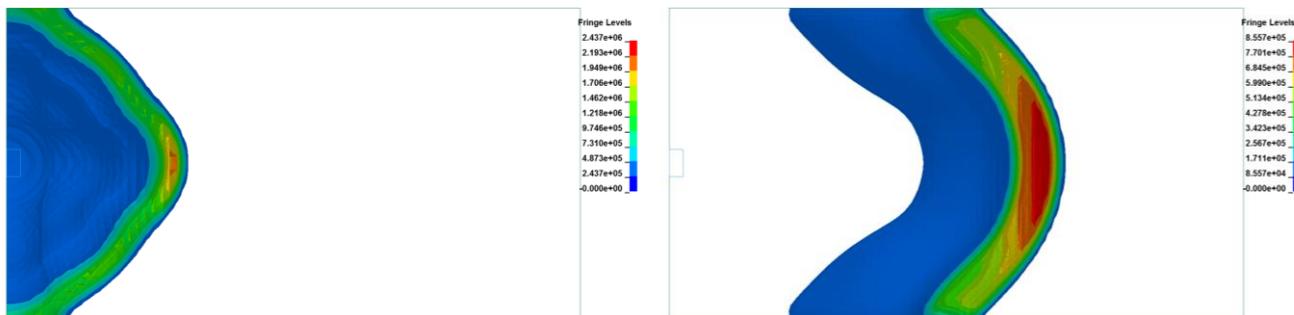


а) изменение давления  $p$

б) изменение импульса  $i$

Рис.4 Результаты численного решения

При распространении взрывной волны в воздухе максимальное давление во фронте с течением времени падает. Происходит расширение зоны взаимодействия фронта волны и воздуха (рис. 5а, б). В ближней зоне взрыва форма волны зависит от геометрической формы заряда (рис. 5а) и с удалением от центра взрыва приближается к сферической.



а) в момент времени  $t=0,00052$  с

б) в момент времени  $t=0,003$  с

Рис.5 Распространение взрывной волны в воздушной области

Полученные данные качественно соответствуют представлениям о физике взрывного процесса. Для заряда ВВ тринитротолуола (ТНТ)  $m=30$  кг было проведено исследование сходимости (рис. 6), и построены законы изменения давления в различных точках для последовательно сгущаемой сетки КЭ (рис. 7). Результаты численных решений сравнивались с известными формулами для определения параметров во фронте ударной волны при взрыве ТНТ, в частности формула Бейкера-Хелда:

$$\Delta p_{\phi} = 1,7 \cdot 10^3 \cdot \exp(-7,5 \cdot \bar{R}^{0,28}) + 0,0156, \quad (11)$$

где  $\bar{R} = R/\sqrt[3]{C}$  – переменная Садовского-Гопкинсона;  $R$  – расстояние от центра заряда, м;  $C$  – масса заряда, кг.

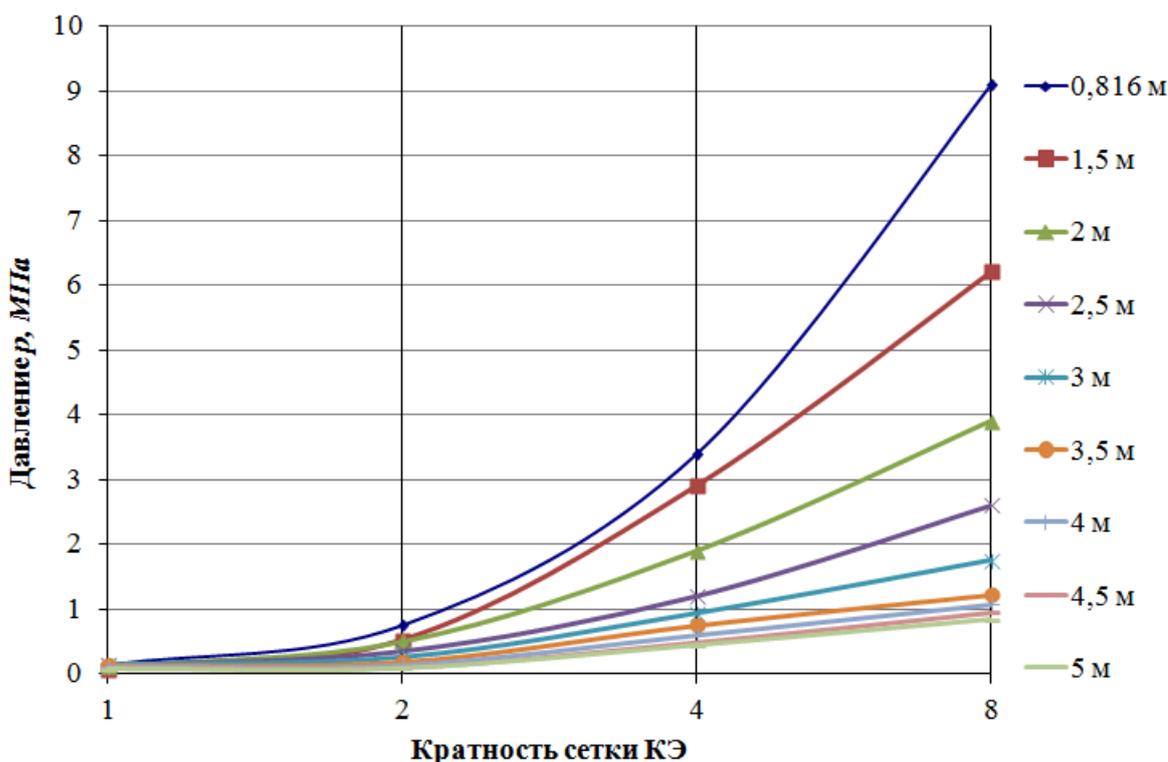


Рис.6 Исследование сходимости

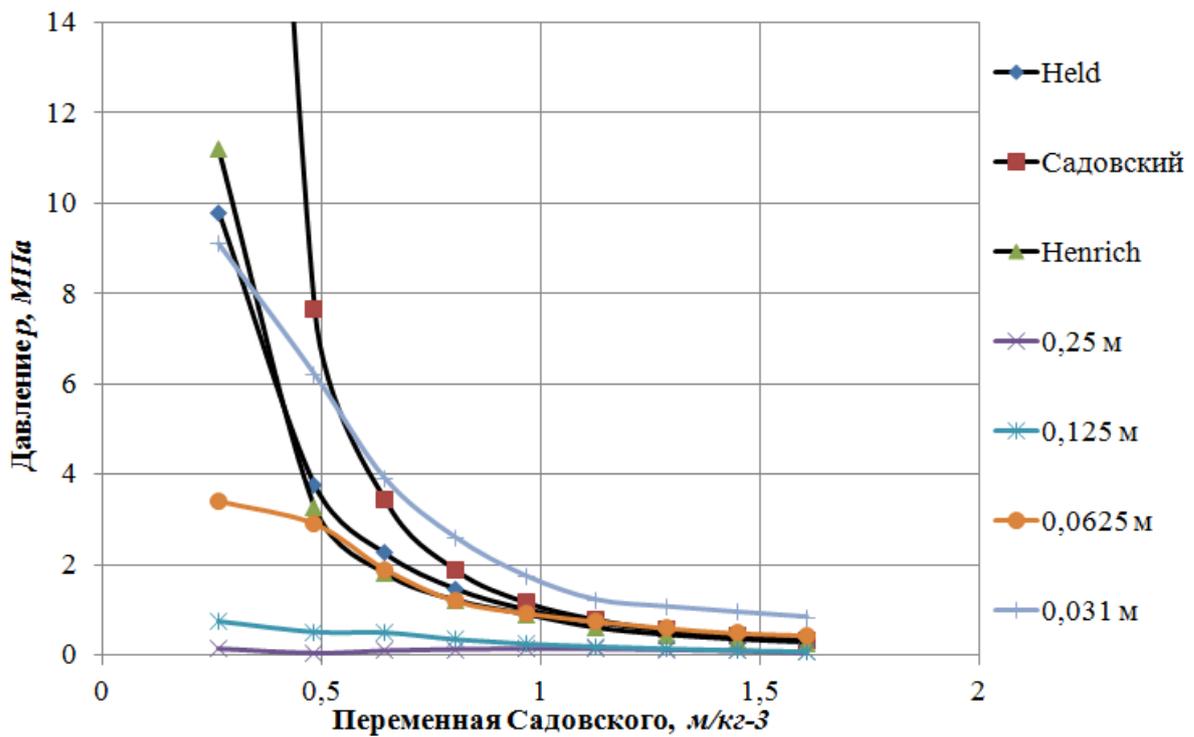
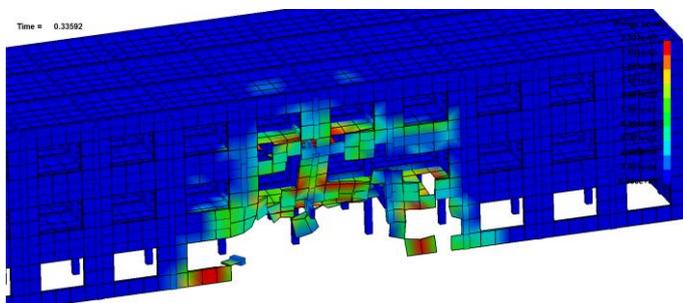


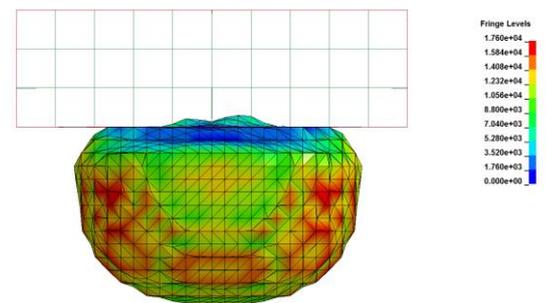
Рис.7 Изменение давления

Сравнение результатов численного моделирования с экспериментальными данными свидетельствует о хорошем совпадении результатов (кривая 0,0625 м на рис. 7). Стоит отметить, что в каждом конкретном случае для разных масс зарядов следует проверять соответствие численных результатов экспериментальным данным.

В рамках работы были проведены исследования взрывобезопасности различных зданий. Для промышленного здания с рамным каркасом (рис. 8) для зарядов ВВ различных масс были определены минимальные расстояния от фронтальной стены, при которых не происходит разрушение наружных несущих конструкций.



а) пластические деформации  $\epsilon_i$

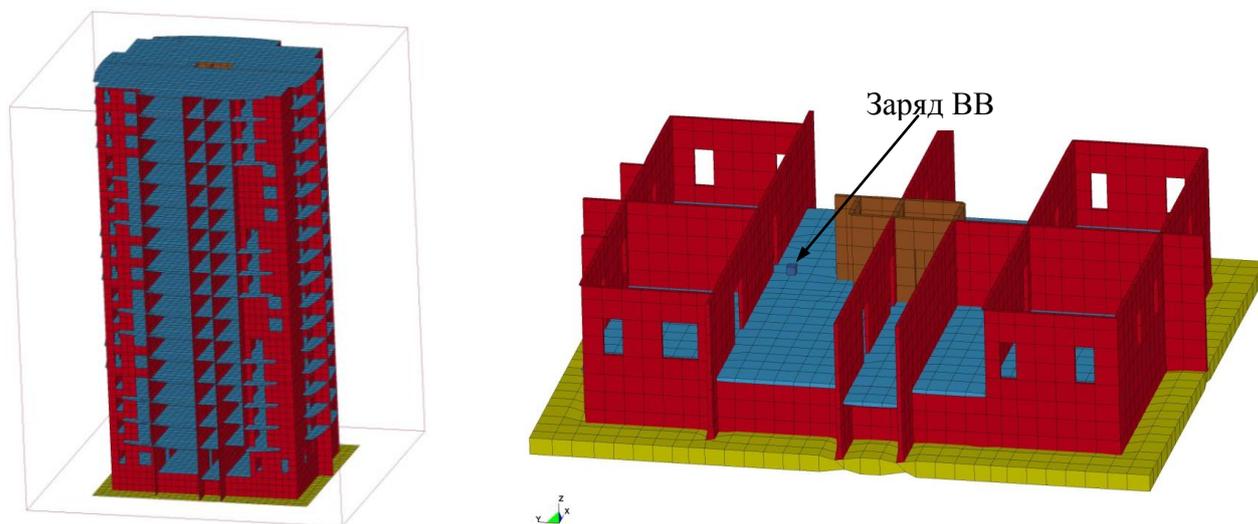


б) распространение ударной волны

Рис.8 Масса заряда  $m = 2000$  кг

Безопасные расстояния составили: при  $m = 30$  кг –  $l_{без} = 3$  м; при  $m = 600$  кг –  $l_{без} = 8$  м; при  $m = 2000$  кг –  $l_{без} = 20$  м. Установка соответствующих барьеров, ограничивающих зоны доступа людей, парковки легковых и грузовых автомобилей, позволяет обеспечить безопасность рассматриваемого здания.

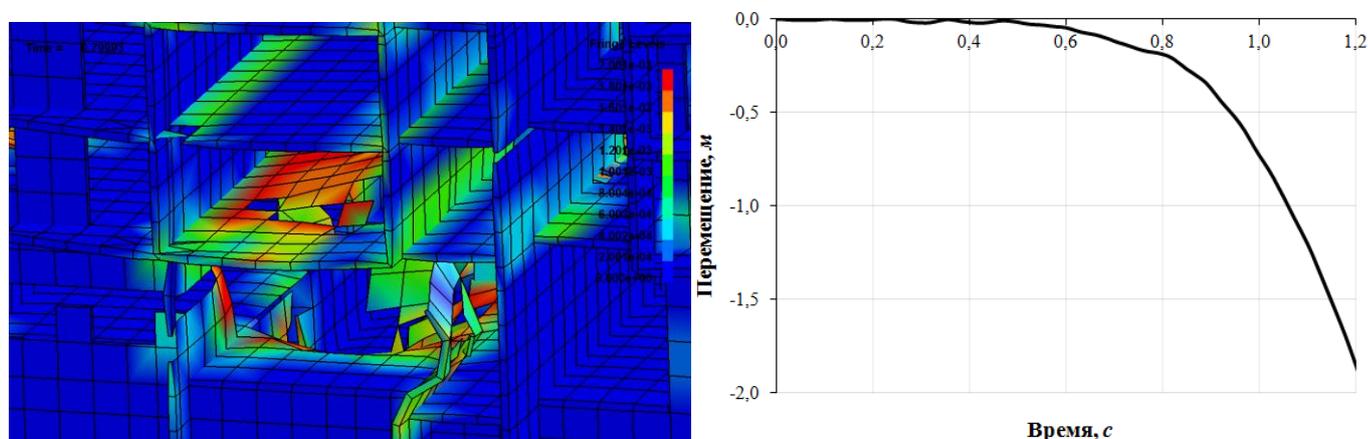
В работе определена масса заряда ВВ, которая приводит к прогрессирующему обрушению многоэтажного монолитного здания с перекрестно-стеновой конструктивной схемой (рис. 9).



а) расчетная схема здания

б) место расположения заряда

Рис.9 Расчетная схема многоэтажного здания



а) пластические деформации  $\varepsilon_i$   
при  $t = 0,8$  с

б) вертикальные перемещения точки  
вышележащего неразрушенного перекрытия

Рис.10 Масса заряда  $m = 150$  кг

В рассматриваемом случае критическая масса заряда составила 150 кг. В результате исследований установлено, что увеличение сечения несущих железобетонных стен первых двух этажей с 200 до 250 мм позволяет обеспечить взрывобезопасность здания при взрыве заряда массой до 400 кг.

**В третьей главе** производится построение вероятностной модели взрывного воздействия.

Анализируются параметры, оказывающие наибольшее влияние на давление во фронте ударной волны. Ударная волна может отражаться от различных предметов и

поверхностей (грунт, строительные конструкции), в результате чего волна сильно искажается.

Взрыв может иметь направленное (кумулятивное) действие, при этом происходит значительное увеличение давления во фронте (взрыв в г. Оклахома, когда заряды ВВ были выставлены в форме буквы **J**). На формирование ударной волны оказывают влияние масса и геометрическая форма заряда, физические параметры материала ВВ (например, плотность). При этом о конкретных значениях взрывной нагрузки можно говорить лишь с определенной долей вероятности.

В рамках работы проведено исследование чувствительности давления в фиксированной точке пространства в зависимости от исходных параметров уравнения JWL (10) и физических параметров модели материала ВВ (ТНТ). Результаты приведены на графиках на рис. 11. Величина данных параметров варьировалась в пределах 5%. Из приведенных данных следует, что рассматриваемые параметры оказывают значительное влияние (до 10%) на пиковое значение давления.

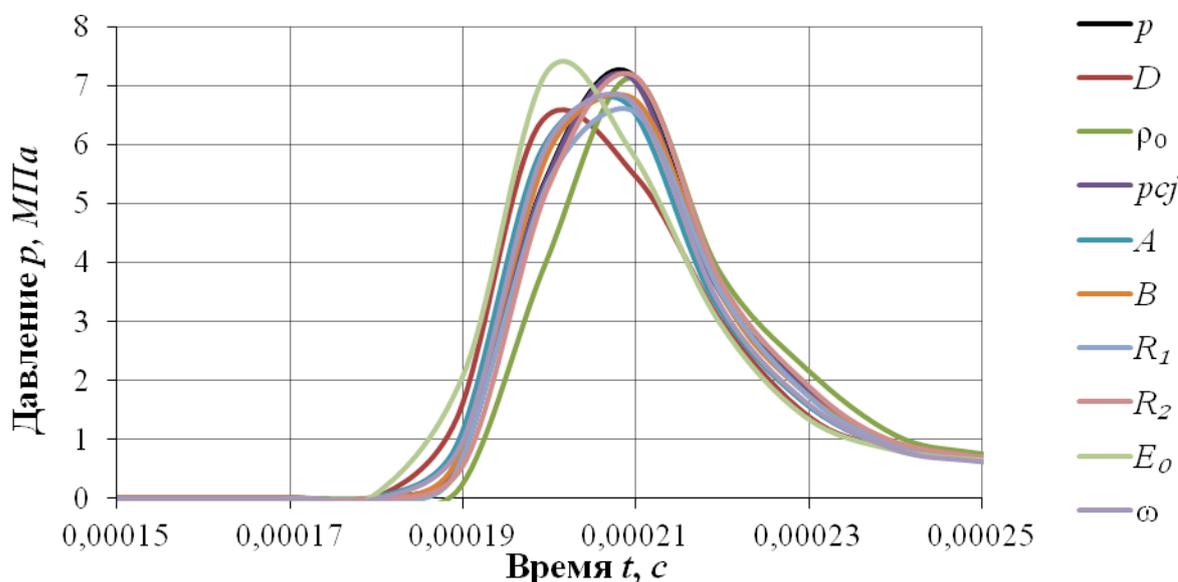


Рис.11 Чувствительность давления в точке

В качестве случайного параметра можно выбрать плотность ВВ. Разброс плотности ТНТ составляет от 1200 до 1700 кг/м<sup>3</sup>. Однако от плотности зависят и остальные характеристики ВВ, и при таком подходе к численному моделированию случайного взрывного воздействия необходима большая база данных по параметрам уравнения состояния JWL. Такие данные есть лишь в ограниченном объеме.

Исходя из экспериментальных формул (11), в качестве случайного параметра удобно выбрать массу заряда, т.к. она оказывает влияние на величину давления во фронте на всем протяжении распространения волны.

Для вероятностного моделирования взрывного воздействия необходимо определить плотности распределения давления, величины стандартов давления взрывной нагрузки в определенных рассматриваемых точках пространства.

Для случайного заряда ТНТ с математическим ожиданием массы заряда  $m_m = 30$  кг и коэффициентом вариации  $v_m = 0,2$  был получен ряд случайных значений масс, распределенных по нормальному закону:

$$F(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}} dx, \quad (12)$$

где  $m$ ,  $\sigma$  – математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение случайной величины.

С помощью численного моделирования были построены кривые плотности распределения и функции распределения давления  $p$  в различных точках (рис. 12).

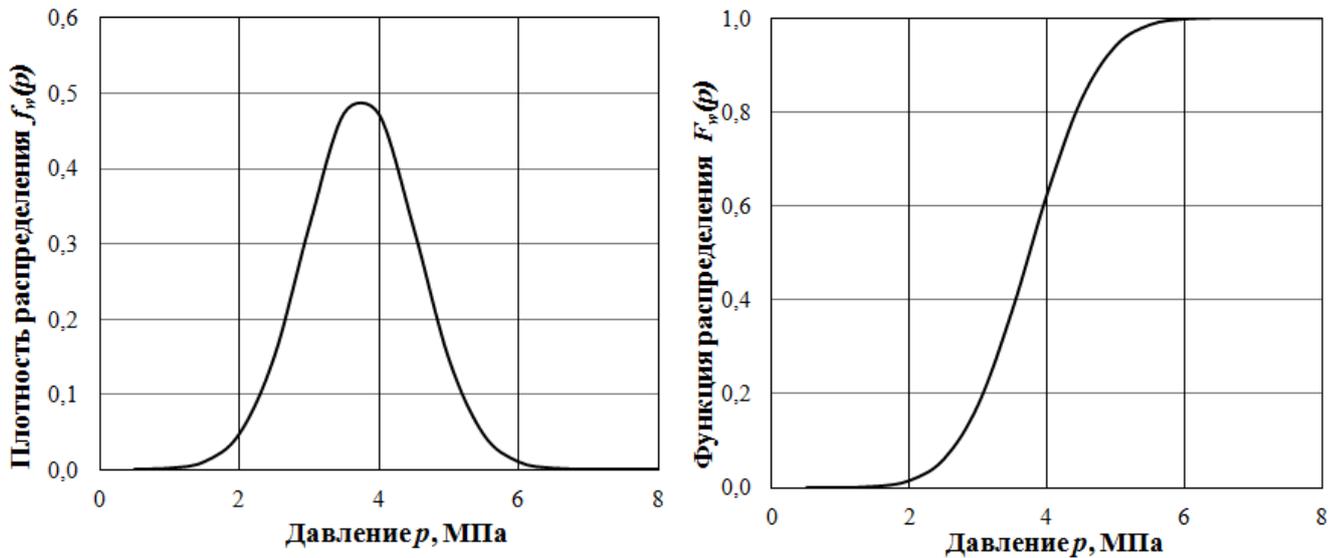


Рис.12 Плотность и функция распределения давления  $p$  в точке

Коэффициент вариации давления в точке на расстоянии 0,813 м от центра взрыва составил  $v_p = 0,214$ . При этом, чем меньше переменная  $\bar{R}$  (т.е. больше масса заряда или более близкое расположение рассматриваемой точки относительно центра заряда), тем выше коэффициент вариации давления  $v_p$ .

**В четвертой главе** проводятся исследования надежности отдельной железобетонной стены и здания перекрестно-стеновой конструктивной схемы в целом при различных исходных данных.

Для оценки надежности применялся метод статистических испытаний. Частота появления отказа  $v$  рассматривается как оценка вероятности отказа конструкции:

$$v = \frac{k}{m} \approx P_f, \quad (13)$$

где  $k$  – число отказов;  $m$  – общее число испытаний

Для вероятностного моделирования прочностных характеристик применялся закон Вейбулла, который наилучшим образом описывает распределение прочности бетона:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{k}{\lambda} \cdot \left(\frac{x}{\lambda}\right)^{k-1} \cdot e^{-\left(\frac{x}{\lambda}\right)^k}, & x \geq 0, \\ 0, & x < 0 \end{cases} \quad (14)$$

где  $\lambda$  – параметр масштаба,  $k$  – параметр формы, определяемые из системы уравнений:

$$\begin{cases} \lambda \cdot [\Gamma \cdot (1 + k^{-1})] = m_{Rb} \\ \lambda^2 \cdot [\Gamma \cdot (1 + 2 \cdot k^{-1}) - \Gamma \cdot (1 + k^{-1})^2] = D_{Rb} \end{cases}, \quad (15)$$

где  $m_{Rb}$ ,  $D_{Rb}$  – математическое ожидание и дисперсия для бетона;  $\Gamma$  – гамма-функция.

Для железобетонной стены (рис. 13) в качестве отказа было принято разрушение элемента конструкции при развитии пластических деформаций.

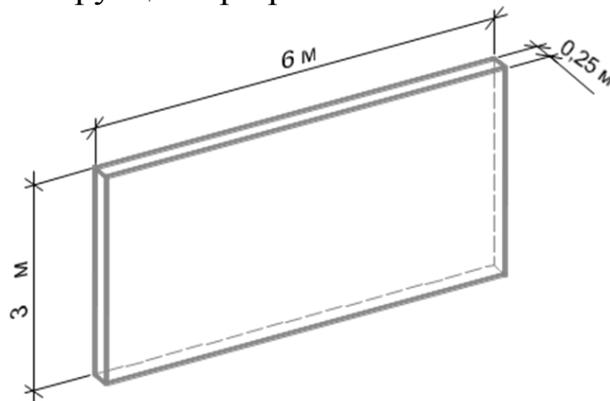


Рис.13 Расчетная схема

На рис. 14 приведены плотности и функции распределения для массы заряда ТНТ и для прочности материала.

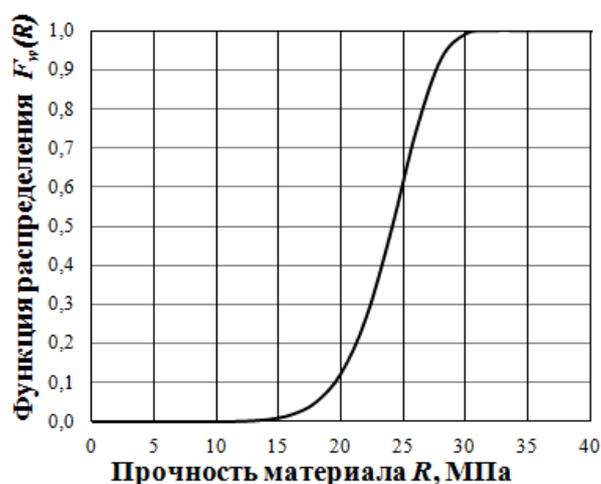
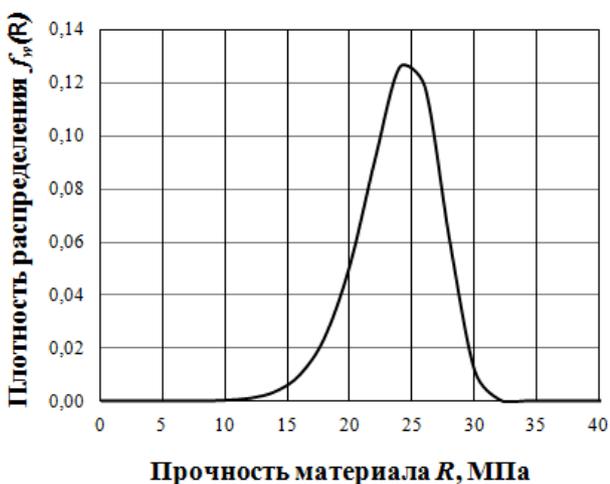
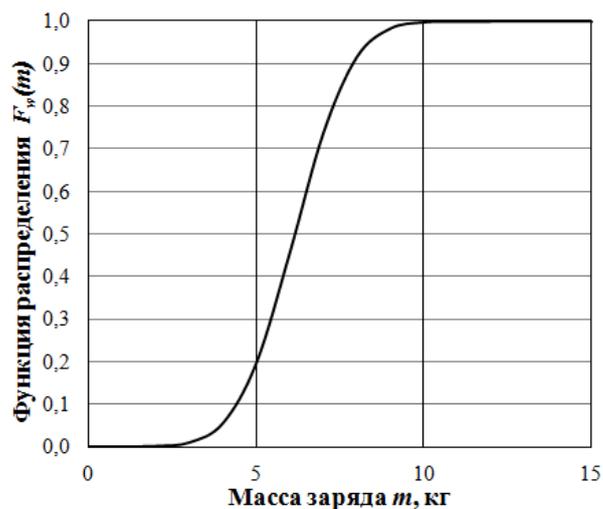
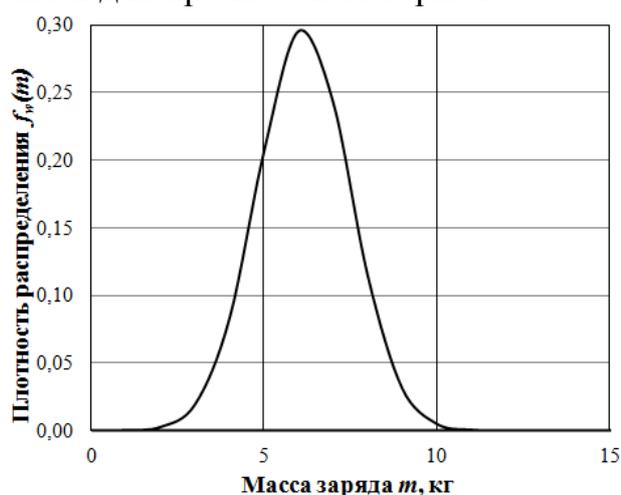


Рис.14 Вероятностные параметры расчета

Получены следующие результаты.

1. Вероятность отказа железобетонной стены при случайном взрывном воздействии:  $P_f = 0,3$ . Доверительные интервалы составили: для обеспеченности  $\beta = 0,95 - I_\beta = (0,119; 0,543)$ ; для обеспеченности  $\beta = 0,99 - I_\beta = (0,085; 0,61)$ .

2. Вероятность отказа железобетонной стены при случайном взрывном воздействии и детерминированном силовом воздействии  $N = 1500$  кН/м, приложенном вертикально к верхней грани конструкции:  $P_f = 0,7$ . Доверительные интервалы:  $\beta = 0,95 - I_\beta = (0,457; 0,881)$ ;  $\beta = 0,99 - I_\beta = (0,39; 0,915)$ .

3. Вероятность отказа железобетонной стены при случайном взрывном и детерминированном силовом воздействиях и случайной прочности:  $P_f = 0,45$ . Доверительные интервалы:  $\beta = 0,95 - I_\beta = (0,231; 0,685)$ ;  $\beta = 0,99 - I_\beta = (0,181; 0,743)$ .

4. Вероятность отказа железобетонной стены с проемом  $2,1 \times 1,2$  м при случайном взрывном и детерминированном силовом воздействиях и случайной прочности:  $P_f = 0,1$ . Доверительные интервалы:  $\beta = 0,95 - I_\beta = (0,012; 0,249)$ ;  $\beta = 0,99 - I_\beta = (0,00025; 0,317)$ .

По результатам расчетов можно сделать следующие выводы. При учете вертикальной нагрузки вероятность отказа конструкции возрастает в 2,3 раза, а при учете случайной прочности в 1,5 раза. При наличии проема вероятность отказа значительно снижается в связи со снижением площади воздействия взрывной нагрузки.

При оценке надежности здания перекрестно-стеновой конструктивной схемы рассмотрены следующие варианты.

1. Случайное взрывное воздействие заряда ТНТ с математическим ожиданием массы заряда  $m_m = 125$  кг и коэффициентом вариации  $v_m = 0,2$  для исходной схемы (рис. 15а).

2. Случайное взрывное воздействие заряда ТНТ с математическим ожиданием массы заряда  $m_m = 150$  кг и коэффициентом вариации  $v_m = 0,2$  для исходной схемы (рис. 15а).

3. Случайное взрывное воздействие заряда ТНТ с математическим ожиданием массы заряда  $m_m = 150$  кг и коэффициентом вариации  $v_m = 0,2$  при увеличении сечения несущей стены с 200 мм до 250 мм (рис. 15б).

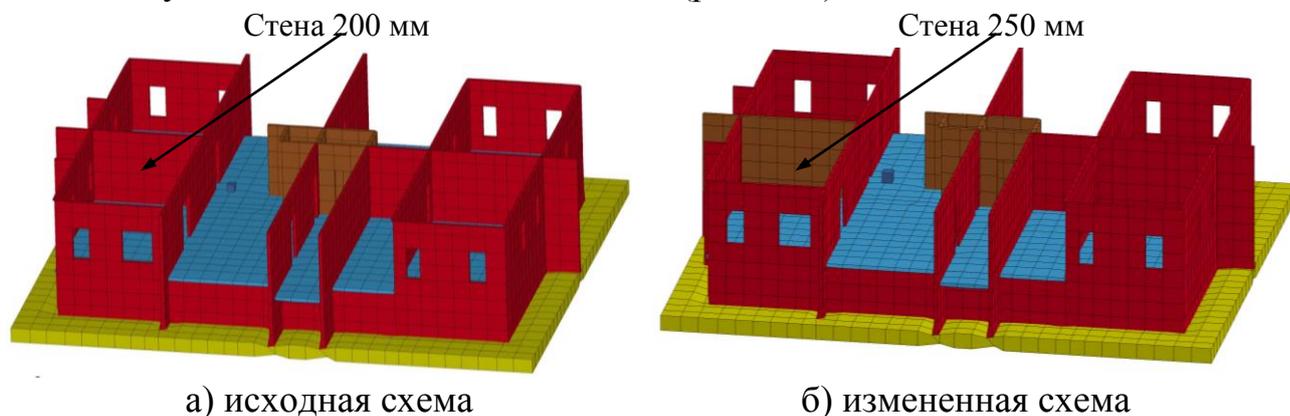


Рис.15 Рассматриваемые случаи

В работе получены следующие результаты.

1. Вероятность отказа системы при математическом ожидании массы заряда  $m_m = 125$  кг:  $P_f = 0,2$ . Доверительные интервалы:  $\beta = 0,95 - I_\beta = (0,057; 0,437)$ ;  $\beta = 0,99 - I_\beta = (0,036; 0,507)$ .

2. Вероятность отказа системы при математическом ожидании массы заряда  $m_m = 150$  кг:  $P_f = 0,4$ . Доверительные интервалы:  $\beta = 0,95 - I_\beta = (0,191; 0,639)$ ;  $\beta = 0,99 - I_\beta = (0,146; 0,701)$ .

3. Вероятность отказа системы при математическом ожидании массы заряда  $m_m = 150$  кг и увеличенной толщиной стены с 200 до 250 мм:  $P_f = 0,05$ . Доверительные интервалы:  $\beta = 0,95 - I_\beta = (0,00127; 0,249)$ ;  $\beta = 0,99 - I_\beta = (0,00025; 0,317)$ .

Проведенные исследования показывают возможность проектирования конструкции взрывобезопасными с заданным уровнем надежности путем корректировки конструктивной схемы зданий и сооружений.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Проведено сравнение результатов численного решения и экспериментальных данных для воздушной ударной волны, и сделан вывод о хорошем совпадении результатов.

2. Исследована чувствительность давления во фронте ударной волны к различным параметрам и факторам. После чего проведено вероятностное моделирование взрывного воздействия с использованием массы заряда ВВ в качестве случайного параметра нагрузки.

3. Проведены исследования взрывобезопасности различных зданий при действии внешних и внутренних ударных волн. Определены безопасные расстояния и минимальные массы зарядов ВВ. Получены картины локальных разрушений и возможного прогрессирующего обрушения конструкций. Расчеты выполнены с учетом геометрической, конструктивной нелинейностей и нелинейной работы материала конструкций.

4. Выполнена оценка надежности отдельной железобетонной стены при случайной прочности, случайном взрывном воздействии и детерминированном силовом нагружении.

5. Выполнена оценка надежности многоэтажного здания перекрестно-стеновой конструктивной схемы в целом при случайной прочности, случайном взрывном воздействии и детерминированном силовом нагружении.

6. Разработаны методики, позволяющие с помощью корректировки положения несущих элементов и их характеристик проектировать здания и сооружения с заданным уровнем взрывобезопасности и надежности.

**Основные положения и результаты диссертации отражены в следующих публикациях:**

В периодических изданиях, включенных в перечень рекомендованных ВАК:

1. *Тамразян А.Г., Мкртычев О.В., Дорожгинский В.Б.* Расчет большепролетной конструкции на аварийные воздействия методами нелинейной динамики. Научно-технический вестник Поволжья. №5 2012г. – Казань: Научно-технический вестник Поволжья, 2012. с. 331 – 334.

2. *Мкртычев О.В., Дорожгинский В.Б.* Анализ подходов к определению параметров взрывного воздействия // Вестник МГСУ. 2012. №5. с. 45 – 49.

3. *Мкртычев О.В., Дорожгинский В.Б.* Вероятностное моделирование взрывного воздействия // Вестник МГСУ. 2012. №11. с. 278 – 282.

4. *Мкртычев О.В., Дорожгинский В.Б., Лазарев О.В.* Расчет конструкций железобетонного здания на взрывные нагрузки в нелинейной динамической постановке // Вестник МГСУ. 2011. №4. с. 243 – 247.

Публикации в иных изданиях:

5. *Мкртычев О.В., Дорожгинский В.Б.* Безопасность железобетонного здания при взрывных воздействиях. Строительство – формирование среды жизнедеятельности: Сборник трудов. / Четырнадцатая Международная межвузовская научно-практическая конференция молодых ученых, докторантов и аспирантов / ГОУ ВПО Моск. гос. строит. ун-т. – М.: МГСУ, 2011. с.230 – 234.

6. *Мкртычев О.В., Дорожгинский В.Б.* Безопасность зданий и сооружений при взрывных воздействиях. Вестник НИЦ «Строительство». Исследования по теории сооружений: Сб. статей. Вып. 3 – 4 (XXVIII) / под ред. И.И. Ведякова и Г.С. Варданяна. – М.: НИЦ «Строительство», 2011. с. 21 – 34.

7. *Мкртычев О.В., Дорожгинский В.Б.* Исследование взрывобезопасности зданий. II Всероссийская конференция с элементами научной школы для молодежи «Устойчивость, безопасность и энергосбережение в современных архитектурных, конструктивных, технологических решениях и инженерных системах зданий и сооружений»: Сборник тезисов / ФГБОУ ВПО «Моск. гос. строит. ун-т» – М.: МГСУ, 2011. с. 75 – 80.

8. *Мкртычев О.В., Дорожгинский В.Б.* Расчет элемента конструкции на взрывные нагрузки в нелинейной динамической постановке./ Теория и практика расчета зданий, сооружений и элементов конструкций. Аналитические и численные методы. Сб. трудов международной научно-практической конференции./ М., МГСУ, 2010. с. 248 – 255.