

Содержание

1. Введение	3
2. Назначение и область применения ПС	16
3. Описание ПС	30
4. Описание расчетных схем и геометрических моделей	45
5. Обоснование расчетной методики	67
6. Матрицы верификации.....	69
7. Описание верификационных примеров (задач, тестов)	78
8. Результаты верификации	79
9. Проект аттестационного паспорта.....	80
10. Перечень источников	89
Основные условные обозначения и сокращения	94

Приложение 1 (том 2). Примеры из верификационного отчета по
АСТРА-АЭС 6.1 (1995 г.)

Приложение 2 (том 3). Верификационные примеры на новые возможности
АСТРА-АЭС'2009

Приложение 3 (том 4). Опыт применения АСТРА-АЭС при расчетном обосновании
прочности ТС в проектно-конструкторских и научно-исследовательских
фирмах

1. Введение

Настоящий документ содержит материалы по верификации программного комплекса (ПК) АСТРА-АЭС'2009, предназначенного для автоматизированных расчетов низко- и высокотемпературных трубопроводных систем на статическую и циклическую прочность, сейсмические воздействия, вибропрочность и неустановившиеся динамические процессы в соответствии с требованиями действующих Норм ПНАЭ Г-7-002–86. Документ подготовлен с учетом требований Руководящего Документа “Требования к составу и содержанию отчета о верификации и обосновании программных средств, применяемых для обоснования безопасности объектов использования атомной энергии”, РД-03-34–2000.

Материалы верификационного отчета содержат как подтверждение ранее аттестованных возможностей (АСТРА-АЭС 6.1, аттестационный паспорт № 40 от 21.12.1995 г., рис.1.1), так и обоснование новых возможностей АСТРА-АЭС'2009 в численном моделировании НДС и оценках прочности трубопроводных систем АЭУ и элементов-деталей.

1.1 Название ПС

Программный комплекс АСТРА-АЭС'2009.

1.2 Самостоятельные модули ПС

Наименование	Описание	Программные файлы
ПРЕ-АСТРА	Препроцессор – ввод и проверка исходных данных.	AstraNova.exe, GeomWnd.dll, CADModel.dll, LFC.dll, Dbedit.exe, Dispmass.dll.
ПОСТ-АСТРА	Постпроцессорная обработка результатов.	AstraNova.exe, Hststac.dll, Hststaes.dll, Hstform.dll, Hstseism.dll, Hstvibr.dll, Hstdyn.dll, LFC.dll.
АСТРА-СТАЦ	Расчёт ТС на статическую и циклическую прочность	Stacaes.dll
АСТРА-ФОРМ	Расчёт собственных частот и форм колебаний ТС. Подготовка данных для динамических расчетов.	Form.dll
АСТРА-СЕЙСМ	Расчёт ТС на сейсмические воздействия, заданные спектрами ускорений и акселерограммами.	Seism .dll
АСТРА-ВИБР	Расчёт ТС на вибропрочность.	Vibr.dll
АСТРА-ДИН	Расчёт ТС на динамические воздействия.	Dyn.dll
АСТРА-СТАДИО	Уточненный расчет температурного и напряженно-деформированного состояния по пространственно-оболочечным и трехмерным КЭ-моделям, оценка статической, циклической и сейсмической прочности деталей трубопровода.	AstraStadyo.exe Inpdatt.dll Massol.dll Outres.dll

1.3 Авторы ПС

Руководитель разработки – д.т.н., проф. Белостоцкий А.М., ответственные исполнители: Воронова Г.А., Потапенко А.Л., Клепец О.Ю., Шишкина А.Н., Аул А.А., Островский К.И.

1.4 Организация-разработчик ПС

ЗАО “Научно-исследовательский центр СтаДиО” (ЗАО НИЦ СтаДиО). Имеется свидетельство Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам об официальной регистрации программ для ЭВМ №2006610288 от 12 января 2006 г. (рис. 1.2).

1.5 Организация-заявитель ПС

ЗАО “Научно-исследовательский центр СтаДиО” (НИЦ СтаДиО).

ОАО “Атомэнергопроект”

ОАО “ОКБ Гидропресс”

1.6 Перечень организаций, использующих (применяющих) ПС

ПК АСТРА-АЭС'2009 находится в производственной эксплуатации ряда ведущих организаций отрасли:

- ОАО “Атомэнергопроект”,
- ОАО “ОКБ “Гидропресс”,
- ПКФ “Росэнергоатом”,
- ОАО ЗИОМАР,
- АО РОСЭП,
- ЗАО “Сельэнергопроект”,
- Свердловский НИИХимМаш,
- ГОУ ВПО МГСУ,
- ЗАО НИЦ СтаДиО,
- Киевский “Энергопроект”,
- Харьковский “Энергопроект”,
- НПО “Вектор” (Киев),
- НТЦ ЯРБ Украины,
- Энергопроект (Болгария),
- Игналинская АЭС.

(всего – более 80-и рабочих мест) и включен в ОФАП-ЯР.

1.7 Операционная система

Windows 98, NT, 2000, XP, Vista.

1.8 Языки программирования

Intel Visual Fortran 11 (вычислительные модули), Microsoft Visual C++ 2008, Borland C++ Builder 2008 for Microsoft Windows. с использованием трехмерной графики OpenGL (визуализация расчетных моделей и результатов, диалоговая система).

1.9 Характерное время счета

Время счета зависит от быстродействия ПЭВМ, вычислительной размерности решаемой задачи (сложности расчетной модели – числа узлов, элементов, собственных частот/форм, шагов по времени) и наличия нелинейных факторов (односторонние опоры и опоры трения). Характерные времена счета приведены в разделе 1.13.

1.10 Требования к электронным вычислительным машинам, на которых возможно выполнение расчетов с применением ПС

Комплекс может функционировать на ПЭВМ Pentium и IBM-совместимых (под управлением операционной системы Windows 98, NT, 2000, XP, Vista).

Минимальные требования к оборудованию:

- CPU 100 МГц;
- RAM 128 Мб,
- HDD 500 Мб,
- VideoCard: не менее 2^{16} цветов; видеопамять - 2 Мб.

Рекомендуемые параметры:

- CPU 750 МГц и выше;
- RAM 256 Мб и выше;
- HDD 2 Гб и выше,
- VideoCard: видеопамять 4 Мб и выше; количество цветов 2^{32} .

Для размещения одного комплекса требуется около 11 Мб дисковой памяти. Дисковая память для хранения программных модулей зависит от выбранной пользователем конфигурации комплекса. Для оценки требуемого объема дисковой памяти можно использовать данные таблицы:

Дисковая память для размещения комплекса

Модуль	Дисковая память, К
<i>ПРЕ-АСТРА</i>	1000
<i>АСТРА-СТАЦ</i>	832
<i>АСТРА-ФОРМ</i>	664
<i>АСТРА-СЕЙСМ</i>	980
<i>АСТРА-ВИБР</i>	977
<i>АСТРА-ДИН</i>	980
<i>ПОСТ-АСТРА</i>	800
<i>АСТРА-СТАДИО</i>	3500
Служебные программы	6587

Для проведения сеанса работы необходимо свободное дисковое пространство от **2.5 Мб** до **200 Мб** в зависимости от сложности расчетной модели и режимов расчета.

1.11 Названия и номера документов, подтверждающих депонирование “замороженной” версии ПС и его самостоятельных модулей в Центре по организации экспертизы ПС

В ОФАП-ЯР переданы:

1. CD-диск, содержащий:
 - инсталляционная программа ПК АСТРА-НОВА'2009;
 - драйверы и утилиты для работы с электронным ключом защиты HASP HL;
 - документация к ПК в электронном виде (общее описание ПК АСТРА-НОВА'2009; сеанс работы с комплексом АСТРА-НОВА'2009: общее описание (приложения) ПК АСТРА-НОВА'2009; общее описание и сеанс работы с АСТРА-СТАДИО'2009;
 - файлы верификационных примеров-проектов (исходные модели и результаты расчетов).
2. Электронный ключ защиты HASP HL Max.
3. Общее описание ПК АСТРА-НОВА'2009 (бумажная копия, 134 стр.)
4. Общее описание ПК АСТРА-НОВА'2009 (приложения) (бумажная копия, 89 стр.)

5. Сеанс работы с комплексом АСТРА-НОВА'2009 (бумажная копия, 275стр.).
6. Общее описание и сеанс работы с АСТРА-СТАДИО'2009 (бумажная копия, 78 стр.).
7. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2006610288.
8. Аннотация ПК АСТРА-АЭС'2009

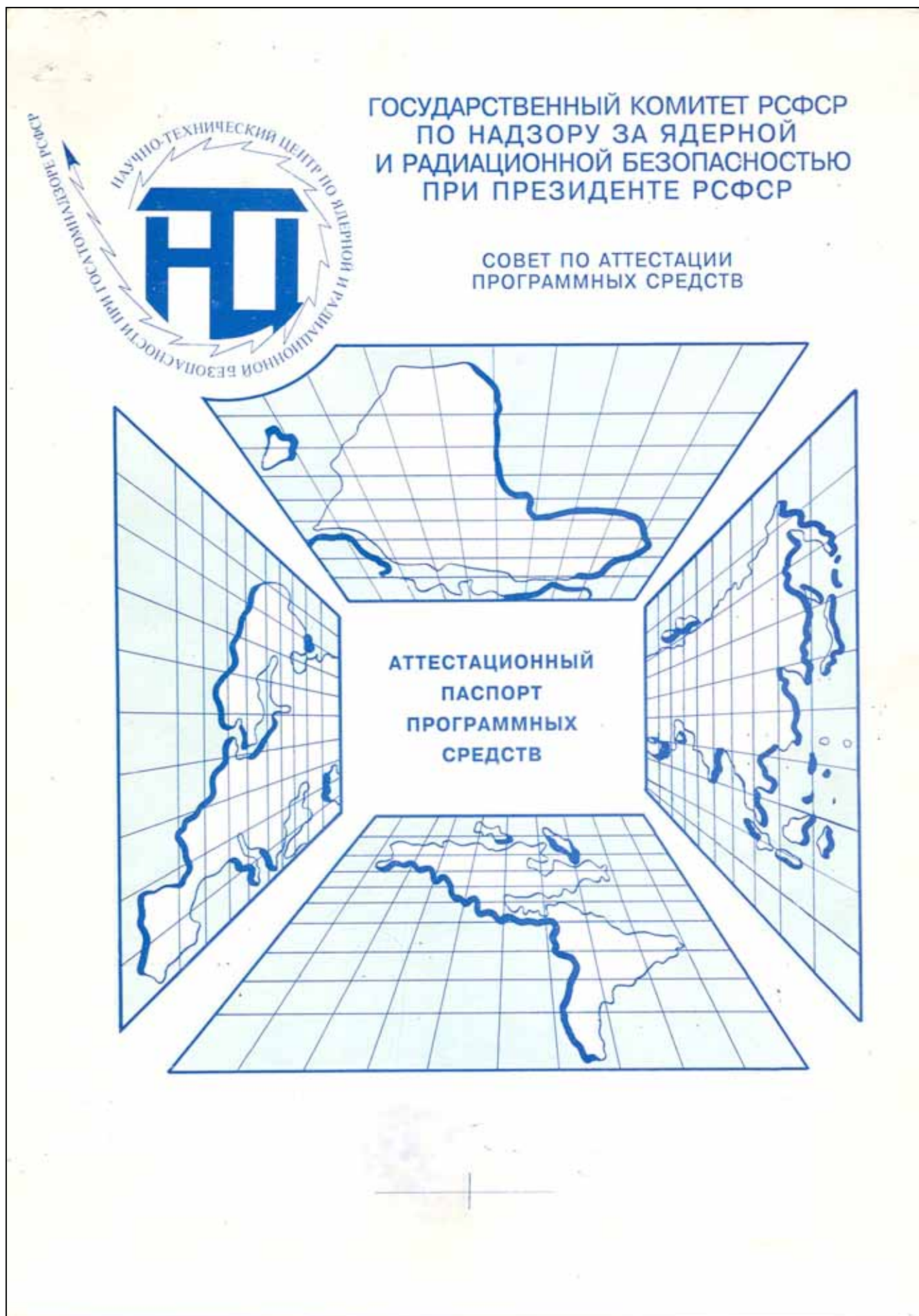


Рис.1.1 Аттестационный паспорт АСТРА-АЭС 6.1

В ЦЭП при НТЦ ЯРБ

№ <u>9</u>	№ <u>40</u>
Регистрационный номер ПС в Госреестре программ для ЭВМ	Регистрационный номер паспорта аттестации ПС
<u>05.06.95</u>	<u>21.12.1995</u>
дата регистрации	дата выдачи

Название программного средства: Комплекс программ АСТРА-АЭС (версия 6.1).
Автоматизированный расчет трубопроводных систем АЭС на статическую и циклическую прочность, на сейсмические воздействия, вибропрочность и неустановившиеся динамические процессы в соответствии с требованиями Норм ПНАЭ Г-7-002-86.

Имя автора (авторов): Белостоцкий А.М., Воронова Г.А., Духовный И.А., Школьников Ф.Л., Шишкина А.Н., Чамов И.К.

ЭВМ: 1) ПЭВМ РС АТ 286/87, 386, 486 и совместимые с операционной системой MS DOS
2) VAX с операционной системой VAX/VMS
3) ЕС с операционной системой ОС ЕС

Организация разработчик: Научно-инженерный центр СТАДИО

Решение Совета по аттестации программных средств
Программа подлежит повторной аттестации после пересмотра нормативных материалов.
Приложение на 4стр.

М.П.

Председатель Совета
по аттестации ПС Ковалевич О.М.
Секретарь совета Угрюмова И.Р.




Рис.1.1 Аттестационный паспорт АСТРА-АЭС 6.1

ПРИЛОЖЕНИЕ К АТТЕСТАЦИОННОМУ ПАСПОРТУ ПС N 40 (Программный комплекс АСТРА-АЭС, версия 6.1)

1. Перечень модулей - Комплекс АСТРА-АЭС содержит 370 подпрограмм.

ПЭВМ - язык программирования Microsoft FORTRAN v5.1, 38 EXE-модулей;

VAX - язык программирования VAX-FORTRAN, 8 EXE-модулей;

ЕС - язык программирования FORTRAN-77, 8 загрузочных модулей.

2. Назначение и область применения. Комплекс программ АСТРА-АЭС (версия 6.1 от 01.09.92г.) предназначен для автоматизированного расчета произвольных пространственных разветвленных трубопроводных систем на статическую и циклическую прочность, на сейсмические воздействия, заданные спектрами ответа и акселерограммами, на вибропрочность для установившихся режимов колебаний и на неустановившиеся динамические процессы в соответствии с требованиями действующих "Норм расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. ПНАЭ Г-7-002-86". Трубопроводная система может содержать замкнутые контуры, свободные, шарнирно опертые и защемленные концы, промежуточные опоры (пружинные, скользящие и катковые), линзовые компенсаторы, стержневые элементы произвольного сечения и другие элементы, характерные для трубопроводов АЭС.

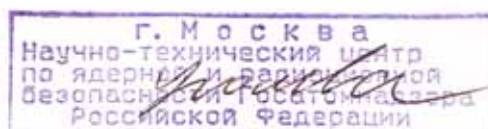
Комплекс программ АСТРА-АЭС состоит из 5 программных модулей (АСТРА-СТАЦ, АСТРА-СЕЙСМ, АСТРА-ВИБР, АСТРА-ДИН, АСТРА-ГРАФ), имеющих единые методические и нормативные основы, способ построения расчетной модели, совместимых по исходным данным, их заданию и форме представления результатов.

АСТРА-СТАЦ - расчет на статическую и циклическую прочность низко- и высокотемпературных трубопроводов АЭС. Для опорных конструкций, задаваемых в общей и местной системах координат, проводится рациональный выбор их характеристик. Пружинные подвески могут иметь заданные характеристики из сортамента МВН, ОСТ и "спецпружин" или характеристики, выбранные программно путем определения нагрузок в рабочем и холодном состоянии, структуры пружинных цепей, их затяжки и осадки; возможен учет наклона пружинных подвесок при температурных перемещениях трубопровода. Для специальных пружин учитываются также удлинения тяг и изменение термомеханических характеристик пружин при нагреве. Предусмотрены все практически значимые виды и режимы прочностных расчетов на нормативно регламентируемые сочетания квазистатических и малоцикловых воздействий: давления, распределенной массы и сосредоточенных нагрузок, температурного нагрева трубопровода, смещений его защемленных концов, монтажного растяга.

Результатами расчета являются перемещения (линейные и угловые), расчетные приведенные и допускаемые напряжения во всех расчетных сечениях участков (включая гибы и колена) и в тройниковых узлах, вычисленные по упрощенной и уточненной методикам; силовые факторы (в общей и местной системах) в заданных сечениях, нагрузки на оборудование (концевые опоры) и узлы участков, а также на опорные конструкции и пружинные подвески в рабочем и холодном состояниях, режиме гидроиспытаний; типы и характеристики выбранных пружинных подвесок.

АСТРА-СЕЙСМ - расчет трубопроводных систем АЭС на сейсмические воздействия: только сейсмических нагрузок или суммарного действия давления, собственной массы и сейсмических нагрузок. В качестве сейсмического воздействия можно задавать спектры ответов и/или ответные акселерограммы землетрясения на отметке крепления трубопровода в одно- или трехкомпонентном виде. Массы трубопроводов и технологического оборудования представляются в виде сосредоточенных масс, приведенных в заданные точки (сечения) расчетной схемы.

Результатами расчета являются собственные частоты и формы (в требуемом частотном диапазоне и/или заданное число), линейные и угловые перемещения и приве-



2

Рис.1.1 Аттестационный паспорт АСТРА-АЭС 6.1

денные напряжения группы $(\sigma_s)_2$ в сечениях суперэлементов ("участков"), нагрузки на пружинные подвески и опорные конструкции в рабочем состоянии, силовые факторы в местной и общей системах координат (в заданных точках), максимальные напряжения в тройниках. При одновременном задании нескольких вариантов сейсмических воздействий возможен выбор максимальных перемещений, напряжений и нагрузок по всем введенным воздействиям.

АСТРА-ВИБР - расчет на вибропрочность трубопроводных систем АЭС; проводится спектральный анализ параметров вынужденных установившихся детерминированных колебаний системы. Силовое нагружение задается для произвольных сечений схемы в полигармоническом виде.

Выполняется два вида расчета:

- определение допускаемых амплитуд виброперемещений (усилий, нагрузок на опоры и оборудование) при колебаниях трубопровода по каждой учитываемой собственной форме из условия достижения допускаемого значения максимальными напряжениями;
- расчет параметров вынужденных установившихся колебаний (амплитуд перемещений, нагрузок и напряжений).

Результатами расчета являются собственные частоты и формы (в требуемом частотном диапазоне и/или заданное число), амплитуды вибрационных перемещений и напряжений, допускаемые напряжения, силовые факторы в местной системе координат для каждой собственной или вынуждающей частоты.

АСТРА-ДИН - предназначена для расчета трубопроводных систем АЭС на неустановившиеся динамические процессы. Определяются параметры неустановившихся вынужденных колебаний, необходимые для оценки вибропрочности при нестационарных (переходных) режимах и анализа аварийных ситуаций, связанных с разрывами трубопроводов.

Силовые воздействия задаются в произвольных точках системы трубопровода в виде временных зависимостей давления и/или сосредоточенных сил.

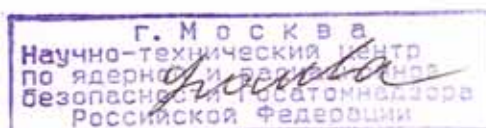
Результатами расчета являются собственные частоты и формы (в требуемом частотном диапазоне и/или заданное число), максимальные (за время воздействия) перемещения, усилия, нагрузки на опоры и узлы, амплитуды приведенных напряжений.

АСТРА-ГРАФ - предназначена для получения графического изображения расчетной схемы трубопроводов или ее фрагмента, что позволяет проверить правильность задания геометрии линии трубопровода, размещения опорных конструкций, пружинных подвесок, элементов трубопровода с отличающимися от участков данных характеристиками.

Выбор масштаба, размеров листа (формат), вида аксонометрической проекции может осуществляться пользователем или проводится автоматически. Изображение может быть выведено одинарной линией, показывающей осевую линию трубопровода, или двойной линией, при этом ширина изображаемых элементов пропорциональна наружным диаметрам труб. Программа **АСТРА-ГРАФ** производит пересчет всех координат в единую систему координат трубопровода, диагностируя несостыковку трубопроводов в местах их соединений.

Исходными данными служит подготовленный обычным образом набор данных для проведения расчета по любой из программ комплекса **АСТРА-АЭС** с необязательным добавлением списка параметров, задаваемого пользователем для получения графического изображения схемы.

Область применения комплекса **АСТРА-АЭС** - расчеты на статическую и циклическую прочность, сейсмостойкость, вибропрочность и на неустановившиеся динамические процессы произвольных пространственных низко- и высокотемпературных трубопроводных систем в соответствии с требованиями "Норм расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. ПНАЭ Г-7-002-86".



3

Рис.1.1 Аттестационный паспорт АСТРА-АЭС 6.1

Ограничения на геометрию и на величины нагрузок: системы рассматриваются как стержневые и линейно-упругие.

Ограничения на параметры расчетной модели:

1) количество суперэлементов ("участков") до 200, "узлов" до 100, тройников до 100, динамических степеней свободы до 1500, вычисляемых и учитываемых собственных частот и форм колебаний до 100, длина спектра ответов до 100 точек, акселерограммы до 600, проекций динамических сил (векторов) до 180, каждая до 600 точек по времени;

2) для каждого суперэлемента можно задать: количество элементов ("отрезков") до 40, пружинных подвесок, опорных конструкций, произвольно ориентированных в пространстве сосредоточенных сил, отличающихся от "участковых" значений (наружного диаметра, толщины стенки и/или вертикальной составляющей весовой нагрузки), дополнительных местных напряжений - до 10, линзовых компенсаторов до 3, монтажный растяг в одной точке (сечении), полигармонических сил до 30, число гармоник в силе до 50.

3. Сведения о методике.

В комплексе программ АСТРА-АЭС реализован единый алгоритм расчета произвольных трубопроводных систем (определение перемещений, нагрузок и усилий в сечениях) как линейно-упругих пространственных многократно статически неопределимых стержневых систем. Алгоритм сочетает суперэлементный подход метода перемещений, методы начальных параметров и прогонки (для каждого неразветвленного суперэлемента) и спектральный подход к решению динамических задач.

Учитывается повышенная оболочечная податливость криволинейных труб (эффект Кармана и стеснение от примыкающих прямых труб). Оболочечная податливость тройниковых соединений не учитывается.

Трение в опорах скольжения и качения моделируется системой эквивалентных фиктивных горизонтальных связей, жесткостные характеристики которых определяются в гарантированно сходящемся итерационном процессе. Критерием сходимости процесса является равенство силы трения (произведение вертикальной нагрузки на коэффициент трения) произведению жесткости фиктивной связи на горизонтальное перемещение.

Осевые и шарнирные линзовые компенсаторы схематизируются прямолинейными элементами (отрезками) с эквивалентными характеристиками сечения на растяжение-сжатие, сдвиг, изгиб и кручение.

Решение результирующей алгебраической системы уравнений равновесия суперэлементной модели (определение вектора перемещений в узлах) проводится для статических задач (АСТРА-СТАЦ) и при определении матриц податливости (АСТРА-СЕЙСМ, АСТРА-ВИБР и АСТРА-ДИН) по схеме квадратного корня (Холецкого) с учетом положительной определенности, симметричности, блочности и разреженности матрицы жесткости.

Значимые собственные частоты и соответствующие им формы колебаний (в требуемом частотном диапазоне и/или заданное число) динамической модели системы, учитываемые в расчетах по программам АСТРА-СЕЙСМ, АСТРА-ВИБР и АСТРА-ДИН, определяются из решения частной проблемы собственных значений блочным методом Ланцоша или методом итераций подпространства (по выбору пользователя).

АСТРА-СЕЙСМ: расчет линейно-упругого трубопровода на сейсмические воздействия, заданные трехкомпонентными спектрами ответов, проводится по линейно-спектральному методу; расчет на сейсмовоздействия, заданные ответными акселерограммами, выполняется интегрированием уравнений движения спектральным методом с разложением по собственным формам колебаний (по схеме Дюамеля).

АСТРА-ВИБР: при расчете на вибропрочность используется спектральный анализ параметров вынужденных установившихся детерминированных колебаний системы. Силовое нагружение задается в полигармоническом виде.

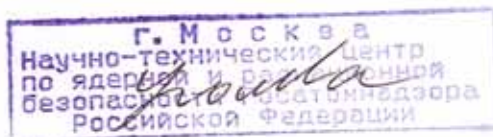


Рис.1.1 Аттестационный паспорт АСТРА-АЭС 6.1

АСТРА-ДИН: при расчете на неустановившиеся динамические процессы реализована спектральная методика расчета неустановившихся вынужденных колебаний для оценки вибропрочности при нестационарных (переходных) режимах и анализа аварийных ситуаций, связанных с разрывами трубопроводов. Силловые воздействия задаются в виде временных зависимостей давления и/или сосредоточенных сил.

4. Сведения о константах. Встроенные в текст программы физические константы не используются. Все физико-механические, геометрико-жесткостные и инерционные характеристики задаются явно в исходных данных или берутся из встроенных баз данных.

5. Перечень организаций использующих программу - ОКБ "Гидропресс", МО "Атомэнергопроект", "Атомэнергопроект", АО РосЭП, НИЦ СТАДИО, ДФ "Энергопроект" (Болгария).

6. Особые условия - после введения в действие новых редакций "Норм расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. ПНАЭ Г-7-002-86" и (или) других нормативно-методических документов, регламентирующих расчеты на прочность трубопроводов АЭУ (РТМ 108.020.01-75, ПНАЭ Г-7-008-89, РТМ 24.038.08-72, РТМ 24.038.12-72, ОСТы и ГОСТы по сортаменту пружинных опор), программный комплекс подлежит повторной аттестации.



Ученый Секретарь Совета
по аттестации

Уголева И.Р. Уголева

Председатель Секции N9 Совета
по аттестации

Калиберда И. В. Калиберда

Рис.1.1 Аттестационный паспорт АСТРА-АЭС 6.1



Рис.1.2 Свидетельство Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам об официальной регистрации ПК АСТРА-НОВА (включая АСТРА-АЭС) для ЭВМ №2006610288 от 12 января 2006 г

1.12 История развития и опыт применения ПС

Верифицируемый ПК *АСТРА-АЭС'2009* является законным и достойным преемником поколения комплекса *АСТРА-АЭС* “доперсональной” эры (1976–1989 гг., ЕС ЭВМ, VAX/VMS), аттестованной в Госатомнадзоре РФ версии 6.1 комплекса *АСТРА-АЭС* (аттестационный паспорт № 40 от 21.12.1995 г., версии на ЕС ЭВМ, VAX/VMS и ПЭВМ, рис. 1.2) и ранних версий уже в составе *АСТРА-НОВА (6.2, -99, -2001, -2003, -2005, -2007)*.

ПК *АСТРА-АЭС'2009* аккумулирует 33-х летний опыт разработок и интенсивной эксплуатации и представляет собой специализированное программное средство, предназначенное для поверочных расчетов произвольных пространственных разветвленных и протяженных трубопроводных систем атомных энергетических установок в соответствии с требованиями действующих “Норм расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. ПНАЭ Г-7-002–86” в процессе автоматизированного проектирования, мониторинга, реконструкции и продления ресурса.

Накоплен многолетний и многогранный опыт широкого внедрения комплекса и его использования в расчетных исследованиях трубопроводных систем, важных для безопасности Курской, Смоленской, Чернобыльской, Ленинградской, Билибинской, Кольской, Запорожской, Нововоронежской, Балаковской, Волгодонской, Армянской, Белоярской и Игналинской АЭС, АЭС “Козлодуй” и “Белене” (Болгария), “Пакш” (Венгрия), “Ловиза” (Финляндия), “Бушер” (Иран), “Куданкулам” (Индия), “Тяньвань” (Китай) и проектов АС нового поколения. Имеются положительные референции специалистов ведущих зарубежных фирм Siemens AG (Германия), EDF (Франция) и Westinghouse (США).

За время своего существования программный комплекс *АСТРА-АЭС* использовался для проведения прочностных расчетов огромного числа (по неполным оценкам – нескольких тысяч) трубопроводных систем АЭУ в ведущих организациях отрасли. Весьма показательно, что ни по одной из этих систем не было рекламаций и (или) каких-либо нештатных ситуаций, обусловленных использованием программного комплекса, что является свидетельством его надежности и квалификации пользователей.

В частности, ЗАО НИЦ СтаДиО применяло ПК в 1991–2009 гг. при выполнении *десятков* НИР, среди которых (последние 7 лет):

1) Расчетные исследования статического и сейсмического напряженно-деформированного состояния системы “сепаратор пара - строительные конструкции” 3 энергоблока Курской АЭС.

2) Уточненные расчетные исследования напряженного состояния и оценка статической и циклической прочности тяжело нагруженных тройниковых соединений трубопроводов КМППЦ АЭС с РБМК.

3) Расчетные исследования напряженно-деформированного состояния и прочности трубопроводов и оборудования комплексов холодоснабжения АЭС “Куданкулам” при действии статических, динамических, ударно-волновых и сейсмических нагрузок.

4) Уточненные расчетные исследования напряженного состояния и оценка статической и циклической прочности тяжело нагруженных тройниковых соединений трубопроводов КМППЦ АЭС с РБМК.

5) Расчеты на статическую и циклическую прочность и на сейсмические воздействия трубопроводных систем РДЭС 3 блока Калининской АЭС в соответствии с требованиями норм ПНАЭ Г-7-002–86.

6) Расчеты на статическую и циклическую прочность и на сейсмические воздействия трубопроводов, важных для безопасности реконструируемых блоков Смоленской АЭС, в соответствии с требованиями норм ПНАЭ Г-7-002–86.

7) Расчеты на статическую и циклическую прочность и на сейсмические воздействия трубопроводов, важных для безопасности 5-го энергоблока Курской АЭС, в соответствии с требованиями норм ПНАЭ Г-7-002–86.

8) Оценка циклической прочности главных паропроводов энергоблока №1 Волгодонской АЭС на основе расчетного анализа квазистатического, температурного и вибрационного напряженного состояния с учетом результатов виброобследований.

9) Расчеты на статическую и циклическую прочность, на сейсмические и ударно-волновые воздействия трубопроводов масла и топлива РДЭС энергоблока №3 Ленинградской АЭС в соответствии с требованиями норм ПНАЭ Г-7-002–86.

10) Расчеты на статическую и циклическую прочность и на сейсмические воздействия трубопроводов РДЭС для АЭС в соответствии с требованиями норм ПНАЭ Г-7-002–86.

11) Программно-алгоритмические разработки, расчетные исследования напряженно-деформированного состояния, нормативные оценки статической, циклической и сейсмической прочности трубопроводов ГКС газопровода Сахалин-Хабаровск-Владивосток.

12) Расчеты на статическую и циклическую прочность и на сейсмические воздействия трубопроводов питательной воды РО, СПиР и САОР, важных для безопасности блока 1 Смоленской АЭС, в соответствии с требованиями норм ПНАЭ Г-7-002–86.

1.13 Характерные времена счета и используемые ресурсы ЭВМ

Таблица, представленная ниже, дает представление о характерных временах счета ЭВМ для решения некоторых классов задач. Расчеты проводились на ПЭВМ Pentium 4 с процессором 3.2 GHz, 512Mb RAM.

Типичное время счета, с

№	Вид расчета (модуль)	Степень разветвленности/протяженности/сложности ТС		
		“Малая” (до 40 СЭ, до 1600 элементов)	“Средняя” (до 400 СЭ, до 16000 элементов)	“Большая” (до 4000 СЭ, до 1600000 элементов)
1	Статика и циклика АСТРА-СТАЦ	1 - 5	5 - 100	100 - 2000
2	Собственные частоты и формы колебаний АСТРА-ФОРМ	2 - 10	10 - 200	200 - 4000
3	Сейсмика АСТРА-СЕЙСМ	2 - 20	20 - 400	400 - 8000
4	Вибрации АСТРА-ВИБР	1 - 10	10 - 100	100 - 1000
5	Динамика АСТРА-ДИН	2 - 20	20 - 400	400 - 8000

№	Вид расчета (модуль)	Размерность КЭ-модели детали		
		“Малая” (до 1000 узлов, до 500 КЭ)	“Средняя” (до 10000 узлов, до 5000 КЭ)	“Большая” (до 100000 узлов, до 50000 КЭ)
6	Уточненный КЭ-расчет деталей АСТРА-СТАДИО	6 - 30	60 - 300	600 - 3000

2. Назначение и область применения ПС

2.1 Отраслевая “ветвь” *АСТРА-АЭС'2009* комплекса программ *АСТРА-НОВА'2009* предназначена для автоматизированного расчета произвольных пространственных разветвленных и протяженных трубопроводных систем на статическую и циклическую прочность, на сейсмические воздействия, заданные спектрами ответа и акселерограммами, на вибропрочность для установившихся режимов колебаний и на неустановившиеся динамические процессы в соответствии с требованиями действующих “Норм расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. ПНАЭ Г-7-002–86”.

Суммируя многочисленные преимущества *АСТРА-АЭС(НОВА)'2009*, имеющие важное самостоятельное значение, констатируем впервые в отечественной практике достигнутый качественно новый уровень комплексного автоматизированного расчетного обоснования статической и циклической прочности, сейсмостойкости, вибрационной и динамической прочности на доступных ПЭВМ: *трубопроводные системы произвольной сложности можно (и следует) оперативно и точно моделировать с использованием преимуществ реализованных современных численных методов, Windows- и САПР-технологий, анализировать в полном соответствии с требованиями действующих российских норм и оптимизировать по прочностным критериям, не прибегая к вынужденным и, зачастую, необоснованным упрощениям и умолчаниям.*

Трубопроводные системы (ТС) рассматриваются как пространственно-стержневые (с учетом оболочечных эффектов в гibaх-коленах и ортогональных тройниках) и линейно-упругие (с возможным учетом эффектов трения Кулона и отрыва в опорах).

ТС может содержать замкнутые контуры, свободные, шарнирно опертые и защемленные концы, промежуточные опоры (мертвые, пружинные, скользящие и катковые, включая односторонние опоры и жесткие тяги), линзовые и сифонные компенсаторы, стержневые элементы произвольного сечения и другие элементы (включая оборудование и нестандартные опорные конструкции), характерные для трубопроводов АЭС.

Задаются и учитываются в статических расчетах следующие нагрузки и воздействия для режимов НУЭ (нормальных условий эксплуатации), ННУЭ (нарушения нормальных условий эксплуатации), ГИ (гидроиспытаний) и АС (аварийных ситуаций):

- внутреннее или внешнее давление,
- статические силы и моменты в произвольных сечениях,
- распределенная нагрузка по 3-м направлениям (включая весовую от продукта, металла и изоляции),
- распределенный момент от неравномерного по высоте сечения нагрева (например, при стратифицированных течениях),
- температура нагрева (охлаждения),
- температурные перемещения опор,
- монтажный натяг (растяг).

Для динамических задач задаются амплитудно-частотные и (или) временные характеристики сейсмических, вибрационных (гидродинамических), импульсно-переходных и аварийных (МПА) воздействий.

Комплекс программ АСТРА-АЭС (аттестуемая часть) состоит из 7-и программных модулей (ПРЕ-АСТРА, АСТРА-СТАЦ, АСТРА-ФОРМ, АСТРА-СЕЙСМ, АСТРА-ВИБР, АСТРА-ДИН, ПОСТ-АСТРА), имеющих единые методические и нормативные основы, способ построения расчетной модели, совместимых по исходным данным, их заданию и форме представления результатов, и модуля АСТРА-СТАДИО для уточненного конечноэлементного расчета температурного и напряженно-деформированного состояния, оценок прочности деталей трубопроводов.

1) **ПРЕ-АСТРА** – многофункциональный “препроцессор” комплекса, обеспечивающий диалоговый многооконный режим задания, генерации и визуализации рацио-

нальных пространственно-стержневых расчетных моделей трубопроводных систем (с возможностями использования баз данных по материалам, опорам, пружинным подвескам и фланцевым соединениям, ранее заданных моделей, расстановки опор и распределение динамических степеней свободы), связь с предыдущими версиями АСТРА-АЭС'2009, импорт-экспорт моделей, поиск и отображение коллизий (пересечений, касаний и недопустимо малых зазоров труб), глубокая диагностика ошибок;

2) **АСТРА-СТАЦ** – расчет на статическую и циклическую прочность низко- и высокотемпературных (в соответствии с методикой, приведенной в [29] трубопроводов АЭУ. Для «абсолютно жестких» опорных конструкций, задаваемых в общей и местной системах координат, проводится рациональный выбор их вычислительных характеристик, обеспечивающих отсутствие перемещений по заданным линейным и угловым направлениям. Пружинные подвески сортамента МВН-043-63, ОСТ 108.764.01-80, ОСТ 24.125.109-01, LISEGA, “спецпружины” ВНИПИЭТ могут иметь заданные характеристики или характеристики, выбранные программно путем определения нагрузок в рабочем и холодном состоянии, структуры пружинных цепей, их затяжки и осадки; возможен учет наклона пружинных подвесок при температурных перемещениях трубопровода. Для “спецпружины” учитываются также удлинения тяг и изменение термомеханических характеристик пружин при нагреве. Предусмотрены все практически значимые виды и режимы прочностных расчетов на нормативно регламентируемые сочетания квазистатических и малоцикловых воздействий: давления, распределенной массы и сосредоточенных нагрузок, температурного нагрева трубопровода, смещений его заземленных концов, монтажного растяга.

Результатами расчета являются перемещения (линейные и угловые), расчетные приведенные и допускаемые напряжения во всех расчетных сечениях участков (включая гибы и колена) и в тройниковых узлах, вычисленные по упрощенной и уточненной методикам; силовые факторы (в общей и местной системах) в заданных сечениях, нагрузки на оборудование (концевые опоры) и узлы участков, а также на опорные конструкции, пружинные подвески и жесткие тяги в рабочем и холодном состояниях, режиме гидр(пневмо)испытаний; типы и характеристики выбранных пружинных подвесок.

Этап 1. Расчет на статическую прочность под действием несамоуравновешенных нагрузок (давления и веса в рабочем состоянии). Определяются перемещения, приведенные и допускаемые напряжения (группа 1 – от действия давления и группа 2 – от всех нагрузок), рабочие нагрузки пружинных подвесок, нагрузки на опорные конструкции, оборудование и узлы, условное давление во фланцевых соединениях, силовые факторы в заданных сечениях.

Этап 3. Расчет на циклическую прочность. Учитывается внутреннее давление, температурное расширение, “собственные” смещения промежуточных опор и заземленных концов при переходе из рабочего состояния в холодное. Определяются перемещения, приведенные и допускаемые напряжения (группы 3 и 4 для низкотемпературных и группа 4 для высокотемпературных трубопроводов), условное давление во фланцевых соединениях, типы и характеристики пружинных подвесок, их затяжка и осадка, силовые факторы в заданных сечениях трубопровода.

Этап 2б. Расчет низкотемпературных трубопроводов на действие всех нагрузок. Учитываются внутреннее давление, весовая нагрузка, температурное расширение (самокомпенсация), “собственные” смещения промежуточных опор и заземленных концов, монтажная растяжка в рабочем состоянии для низкотемпературных трубопроводов. Определяются перемещения в расчетных сечениях, условное давление во фланцевых соединениях, силовые факторы в заданных сечениях, нагрузки на опорные конструкции, оборудование и узлы в рабочем состоянии. Определяются также нагрузки на опорные конструкции и оборудование в холодном состоянии, за исключением случая учета трения по методике Гипрокаучука.

Этап 2а. Расчет высокотемпературных трубопроводов на статическую прочность под действием несамоуравновешенных и самоуравновешенных нагрузок. Учитываются внутреннее давление, весовая нагрузка, температурное расширение (самокомпенсация), “собственные” смещения заземленных концов, монтажная растяжка в рабочем со-

стоянии. Определяются перемещения в расчетных сечениях, приведенные и допускаемые напряжения группы 3, условное давление во фланцевых соединениях, силовые факторы в заданных сечениях, нагрузки на опорные конструкции, оборудование и узлы в рабочем состоянии.

Этап 4. Расчет нагрузок в нерабочем состоянии. Учитываются те же воздействия, что и на этапе 2 для холодного (нерабочего) состояния трубопровода. Определяются перемещения в расчетных сечениях, силовые факторы в заданных сечениях, нагрузки на опорные конструкции, оборудование и узлы.

Режим гидро(пнеumo)испытаний. Определяются перемещения в расчетных сечениях, силовые факторы в заданных сечениях, приведенные и допускаемые напряжения (группы 1 и 2), нагрузки на опорные конструкции, оборудование и узлы для режимов “распущенных” и заклиненных пружин.

Дополнительные режимы (этапы 3). Определяются перемещения в расчетных сечениях, силовые факторы в заданных сечениях, приведенные и допускаемые напряжения (группы 3 и 4).

Виды (номера), этапы, нагружающие факторы и результаты расчета трубопроводных систем на статическую и циклическую прочность представлены в таблицах 2.2 – 2.5.

3) **АСТРА-ФОРМ** – позволяет определить требуемое число (или в требуемом частотном диапазоне) низших собственных частот и форм колебаний трубопроводной системы. Массы трубопроводов и технологического оборудования представляются в виде сосредоточенных масс, приведенных в заданные точки (сечения) расчетной модели или в сечения, генерируемые средствами препроцессора ПРЕ-АСТРА. Массы имеют до шести степеней свободы.

Вычисленные собственные частоты и формы колебаний могут либо непосредственно использоваться при оценке вибропрочности (отстройка от резонанса), либо применяются программами АСТРА-СЕЙСМ, АСТРА-ВИБР и АСТРА-ДИН при расчетном анализе сейсмической, вибрационной и динамической реакции трубопроводов.

4) **АСТРА-СЕЙСМ** – расчет трубопроводных систем АЭС на сейсмические воздействия; только сейсмических нагрузок или суммарного действия давления, собственной массы и сейсмических нагрузок. В качестве сейсмического воздействия можно задавать спектры ответов и/или ответные акселерограммы землетрясения на отметке крепления трубопровода в одно- или трехкомпонентном виде.

Результатами расчета являются линейные и угловые сейсмические перемещения и ускорения, сейсмические нагрузки на пружинные подвески и опорные конструкции, приведенные напряжения группы $(\sigma_s)_2$ в сечениях суперэлементов (“участков”) и в тройниках, силовые факторы в местной и общей системах координат. При одновременном задании нескольких вариантов сейсмических воздействий возможен выбор максимальных перемещений, напряжений и нагрузок по всем введенным воздействиям.

5) **АСТРА-ВИБР** – расчет на вибропрочность трубопроводных систем АЭС; проводится спектральный анализ параметров вынужденных установившихся детерминированных колебаний системы. Силовое нагружение задается для произвольных сечений схемы в полигармоническом виде. Выполняется два вида расчета:

- определение допускаемых амплитуд виброперемещений (усилий, нагрузок на опоры и оборудование) при колебаниях трубопровода по каждой учитываемой собственной форме из условия достижения допускаемого значения максимальными напряжениями;
- расчет параметров вынужденных установившихся колебаний (амплитуд перемещений, нагрузок и напряжений).

Результатами расчета являются собственные частоты и формы (в требуемом частотном диапазоне и/или заданное число), амплитуды вибрационных перемещений и напряжений, допускаемые напряжения, силовые факторы в местной системе координат для каждой собственной или вынуждающей частоты.

Низкотемпературные трубопроводы без трения и с трением по методике НПО ЦКТИ
Виды (номера), этапы и результаты расчетов по программе АСТРА-СТАЦ

Вид (номер) расчета	Наименование расчета	Этапы расчета	Значения переменных параметров										Результаты этапа расчета
			$K_{ПП}$	$P_{3У}$	T	u	δ'	E	p	P_3	q_3	Учёт трения	
1	С выбором пружинных подвесок	I	K_Y	0	0	0	0	E_P	p	P_3	q_3	-	$P_{3У}^P, (u)_I, (\sigma)_I \leq [\sigma]?, (\sigma)_2 \leq 1,3[\sigma]?$
		III	$K_{ПП}$	0	t_H	u_H	0	E_X	p	0	0	+	$P_{3У}^X, K_{ПП}, (u)_{III}, (\sigma)_{RK} \leq [\sigma]_{RK}?, (\sigma_{aF})_K \leq [\sigma_{aF}]?$
		ПБ	0	$P_{3У}^P$	t_H	u_H	δ'	E_P	p	P_3	q_3	+	Нагрузки на опоры и узлы в холодном и рабочем состоянии
2	С заданными пружинными подвесками	I	0	$P_{3У}^P$	0	0	0	E_P	p	P_3	q_3	-	$(u)_I, (\sigma)_I \leq [\sigma]?, (\sigma)_2 \leq 1,3[\sigma]?$
		III	$K_{ПП}$	0	t_H	u_H	0	E_X	p	0	0	+	$(u)_{III}, (\sigma)_{RK} \leq [\sigma]_{RK}?, (\sigma_{aF})_K \leq [\sigma_{aF}]?$
		ПБ	0	$P_{3У}^P$	t_H	u_H	δ'	E_P	p	P_3	q_3	+	Нагрузки на опоры и узлы в холодном и рабочем состоянии
7	На действие нагрузки в холодном состоянии	IV	0	$P_{3У}^X$	0	0	0	E_X	0	P_3	q_3	-	Нагрузки на опоры и узлы в холодном состоянии

Таблица 2.2

Виды (номера), этапы и результаты расчетов по программе АСТРА-СТАЦ

Вид (номер) расчета	Наименование расчета	Этапы расчета	Значения переменных параметров										Результаты этапа расчета
			$K_{ПП}$	P_{3Y}	T	u	δ'	E	p	P_3	q_3	Учёт трения	
1	С выбором пружинных подвесок	I	K_Y	0	0	0	0	E_P	p	P_3	q_3	-	$P_{3Y}^P, (u)_I, (\sigma)_I \leq [\sigma]?, (\sigma)_2 \leq 1,3[\sigma]?$
		ПБ	0	P_{3Y}^P	t_H	u_H	δ'	E_P	p	P_3	q_3	+	Нагрузки на опоры и узлы в рабочем состоянии, P_{3Y}^3
		IV	$K_{ПП}$	P_{3Y}^3	0	0	0	E_X	0	P_3	q_3	+	Нагрузки на опоры и узлы в холодном состоянии
		III=ПБ-IV											+
2	С заданными пружинными подвесками	I	0	P_{3Y}^P	0	0	0	E_P	p	P_3	q_3	-	$(u)_I, (\sigma)_I \leq [\sigma]?, (\sigma)_2 \leq 1,3[\sigma]?$
		ПБ	0	P_{3Y}^P	t_H	u_H	δ'	E_P	p	P_3	q_3	+	Нагрузки на опоры и узлы в рабочем состоянии, P_{3Y}^3
		IV	$K_{ПП}$	P_{3Y}^3	0	0	0	E_X	0	P_3	q_3	+	Нагрузки на опоры и узлы в холодном состоянии
		III=ПБ-IV											+
7	На действие нагрузки в холодном состоянии	IV	0	P_{3Y}^X	0	0	0	E_X	0	P_3	q_3	+	Нагрузки на опоры и узлы в холодном состоянии

Таблица 2.3

Высокотемпературные трубопроводы без учета трения/отрыва от опор
Виды (номера), этапы и результаты расчетов по программе АСТРА-СТАЦ

Вид (номер) расчета	Наименование расчета	Этапы расчета	Значения переменных параметров										Результаты этапа расчета
			$K_{ПР}$	P_{3V}	T	u	δ'	E	p	P_3	q_3	Учѐт трения	
1	С выбором пружинных подвесок	I	K_Y	0	0	0	0	E_P	p	P_3	q_3	-	$P_{3V}^p, (u)_I, (\sigma)_I \leq [\sigma]?, (\sigma)_2 \leq [\sigma]_2?$
		III	$K_{ПР}$	0	t_H	u_H	0	E_X	p	0	0	-	$P_{3V}^x, K_{ПР}, (u)_{III}, (\sigma_{aF})_K \leq [\sigma_{aF}]?$
		IIA	0	P_{3V}^p	χt_H	χu_H	δ'	E_P	p	P_3	q_3	-	Нагрузки на опоры и узлы в рабочем состоянии, $(\sigma)_{RK} \leq [\sigma]_{RK}^*$?
		IV	0	P_{3V}^x	$-\delta t_H$	$-\delta u_H$	0	E_X	0	P_3	q_3	-	Нагрузки на опоры и узлы в холодном состоянии, $(\sigma)_{RK} \leq [\sigma]_{RK}^*$?
2	С заданными пружинными подвесками	I	0	P_{3V}^p	0	0	0	E_P	p	P_3	q_3	-	$(u)_I, (\sigma)_I \leq [\sigma]?, (\sigma)_2 \leq [\sigma]_2?$
		III	$K_{ПР}$	0	t_H	u_H	0	E_X	p	0	0	-	$(u)_{III}, P_{3V}^x, (\sigma_{aF})_K \leq [\sigma_{aF}]?$
		IIA	0	P_{3V}^p	χt_H	χu_H	δ'	E_P	p	P_3	q_3	-	Нагрузки на опоры и узлы в рабочем состоянии, $(\sigma)_{RK} \leq [\sigma]_{RK}^*$?
		IV	0	P_{3V}^x	$-\delta t_H$	$-\delta u_H$	0	E_X	0	P_3	q_3	-	Нагрузки на опоры и узлы в холодном состоянии, $(\sigma)_{RK} \leq [\sigma]_{RK}^*$?
7	На действие нагрузки в холодном состоянии	IV	0	P_{3V}^x	$-\delta t_H$	$-\delta u_H$	0	E_X	0	P_3	q_3	-	Нагрузки на опоры и узлы в холодном состоянии, $(\sigma)_{RK} \leq [\sigma]_{RK}^*$?

**Высокотемпературные трубопроводы с трением по методике института “Гипрокаучук” и отрывом от опор
Виды (номера), этапы и результаты расчетов по программе АСТРА-СТАЦ**

Вид (№)	Наименование расчета	Этапы расчета	Значения переменных параметров										Результаты этапа расчета
			K_{IP}	P_{3Y}	T	u	δ'	E	p	P_3	q_3	Учёт трения	
1	С выбором пружинных подвесок	I	K_Y	0	0	0	0	E_p	p	P_3	q_3	-	$P_{3Y}^p, (u)_I, (\sigma)_I \leq [\sigma]?, (\sigma)_2 \leq [\sigma]_2^*?$
		IIA	0	P_{3Y}^p	χt_H	χu_H	δ'	E_p	p	P_3	q_3	+	Нагрузки на опоры и узлы в рабочем состоянии, $(\sigma)_{RK} \leq [\sigma]_{RK}^*?$
		IV	0	P_{3Y}^x	$-\delta t_H$	$-\delta u_H$	0	E_x	0	P_3	q_3	+	Нагрузки на опоры и узлы в холодном состоянии, $(\sigma)_{RK} \leq [\sigma]_{RK}^*?$
		III	K_{IP}	0	t_H	u_H	0	E_X	p	0	0	-	$P_{3Y}^x, K_{IP}, (u)_{III}, (\sigma_{aF})_K \leq [\sigma_{aF}]?$
2	С заданными пружинными подвесками	I	0	P_{3Y}^p	0	0	0	E_p	p	P_3	q_3	-	$(u)_I, (\sigma)_I \leq [\sigma]?, (\sigma)_2 \leq [\sigma]_2^*?$
		IIA	0	P_{3Y}^p	χt_H	χu_H	δ'	E_p	p	P_3	q_3	+	Нагрузки на опоры и узлы в рабочем состоянии, $(\sigma)_{RK} \leq [\sigma]_{RK}^*?$
		IV	0	P_{3Y}^x	$-\delta t_H$	$-\delta u_H$	0	E_x	0	P_3	q_3	+	Нагрузки на опоры и узлы в холодном состоянии, $(\sigma)_{RK} \leq [\sigma]_{RK}^*?$
		III	K_{IP}	0	t_H	u_H	0	E_X	p	0	0	-	$(u)_{III}, P_{3Y}^x, (\sigma_{aF})_K \leq [\sigma_{aF}]?$
7	На действие нагрузки в холодном состоянии	IV	0	P_{3Y}^x	$-\delta t_H$	$-\delta u_H$	0	E_x	0	P_3	q_3	+	Нагрузки на опоры и узлы в холодном состоянии, $(\sigma)_{RK} \leq [\sigma]_{RK}^*?$

Таблица 2.5

Низко- и высокотемпературные трубопроводы (с учетом дополнительных режимов и (гидро)испытаний)
Виды (номера), этапы и результаты расчетов по программе АСТРА-СТАЦ

Вид (номер) расчета	Наименование расчета	Этапы расчета		Значения переменных параметров									Результаты этапа расчета	
				$K_{ПР}$	$P_{3У}$	T	u	δ'	E	p	P_3	q_3		Учѐт трения
10	Полный с выбором пружинных подвесок	Этапы расчета №1												
		Дополнительные режимы ($i \leq 3$)		$K_{ПР}$	0	t_i	u_n	0	E_X	p_i	0	0	-	$(u)_{III}, (\sigma)_{RK} \leq [\sigma]_{RK}, (\sigma_{aF})_K \leq [\sigma_{aF}]$
		Гидроиспытания	С заклиненными пружинами	K_U	0	$t_{Г}$	0	0	$E_{Г}$	$p_{Г}$	P_3	$q_{3Г}$	-	$P_{3У}^r, (u)_I^r,$ $(\sigma)_I^{Th} \leq 1,35[\sigma]^{Th}, (\sigma)_2^{Th} \leq 1,7[\sigma]^{Th}$
			С распушенными пружинами	$K_{ПР}$	0	$t_{Г}$	0	0	$E_{Г}$	$p_{Г}$	0	$\Delta q_{Г}$	-	Подэтап 1, $P_{3У}^r$
				0	$P_{3У}^r$	$t_{Г}$	0	0	$E_{Г}$	$p_{Г}$	P_3	$q_{3Г}$	-	Подэтап 2, $(u)_I^r,$ $(\sigma)_I^{Th} \leq 1,35[\sigma]^{Th}, (\sigma)_2^{Th} \leq 1,7[\sigma]^{Th}$
11	Полный с заданными пружинами	Этапы расчета №2												
		Дополнительные режимы ($i \leq 3$)												
		Гидроиспытания (см. расчѐт №10)												
3	Этап I расчета №1													
4	Этап I расчета №2													
5	Этап IIБ (IIА) расчета №2													
6	Этап III расчета №2													
8	Этап I расчета №1 + расчет №2													
12	Расчет №8 + дополнительные режимы + гидроиспытания													

Условные обозначения: $K_{ПР}$ – жёсткость пружинной подвески (цепи);

$P_{3У}$ – нагрузка на пружинную опору;

K_U – условная жесткость опоры (“абсолютная” жесткость);

T – перепад температур;

T_h – температура гидроиспытаний;

u – перемещения заземлённых концов и опор;

δ' – монтажный растяг;

E – модуль упругости;

p – давление;

P_3 – сосредоточенные нагрузки (силы и моменты);

q_3 – распределённая нагрузка;

χ – коэффициент “усреднения” компенсационных напряжений для высокотемпературных трубопроводов;

δ – коэффициент “релаксации” компенсационных напряжений;

“Учет трения” – итерационный учет трения об опоры, отрыва от опор и жестких подвесок;

“н” – номинальный, “р” – рабочий, “х” – холодный, “г” – (гидро)испытания;

u_i – расчётные перемещения i -го этапа;

$P_{3У}^3$ – сила затяга пружины опоры вне трубопровода;

$[\sigma] = \min \{ R_{p0,2}^T / 1,5; R_m^T / 2,6; R_{mi}^T / 1,5 \}$ – допускаемое напряжение;

$[\sigma]_{RK} = \min \{ (2,5 - R_{p0,2}^T / R_m^T) R_{p0,2}^T; 2 R_{p0,2}^T \}$;

$[\sigma_{aF}]$ – допускаемая амплитуда напряжений;

$[\sigma]_2^* = \min \{ 1,3 [\sigma], K_i R_{mi}^T / 1,5 \}; K_i = 1,25 - 0,375(\sigma)_i / R_{mi}^T$;

$[\sigma]_{RK}^* = \min \{ [\sigma]_{RK}, K_i' R_{mi}^T / 1,5 \}; K_i' = 1,75 - 0,375(\sigma)_i / R_{mi}^T$;

$P_{3y}^p = -u_I^3 \cdot K_y$ – для расчетов 1, 10; заданная рабочая нагрузка – для расчетов 2, 11, 12;

$P_{3y}^x = P_{3y}^p + (u_{III} - u_{II}) \cdot K_{IIp} \cdot N$;

u_{III} – вертикальное температурное перемещение сечения подвески;

u_{II} – собственное вертикальное перемещение точки подвеса пружинной опоры;

N – число цепей (тяг) пружинной опоры;

$P_{3y}^3 = P_{3y}^p + (u_{II}^3 - u_{II}) \cdot K_{IIp} \cdot N$;

u_{II}^3 – вертикальное перемещение на этапе 2;

P_{3y}^r – нагрузка на пружинную опору при гидроиспытаниях;

Пружины при гидроиспытаниях **заклинены**:

$P_{3y}^r = -u_r^3 \cdot K_y$;

u_r^3 – малое расчетное вертикальное перемещение в точке подвески на этапе гидроиспытаний (идеальное значение равно нулю).

Пружины при гидроиспытаниях **распущены**:

$P_{3y}^r = P_3^r - u_r^3 \cdot K_{IIp} \cdot N$; $P_3^r = P_{3y}^p + (u_{III} - u_{II}) \cdot K_{IIp} \cdot K_t \cdot N$;

u_r^3 – вертикальные перемещения на первом подэтапе при гидроиспытаниях;

K_t – коэффициент, учитывающий влияние температуры при гидроиспытаниях;

$K_t = (t_{РАБ} - t_{ХОЛ} - t_r) / (t_{РАБ} - t_{ХОЛ})$; $t_r = (t_{гидр} - t_{ХОЛ})$.

$q_{3r} = q_3 + \Delta q_r$; $\Delta q_r = -\pi \cdot (D/2 - S)^2 \cdot \gamma_{гидр}$;

$\gamma_{гидр}$ – разность между удельными весами сред, заполняющими трубопровод, при гидро(пневмо)испытаниях и в рабочем состоянии.

6) **АСТРА-ДИН** – расчет трубопроводных систем АЭС на неустановившиеся динамические процессы. Определяются параметры неустановившихся вынужденных колебаний, необходимые для оценки прочности при нестационарных (переходных) режимах и анализа аварийных ситуаций, связанных с разрывами трубопроводов.

Силовые динамические воздействия задаются в произвольных точках системы трубопровода в виде временных зависимостей давления и/или сосредоточенных сил.

Результатами расчета являются динамические перемещения, усилия, нагрузки на опоры и узлы, амплитуды приведенных напряжений для всех моментов времени, а также максимальные значения (за время воздействия).

7) **ПОСТ-АСТРА** – “постпроцессор” комплекса обеспечивает следующие режимы работы с результатами статических и динамических расчетов:

- диагностика превышений расчетными параметрами (напряжения, нагрузки на опоры, взаимные перемещения труб) критериальных значений
- визуализация перемещений для всех значимых этапов расчета, включая определение коллизий – недопустимо малых зазоров, касаний и пересечений труб в деформированных состояниях;
- визуализация усилий и напряжений с оценкой прочности по нормативным критериям;
- визуализация нагрузок на опоры и пружины;
- анимация собственных форм колебаний;
- таблицы максимальных перемещений, напряжений, усилий и нагрузок, выборки по сортаментам труб, гибов и тройников;
- полные таблицы результатов расчета;
- формирование отчета;
- сохранение, переименование и удаление файлов результатов.

8) **АСТРА-СТАДИО** – подсистема, обеспечивающая уточненный МКЭ-расчет температурного и напряженного состояния, статической, циклической и сейсмической прочности следующих деталей трубопроводов при полной системе значимых нагрузок (внутреннее давление, вес и температурные деформации, осевая и поперечные силы, изгибающие и крутящий моменты на границах-торцах):

1) *тройников* ортогональных и неортогональных (косых) радиальных (сварных, штампосварных, штампованных и кованных, со сварными швами, накладками и плакирующим слоем);

2) *отводов* (гибов, колен) гнутых, крутоизогнутых, штампованных и секторных с учетом эллиптичности, разностенности (переменной толщины сечения) и примыкающих прямых труб;

3) *косых стыков*;

4) *конических переходов*;

5) *линзовых и сильфонных компенсаторов* осевых, угловых и сдвиговых (многоволновых с учетом примыкающих прямых труб).

Подсистема обладает диалоговым таблично-графическим пре- и постпроцессором, может быть связана с базой данных типовых элементов, требует лишь необходимого минимума информации для автоматической генерации оптимальных по точности пространственно-оболочечных (для тонко- и “среднестенных” элементов) и объемных (для толстостенных деталей и системы “трубопровод-изоляция-грунт”) расчетных конечноэлементных моделей. Вычислительным “ядром” служит мощный верифицированный конечно/суперэлементный комплекс *СТАДИО* [9], имеющий богатый послужной список исследованных сложных объектов атомной, тепловой и гидроэнергетики, различных отраслей строительства и машиностроения.

Результаты расчета при заданных сочетаниях нагрузок:

- узловые температуры (для стационарной задачи теплопроводности);
- узловые перемещения (вариант – при единичных нагрузках – матрица податливости);

– значимые компоненты полных нормальных и касательных напряжений, главных напряжений и приведенных (эквивалентных по Треска и Мизесу) напряжений на внутренней, срединной и наружной поверхностях КЭ;

– оценка статической, циклической и сейсмической прочности по критериям действующих “Норм расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. ПНАЭ Г-7-002–86” [1].

2.2 Ограничения по применению программы определяются линейно-упругой областью решения при малых деформациях и линейных колебаниях трубопроводной системы.

Основные реализованные гипотезы: изотропия и линейная упругость металла (физическая линейность) и малость деформаций-перемещений (геометрическая линейность). Ползучесть и релаксация напряжений в высокотемпературных трубопроводах моделируется в рамках инженерного подхода – “фиктивных температур” для рабочего (этап 2) и холодного (этап 4) состояний.

Практические ограничения по размерности решаемых задач определяется размерами доступной оперативной памяти, дискового пространства и времени счета. Тем не менее, программа имеет формальные ограничения размерности.

ПК АСТРА-АЭС'2009 накладывает следующие единые количественные ограничения на расчетную модель в целом и каждый суперэлемент, позволяющие свободно анализировать трубопроводные системы “предельной” сложности (в скобках приведены соответствующие данные для ранее аттестованной версии АСТРА-АЭС 6.1):

Характеристики	Диапазон изменения
Число узлов (суперэлементных)	0 - 4 000 (1 – 100)
Число неразветвленных суперэлементов	1 - 4 000 (1 - 200)
Число “матричных” суперэлементов	0 - 4 000 (–)
Число элементов (отрезков)	1 - 8 000 000 (2 – 40 000)
Число динамических степеней свободы	1 - 60 000 (3 - 1 500)
Число собственных частот и форм	1 - 4 000 (1 – 100)
Число шагов интегрирования по времени	1 - 60 000 (1 - 600)

Ниже также представлены основные отличия ПК АСТРА-АЭС'2009 от ранее аттестованной версии АСТРА-АЭС 6.1.

Специфические ограничения, связанные с использованием тех или иных элементов при проведении характерных расчетов, приведены в соответствующих пунктах раздела 5 “Общего описания ПК АСТРА-НОВА'2009” [25].

2.3 В рамках своих вычислительных возможностей ПК АСТРА-АЭС'2009 может использоваться для выполнения как проектных, так и эксплуатационных расчетов, а также служить для выполнения лицензионных расчетов для обоснования безопасности Объектов Исполнения Атомной Энергии (ОИАЭ).

2.4 Программный комплекс АСТРА-АЭС заявляется к переаттестации как средство выполнения инженерных расчетов температурного и напряженно-деформированного состояния, оценки статической, циклической, сейсмической и динамической прочности трубопроводных систем и элементов-деталей.

**Основные различия версии АСТРА-АЭС 6.1, аттестованной в 1995 г.,
и актуальной версии АСТРА-АЭС'2009**

Возможности/характеристики	6.1	'2009
Тип ЭВМ, основные языки программ		
Тип ЭВМ (не ниже), основные языки программ	ПЭВМ, MS FORTRAN VAX, VAX-FORTRAN EC, FORTRAN-77	ПЭВМ IBM-совмест., Intel Visual Fortran 11 Visual C++
Состав программных модулей АСТРА-АЭС		
	АСТРА-ГРАФ, АСТРА-СТАЦ, АСТРА-СЕЙСМ, АСТРА-ВИБР, АСТРА-ДИН	ПРЕ-АСТРА, ПОСТ-АСТРА, АСТРА-СТАЦ, АСТРА-ФОРМ, АСТРА-СЕЙСМ, АСТРА-ВИБР, АСТРА-ДИН, АСТРА-СТАДИО
Количественные ограничения		
Число узлов стыковки суперэлементов	1 – 100	0 – 4 000
Число суперэлементов (неразветвленных участков)	1 – 200	1 – 4 000
Число элементов в суперэлементе	2 – 40	1 – 400
Число динамических степеней свободы	3 – 1 500	3 – 60 000
Число собственных частот и форм	1 – 100	1 – 4 000
Число шагов интегрирования по времени	1 – 600	1 – 60 000
Нумерация суперэлементных узлов	сплошная	произвольная
Элементы модели		
Замкнутые суперэлементы	–	+
Тонкостенные тройники с учетом податливости (методика РТМ 38.001-94, ASME)	–	+
Врезки “труба-оборудование” с учетом податливости	–	+
Переходы, линзовые компенсаторы, фланцы, днища (крышки), арматура с приводом	–	+
Пружинные опоры сортамента ОСТ 24.125.109– 01, LISEGA, постоянного усилия	–	+
Жесткие подвески	–	+
Односторонние опоры	–	+
Опоры и пружины с заданными собственными перемещениями	–	+
Жесткие элементы	–	+
Моментные компоненты нагрузок	–	+
Распределенный момент от неравномерного на- грева по высоте трубы	–	+
Массовые моменты инерции	–	+
Опоры, нагрузки и массы в узлах СЭ-модели	–	+
Матричные суперэлементы для статических и ди- намических задач (Крейга-Бемптона, формирова- ние и учет)	–	+

Возможности/характеристики	6.1	'2009
Алгоритмы и программная реализация		
Выполнение «критических» вычислений и хранение массивов с двойной точностью	–	+
Итерационный – учет возможного отрыва от односторонних идеальных опор и опор трения	–	+
Итераций подпространства – решение частной проблемы собственных значений	+	–
Учет “потерянной” массы по высшим формам колебаний при сейсмическом расчете	–	+
“Инженерный” учет трения в опорах в динамических расчетах	–	+
Уточненный расчет температурного поля, статического и сейсмического НДС на основе пространственно-оболочечных и трехмерных схем МКЭ, оценка статической, циклической и сейсмической прочности деталей трубопроводов: тройников, гибов-отводов, переходов и линзовых/сильфонных компенсаторов (АСТРА-СТАДИО)	–	+
Результаты расчетов		
Допустимость перемещений (отсутствие касаний и пересечений труб)	–	+
Перемещения в местной системе координат	–	+
Допустимость нагрузок на опоры	–	+
Герметичность фланцевых соединений (методика РТМ 38.001-94)	–	+
Напряжения в линзовых/сильфонных компенсаторах (методика РТМ 38.001-94)	–	+
Анимация собственных форм колебаний и динамической реакции	–	+
Сейсмические ускорения	–	+
Визуализация динамических перемещений и напряжений	–	+
Распределение температур, компонент и приведенных напряжений в деталях трубопроводов: тройниках, гibaх-отводах, переходах и линзовых/сильфонных компенсаторах (АСТРА-СТАДИО)	–	+

3. Описание ПС

3.1 В комплексе АСТРА-АЭС'2009 реализован единый алгоритм расчета произвольных разветвленных и протяженных трубопроводных систем (определение перемещений, нагрузок на опоры и усилий в сечениях) как пространственных многократно статически неопределимых стержневых систем, изложенный в РТМ 108.020.01–75 [6] и модернизированный для:

- 1) повышения точности и вычислительной эффективности для сильно разветвленных, протяженных и (или) контрастных по жесткости систем;
- 2) учета нагрузок и опор не только в сечениях суперэлементов (участков), но и в узлах соединения суперэлементов;
- 3) учета повышенной оболочечной податливости тройниковых соединений и врезок трубопроводов в оборудование;
- 4) учета стержневых элементов произвольного (некольцевого) сечения для моделирования сложных опорных конструкций и оборудования в составе трубопроводных систем;
- 5) учета трения скольжения и качения в опорных конструкциях, возможного отрыва трубопроводов от них (для односторонних по вертикали опор);
- 6) расчета на сейсмические, вибрационные и динамические воздействия;
- 7) формирования и учета т.н. матричных суперэлементов (жесткости, масс и нагрузок, процедура Крейга-Бемптона).

Алгоритм сочетает суперэлементный подход метода перемещений с методами начальных параметров и прогонки (для каждого неразветвленного суперэлемента), реализует спектральный подход (разложение по значимым собственным формам колебаний, определяемым из решения частичной проблемы собственных значений) динамического анализа, использует эффективные шагово-итерационные процедуры решения нелинейных задач.

Значительная часть реализованных численных методов, схем и программ полностью или с необходимыми модификациями заимствована из “материнского” универсального конечно- и суперэлементного комплекса программ СТАДИО [23], с помощью которого решены разнообразные, в том числе плохо обусловленные статические и динамические задачи “сверх”большой размерности для пространственных систем, существенно более сложных (плитно-оболочечно-стержневых, трехмерных и комбинированных), чем трубопроводные (стержневые).

3.2 Предусмотрен режим статического расчета (этап 3 расчета 1, *АСТРА-СТАЦ*) с автоматическим выбором характеристик пружинных подвесок, проводимым итерационным путем в соответствии с рекомендациями РТМ 24.038.12–72 [8]. Сходимость процесса (как правило, задается критерий не более чем 25–35%-го отличия нагрузок на пружины в “рабочем” и “холодном” состояниях) достигается за 2–4 итерации.

При определении характеристик “специальных” пружин ВНИПИЭТ учитываются также удлинения тяг и изменение термомеханических характеристик пружин при нагреве.

Предусмотрена возможность учета наклона тяг пружинных подвесок (упругих опор) и жестких подвесок, возникающего при температурных перемещениях трубопровода; для этого должны задаваться рабочие длины тяг подвесок.

3.3 *Трение* скольжения и (или) качения в опорных конструкциях низкотемпературных трубопроводов учитывается в рамках модели Кулона по двум альтернативным методикам (*АСТРА-СТАЦ*).

По методике НПО ЦКТИ [29] трение учитывается при переходе из рабочего состояния в холодное (этап 3). В рабочем состоянии трубопровода (этап 2) к действующим квазистационарным нагрузкам (вес, давление, температура и др.) добавляются силы трения, определенные на этапе 3.

По методике института “Гипрокаучук” [32] трение учитывается при действии на трубопровод всех нагружающих факторов отдельно в рабочем (этап 2) и холодном (этап 4) состояниях. Переход из рабочего состояния в холодное (размахи перемещений и напряжений, этап 3) определяется как разница между одноименными факторами этапов 2 и 4.

В обеих методиках трение моделируется эквивалентными упругими связями, жесткость которых вычисляется в итерационном процессе. Критерием сходимости принято равенство (с относительной точностью до 0,1%) произведения упомянутой жесткости на соответствующую компоненту перемещений силе трения, т.е. произведению вычисляемой нормальной реакции на заданный коэффициент трения f_r .

Для ускорения сходимости предусмотрен ряд вычислительных процедур, в частности, адаптивная итерационная схема (число итераций колеблется, как правило, в интервале 10÷20 для “простых” трубопроводов с малым числом таких опор до 50÷200 для сложных систем с большим числом опор трения).

По аналогичной итерационной процедуре учитывается возможный *отрыв* трубопровода от односторонних опор (на соответствующих этапах вертикальная жесткость таких опор программно обнуляется).

Сочетание двух итерационных процессов для односторонних опор трения может существенно увеличить число итераций, а для некоторых нерациональных расстановок (с инженерной точки зрения) даже сделать невозможной сходимость с заданной точностью.

3.4 “Условные” жесткости пружинных подвесок (на этапе 1 расчета с выбором пружин), жесткости “абсолютно” жестких опорных конструкций и жестких подвесок (тяг) вычисляются автоматически, исходя из 2-х критериев:

- 1) обеспечение исчезающе малых перемещений по направлениям установки опор;
- 2) предотвращение чрезмерных “контрастов” в жесткостях, ведущих к ухудшению вычислительной обусловленности системы.

В соответствии с этими критериями и с вычислительными экспериментами величина жесткости определяется в программах как:

$$10^4 \max \left\{ \left(\frac{D}{l} \right)^3 sE, \frac{D}{l} sE \right\}$$

где:

E – модуль упругости,

D – наружный диаметр трубы,

s – толщина стенки трубы,

$l=0,5(l_{i-1}+l_i)$ – характерная длина оси,

l_{i-1}, l_i – длины пролетов (расстояния до соседних опор) с одной и с другой стороны от данной опоры.

3.5 Решение результирующей алгебраической системы уравнений равновесия суперэлементной модели (определение вектора перемещений в узлах $\{U\}$)

$$[K]\{U\}=\{F\}$$

проводится для статических задач (АСТРА-СТАЦ) и при определении матриц податливости (АСТРА-ФОРМ) по схеме квадратного корня (Холецкого) с учетом положительной определенности, симметричности, блочности и разреженности матрицы жесткости $[K]$:

$$[K]=[L]^T[L],$$

$$[L]^T\{Z\}=\{F\},$$

$$[L]\{U\}=\{Z\},$$

где $\{F\}$ – вектор нагрузок системы. Коэффициенты матрицы $[K]$ и треугольной матрицы-фактора $[L]$ вычисляются с двойной точностью. Предусмотрен режим анализа точности полученного решения и его итерационного уточнения.

3.6 Значимые собственные частоты ω_i (в задаваемом диапазоне динамического воздействия $\Omega_1 \leq \omega \leq \Omega_2$ или заданное количество KI низших) и соответствующие им формы $\{\varphi\}_i$ колебаний расчетной динамической модели определяются из решения частной (частичной) линейной алгебраической задачи о собственных значениях:

$$[\Phi] = [\omega_i^2 - \theta^2] \Lambda [M] [\Phi]$$

где $[\Phi] = [\{\varphi\}_j, \{\varphi\}_{j+1}, \dots, \{\varphi\}_{j+KI-1}]$ – матрица KI значимых собственных форм,

$\theta^2 = (\Omega_1^2 + \Omega_2^2)/2$ – задаваемый сдвиг спектра, $[\Lambda] = [K - \theta^2 M]^{-1}$ – матрица податливости для динамических степеней свободы, $[M]$ – матрица масс (динамических степеней свободы).

Решение частной проблемы собственных значений проводится в программе *АСТРА-РА-ФОРМ* (результаты используются программами *АСТРА-СЕЙСМ*, *АСТРА-ВИБР* и *АСТРА-ДИН*) эффективным блочным методом Ланцоша [45], позволяющим определять все частоты и формы колебаний произвольных разветвленных и протяженных систем (в частности, кратные и близкие к кратным).

Матрица жесткости системы $[K]$ может учитывать характеристики опор в 2-х вариантах:

- 1) жесткости *двусторонних без трения* (формально строгий подход, отвечающий ограничениям спектральной динамической методики);
- 2) жесткости *односторонних опор с трением*, определенные из статического расчета (*АСТРА-СТАЦ*).

3.7 Расчет линейно-упругого трубопровода на сейсмические воздействия, заданные трехкомпонентными спектрами ответа (ускорений) $\{a(\omega)\}_{1,2,3}$, проводится по “линейно-спектральному методу” (ЛСМ) реализованному в программе *АСТРА-СЕЙСМ* в следующей последовательности.

3.7.1 Для каждой i -й учитываемой собственной формы колебаний $\{\varphi_i\}$ ($i=1,2, \dots, KI$) определяется максимальная сейсмическая нагрузка на трубопровод

$$\{S\}_i = [M] \{\varphi\}_i \frac{\{\varphi\}_i^T [M] \{\cos(\bar{a}, \bar{x})\}}{\{\varphi\}_i^T [M] \{\varphi\}_i} a(\omega_i)$$

где $\cos(\bar{a}, \bar{x})$ – вектор направляющих косинусов сейсмического воздействия, $a(\omega_i)$ – величина (ордината) спектра ответа для собственной частоты ω_i .

В общем случае задания трех спектров ответа $a_1(\omega)$, $a_2(\omega)$, $a_3(\omega)$ по трем взаимно перпендикулярным направлениям

$$\{S\}_i = [M] \{\varphi\}_i \frac{\{\varphi\}_i^T [M] \sum_{j=1}^3 \{\cos(\bar{a}_j, \bar{x})\} a_j(\omega_i)}{\{\varphi\}_i^T [M] \{\varphi\}_i}.$$

3.7.2 Для каждой i -й учитываемой формы определяются сейсмические перемещения $\{U_s\}_i$ и внутренние силовые факторы $\{N'_s\}_i$ во всех расчетных сечениях, нагрузки на опоры и оборудование $\{P_s\}_i$ от статического приложения сейсмических нагрузок $\{S\}_i$.

3.7.3 Определяются расчетные величины сейсмических перемещений $\{\bar{U}_s\}$, внутренних усилий $\{\bar{N}'_s\}$ и нагрузок на опоры и оборудование $\{P_s\}$

$$\{\bar{U}_s\} = \left(\sum_{i=1}^{KI} \{U_s\}_i^2 \right)^{1/2};$$

$$\{\bar{N}'_s\} = \left(\sum_{i=1}^{KI} \{N'_s\}_i^2 \right)^{1/2};$$

$$\{\bar{P}_s\} = \left(\sum_{i=1}^{KI} \{P_s\}_i^2 \right)^{1/2};$$

а через внутренние усилия $\{\bar{N}_s\}$ – приведенные сейсмические напряжения $\{\sigma_s\}$ во всех элементах (сечениях) трубопровода.

3.7.4 Сейсмические ускорения для всех сечений расположения динамических степеней свободы (в том числе, и для сечений арматуры) определяются в рамках линейно-спектрального расчета по следующей вычислительной процедуре.

а) для каждой i -й учитываемой собственной формы колебаний $\{\varphi\}_i$ ($i=1, 2, \dots, KI$) определяется максимальная сейсмические ускорения в сечениях с динамическими степенями свободы [12-20].

$$\{A\}_i = \{\varphi\}_i \frac{\{\varphi\}_i^T [M] \sum_{j=1}^3 \{\cos(\bar{a}_j, \bar{x})\} a_j(\omega_i)}{\{\varphi\}_i^T [M] \{\varphi\}_i},$$

где $\cos(\bar{a}, \bar{x})$ - вектор направляющих косинусов сейсмического воздействия,

$a(\omega_i)$ - величина (ордината) спектра ответа для собственной частоты ω_i .

б) определяются “итоговые” расчетные величины сейсмических ускорений $\{A_s\}_i$

$$\{\bar{A}_s\} = \left(\sum_{i=1}^{KI} \{A_s\}_i^2 \right)^{1/2}$$

3.7.5 Дополнительные, регламентированные новой редакцией нормативных документов возможности сейсмического расчета – учет «потерянной» массы по высшим собственным формам, соответствующим частотам выше 33 Гц.

Алгоритм, реализованный в актуальном программном модуле АСТРА-СЕЙСМ, сводится к определению дополнительной квазистатической нагрузки $\{S^*\}$, учитывающей вклад всех неучтенных высших собственных форм колебаний ($f_i > \omega^* = 33 \text{ Гц}$):

$$\{S^*\} = [M] \{\eta^*\} a(\omega^*),$$

где:

$$\{\eta^*\} = \{I\} - \sum_{i=1}^{KI} \{\eta\}_i, \quad \{\eta\}_i = \{\varphi\}_i \frac{\{\varphi\}_i^T [M] \{\cos(\bar{a}, \bar{x})\}}{\{\varphi\}_i^T [M] \{\varphi\}_i}, \quad \{I\} = \{\cos(\bar{a}, \bar{x})\}$$

и вызванных ею перемещений, нагрузок на опоры, усилий и напряжений в сечениях трубопровода [23].

3.8 Динамический расчет трубопровода по “платформенной схеме” на сейсмические воздействия, заданные ответными акселерограммами $\{a(t)\}_{1,2,3}$, выполняется спектральным методом с разложением по собственным формам колебаний (АСТРА-СЕЙСМ). По схеме Дюамеля интегрируется по времени KI уравнений движения в “нормальных координатах” $Z_i(t)$:

$$\{U(t)\} = \sum_{i=1}^{KI} Z_i(t) \{\varphi\}_i;$$

$$Z_i(t) + 2\xi_i \omega_i Z_i(t) + \omega_i^2 Z_i(t) = \frac{\{\varphi\}_i^T [M] \{a(t)\}}{\{\varphi\}_i^T [M] \{\varphi\}_i},$$

где $i=1, 2, \dots, KI$,

$\{a(t)\}$ – вектор заданных (в общем случае - трех) компонент акселерограмм,

ξ_i – коэффициент демпфирования в долях от критического (при отсутствии экспериментальных данных принимается $\xi_i = 0.02$ [1]).

В результате расчета (интегрирования по времени) определяются сейсмические перемещения и напряжения в заданных сечениях, максимальные за все время интегриро-

вания. Также определяются максимальные нагрузки на пружинные подвески и промежуточные опоры, оборудование и строительные конструкции. По запросу пользователя могут также выдаваться временные зависимости искомых параметров (в таблично-числовом и графических формах).

Величина шага интегрирования Δt выбирается из условия

$$\Delta t = \min\{T_{KI/6}, \Delta t_a / n\}$$

где Δt_a – шаг цифровки акселерограмм,

$T_{KI} = 2\pi/\omega_{KI}$ – период (с) KI -й собственной формы;

$n = 1$ – при малом шаге цифровки (более 6 точек на характерный период акселерограмм), $n = 2 \div 6$ – при “грубой” цифровке.

3.9 Спектральный расчет параметров установившихся вынужденных вибраций (перемещений, напряжений и нагрузок на “опоры”) трубопроводов с линейно-упругими связями при детерминированном силовом нагружении, заданном для произвольных сечений стержневой модели (с обязательным расположением приведенной массы в этом сечении) в полигармоническом виде:

$$\{F(t)\} = \sum_{j=1}^J (\{F\}_{cj} \cos \theta_j t + \{F\}_{sj} \sin \theta_j t)$$

проводится по алгоритму (см. ниже) реализованному в программе АСТРА-ВИБР.

3.9.1 Амплитуды виброперемещений $\{U\}_j$ для каждой возбуждающей частоты θ_j во всех сечениях расположения масс определяются по следующим зависимостям:

$$\begin{aligned} \{U\}_j &= (\{U\}_{jc}^2 + \{U\}_{js}^2)^{1/2} \\ \{U\}_{jc} &= \sum_{i=1}^{KI} \frac{F_{cij}(\omega_i^2 - \theta_j^2) - 2F_{sij}\xi_i\omega_i\theta_j}{(\omega_i^2 - \theta_j^2)^2 + 4\xi_i^2\omega_i^2\theta_j^2} \{\varphi\}_i \\ \{U\}_{js} &= \sum_{i=1}^{KI} \frac{F_{sij}(\omega_i^2 - \theta_j^2) + 2F_{cij}\xi_i\omega_i\theta_j}{(\omega_i^2 - \theta_j^2)^2 + 4\xi_i^2\omega_i^2\theta_j^2} \{\varphi\}_i \\ F_{cij} &= \{\varphi\}_i^T \{F\}_{jc} / M_i \\ F_{sij} &= \{\varphi\}_i^T \{F\}_{js} / M_i \\ M_i &= \{\varphi\}_i^T [M] \{\varphi\}_i \end{aligned}$$

3.9.2 Расчетные амплитуды виброперемещений $\{U\}_j$ во всех или заданных сечениях суперэлементной модели определяются решением статической задачи от действия приложенных инерционных нагрузок (в местах расположения динамических степеней свободы) $\{F\}_i = \theta_j^2 [M] \{U\}_j$.

3.9.3 Далее по значениям виброперемещений $\{U\}_j$ определяются амплитуды силовых факторов $\{N'\}_j$, а затем - амплитуды приведенных вибронапряжений $\{\sigma_{aF}\}_j$.

3.9.4 Изложенная методика позволяет учесть и кинематическое и вибрационное воздействия на ряд сечений (опор, патрубков и строительных конструкций) трубопровода, заданные в виде полигармонических перемещений:

$$\{U(t)\} = \sum_{j=1}^J (\{U\}_{cj} \cos \theta_{jt} + \{U\}_{sj} \sin \theta_{jt})$$

Для этого в указанных сечениях расчетной стержневой модели устанавливаются фиктивные связи большой жесткости $k \rightarrow \infty$ по направлениям кинематического воздействия и задается эквивалентное силовое воздействие с параметрами:

$$\{F\}_{cj} = k\{U\}_{cj} \text{ и } \{F\}_{sj} = k\{U\}_{sj}$$

3.10 Спектральный динамический расчет неустановившихся колебаний трубопроводных систем с линейно-упругими связями при произвольном динамическом нагружении $\{F(t)\}$ производится по алгоритму, реализованному в программе *АСТРА-ДИН*. Алгоритм следует схеме *АСТРА-СЕЙСМ* с точностью до замены сейсмической нагрузки $[M]\{a(t)\}$ на силовую динамическую $\{F(t)\}$.

При этом жесткостные характеристики приведенной линейно-упругой системы соответствуют заданным статическому давлению и температуре.

3.11 В актуальной версии АСТРА-АЭС метод суперэлементов (МСЭ), известный и как метод подконструкций, реализован также для построения редуцированных матриц влияния системы или учета этих матриц при суперэлементной сборке. Ключевой процедурой МСЭ является статическая конденсация [63] – исключение внутренних степеней свободы подконструкции $\{u_i\}$, – приводящая исходную блочную систему уравнений равновесия:

$$\begin{bmatrix} K_{ii} & K_{ib} \\ K_{bi} & K_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i \\ u_b \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_i \\ F_b \end{Bmatrix}$$

к редуцированной системе относительно компонент вектора граничных неизвестных $\{u_b\}$:

$$[\bar{K}]\{u_b\} = \{\bar{F}\},$$

$$\text{где } [\bar{K}] = [K_{bb}] - [K_{bi}][K_{ii}]^{-1}[K_{ib}],$$

$$\{\bar{F}\} = \{F_b\} - [K_{bi}][K_{ii}]^{-1}\{F_i\}.$$

Редуцированные матрицы $[\bar{K}]$ и $\{\bar{F}\}$ импортируются-экспортируются через текстовые файлы, формат которых учитывает блочно-диагональную структуру $[\bar{K}]$, а также через бинарные файлы структуры ПК СТАДИО и АСТРА-АЭС'2009.

3.12 Реализован также алгоритм метода динамического синтеза подконструкций. Методы динамического синтеза подконструкций можно классифицировать по способу выбора базисных векторов метода Релея-Ритца для подконструкций и по способу их стыковки. Чаще всего в качестве базиса для подконструкций используются ее собственные формы колебаний при определенных граничных условиях: [64, 65] – для закрепленной границы, [66] – для свободной границы, [67] – для частично закрепленной границы подконструкции. Из трех рассмотренных вариантов метода наиболее предпочтительным, с вычислительной и реализационной точек зрения, является первый, использующий формы колебаний основной системы метода перемещений. При этом, для упрощения стыковки подконструкций и для правильного учета их жестких смещений и перемещений граничных точек базис из форм колебаний целесообразно дополнить набором статических функций формы суперэлементов, каждая из которых представляет собой вектор упругих перемещений узлов подконструкции, вызванных единичным смещением по направлению соответствующей фиктивной связи для основной системы метода перемещений.

Наиболее популярен реализованный в универсальных “коммерческих” ПК (NASTRAN, ANSYS, ADAMS,...) упомянутый подход Крейга-Бемптона [64], сводящийся к построению редуцированных матриц жесткости и масс

$$[\hat{K}] = [\hat{\Phi}]^T [K] [\hat{\Phi}] = \begin{bmatrix} \hat{K}_{CC} & 0 \\ 0 & \hat{K}_{NN} \end{bmatrix};$$

$$[\hat{M}] = [\hat{\Phi}]^T [M] [\hat{\Phi}] = \begin{bmatrix} \hat{M}_{CC} & \hat{M}_{NC} \\ \hat{M}_{CN} & \hat{M}_{NN} \end{bmatrix},$$

где:

$$[\hat{\Phi}] = \begin{bmatrix} I & 0 \\ \Phi_{IC} & \Phi_{IN} \end{bmatrix},$$

Φ_{IC} – перемещения внутренних степеней свободы СЭ для заданных единичных перемещений граничных (стыковочных) узлов, Φ_{IN} – перемещения внутренних степеней свободы, соответствующие собственным формам колебаний при ограничении степеней свободы (заделке) граничных узлов.

Программная реализация матричных операций при формировании $[\hat{K}]$ и $[\hat{M}]$ (и редуцированных векторов нагрузок $\{\hat{F}\}$) в основном построена на стандартных процедурах, содержащиеся в модулях ПК. Не встречается каких-либо трудностей, следуя канонической конечно(супер)элементной сборке, и учет $[\hat{K}]$, $[\hat{M}]$ и $\{\hat{F}\}$ в общей суперэлементной модели.

Импорт-экспорт матриц организован через текстовые файлы, формат которых учитывает блочно-диагональную структуру $[\hat{K}]$ и заполненную структуру $[\hat{M}]$. В частности, поддерживается формат ПК NASTRAN и ANSYS.

Также формируются, хранятся и доступны бинарные файлы с $[\hat{K}]$, $[\hat{M}]$ и $\{\hat{F}\}$, структура которых соответствует ПК СТАДИО и АСТРА-НОВА.

3.13 “Исследовательская” подсистема программного комплекса прочностных расчетов трубопроводных систем – *АСТРА-СТАДИО* – полностью совместимая с *АСТРА-АЭС'2009* (экспорт геометрических характеристик, физико-механических свойств и нагрузок, импорт уточненных напряжений и матриц жесткости/податливости), обеспечивает уточненный расчет по пространственно-оболочечным и объемным схемам метода конечных элементов (МКЭ) напряженно-деформированного состояния (НДС) и прочности следующих тяжело нагруженных элементов трубопроводов при действии полной системы квазистатических нагрузок (внутреннее давление, вес и температурные деформации, осевая и поперечные силы, изгибающие и крутящий моменты на границах-торцах):

- 1) *тройников* ортогональных радиальных (сварных, с накладками, с плакирующим слоем, штампосварных и штампованных);
- 2) *отводов* (гибов, колен) гнутых, крутоизогнутых, штампованных и секторных с учетом эллиптичности, разностенности (переменной толщины сечения) и примыкающих прямых труб, косых *стыков*;
- 3) конических *переходов(ников)* концентрических и с эксцентриситетом;
- 4) линзовых и *сильфонных компенсаторов* осевых, угловых и сдвиговых (многоволновых с учетом примыкающих прямых труб);

Подсистема аккумулирует мировой и собственный 33-летний опыт разработчиков по анализу сложного пространственного распределения перемещений, деформаций и напряжений в деталях, определяющих прочность всей трубопроводной системы, в оборудовании, строительных конструкциях и сооружениях.

Подсистема обладает диалоговым пре- и постпроцессором, может быть связана с базой данных типовых элементов, требует лишь необходимого минимума информации для автоматической генерации оптимальных по точности пространственно-оболочечных (для тонко- и “среднестенных” элементов) и объемных (для толстостенных деталей) расчетных конечноэлементных моделей. Вычислительным “ядром” служит мощный верифицированный конечно/суперэлементный комплекс *СТАДИО* [23], имеющий богатый послужной список исследованных сложных объектов атомной, тепловой и гидроэнергетики, различных отраслей строительства и машиностроения.

Предусмотрены следующие виды расчетов:

- стационарная линейная задача теплопроводности;
- расчет НДС и прочности;
- комбинированный расчет (определение температурного поля и использование его в качестве температурной нагрузки для определения НДС);
- формирование матрицы жесткости детали (элемента).

Основные реализованные гипотезы: изотропия и линейная упругость металла (физическая линейность) и малость деформаций-перемещений (геометрическая линейность). В частности, при этом не учитывается важный для тонкостенных крутоизогнутых отводов-гибов (в меньшей степени – для тонкостенных равнопроходных тройников) нелинейный фактор влияния давления на жесткость системы, реализуемый в аналитических зависимостях для стержневой модели ТС.

3.13.1. Формирование матриц КЭМ

Матрицы $[K]$ и $\{F\}$ строятся на основе матриц сосредоточенных факторов $[K]^L$, $\{F\}^L$ и матриц конечных элементов $[k]^e$, $\{f\}^e$ [6, 7].

$$[K] = [K]^L + \sum_e [k]^e, \\ \{F\} = \{F\}^L + \sum_e \{f\}^e,$$

где Σ знак означает суммирование по элементам с расстановкой коэффициентов матриц КЭ в матрицы КЭМ на позиции, соответствующие глобальным степеням свободы.

Заданием $[K]^L$ и $\{F\}^L$ можно имитировать характерные свойства систем, внешних к исследуемой (или её подсистем), а также реальные сосредоточенные упругие связи с линейными характеристиками и нагрузками.

Коэффициенты полных симметрических матриц $[k]^e$ и вектора $\{f\}^e$ вычисляются по квадратурным схемам Гаусса “оптимального” порядка точности [6], [9] для оболочечных и трёхмерных КЭ (см.п.3.4):

$$[k]^e = \iiint_{v^e} [B']^T [D'] [B'] dV, \\ \{g\}^e = \iiint_{v^e} [N]^T \rho \{g\} dV, \\ \{v\}^e = \iiint_{v^e} [N]^T \{v\} dV, \\ \{p'\}^e = \iint_{S_p} [N]^T [\cos(x', x)] \{p'\} dS + \int_{L_p} [N]^T [\cos(x', x)] \{p'\} dL, \\ \{p\}^e = \iint_{S_p} [N]^T \{p\} dS + \int_{L_p} [N]^T \{p\} dL, \\ \{\theta\}^e = \iiint_{v^e} [B']^T [D'] \{\varepsilon_\theta\} dV, \\ \{f\}^e = \{g\}^e + \{v\}^e + \{p'\}^e + \{p\}^e + \{\theta\}^e,$$

где v – объем элемента;

S_p – поверхность приложения давления, ориентированного по местным осям элемента x'_1, x'_2, x'_3 (x', y', z') – $\{p'\}$ и по глобальным осям x_1, x_2, x_3 (x, y, z) – $\{p\}$;

L_p – линии (рёбра) КЭ, по которым действуют распределённые силы $\{p'\}$ и $\{p\}$ в местной или общей системе координат, соответственно;

$[\cos(x', x)]$ матрица направляющих косинусов местной системы координат;

ρ – плотность;

$[D']$ матрица упругих постоянных материала в локальных координатах x', y', z' [6];

$[B']$ – матрица “деформаций”;

$[B_\theta]$ – матрица производных:

$$[B'_\theta]^T = [[B'_\theta]_1]^T [B'_\theta]_2^T [B'_\theta]_3^T,$$

$$\left\{ \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right\} = [B'_0]_i \{q\}^e, \quad j = 1, 2, 3;$$

$\{g\}^e, \{v\}^e, \{\theta\}^e$ – вектора весовой нагрузки, произвольно распределённой объёмной нагрузки и температуры.

Векторы физических составляющих тензора малых деформаций $\{\epsilon'\}^e$ и упругих напряжений $\{\sigma'\}$ определяются формулами:

$$\{\epsilon'\}^e = [B']\{q\}^e, \quad \{\sigma'\} = [D']\{\epsilon'\}^e.$$

Объединение групп узлов КЭ в жёсткое тело.

Объединение групп узлов КЭ в один узел КЭМ – процедура формирования жёсткого тела, – необходима для эффективного построения усечённых (редуцированных) расчётных моделей (например, объединения в жёсткий диск).

Матрица преобразования $[T]_3$ действует совместно с матрицей $[T]_2^V$ (“жёсткие вставки”):

$$[T]_3^V = [T]_2^V [T]_3$$

Так при объединении 1-го и N-го узлов КЭ матрица $[T]_3$ имеет размерность $(N \times (N - N_I))$ и характерный вид:

$$[T]_3 = \begin{bmatrix} [E]_{N1} & [0] & \dots \\ [0]_{N2} & [E]_{N2} & \dots \\ [E]_{N1} & [0]_{N1} & \dots \end{bmatrix}$$

В частном случае объединение всех узлов КЭ в один узел матрицы $[k]^*$ не формируется, т.к. $[k]^* = 0$.

Учёт граничных условий

Учёт однородных (нулевых) и неоднородных кинематических граничных условий – заданных перемещений группы узлов – проводится путём обнуления внедиагональных коэффициентов соответствующих строк и столбцов матрицы $[K]$ и видоизменения матрицы нагрузок $[F] = [\{F\}_1 \dots \{F\}_{N/F}]$.

Алгоритм оперирует лишь ненулевыми блоками матрицы $[K]$, уменьшает число степеней свободы системы, минимизирует число обращений к внешней памяти.

Учёт условий циклической симметрии и антисимметрии осуществляется установкой пружин большой жёсткости ($K = 10^6 K_{ii}$ – диагональный коэффициент матрицы жёсткости для i -й степени свободы) в соответствующих узлах по соответствующим направлениям.

3.13.2. Уравнение стационарной «линейной» теплопроводности в матричной форме МКЭ имеет вид:

$$[K]\{\theta\} = \{Q\},$$

где $[K]$ – матрица теплопроводности, аналог матрицы линейной жесткости,

$$[K] = \sum_e [k]^e = \sum_e \iiint [B']^T [k] [B'] dV$$

$[B']$ – матрица, определяющая температурные градиенты в КЭ через узловые температуры $\{\theta\}$,

$$[K] = \begin{bmatrix} k_x & 0 & 0 \\ 0 & k_y & 0 \\ 0 & 0 & k_z \end{bmatrix}$$

k_x, k_y, k_z – коэффициенты теплопроводности по трем произвольным, взаимно ортогональным направлениям (постоянные для заданной температуры);

$\{Q\}$ – вектор подводимого к узлам тепла,

$$\{Q\} = \{Q\}_v + \{Q\}_s + \{Q\}_L$$

$$\{Q\}_v = \sum_e \{q\}_v^e = \sum_e \iiint [N]^T \{q\}_v dv,$$

$$\{Q\}_s = \sum_e \{q\}_s^e = \sum_e \iint [N]^N \{q\}_s dS,$$

$\{Q\}_v$ – вектор подвода тепла, распределенного по объему,

$\{Q\}_s$ – то же, но по поверхности,

$\{Q\}_L$ – концентрированный подвод тепла в узловых точках.

Задачи теплопроводности решаются в линейной постановке для систем, аппроксимируемых трехмерными изопараметрическими КЭ. Алгоритм формирования матриц и решения системы уравнений не отличается от алгоритма, реализованного для решения линейных статических задач.

Учитываются все практически значимые граничные условия.

Граничные условия первого рода $\theta = \theta_i$ моделируются по аналогии с заданными перемещениями в задачах статики (п.3.4).

Условия второго рода

$$\frac{\partial \theta}{\partial n} = q_s$$

соответствует нагруженной поверхностью силами q_s границе в задачах статики ($q_s = 0$ – свободная поверхность, условие непроницаемости).

Условия третьего рода (конвекция)

$$q_s = h(\theta_i - \theta),$$

где h – постоянная конвекции, θ_l – температура (заданная) среды. Процедура сводится к добавлению матриц-аналогов матрицы присоединенной жесткости:

$$[K] = \sum_e \iint_S [N]^T h [N] dS$$

к матрице теплопроводности $[K]$, а вектора

$$\{Q\} = \sum_e \iint_S h^e [N]^T dS \{\theta_l\}^e$$

– к вектору теплового потока. Здесь $[N]$ – функция (вектор-строка) формы, $\{\theta_l\}^e$ – вектор узловых значений температуры внешней среды.

Методика МКЭ-расчета упругого НДС деталей трубопроводов

Отсутствие, до 1980 г., достоверных и систематизированных данных о реальном пространственном распределении упругих напряжений в тройниковых соединениях при действии всех значимых статических нагрузок не позволяло обоснованно оценивать прочность и ресурс этих узлов, как правило самых напряженных в трубопроводах, и сдерживало применение наиболее перспективных их типов: штампованных с тянутой горловиной, профилированных и других. Выполненные автором ПК расчетно-теоретические исследования НДС ортогональных (“прямых”) сварных, с накладками и штампованных тройников трубопроводов энергетических установок в реальном диапазоне изменения их геометрических параметров при раздельном и совместном действии внутреннего давления и торцевых нагрузок позволили восполнить указанный пробел.

Рассмотрены Т-образные тройниковые соединения, образованные ортогональным пересечением (“сварной” тройник с зачищенным или “треугольным” швом) или сопряжением по заданным поверхностям (“штампованный”, с приливами и профилированный) двух круглоцилиндрических оболочек: штуцера (диаметр срединной поверхности d , толщина стенки h) и трубы (D, H), возможно, усиленных накладками. Наружная поверхность сопряжения штуцера и трубы “штампованных” тройников характеризуется двумя радиусами: в плоскости и из плоскости тройника. Гладкая внутренняя поверхность сопряжения обеспечивает монотонное изменение толщины в зоне горловины.

Корректный и экономичный подход, предложенный автором, сводит исходную упругую задачу к суперпозиции решений для четверти тройника с использованием свойств циклической симметрии и антисимметрии давления p и 8 групп значимых самоуравновешенных торцевых нагрузок относительно двух плоскостей геометрической симметрии. Напряжения от действия исходной системы нагрузок определяются как

$$(\sigma)_m = \sigma^{(p)} + \sum_{k=1}^3 \sigma^{(k)} + (-1)^{m/2} \sigma^{(4)} + (-1)^{(m-1)/2} \sum_{k=5}^6 \sigma^{(k)} + (-1)^{(m+1)} \sum_{k=1}^8 \sigma^{(k)},$$

$$(\tau)_m = (-1)^{m+1} \left[\tau^{(p)} + \sum_{k=1}^3 \tau^{(k)} \right] + (-1)^{(m-1)/2} \tau^{(4)} + (-1)^{m/2} \sum_{k=5}^6 \tau^{(k)} + \sum_{k=7}^8 \tau^{(k)}$$

где $(\sigma)_m$ – расчетные суммарные нормальные напряжения (продольные σ_z и поперечные σ_m), $(\tau)_m$ – касательные напряжения в точке m -й четверти тройника ($m=1, 2, 3, 4$ – соответствует расчетной, 2-й, 3-й и 4-й четвертям); $\sigma^{(k)} \equiv \sigma_{z,\theta}^{(k)}$, $\tau^{(k)}$ – те же составляющие для соответствующей точки 1-й четверти (расчетного фрагмента) тройника от действия группы нагрузок X_k ($k \equiv p, 1, \dots, 8$); знак “/” означает деление нацело.

Аналогичные методики суперпозиции упругих решений разработаны для гибов-отводов (2 плоскости симметрии-антисимметрии), переходов (2 плоскости симметрии-антисимметрии) и линзовых-сильфонных компенсаторов (4 плоскости симметрии-антисимметрии).

антисимметрии).

Диапазон расчетных значений трех определяющих относительных геометрических параметров (h/d ; D/d ; hD/Hd) охватывал практически все тройники технологических трубопроводов. Для “штампованных” тройников, кроме этого, варьировалась величина радиуса сопряжения штуцера и трубы наружной поверхности, а для тройников с накладками и приливами – геометрические параметры этих элементов.

Параметры конечноэлементных моделей расчетного фрагмента выбирались, исходя из требований точности определения местных напряжений в зоне стыка (горловины) и адекватного сеточного представления “стержневых” торцевых нагрузок: длины штуцера (l) и трубы (L) - $l > 2d$, $L > 2D$, число слоев криволинейных квадратичных КЭ по четверти окружности штуцера - от $5 \div 6$ для $D/d \geq 2$ до $8 \div 12$ для $D/d = 1$, в продольных направлениях штуцера и трубы - от $5 \div 6$ для толстостенных до $8 \div 10$ для тонкостенных тройников, размер слоя элементов у линии стыка (горловины) в направлении поперек нее – от $0,1 \sqrt{rh}$ в штуцере и $0,1 \sqrt{RH}$ в трубе для тонкостенных до $0,4 \sqrt{rh}$ и $0,4 \sqrt{RH}$ для толстостенных тройников.

Достоверность численной методики подтверждена хорошим соответствием результатов, полученных для ряда тонко- и толстостенных сварных и штампованных тройников, с опубликованными численными и экспериментальными данными. В частности, сопоставление с модельными экспериментами и расчетами штампованных тройников МКЭ по трехмерной теории упругости свидетельствует о достаточной точности однослойной (по толщине) аппроксимации с использованием суперпараметрических КЭ даже для толстостенных тройников.

Выявлены следующие основные закономерности распределения расчетных упругих напряжений в ортогональных “сварных” и “штампованных” тройниках:

* Размер зоны возмущенного моментного напряженного состояния составляет $\sim 2\sqrt{dh}$ по штуцеру и $\sim 2\sqrt{DH}$ по трубе от линий их пересечения, сопряжения или приварки накладок, что соответствует размеру зоны краевого эффекта по теории тонких оболочек.

* В равнопроходных и близких к ним тройниках ($D/d < 1.1 \div 1.3$) напряжения распределены немонотонно не только в направлениях поперек (как у всех тройников), но и вдоль линий стыка и сопряжения четверти тройника для всех групп нагрузок. В неравнопроходных тройниках точки с максимальными компонентами лежат на наружной или внутренней поверхностях в одной из плоскостей геометрической симметрии, за исключением действия крутящих моментов (группы X_7 и X_8), а при $D/d < 2 \div 4$, $h/d \sim H/D$ - и момента в штуцере в плоскости тройника (X_4). Главные напряжения совпадают с продольными и окружными составляющими σ_z и σ_θ , влияние касательных напряжений τ существенно только для групп X_7 , X_8 .

* В наиболее напряженных сечениях преобладают:

- продольные изгибные напряжения σ_z^{u32} для тонко- и среднестенных тройников ($h/d \leq 0.1$) при действии нагрузок на штуцер X_1 , X_4 , X_5 , причем максимальные напряжения в штуцере и трубе соотносятся как H^2/h^2 ;
- поперечные мембранные напряжения σ_θ^0 (при $h < H$ также и продольные изгибные напряжения σ_z^{u32}) при действии нагрузок на трубу X_2 , X_3 и X_6 ;
- те и другие нормальные напряжения при действии давления p .

* Для неравнопроходных тонкостенных сварных тройников коэффициенты интенсификации принимают весьма большие значения: при $h/d = H/D = 0.01$ $(\gamma_z^{(1)})_{\max} \approx 45$ и $(\gamma_z^{(5)}) \approx 40$ при $D/d = 1.3 \div 2$, $(\gamma_{\theta,z}^{(7)})_{\max} \approx (\gamma_{\theta,z}^{(8)}) = 45 \div 50$ при $D/d = 1$. С ростом степени равнопроходности коэффициенты $\gamma^{(2)}$, $\gamma^{(3)}$ и $\gamma^{(6)}$ увеличиваются и при $D/d = 1$ становятся сравнимыми с коэффициентами от действия нагрузок на штуцер. В равнопро-

ходных тройниках выравниваются коэффициенты от осевых сил и крутящих моментов в штуцере и трубе ($\gamma^{(2)} \rightarrow \gamma^{(1)}$, $\gamma^{(8)} \rightarrow \gamma^{(7)}$).

* Для “сварных” тройников с накладками на штуцер и (или) на трубу напряжения определяются теми же коэффициентами, что и для тройников с зачищенным сварным швом при эффективных толщинах: $h' = h + h_n$; $H' = H + H_n$, где h_n , H_n - толщины накладок. В случае $l' \leq 3\sqrt{dh'}$ или $L' \leq 3\sqrt{DH'}$ (l' , L' - “ширина” накладок) в распределении напряжений сказывается взаимное влияние 2-х краевых эффектов: стыка труба - штуцер и зоны приварки накладки.

* В “штампованных” тройниках изгибные напряжения, а с ними и коэффициенты $\gamma_z^{(1)}$, $\gamma_z^{(4)}$, $\gamma_z^{(5)}$, $\gamma_z^{(7)}$ снижаются по сравнению с сопоставимыми “сварными” тройниками, причем тем существеннее, чем больше наружные радиусы сопряжения. Поперечные мембранные напряжения σ_θ^0 могут незначительно возрастать за счет увеличения эффективного диаметра отверстия в трубе и, возможно, ослабления подкрепляющей роли штуцера.

* Максимальные суммарные напряжения при одновременном действии p и $X_1 \div X_8$ возникают в зоне пересечения или сопряжения наружной или внутренней поверхности штуцера и трубы в точке, положение которой зависит от геометрии тройника и соотношения нагрузок. Для равнопроходных тройников эта точка может смещаться вверх по штуцеру.

Выявленное сложное пространственное распределение напряжений в тройниках качественно и количественно отличается от простых аналитических зависимостей, ранее принятых в нормативных методиках расчета для энергомашиностроения и других отраслей. В частности, ранее широко используемая методика РТМ 108.020.01-75, Норм ПНАЭ Г-7-002-86 и ее модификации оперируют коэффициентом местных напряжений $K_{из(ш)}$, учитывающим “выворачивающее” действие штуцера на трубу, который полагается общим для изгибающего момента и осевой силы в штуцере. Не рассматривались местные напряжения от крутящих моментов на трубу и на штуцер, а коэффициент от нагрузок на трубу задается равным 3, как для трубы с отверстием. Указанное несоответствие приводило к тому, что для ряда тройников (особенно для тонкостенных равнопроходных) и сочетаний нагрузок методики давали завышенные значения расчетных напряжений, а в иных случаях – работали не “в запас прочности”.

Разработана устраняющая отмеченные недостатки оригинальная инженерная методика расчета прочности тройниковых соединений, в основу которой положены установленные закономерности пространственного распределения упругих напряжений. Значимые компоненты суммарных напряжений σ_θ , σ_z , $\tau_{\theta z}$ определяются в выборочных расчетных сечениях зоны горловины, характеризующих прочность тройникового соединения; с использованием номограмм коэффициентов интенсификации $\gamma_\theta^{(k)}$, $\gamma_z^{(k)}$, $\gamma_{\theta z}^{(k)}$ и в консервативном предположении действия всех максимальных компонент напряжений $\sigma_\theta^{(k)}$, $\sigma_z^{(k)}$, $\tau_{\theta z}^{(k)}$ на одной поверхности. Методика вошла в новую действующую редакцию “Норм расчета на прочность оборудования и трубопроводов АЭУ. ПНАЭ Г-7-002-86” [1] (п.2.9 Приложения 5).

Оценка прочности

Проводится с учетом нагрузок, заданных явно или импортированных из АСТРА-АЭС (СТАЦ, СЕЙСМ), по следующим группам приведенных напряжений:

- (σ)₂ – расчетные приведенные напряжения (группа 2), определяемые по суммам составляющих общих или местных мембранных и общих изгибных напряжений, от действия весовой нагрузки и давления, МПа;
- (σ)_{РК} – максимальный размах приведенных напряжений (группа 3), определяемых по суммам составляющих ранее упомянутых напряжений, общих температурных, местных изгибных и сдвиговых напряжений, от действия давления, компенсации температурных расширений и смещения опор (концов), МПа;
- (σ_{aF})_К – амплитуда приведенных “низкочастотных” напряжений (группа 4), определяемая от действия тех же факторов, что и (σ)_{РК} с учетом концентрации напряжений и овальности сечений (для колен и гибов);
- (σ_s)₂ – расчетные приведенные напряжения, определяемые как напряжения группы (σ)₂ от действия давления, весовой нагрузки и сейсмических воздействий уровня ПЗ или МРЗ, МПа.

1) Оценка статической прочности и сейсмостойкости выполняется по максимальным приведенным напряжениям, (σ)₂ и (σ_s)₂ соответственно, на срединной поверхности КЭМ (для объемных КЭ-моделей толстостенных деталей – для “слоя” точек интегрирования, ближайшего к срединной поверхности);

2) Оценка прочности по “приспособляемости” (σ)_{РК} также проводится по максимальным размахам приведенных напряжений на срединной поверхности КЭМ (для объемных КЭ-моделей толстостенных деталей – для “слоя” точек интегрирования, ближайшего к срединной поверхности);

3) Оценка циклической прочности выполняется по максимальным амплитудам приведенных упругих напряжений (σ_{aF}) на наружной и внутренней поверхностях КЭМ.

Значения компонент, главных и приведенных напряжений вычисляются не в узлах КЭМ, а так, чтобы достигалась наилучшая возможная точность – в точках интегрирования КЭ (квадратурная схема Гаусса). Значения в точках интегрирования могут быть приведены к узлам при помощи различных, но равно нестрогих схем усреднения.

Эти схемы строятся таким образом, чтобы не пропустить экстремальные значения напряжений в точках интегрирования и дать достоверную картину распределения напряжений в рассматриваемой области (прежде всего, в зонах с высоким градиентом изменения напряжений).

В ПК АСТРА-СТАДИО реализованы следующие схемы приведения напряжений в точках интегрирования к узлам:

Схема 1. Суммирование с весами по точкам интегрирования. Осреднение значений в узлах на верхней и нижней поверхностях обратно-пропорционально квадрату расстояния от точек интегрирования до выбранной точки.

Схема 2. Выбор максимума на верхней и нижней поверхностях. Для точек интегрирования на верхней и нижней поверхностях КЭ выбирается максимальное по модулю значение. Найденные значения присваиваются всем точкам на верхней и нижней поверхностях соответственно.

Схема 3. Выбор максимума во всем КЭ. Выбор максимального по модулю значения для всех точек интегрирования КЭ. Полученное значение присваивается всем точкам КЭ.

Возможен расчет и показ напряжений во всех КЭ или за исключением КЭ торцевых зон. В торцевых зонах возможно появления “паразитических” высоких напряжений из-за закреплений некоторых узлов на торце (например, в КЭ-модели отвода).

Для повышения наглядности представления напряжений реализована возможность отображения изолиний на деформированной схеме.

Создание краткого итогового отчета (протокола) по уточненной нормативной оценке статической, циклической и сейсмической прочности (Рис. 3.1).

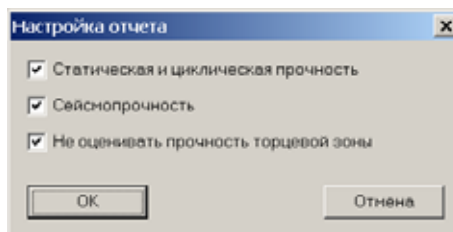


Рис. 3.1 АСТРА-СТАДИО. Диалог для настройки вида протокола

Выводятся максимальные расчетные напряжения, допускаемые напряжения и идентификация превышения первыми вторых (Есть) для всех значимых этапов расчета (групп напряжений) (Рис. 3.2).

Оценка прочности (ПНАЗ Г-7-002-86).				
Вид расчета	Max (МПа)	Доп. (МПа)	Прев.	
Этап 1. Группа 2	182.15	176.50	Есть	
Этап 3. Группа 3	179.44	407.83		
Этап 3. Группа 4	144.88	180.00		
Сейсмоздействие Спектр №1 (угол №1)	СЕЙСМ	725.19		Есть +
	СТАЦ+СЕЙСМ	808.81	217.23	Есть
	СТАЦ-СЕЙСМ	678.79		Есть +
Сейсмоздействие Спектр №1 (угол №2)	СЕЙСМ	726.33		Есть +
	СТАЦ+СЕЙСМ	810.06	217.23	Есть
	СТАЦ-СЕЙСМ	680.06		Есть +
Сейсмоздействие Спектр №1 (угол №3)	СЕЙСМ	726.33		Есть +
	СТАЦ+СЕЙСМ	810.06	217.23	Есть
	СТАЦ-СЕЙСМ	680.07		Есть +
Сейсмоздействие Акселерограмма №2 (угол №1)	СЕЙСМ	175.50		
	СТАЦ+СЕЙСМ	253.19	217.23	Есть
	СТАЦ-СЕЙСМ	263.34		Есть +

Рис. 3.2 АСТРА-СТАДИО. Пример протокола по оценке прочности

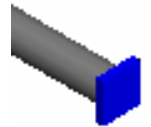

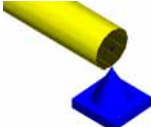
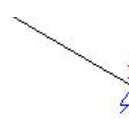
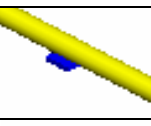
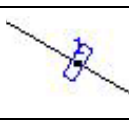
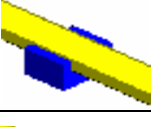
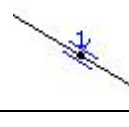
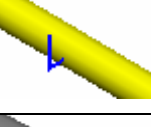
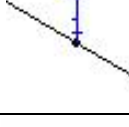
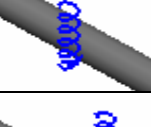

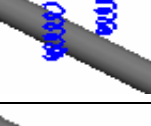
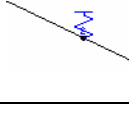
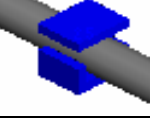

4. Описание расчетных схем и геометрических моделей

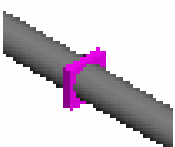
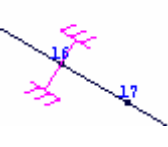
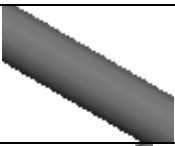
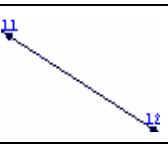
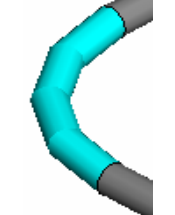
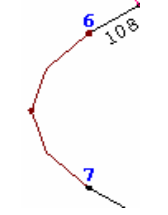
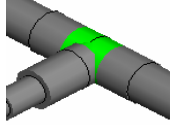
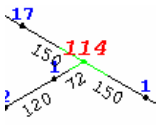
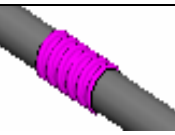
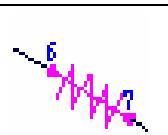
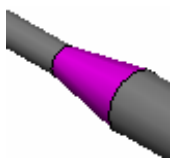
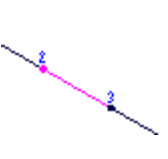
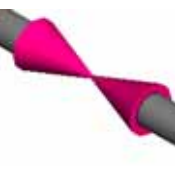
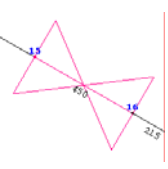
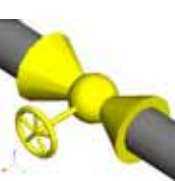
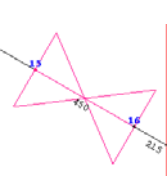
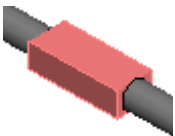
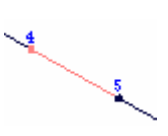
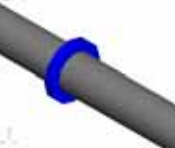

4.1 Произвольный разветвленный трубопровод, содержащий, в общем случае, тройниковые узлы, замкнутые петли, заземленные и консольные концы, рассматривается как пространственная стержневая система, жесткость некоторых элементов которой (отводы-гибы-колена, тройниковые соединения, линзовые компенсаторы и др.) определяется и оболочечными эффектами. Система состоит из пространственных неразветвленных суперэлементов (СЭ) – “участков”, каждый из которых набирается, в свою очередь, из прямо- и криволинейных стержневых элементов – “отрезков”. Суперэлементы-участки соединяются в узлах суперэлементной модели (СЭМ); узлами СЭМ являются тройниковые узлы, консольные концы и сечения на прямолинейных частях трубопровода, приуроченные к изменению физико-механических характеристик и/или нагрузок (давление, температура).


4.2 Основные элементы расчетной АСТРА-модели трубопроводной системы (ТС) представлены ниже в таблице 4.1.

Таблица 4.1

Элементы (детали) расчетной АСТРА-модели

№	Изображение		Элемент АСТРА-модели	Описание/ примечание
	3D модель	осевая модель		
1.			Защемляющая опора (мертвая)	Ограничение всех линейных и угловых перемещений
2.			Неподвижная опора (неподвижный шарнир)	Ограничение всех линейных перемещений
3.			Опора скольжения / качения	Ограничение вертикальных перемещений
4.			Направляющая опора	Ограничение вертикальных и боковых перемещений
5.			Жесткая подвеска	Ограничение перемещений вертикально вниз
6.			Пружинная подвеска (ОСТ, МВН, спецпружины, постоянного усилия, пользователя)	Подвеска на одной тяге
				Подвеска, имеющая две или более тяг.
7.			Опора общего вида	Конкретный вид опоры зависит от заданных характеристик опоры

№	Изображение		Элемент АСТРА-модели	Описание/ примечание
	3D модель	осевая модель		
8.			Амортизатор	Воспринимает только динамические нагрузки
9.			Прямая труба	3D-модель отражает реальный диаметр трубы
10.			Отвод (гиб, колено)	Выделяется от сечения начала вставки отвода до сечения его конца. Имеет сечение серединыгиба (вставляется программой автоматически)
11.			Тройник (сварной, с накладками, штампованный,...)	Выделяется цветом от узла до середины ближайшего отрезка.
12.			Компенсатор (линзовый, сильфонный,...)	Количество гофров на изображении – условное
13.			Переход(ник) (концентрический, эксцентрический)	Размер (длина) изображения соответствует фактической длине перехода
14.			“Арматура” (клапан, вентиль, задвижка,...)	Размер (длина) изображения соответствует фактической длине арматуры
15.			“Арматура” с приводом (клапан, вентиль, задвижка,...)	Размеры изображения соответствуют длине арматуры и центру масс привода
16.			Элемент не кольцевого (произвольного) сечения	Задается приведенными жесткостными характеристиками сечения
17.			Фланец	В любом сечении прямой трубы.

№	Изображение		Элемент АСТРА-модели	Описание/ примечание
	3D модель	осевая модель		
18.			Днище/крышка	Можно установить только в консольных узлах
19.			“Жесткий элемент” (вставка)	Обеспечивает абсолютно жесткую невесомую связь между сечениями

4.3 Пружинные подвески и растяжки, жесткие тяги, опоры скольжения, катковые и направляющие опоры, сейсмо- и виброамортизаторы моделируются линейно-упругими связями, приложенными в соответствующих узлах и сечениях суперэлементов, действующих в требуемых направлениях (глобальных X_1 , X_2 , X_3 или локальных x'_1 , x'_2 , x'_3) и обладающих заданными и/или вычисленными жесткостями.

Рассматриваются эффекты трения в опорных конструкциях (трение скольжения и трение качения по модели Кулона) при статических и температурных перемещениях трубопровода.

4.4 Линзовые, сильфонные и сальниковые компенсаторы, арматура и оборудование, а также сложные опорные конструкции, включаемые в расчетную модель трубопроводной системы, идеализируются:

1) стержневыми элементами, имеющими заданные жесткостные характеристики растяжения-сжатия, изгиба, кручения и сдвига, инерционные (массовые) характеристики и нагрузки;

2) суперэлементами с матрицами жесткости, масс и нагрузок, определенными из расчетов упомянутых подсистем методом конечных элементов по пространственным оболочечным, трехмерным и комбинированным схемам.

4.5 Повышенная стержневая податливость криволинейных труб (“эффект Кармана”) автоматически определяется по асимптотической методике [6, 8] с учетом влияния присоединенных прямых труб, внутреннего давления и других факторов. При этом каждый гнутый или секторный отвод заменяется 4-мя прямолинейными элементами с приведенными жесткостными характеристиками.

Повышенная податливость сварных тройниковых соединений определяется согласно методике РТМ 38.001–94 [3] и ASME [7], коэффициенты податливости (жесткости) врезок труб в оборудование явно задаются пользователем на основе известных аналогов или предварительного трехмерного конечноэлементного анализа фрагментов “штуцер-обечайка”.

4.6 Погонная масса динамической суперэлементной модели (с учетом массы теплоизоляции и рабочей среды) сосредотачивается во всех узлах и в ряде сечений суперэлементов, выбираемых из условия представительной аппроксимации необходимого числа форм собственных и (или) вынужденных колебаний трубопровода. Кроме того, сосредоточенные массы располагаются в местах установки (центрах масс) массивного оборудования и арматуры, а также в местах действия динамических кинематических и силовых нагрузок, возбуждающих вибрации (средние сечения отводов, косые стыки, переходники, тройники и врезки, опоры с неплатформенным кинематическим возбуждением и др.).

4.7 Система действующих и учитываемых нагрузок и воздействий на трубопроводы включает:

– квазистатическое равномерное (в пределах СЭ) внутреннее или внешнее давление p ;

- квазистатическую кусочно-постоянную погонную весовую нагрузку q_3 (продукт+труба+изоляция и, возможно, снеговая и гололедная) и погонные нагрузки по двум горизонтальным осям q_1, q_2 (ветер, статический эквивалент инерционной нагрузки);
- квазистатический кусочно-постоянный погонный температурный момент, действующий на горизонтальных участках труб с неравномерным нагревом по высоте сечения (например, участки со стратифицированным течением);
- квазистатические сосредоточенные в узлах и сечениях силы и моменты (ими можно моделировать статическое влияние оборудования, арматуры, опор, отброшенных ветвей трубопровода и др.);
- квазистационарный перепад средней температуры стенки трубопровода при переходе из “холодного” состояния в “рабочее”;
- заданные вынужденные линейные и угловые перемещения заземленных концов (узлов) и сечений (как правило, так имитируются температурные перемещения присоединенного оборудования, жестких коллекторов и других систем, не включенных в расчетную модель), а также промежуточных опор и точек подвесок пружин и жестких тяг;
- монтажная растяжка в заданных сечениях;
- сейсмические воздействия, задаваемые в виде либо трехкомпонентных спектров ускорений, либо трехкомпонентных акселерограмм для отметок крепления трубопровода (“платформенная” схема возбуждения) – *АСТРА-СЕЙСМ*;
- возбуждающие установившиеся вибрации – полигармонические силовые нагрузки, задаваемые в произвольных сечениях в виде набора амплитуд (сил или давления), частот и сдвига фаз воздействий – *АСТРА-ВИБР*;
- возбуждающие динамические нагрузки для произвольных сечений – *АСТРА-ДИН*.

4.8 Расчетная пространственная стержневая модель строится исходя из условия представительной аппроксимации реальной геометрии, нагрузок и НДС трубопроводной системы, по возможности, минимизации числа узлов, суперэлементов, элементов и сечений приведения масс.

Расчетные сечения суперэлементов должны отслеживать его пространственную конфигурацию (начальные и конечные сечения криволинейных элементов, сечения перегибов), изменения геометрических характеристик сечения (диаметров, толщин, прибавок), физико-механических свойств и параметров распределенных нагрузок (погонная масса, температура, давление), быть приурочены к местам приложения связей (пружинные подвески и растяжки, опоры скольжения, направляющие и катковые опоры, сейсмо- и виброопоры) и сосредоточенных нагрузок, к сечениям, для которых выполняется монтажная растяжка и/или заданы вынужденные перемещения.

4.9 Выбор сечений приведения масс для суперэлементной модели (помимо “обязательных” – узлов модели и сечений действия динамических нагрузок) определяется из приближенного анализа “парциальных” собственных частот ветвей трубопроводной системы: количество таких сечений в i -м суперэлементе должно быть равно

$$n_i = (L_n - 3N) \frac{\sum_{m=1}^3 \frac{1}{\omega_{im}^*}}{\sum_{k=1}^I \sum_{m=1}^3 \frac{1}{\omega_{km}^*}}$$

где:

L_n – максимально допустимое число динамических степеней свободы СЭМ (в данной версии, $L_n = 60000$),

N – общее число узлов СЭМ,

I – число суперэлементов,

ω_{im}^* – приближенная низшая собственная частота i -го суперэлемента при преимущественном перемещении по оси X_m ($m=1,2,3$), которая определяется как:

$$\omega_{im}^* = \sqrt{\frac{\frac{3E^T D^3 s}{2l_{im}^3}}{ml_{im} + \sum_p M_p}}$$

Здесь:

l_{im} – “приведенная” изгибная длина суперэлемента,

m – погонная масса трубы,

M_p – сосредоточенная масса.

Если $n_i \ll 1$, то масса не размещается на данном суперэлементе. Если $n_i \in (0,5; 1)$, то вводится одно сечение с массой (за счет суперэлементов, где $n_i \gg 1$).

4.10 В подсистеме уточненного расчета деталей трубопроводов (АСТРА-СТАДИО) реализована автоматическая генерация оптимальных по точности пространственно-оболочечных (для тонко- и “среднестенных” элементов, криволинейные 6-и и 8-и узловые КЭ переменной толщины суперпараметрического семейства, СПКЭ) и объемных (для средне- и толстостенных деталей, 12-и, 15-и, 16-и и 20-и узловые КЭ изопараметрического семейства, ИПКЭ, многослойные схемы по толщине детали) расчетных конечно-элементных моделей – см. таблица 4.2.

Таблица 4.2

Деталь (элемент, узел)	Типы КЭ, вид сетки	Виды расчета
<i>Тройник сварной</i> с защищенным швом	<ul style="list-style-type: none"> СПКЭ8, СПКЭ6 (пересечение штуцера и магистрали по верхней и нижней поверхности); СПКЭ8, СПКЭ6 (пересечение штуцера и магистрали по срединной поверхности) 	(2)
	<ul style="list-style-type: none"> ИПКЭ-16, ИПКЭ-12 ИПКЭ-20, ИПКЭ-15 Многослойная схема.	(1-4)
<i>Тройник сварной</i> с защищенным швом и плакирующим слоем	<ul style="list-style-type: none"> ИПКЭ16, ИПКЭ12 ИПКЭ20, ИПКЭ15 Многослойная схема.	(1-4)
<i>Тройник штампованный</i> <i>и штампованной</i> (с тянутой горловиной)	<ul style="list-style-type: none"> СПКЭ8, СПКЭ6 	(2)
	<ul style="list-style-type: none"> ИПКЭ16, ИПКЭ12 ИПКЭ20, ИПКЭ15 Многослойная схема.	(1-4)
<i>Тройник штампованный</i> <i>и штампованной</i> с плакирующим слоем	<ul style="list-style-type: none"> ИПКЭ16, ИПКЭ12 ИПКЭ20, ИПКЭ15 Многослойная схема.	(1-4)
<i>Тройник сварной</i> с защищенным швом и накладкой	<ul style="list-style-type: none"> СПКЭ8, СПКЭ6 (пересечение штуцера и магистрали по верхней и нижней поверхности); СПКЭ8, СПКЭ6 (пересечение штуцера и магистрали по срединной поверхности) 	(2)

Деталь (элемент, узел)	Типы КЭ, вид сетки	Виды расчета
	<ul style="list-style-type: none"> ИПКЭ16, ИПКЭ12 ИПКЭ20, ИПКЭ15 Многослойная схема.	(1-4)
<i>Тройник сварной</i> с зачищенным швом, накладкой и плакирующим слоем	<ul style="list-style-type: none"> ИПКЭ16, ИПКЭ12 ИПКЭ20, ИПКЭ15 Многослойная схема.	(1-4)
<i>Тройник сварной</i> со швом (“треугольник”) “штуцер-магистраль”	<ul style="list-style-type: none"> ИПКЭ16, ИПКЭ12 ИПКЭ20, ИПКЭ15 Многослойная схема.	(1-3)
<i>Тройник сварной</i> с накладкой и швами “штуцер-магистраль- накладка” и “магистраль- накладка”	<ul style="list-style-type: none"> ИПКЭ16, ИПКЭ12 ИПКЭ20, ИПКЭ15 Многослойная схема.	(1-3)
<i>Отвод гнутый</i> (с примыкающими трубами)	<ul style="list-style-type: none"> СПКЭ8 	(1-4)
	<ul style="list-style-type: none"> ИПКЭ16, ИПКЭ20 Многослойная схема.	(1-3)
<i>Отвод гнутый</i> с плакирующим слоем (с примыкающими труба- ми)	<ul style="list-style-type: none"> ИПКЭ16, ИПКЭ20 Многослойная схема.	(1-3)
<i>Отвод секторный</i> (с примыкаю- щими трубами)	<ul style="list-style-type: none"> СПКЭ8 –пересечение по верх- ней и нижней поверхности СПКЭ8 –пересечение по сре- динной поверхности 	(2)
	<ul style="list-style-type: none"> ИПКЭ16, ИПКЭ20 Многослойная схема.	(1-3)
<i>Отвод секторный</i> с плакирующим слоем (с примыкающими трубами)	<ul style="list-style-type: none"> ИПКЭ16, ИПКЭ20 Многослойная схема.	(1-3)
<i>Косой стык</i>	<ul style="list-style-type: none"> СПКЭ8 –пересечение по верх- ней и нижней поверхности СПКЭ8 –пересечение по сре- динной поверхности 	(2)
	<ul style="list-style-type: none"> ИПКЭ16, ИПКЭ20 Многослойная схема.	(1-3)
<i>Косой стык</i> с плакирующим слоем	<ul style="list-style-type: none"> ИПКЭ16, ИПКЭ20 Многослойная схема.	(1-3)
<i>Косой стык</i> со сварным швом	<ul style="list-style-type: none"> ИПКЭ20, ИПКЭ15 Многослойная схема.	(1-3)

Деталь (элемент, узел)	Типы КЭ, вид сетки	Виды расчета
<i>Прямая труба</i> с кольцевым сварным швом	<ul style="list-style-type: none"> ИПКЭ20, ИПКЭ15 Многослойная схема.	(1-3)
<i>Переход</i>	<ul style="list-style-type: none"> СПКЭ8 – пересечение по верхней и нижней поверхности СПКЭ8 – пересечение по срединной поверхности 	(2)
<i>Компенсатор</i> (сильфонный, линзовый)	<ul style="list-style-type: none"> СПКЭ8 	(2)

- (1) – стационарная линейная задача теплопроводности;
(2) – линейно-упругий расчет НДС и прочности;
(3) – комбинированный расчет (определение температурного поля и использование его в качестве температурной нагрузки для определения НДС);
(4) – формирование матриц жесткости и нагрузок детали (элемента).

СПКЭ8 – четырехугольный в плане 8-узловой оболочечный конечный элемент с промежуточными узлами суперпараметрического семейства.

СПКЭ6 – треугольный в плане 6-узловой оболочечный конечный элемент с промежуточными узлами суперпараметрического семейства.

ИПКЭ16 – трехмерный, шестигранный четырехугольный в «плане», линейный по толщине 16-узловой КЭ с промежуточными узлами.

ИПКЭ20 – трехмерный, шестигранный четырехугольный в «плане», 20-ти узловой КЭ с промежуточными узлами.

ИПКЭ12 – трехмерный, пятигранный треугольный в «плане», линейный по толщине 12-узловой КЭ с промежуточными узлами.

ИПКЭ15 – трехмерный, пятигранный треугольный в «плане», 15-узловой КЭ с промежуточными узлами.

Семейство пространственных оболочечных, пластинчатых и мембранных КЭ суперпараметрического типа (СПКЭ)

Для аппроксимации пластина-оболочечных подсистем малой и средней толщины, постоянной или переменной, наиболее эффективны оболочечные КЭ суперпараметрического типа (СПКЭ) (таблицы).

Поле перемещений внутри СПКЭ по осям x, y, z – u, v, w соответственно, – однозначно определяется аналогичными компонентами узловых перемещений (u_i, v_i, w_i) и двумя углами поворота (α_i, β_i) узлового вектора нормали $z' = \{V_{3i}\}$ относительно двух взаимно перпендикулярных к нему направлений y' и x' :

$$\begin{Bmatrix} U \\ V \\ W \end{Bmatrix} = [N] \begin{Bmatrix} \{q\}_I^e \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \{q\}_{NPL}^e \end{Bmatrix}, \quad \{q\}_i^e = \begin{Bmatrix} U_i \\ V_i \\ W_i \\ \alpha_i \\ \beta_i \end{Bmatrix},$$

где матрица формы $[N]$ имеет вид $[N] = [[N_I] \dots [N_{NPL}]]$.

$$[N_i] = N_i \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & | & 0,5\zeta h_i (\bar{V}_{li})_x & | & -0,5\zeta h_i (\bar{V}_{2i})_x \\ 0 & 1 & 0 & | & 0,5\zeta h_i (\bar{V}_{li})_y & | & -0,5\zeta h_i (\bar{V}_{2i})_y \\ 0 & 0 & 1 & | & 0,5\zeta h_i (\bar{V}_{li})_z & | & -0,5\zeta h_i (\bar{V}_{2i})_z \end{bmatrix}$$

(V_{li}) – проекции единичного вектора, по направлению совпадающего с на оси x, y, z ;

(V_{2i}) – то же для y' , ζ – координата по толщине $\zeta \in [-1, 1]$ – толщина СПКЭ по i -ой нормали.

В библиотеку комплекса включены треугольные (Δ) СПКЭ первого и второго порядка ($\Delta 3$ и $\Delta 6$, 3, 6 – число узлов), четырёхугольные (\square) СПКЭ первого, смешанного и второго порядка ($\square 4$, $\square 5$ – $\square 7$ и $\square 8$) точности.

Для вычисления коэффициентов матрицы $[B']$, связывающей узловые перемещения $\{q^e\}$ с компонентами деформации $\{\varepsilon\}$ в локальной системе координат x', y', z' :

$$\{\varepsilon'\}^T = \left[\frac{\partial U'}{\partial x'}; \frac{\partial V'}{\partial y'}; \frac{\partial U'}{\partial y'} + \frac{\partial V'}{\partial x'}; \frac{\partial W'}{\partial x'} + \frac{\partial U'}{\partial z'}; \frac{\partial W'}{\partial y'} + \frac{\partial V'}{\partial z'} \right],$$

применяется процедура, описанная в [6].

Матрица упругих постоянных $[D']$ для общего случая ортотропного СПКЭ строится на основе трёхмерного закона Гука в предположении $\sigma_z = 0$.

$$[D] = \begin{bmatrix} \frac{E_1}{1-\nu_{12}^2} & \frac{E_2 \nu_{12}}{1-\nu_{12}^2} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{E_2 \nu_{12}}{1-\nu_{12}^2} & \frac{E_2}{1-\nu_{12}^2} & 0 & 0 & 0 \\ & & G_{12} & 0 & 0 \\ \text{симм} & & & \frac{G_{23}}{K} & 0 \\ & & & & \frac{G_{23}}{K} \end{bmatrix}$$

где E_1, E_2 – модули упругости в направлении осей симметрии (ортотропии), ν_{12} – коэффициент Пуассона, G_{12}, G_{13}, G_{23} – модули сдвига, $K = 1, 2$ – коэффициент “формы”, улучшающий аппроксимацию сдвиговых деформаций по толщине СПКЭ. В частном случае изотропного материала $E_1 = E_2 = E$; $\nu_{12} = \nu$; $G_{12} = G_{13} = G_{23} = E/2(1+\nu)$. В случае, когда оси симметрии 1 и 2 не совпадают с локальными осями x', y' матрица $[D']$ преобразуется к виду:

$$[D'] = [T][D][T]^T,$$

где

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos^2 \beta & \sin^2 \beta & -2 \sin \beta \cos \beta & 0 & 0 \\ \sin^2 \beta & \cos^2 \beta & 2 \sin \beta \cos \beta & 0 & 0 \\ \sin^2 \beta \cos^2 \beta & -\sin \beta \cos \beta & \cos^2 \beta - \sin^2 \beta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \beta & \sin \beta \\ 0 & 0 & 0 & -\sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix}$$

β – угол между осью 1 и x' .

Для весьма тонкостенных пластин и оболочек с целью улучшения обусловленности матрицы жёсткости $[K]$ проводится коррекция сдвиговых коэффициентов матрицы $[D']$:

$$D_{44}^{*/} = \beta^* \frac{G_{13}}{K}; \quad D_{55}^{*/} = \frac{G_{23}}{K};$$

корректирующий множитель β^* принимается равным [12], [13]:

$$\beta^* = \min\{1, (20h/L)^2\},$$

где h, L – характерные (средние по КЭ) толщина и размер в плане СПКЭ.

Вектор $\{g\}$ в формуле для весовой нагрузки определяется как:

$$\{g\} = g \begin{Bmatrix} \cos(\bar{g}, \bar{x}) \\ \cos(\bar{g}, \bar{y}) \\ \cos(\bar{g}, \bar{z}) \end{Bmatrix},$$

где g ускорение силы тяжести, а $\cos(g, x)$ – косинусы углов между направлениями действия веса и осями x, y, z

Вектор температурных (начальных) деформаций $\{\varepsilon_\theta\}$ формируется в следующем виде:

$$\{\varepsilon_\theta\}^T = [\alpha_1 \theta, \alpha_2 \theta, 0, 0, 0, 0],$$

где α_1, α_2 – коэффициенты температурного расширения материала в направлении осей ортотропии 1 и 2,

$$\theta = (\theta^+ + \theta^-)/2 + \zeta(\theta^+ - \theta^-)/2$$

– температура, линейно распределенная по толщине. Для изотропного материала $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$ в общем случае ортотропного материала $\{\varepsilon_\theta\} = [T] \{\varepsilon_\theta\}$.

Коэффициенты матриц СПКЭ вычисляются по формулам (3.3) с использованием квадратур Гаусса в криволинейных координатах ($\xi, \eta, \zeta \in [-1, 1]$ для \square ; $L_1, L_2, L_3 \in [0, 1]$ и ζ для Δ):

$$[k] = \sum_{j=1}^J W_j \left([k(\xi_j, \eta_j, \zeta_1)] + [k(\xi_j, \eta_j, -\zeta_1)] \right)$$

где $j = 1, 2, \dots, J$ точки интегрирования, $\xi_j, \eta_j, L_1, L_2, L_3$ – криволинейные координаты точек интегрирования, W_j – весовые коэффициенты, $\zeta_1 = 0,5773503$ (см. 3.4).

Установлено что для СПКЭ наилучшим является равномерное и умеренное (на 1÷2 единицы) понижение точности квадратур при вычислении матриц (3.3) по сравнению со схемой, которая обеспечивает точное вычисление объема (площади поверхности) и воспроизводит в основном характер изменения подынтегральных матриц в элементе. Исходя из положения, порядок интегрирования для матрицы $\{p\}^e$ рекомендуется брать на 1÷2 единицы больше, чем для других матриц.

С целью экономии машинного времени и памяти при вычислениях учитывается симметричность матриц $[k]^e$ независимость коэффициента матриц $[N]$, $[B]$ и др. от коор-

динаты ξ .

Семейство трехмерных изопараметрических КЭ (ИПКЭ) твёрдого тела

Трехмерные изопараметрические КЭ (ИПКЭ) следует использовать лишь там, где адекватная аппроксимация фрагментов с помощью СПКЭ невозможна – в массивных узлах, толстостенных многослойных подсистемах, зонах пересечения толстостенных оболочек и т.д. (см. таблицы).

В качестве базовых используются:

1) **ИПКЭ**, являющиеся аналогами соответствующих **СПКЭ** с тем отличием, что узлы расположены попарно на “нижней” и “верхней” поверхностях (их число $NPL = 2 * NPL$), а число степеней свободы в каждом из них равно **3** (u_i, v_i, w_i по x, y, z). При этом генерируется достаточно экономичные **КЭМ**, поддающейся расчету на доступных современных **ЭВМ**, используют **ИПКЭ** – при необходимости может быть реализована эквивалентная по точности схема с несколькими слоями **ИПКЭ** в этом направлении.

2) **ИПКЭ** с промежуточными узлами – 20-узловые шестигранники ИПКЭ20 (мятые кирпичи), 15-узловые треугольные призмы ИПКЭ15 (мятые пятигранники) и 10-узловые четырехгранники ИПКЭ10 (мятые тетраэдры)

При учёте всех компонент напряжений и деформаций матрица **[B]** определяется также для локальной системы координат x', y', z' , что при известном удорожании процедуры позволяет получать напряжения в более информативной, по сравнению с глобальной, системе координат. Матрица **[D']** для $NCOM = 6$ имеет следующий вид [6]:

$$[D'] = \begin{bmatrix} [D']_{ij} & 0 \\ 0 & diag(G_{ij}) \end{bmatrix}$$

$$diag(G_{ij}) = \begin{bmatrix} G_{12} & 0 & 0 \\ 0 & G_{13} & 0 \\ 0 & 0 & G_{23} \end{bmatrix}, \quad [D']_{ij} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & -\frac{\nu_{31}}{E_3} \\ & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} \\ симм. & & \frac{1}{E} \end{bmatrix}^{-1}$$

В случае несовпадения осей симметрии 1 и 2 с локальными осями x', y' . (предполагается, что ось 3 совпадает с z) матрица **[D']** преобразуется к виду:

$$[D'] = [T][D'][T]^T,$$

где

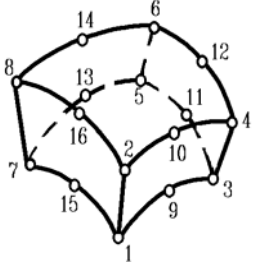
$$[T] = \begin{bmatrix} \cos^2 \beta & \sin^2 \beta & 0 & -2 \sin \beta \cos \beta & 0 & 0 \\ \sin \beta & \cos \beta & 0 & 2 \sin \beta \cos \beta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \sin \beta \cos \beta & \sin \beta \cos \beta & 0 & \cos^2 \beta - \sin^2 \beta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cos \beta & \sin \beta \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix}$$

Вектор температурных деформаций формируется в виде:

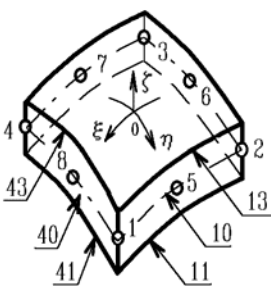
$$\{\varepsilon_{\theta}\} = [T] \alpha_1 \theta, \alpha_2 \theta, \alpha_3 \theta, 0, 0, 0, 0, 0]$$

У ИПКЭ нежелательно понижение квадратур по сравнению с обеспечивающими точное вычисление объемов для объемных интегралов и площадей для поверхностных интегралов [2, 3, 13].

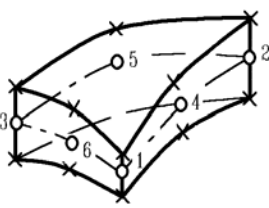
“Библиотека” конечных элементов программного модуля АСТРА-СТАДИО. ИПКЭ16 (теплопроводность)

Код 16841 (“теплопроводный”)	Аппроксимируемые фрагменты КЭМ, НДС	Изображение	Степени свободы в узлах $\{q\}^e$	Нагрузки	Другие факторы	Результаты расчёта
Криволинейный 16-и узловой четырёх- угольный (в плане) пе- ременной толщины массивный трёхмерный изопараметрического семейства ИПКЭ □8, ИПКЭ16	Толстостенные и массив- ные трёхмерные фраг- менты с произвольным градиентом поля (темпе- ратуры, давления и т.п.).		φ_i	1. Поток через заданные пов-ти КЭ (условия II рода). 2. Конвекция с тепловыделением (условия III рода).		$\varphi_i(t)$ $\left\{ \frac{\partial \varphi_i}{\partial n} \right\}$

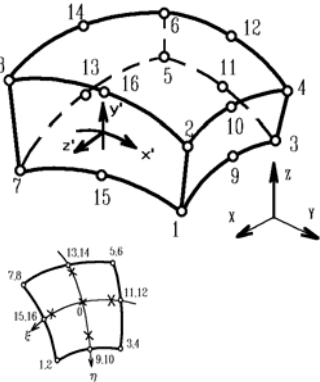
“Библиотека” конечных элементов программного модуля АСТРА-СТАДИО. СПКЭ8

Код 8845	Аппроксимируемые фрагменты КЭМ, НДС	Изображение	Степени свободы n узлах $\{q\}^e$	Нагрузки	Другие факторы	Результаты расчёта
<p>Криволинейный 8-и узельный четырёх- угольные в плане пере- менной толщины плитно- оболочечный (гипотезы Тимошенко) супер- параметрического семей- ства</p> <p>СПКЭ □8, СПКЭ 8</p>	<p>Произвольные изотропные тон- ко-, средне- и толстостенные плитные и оболочечные (двой- ной кривизны) фрагменты без ограничения на градиент НДС. Рекомендуется как базовый для внутренних зон.</p>	 <p>1,2,3 (-1,0,1-для давления)-поверхности $\zeta=-1,0,1$ 10,20,30,40-торцевые грани $\eta=1, \xi=-1,$ $\eta=-1, \xi=1$ 11,12,13,... 41, 42,43-рёбра на пересече- нии $\zeta=\text{const}$ и $\xi, \eta=\text{const}$</p>	<p>1.Стандартная $\begin{Bmatrix} u, v, w \\ \alpha', \beta' \end{Bmatrix}$</p> <p>2.Альтернат. $\begin{Bmatrix} u, v, w \\ \beta', \alpha' \end{Bmatrix}$</p> <p>3.Глобальная $\begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \\ \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{Bmatrix}$</p> <p>4.Местная $\begin{Bmatrix} u' \\ v' \\ w' \\ \alpha' \\ \beta' \end{Bmatrix}$</p>	<p>1.Весовая (инерционная) в заданном направлении. 2.Нормальное давление ($\zeta=\text{const}$). 3.Произвольно ориенти- рованное давление в об- щей или местной системе на заданные поверхности и линии. 4.Произвольная объёмная нагрузка (в т.ч. центро- бежная). 5.Произвольная темпе- ратурная нагрузка. 6.Заданные “начальные” напряжения.</p>	<p>1. Жёсткие вставки между узлами СПКЭ и узлами КЭМ (поэлемент. задание). 2. Упругие, шарнирные и скользящие связи (поэлемент. задание).</p>	<p>1. $\{q\}^e$</p> <p>2. $\{N\}^e = \begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ Q_x \\ Q_y \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix}$</p> <p>3. $\{\sigma\}^e = \begin{Bmatrix} \sigma_x^{+-} \\ \sigma_y^{+-} \\ \tau_{xy}^+ \\ \tau_{xz}^o \\ \tau_{yz}^o \end{Bmatrix}$</p>

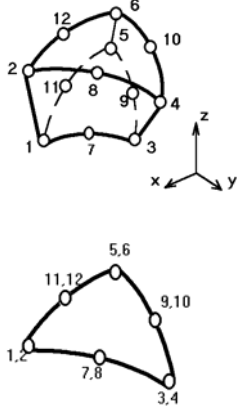
“Библиотека” конечных элементов программного модуля АСТРА-СТАДИО. СПКЭ6

Код 6635	Аппроксимируемые фрагменты КЭМ, НДС	Изображение	Степени свободы п узлах $\{q\}^e$	Нагрузки	Другие факторы	Результаты расчёта
Криволинейный 6-и узель- ный треугольный в плане переменной толщины плит- но-оболочечный (гипотезы Тимошенко) суперпарамет- рического семейства СПКЭ Д6 СПКЭ6	Произвольные изотропные тонко-, средне- и толстостенные плитные и оболочечные фрагменты; реко- мендуется для зон сгущения (раз- ряжения) сетки 4-х угольных КЭ, в вершинах (полюсах) оболочек и плит вращения и трещин, нерегу- лярных приграничных зонах.		1.Стандартная $\begin{Bmatrix} u, v, w \\ \alpha', \beta' \end{Bmatrix}$ 2.Альтернат. $\begin{Bmatrix} u, v, w \\ \beta', \alpha' \end{Bmatrix}$ 3.Глобальные $\begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \\ \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{Bmatrix}$ 4.Местная $\begin{Bmatrix} u' \\ v' \\ w' \\ \alpha' \\ \beta' \end{Bmatrix}$	1.Весовая (инерционная) в заданном направлении. 2.Нормальное давление ($\xi=\text{const}$). 3.Произвольно ориенти- рованное давление в общей или местной сис- теме на заданные по- верхности и линии. 4.Произвольная объём- ная нагрузка (в т.ч. цен- тробежная). 5.Произвольная темпера- турная нагрузка. 6.Заданные “начальные” напряжения	1. Жёсткие вставки между узлами ИПКЭ и узлами КЭМ (поэлемент. задание). 2. Упругие, шарнирные и скользящие связи (поэле- мент. задание).	1. $\{q\}^e = \begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ Q_x \\ Q_y \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix}$ 3. $\{\sigma\}^e = \begin{Bmatrix} \sigma_x^\pm \\ \sigma_y^\pm \\ \tau_{xy}^\pm \\ \tau_{xz}^o \\ \tau_{yz}^o \end{Bmatrix}$

“Библиотека” конечных элементов программного модуля АСТРА-СТАДИО. ИПКЭ16

Код 16846	Аппроксимируемые фрагменты КЭМ, НДС	Изображение	Степени свободы п узлах {q} ^e	Нагрузки	Другие факторы	Результаты расчёта
Криволинейный 16-и узельный четырёх- угольный (в плане) пе- ременной толщины мас- сивный трёхмерный изо- параметрического се- мейства, ИПКЭ □8 ИПКЭ 16	Изотропные толстостенные и массивные трёхмерные фраг- менты деформируемого твёр- дого тела с произвольным градиентом НДС.	 <p>х-точки интегрирования и выхода напряжений (по умолчанию).</p>	1.Стандартная (глобальные) $\begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix}$ 2.Местная $\begin{Bmatrix} u' \\ v' \\ w' \end{Bmatrix}$	1.Весовая (инерционная) в заданном направлении. 2.Нормальное давление ($\zeta=\text{const}$). 3. Произвольно ориенти- рованное давление в общей или местной системе на заданные поверхности и линии. 4.Произвольная объёмная нагрузка (в т.ч. центробеж- ная). 5.Произвольная темпера- турная нагрузка. 6.Заданные “начальные” напряжения	1. Жёсткие вставки между узлами ИПКЭ и узлами КЭМ (поэлем. задание). 2. Упругие, шарнирные и скользящие связи (поэлем. задание).	1. $\{u, v, w\}$ $\{u', v', w'\}$ 2. $\begin{Bmatrix} N_{x'}, N_{y'}, N_{x'y'} \\ Q_{x'}, Q_{y'} \\ M_{x'}, M_{y'}, M_{z'} \end{Bmatrix}$ 3. $\begin{Bmatrix} \sigma_{x'}^{\pm} \\ \sigma_{y'}^{\pm} \\ \sigma_{z'}^{\pm} \\ \tau_{x'y'}^{\pm} \\ \tau_{x'z'}^{\pm} \\ \tau_{y'z'}^{\pm} \end{Bmatrix}$ 4. 2) и 3) в об- щей системе

“Библиотека” конечных элементов программного модуля АСТРА-СТАДИО. ИПКЭ12

Код 12635,12636	Аппроксимируемые фрагменты КЭМ, НДС	Изображение	Степени свободы в узлах $\{q\}^e$	Нагрузки	Другие факторы	Результаты расчёта
Криволинейный 12-и узловой треугольный (в плане) переменной толщины трёхмерный изопараметрического семейства ИПКЭ Д6 ИПКЭ12	Изотропные толсто- стенные и массив- ные трёхмерные фрагменты дефор- мируемого твёрдого тела с произвольным градиентом НДС; рекомендуется для зон сгущения (раз- ряджения) сетки 4-х угольных ИПКЭ, в вершинах (полюсах) тел вращения и тре- щин, нерегулярных приграничных зон.		1.Стандарт. (глобальн.) $\begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix}$ 2.Местные $\begin{Bmatrix} u' \\ v' \\ w' \end{Bmatrix}$	1.Весовая (инер- ционная) в за- данном направ- лении. 2.Нормальное давление ($\zeta=\text{const}$). 3. Произвольно ориенти- рованное давле- ние в общей или местной системе на заданные по- верхности и ли- нии. 4.Произвольная объёмная нагруз- ка (в т.ч. центро- бежная). 5.Произвольная температурная нагрузка. 6.Заданные “на- чальные” напря- жения.	1. Жёсткие вставки между узлами ИПКЭ и узлами КЭМ (по- элемент. задание). 2. Упругие, шарнир- ные и скользящие связи (поэлемент. за- дание). $\begin{Bmatrix} N_{x'}, N_{y'}, N_{x'y'} \\ Q_{x'}, Q_{y'} \\ M_{x'}, M_{y'}, M_{z'} \end{Bmatrix}$ 3. $\begin{Bmatrix} \sigma_{x'}^+ \\ \sigma_{y'}^+ \\ \sigma_{z'}^+ \\ \tau_{x'y'}^+ \\ \tau_{x'z'}^+ \\ \tau_{y'z'}^+ \end{Bmatrix}$	1. $\{u, v, w\}$ $\{u', v', w'\}$ 2. $\begin{Bmatrix} N_{x'}, N_{y'}, N_{x'y'} \\ Q_{x'}, Q_{y'} \\ M_{x'}, M_{y'}, M_{z'} \end{Bmatrix}$ 3. $\begin{Bmatrix} \sigma_{x'}^+ \\ \sigma_{y'}^+ \\ \sigma_{z'}^+ \\ \tau_{x'y'}^+ \\ \tau_{x'z'}^+ \\ \tau_{y'z'}^+ \end{Bmatrix}$ 4. 2) и 3) в общей системе

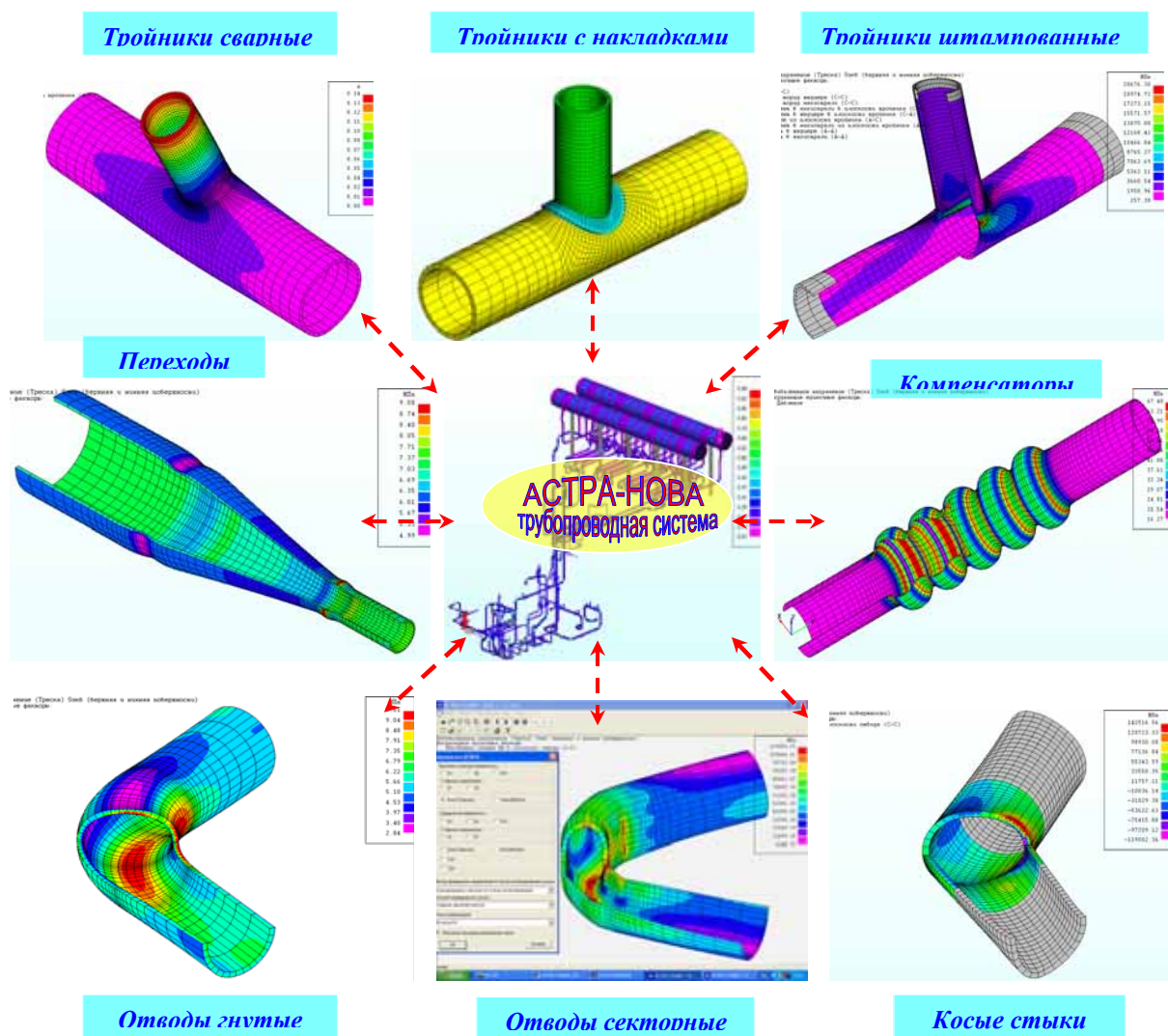


Рис.4.1. Программный модуль (подсистема) АСТРА-СТАДИО.
Основные типы деталей (элементов) ТС

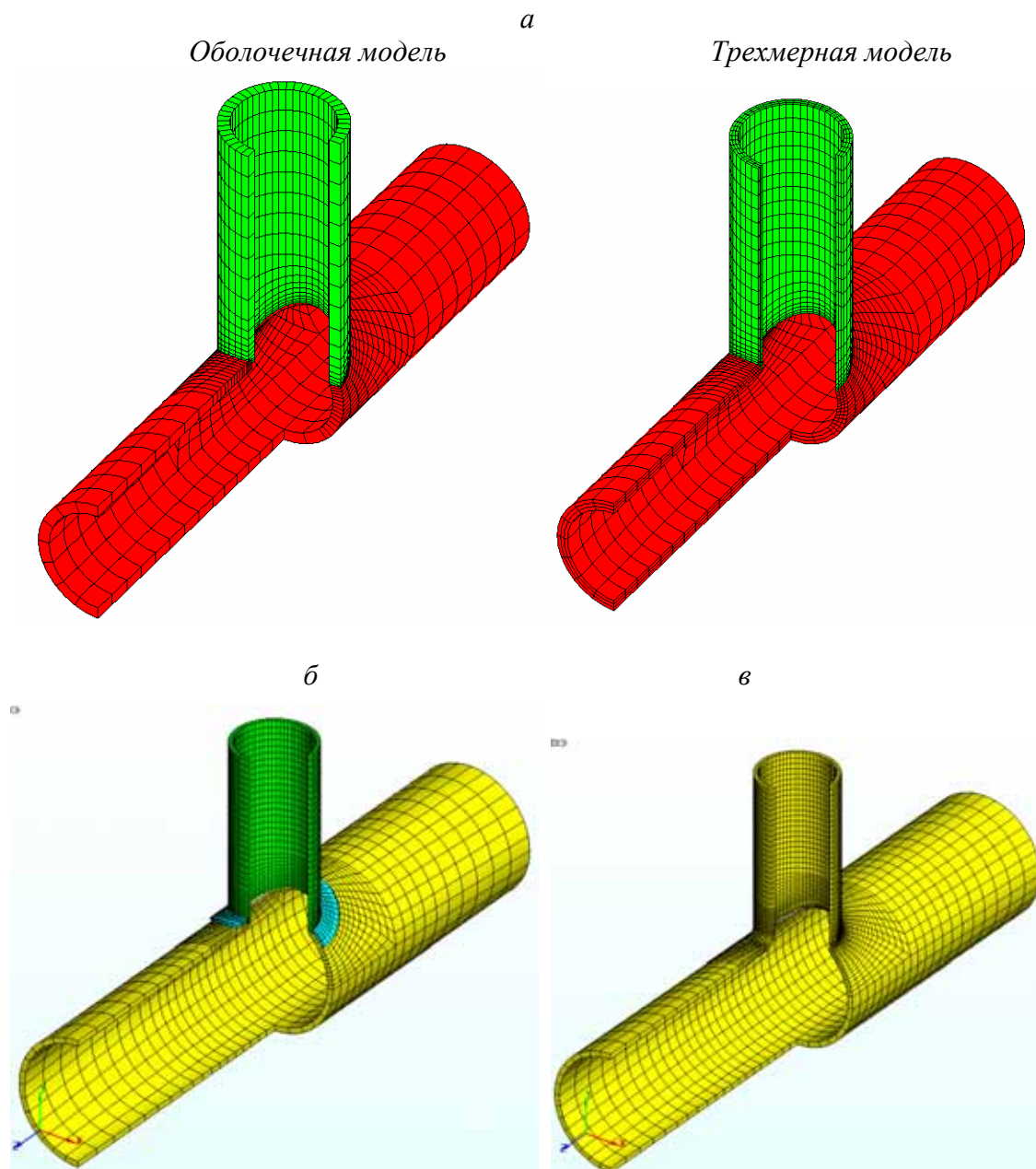


Рис. 4.2 АСТРА-СТАДИО. Конечноэлементные модели ортогональных радиальных тройниковых соединений. а) сварной с зачищенным швом; б) сварной с накладкой; в) штампованный с тянутой горловиной.

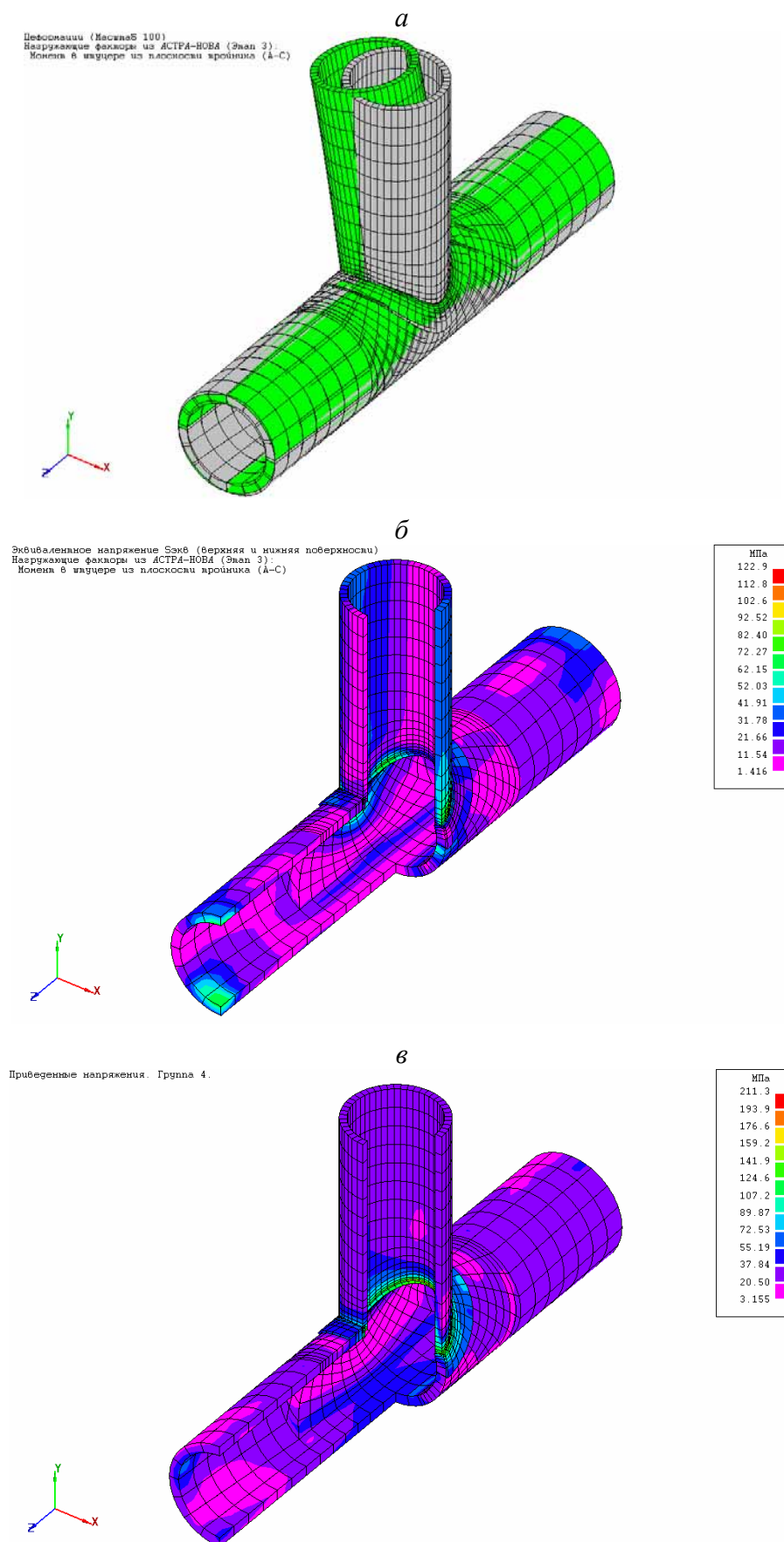
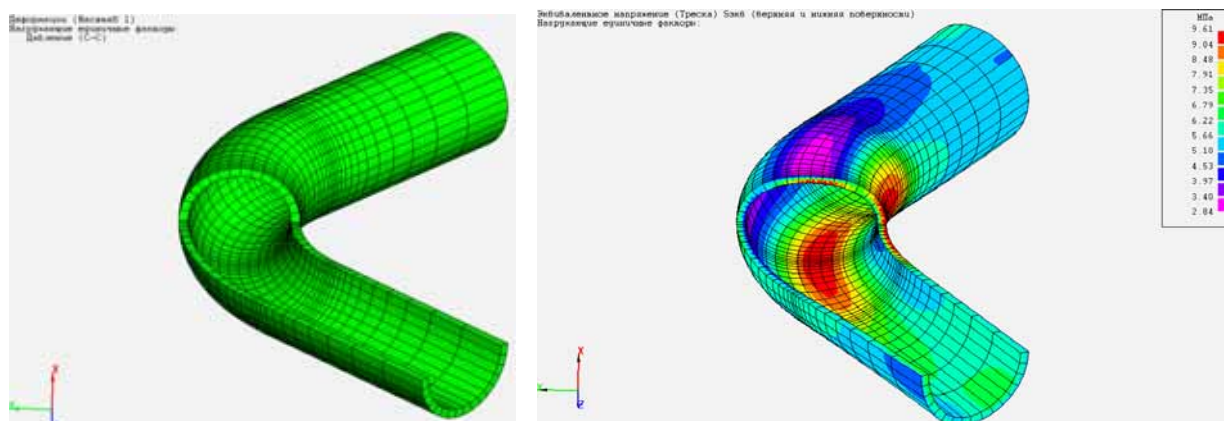
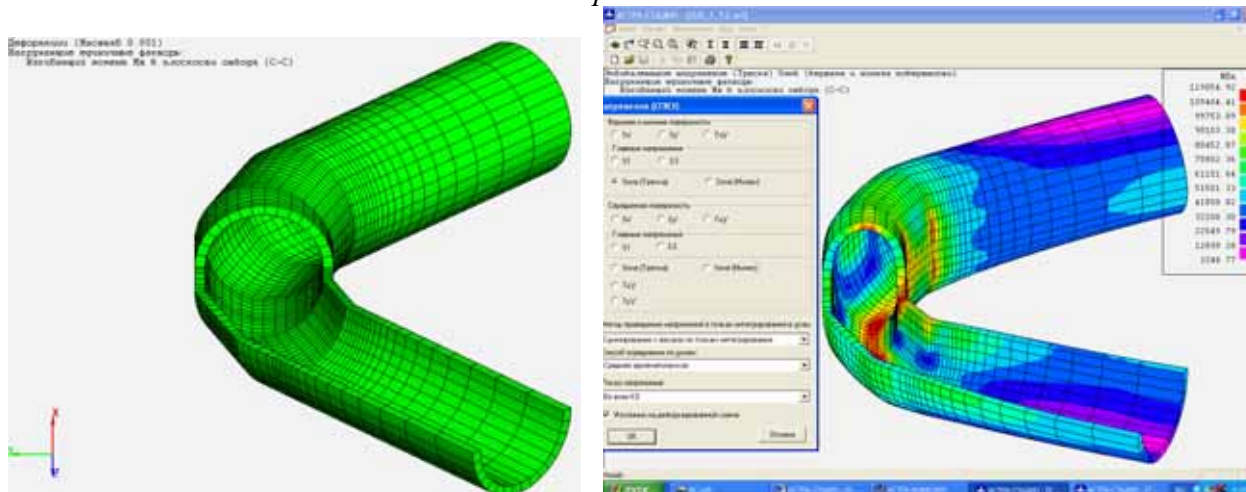


Рис. 4.3 АСТРА-СТАДИО. Деформированное (а) и напряженное (б) состояния при заданных сочетаниях нагрузок, расчетная группа напряжений (в, этап 3, группа $(\sigma_{\text{aF}})_K$) тройникового соединения

Отвод, гиб, колено (с эллиптичностью и разностенностью)



Секторный отвод



Косой стык

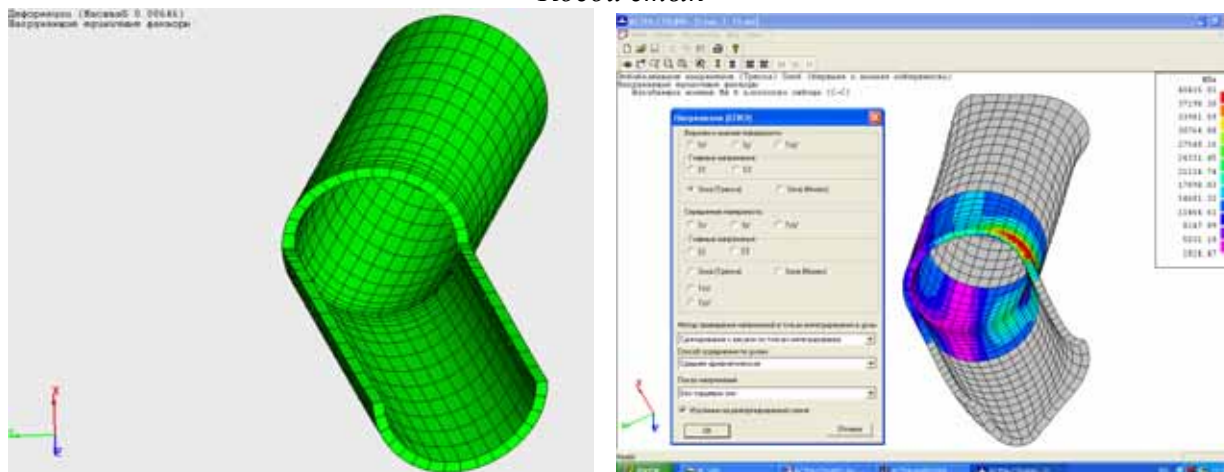
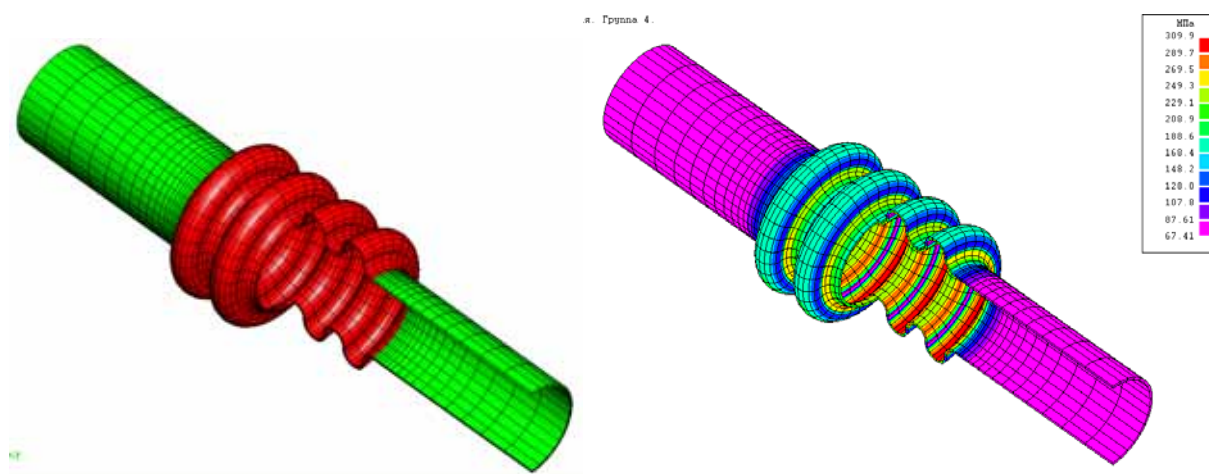


Рис. 4.4 АСТРА-СТАДИО. Конечноэлементные оболочечные модели, расчетные напряжения и оценки прочности деталей трубопроводов

Линзовый и сильфонный компенсатор



Переход конический концентрический

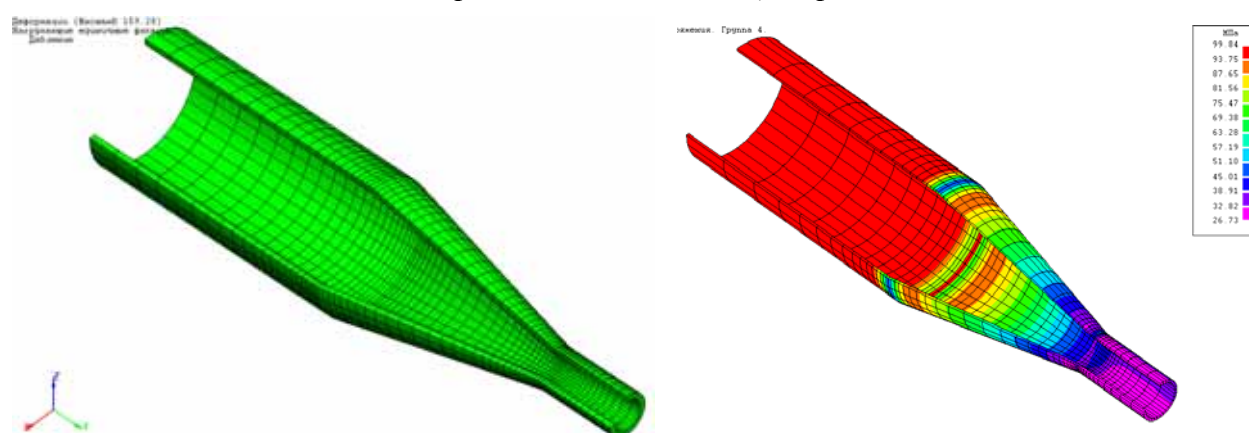


Рис. 4.5 АСТРА-СТАДИО. Конечноэлементные оболочечные модели, расчетные напряжения и оценки прочности деталей трубопроводов

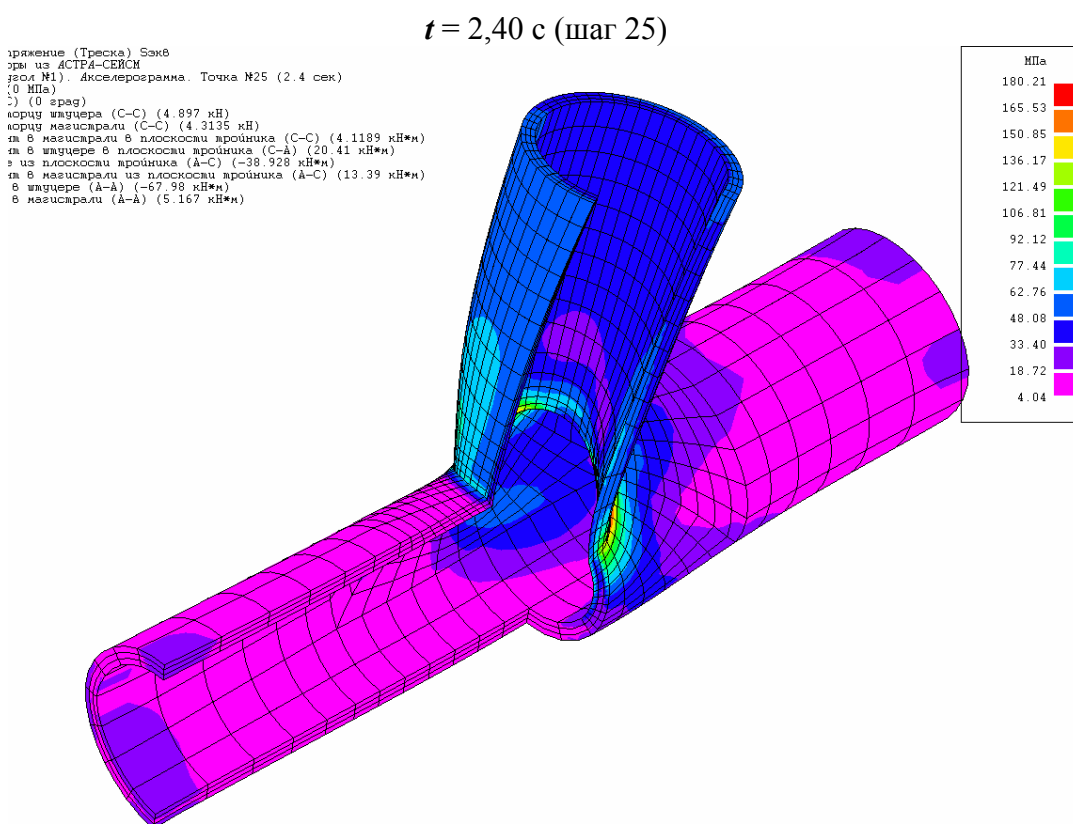
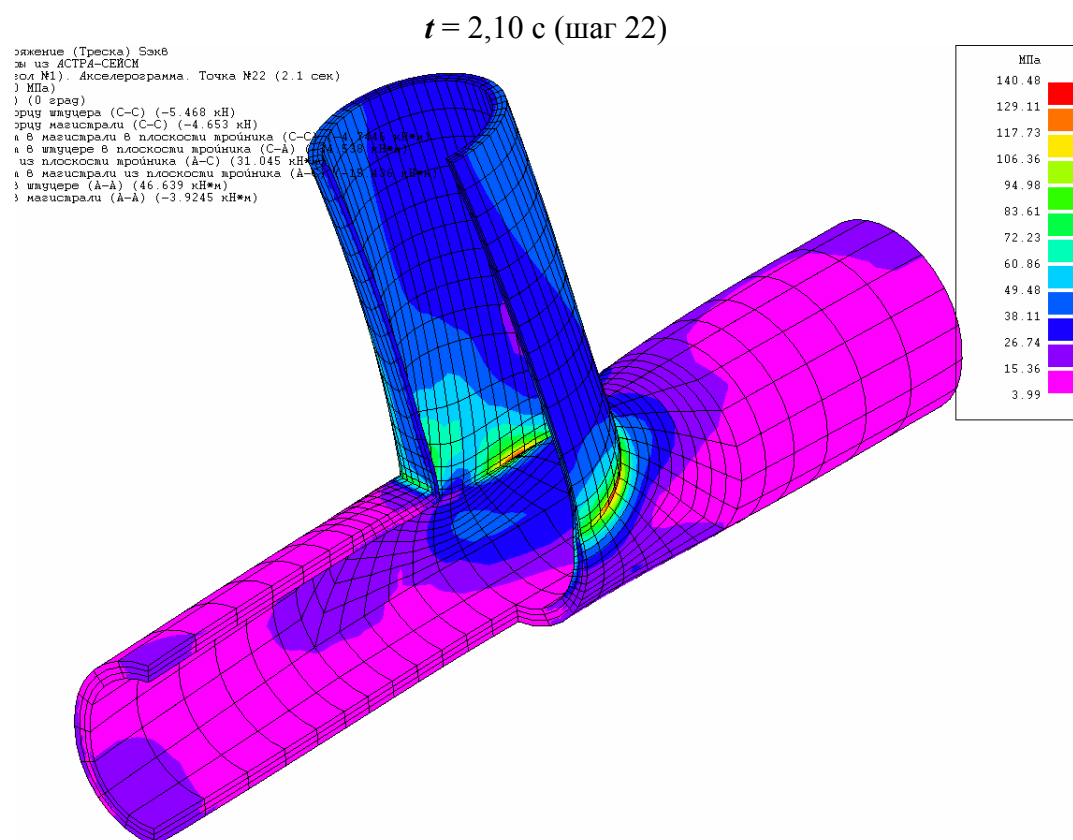


Рис. 4.6 АСТРА-СТАДИО. Кадры видеоролика динамики НДС тройника от сейсмического воздействия, заданного акселерограммой

5. Обоснование расчетной методики

5.1 Методика, реализованная в программном комплексе АСТРА-АЭС'2009 (АСТРА-СТАЦ, -ФОРМ, -СЕЙСМ, -ВИБР, -ДИН), основывается на едином алгоритме расчета произвольных разветвленных и протяженных трубопроводных систем (определение перемещений, нагрузок на опоры и усилий в сечениях) как линейно-упругих пространственных многократно статически неопределимых стержневых систем, изложенном в РТМ 108.020.01–75 [6] и модифицированном для:

- 1) повышения точности и вычислительной эффективности для сильно разветвленных, протяженных и (или) контрастных по жесткости систем;
- 2) учета нагрузок и опор не только в сечениях суперэлементов (участков), но и в узлах соединения суперэлементов;
- 3) учета повышенной оболочечной податливости тройниковых соединений и врезок трубопроводов в оборудование;
- 4) учета стержневых элементов произвольного (некольцевого) сечения для моделирования сложных опорных конструкций и оборудования в составе трубопроводных систем;
- 5) учета трения скольжения и качения в опорных конструкциях, возможного отрыва трубопроводов от них (для односторонних по вертикали опор);
- 6) расчета на сейсмические, вибрационные и динамические воздействия;
- 7) формирования и учета т.н. матричных суперэлементов (жесткости, масс и нагрузок, процедура Крейга-Бемптона).

Уточненный расчет температурного и напряженно-деформированного состояний деталей трубопроводов (АСТРА-СТАДИО) основан на пространственно-оболочечных и трехмерных схемах “традиционного” метода конечных элементов в перемещениях в предположении упругой работы материала и малости деформаций-перемещений.

5.2 В качестве расчетных параметров определяются и рассматриваются:

- 1) перемещения (статика – для всех расчетных этапов) и ускорения сечений и узловых точек модели;
- 2) статические и динамические нагрузки на опорные конструкции (пружины, опоры скольжения и качения, неподвижные и мертвые опоры, оборудование и строительные конструкции);
- 3) статические и динамические внутренние усилия (силы, моменты) в сечениях расчетной модели;
- 4) расчетные приведенные напряжения в сечениях/элементах и допускаемые напряжения нормативно регламентированных групп.
- 5) значимые собственные частоты и формы колебаний системы (заданное число или в заданном частотном диапазоне).

5.3. Следующие факторы при построении расчетной модели могут влиять на точность полученного решения:

- достоверность физико-механических характеристик материалов;
- подробность моделирования элементов опорно-подвесной системы (жесткости, коэффициенты трения и т.п.) и деталей (трубы, отводы, тройники, переходы, компенсаторы, днища-крышки и т.п.) ТС;
- степень дискретизации статической и динамической суперэлементной модели ТС и КЭ-модели детали;
- соотношение между величинами жесткости отдельных элементов расчетной модели;
- число и состав форм собственных колебаний, учитывающихся при решении динамических задач (в частности, учет высших форм – «потерянной массы»);
- величина шага интегрирования при расчете методом динамического анализа на сейсмические и силовые динамические воздействия;

5.4 Влияние перечисленных и ряда других факторов на точность и устойчивость решения исследуется в верификационных задачах (см. раздел 6, Приложения 1, 2 и, отчасти, 3). Здесь же повторим известные положения по построению расчетной модели.

5.4.1. Расчетная пространственная стержневая модель строится исходя из условия представительной аппроксимации реальной геометрии, нагрузок и НДС трубопроводной системы при, по возможности, минимизации числа узлов, суперэлементов, элементов и сечений приведения масс. Расчетные сечения (и элементы) суперэлементов должны отслеживать его пространственную конфигурацию (начальные и конечные сечения криволинейных элементов, переходов, линзовых компенсаторов, арматуры и др.), изменения геометрических характеристик сечения (диаметров, толщин, прибавок), физико-механических свойств и параметров распределенных нагрузок (погонная масса, температура, давление), быть приурочены к местам приложения связей (пружинные подвески и растяжки, жесткие подвески, опоры скольжения, направляющие и катковые опоры, сейсмо- и виброопоры) и сосредоточенных нагрузок, к сечениям, для которых выполняется монтажная растяжка и/или заданы вынужденные перемещения. Выбор сечений приведения масс для динамической суперэлементной модели ТС (помимо “обязательных” – узлов суперэлементной модели и сечений действия динамических нагрузок) определяется из анализа “парциальных” собственных частот ветвей трубопроводной системы, исходя из требования реализации всех собственных форм колебаний в энергетически (сейсмически, вибрационно, динамически) значимом частотном диапазоне.

5.4.2. Параметры конечноэлементных моделей расчетного фрагментов деталей (тройников, гибов-отводов, переходов, линзовых компенсаторов – АСТРА-СТАДИО) выбираются, исходя из требований точности определения местных напряжений в зоне их интенсификации и адекватного сеточного представления “стержневых” торцевых нагрузок. Так, для тройников: длины штуцера (l) и трубы (L) – $l > 2d$, $L > 2D$, число слоев криволинейных квадратичных СПКЭ или ИПКЭ по четверти окружности штуцера – от $8 \div 10$ для $D/d \geq 2$ до $12 \div 16$ для $D/d = 1$, в продольных направлениях штуцера и трубы – от $8 \div 10$ для толстостенных до $12 \div 16$ для тонкостенных тройников, размер слоя элементов у линии стыка (горловины) в направлении поперек нее – от $0,1 \sqrt{rh}$ в штуцере и $0,1 \sqrt{RH}$ в трубе для тонкостенных до $0,4 \sqrt{rh}$ и $0,4 \sqrt{RH}$ для толстостенных. Для толстостенных тройников рекомендуется использовать многослойные по толщине схемы изопараметрических КЭ (от 3-х до 5-7-и слоев). По “умолчанию” системой выставлены значения в указанном диапазоне.

5.4.3. При решении обобщенной частичной проблемы собственных значений должны определяться для дальнейшего учета в динамических расчетах собственные частоты и формы колебаний ТС в энергетически значимом частотном диапазоне (от 0 до 33 Гц – для сейсмических расчетов, в характерных для рассматриваемых вибрационных и динамических процессов диапазоне частот).

5.4.4. Величина шага интегрирования Δt при решении динамических задач спектральным методом выбирается из условия

$$\Delta t = \min \{ T_{KI} / 6, \Delta t_a / n \}$$

где Δt_a – шаг цифровки акселерограмм или силовых нагрузок,

$T_{KI} = 2\pi / \omega_{KI}$ – период (с) высшей учитываемой собственной формы колебаний;

$n = 1$ – при малом шаге цифровки нагрузок-воздействий (более 6 точек на характерный период), $n = 2 \div 6$ – при “грубой” цифровке.

6. Матрицы верификации

Рассчитываемые параметры: температуры (для деталей), статические/температурные и динамические перемещения, ускорения, собственные частоты и формы колебаний, статические и динамические нагрузки на опорные конструкции/оборудование, статические и динамические внутренние усилия (значимые силы и моменты), приведенные и допускаемые и напряжения нормативных групп с оценкой статической, циклической, сейсмической и вибрационной прочности.

Методика расчета:

1) трубопроводные системы – суперэлементный подход метода перемещений, методы начальных параметров и прогонки (для каждого неразветвленного суперэлемента), метод "фиктивных температур" для учета ползучести и релаксации высокотемпературных трубопроводов, блочный метод Ланцоша для решения частичной проблемы собственных значений, линейно-спектральный метод сейсмического расчета, метод динамического анализа с разложением по значимым собственным формам колебаний (динамического анализ), шагово-итерационные процедуры решения нелинейных статических задач (трение-отрыв от опор).

2) детали (тройники, отводы, переходы, линзовые компенсаторы) – метод конечных элементов в перемещениях, пространственно-оболочечные и объемные КЭ-модели, ...

Диапазон изменения параметров: упругая область (физическая линейность), малые деформации-перемещения (геометрическая линейность), нелинейная работа опорно-подвесной системы (трение скольжения/качения и отрывы) при статических, температурных, сейсмических, вибрационных и динамических воздействиях.

“Погрешности” (расхождения) полученных результатов по АСТРА-АЭС'2009 с “эталонными” решениями определяются как (δ ,%)

$$\delta = |(A - B) / B| \cdot 100,$$

где A – расчетный АСТРА-АЭС'2009-параметр, B – величина “эталонного” решения.

ПК АСТРА-АЭС'2009. Матрица верификации №1

№	Наименование теста	Сочетание нагрузок/воздействий	Тип проверки результатов	Элементы	Оцениваемые параметры	Максимальное расхождение, %	
						Эталон	АСТРА-АЭС 6.1
1	Расчет консольного полукольца (гиб, колено трубопровода) на сосредоточенную нагрузку в плоскости. Сопоставление с аналитическим и численным решением	Сосредоточенная статическая нагрузка	(1), (2-ANSYS), (7)	Отвод (гиб, колено), прямая труба, мертвая опора (заделка)	Перемещения	0.64	0.00
					Опорные реакции	0.00	0.00
2	Расчет консольного полукольца (гиб, колено трубопровода) на сосредоточенную нагрузку из плоскости. Сопоставление с аналитическим и численным решением	Сосредоточенная статическая нагрузка	(1), (2-ANSYS), (7)	Отвод (гиб, колено), прямая труба, мертвая опора (заделка)	Перемещения	0.87	0.00
					Опорные реакции	0.00	0.00
3	Защемленное полукольцо под собственным весом. Сопоставление с другими программами	Распределённая статическая нагрузка (собственный вес)	(2 - ANSYS), (5), (7)	Отвод (гиб, колено), прямая труба, мертвая опора (заделка)	Перемещения	0.18	0.09
					Опорные реакции	3.81	0.00
4	Консоль, нагруженная силой на свободном конце (сечение общего вида). Сопоставление с аналитическим решением	Сосредоточенная статическая нагрузка	(1), (7)	Стержень не кольцевого сечения, мертвая опора (заделка)	Перемещения	0.00	0.00
5	Консоль под равномерно распределённой нагрузкой (сечение общего вида). Сопоставление с аналитическим решением	Распределённая статическая нагрузка (собственный вес)	(1), (7)	Стержень не кольцевого сечения, мертвая опора (заделка)	Перемещения	0.01	0.08
6	Консольная балка, нагруженная на конце крутящим моментом (сечение общего вида). Сопоставление с аналитическим решением	Сосредоточенная статическая нагрузка	(1), (7)	Прямая труба, стержень не кольцевого сечения, мертвая опора (заделка)	Перемещения	0.00	0.00
7	Опорные конструкции, заданные в местной системе координат. Статический расчет	Сосредоточенная статическая нагрузка	(6), (7)	Прямая труба, направляющая опора, мертвая опора (заделка), опора общего вида	Перемещения, реакции в опорах, напряжения	0.00	0.00
8	Собственные частоты	Собственные частоты и формы колебаний	(6), (7)	Прямая труба, направ-	Собственные частоты	0.00	0.00

№	Наименование теста	Сочетание нагрузок/воздействий	Тип проверки результатов	Элементы	Оцениваемые параметры	Максимальное расхождение, %	
						Эталон	АСТРА-АЭС 6.1
	тоты прямолинейной трубы с опорными конструкциями, заданными в местной системе координат			ляющая опора, мертвая опора (заделка), опора общего вида			
9	Собственные частоты стержня с поперечным сечением общего вида. Сопоставление с аналитическим решением	Собственные частоты и формы колебаний	(1), (5), (7)	Стержень не кольцевого сечения, прямая труба, мертвая опора (заделка)	Собственные частоты	0.09 низшие 0.63 – высшие	0.27 – низшие 3.97 – высшие
10	Собственные частоты пространственного криволинейного стержня. Сопоставление с аналитическим решением	Собственные частоты и формы колебаний	(1), (3), (7)	Прямая труба, отвод (гиб, колено), мертвая опора (заделка), неподвижная опора (шарнир)	Собственные частоты	1.42	0.86
11	Вынужденные установившиеся колебания консольно закрепленного стержня (АСТРА-ВИБР). Сопоставление с аналитическим решением	Сосредоточенная динамическая нагрузка	(1), (7)	Прямая труба, мертвая опора (заделка)	Перемещения	12.02	0.16
12	Вынужденные неустановившиеся колебания консольно закрепленного стержня. Сопоставление с другими программами	Сосредоточенная динамическая нагрузка	(2- ANSYS) (7)	Прямая труба, мертвая опора (заделка)	Перемещения	4.53	0.00
13	Расчет собственных частот и форм разветвленной трубопроводной системы АЭС с РБМК (подвода и сброса пара за ГПК)	Собственные частоты и формы колебаний	(2 - РАМ-ПА), (7)	Прямая труба, отвод (гиб, колено), тройник, пружинная подвеска, мертвая опора (заделка), опора общего вида	Собственные частоты	12.45	1.50
14	Расчет собственных частот и форм разветвленной трубопроводной системы АЭС с РБМК (приема паровых сбросов от ГПК)	Собственные частоты и формы колебаний	(2 – РАМПА), (7)	Прямая труба, отвод (гиб, колено), тройник, мертвая опора (заделка), направляющая опора, опора общего вида	Собственные частоты	24.49	0.95
15	Проверка правильности определения расчетных усилий и напряжений в элементах трубопровода	Температура, давление, распределённая статическая нагрузка (собственный вес)	(1), (7)	Прямая труба, отвод (гиб, колено), тройник, мертвая опора (заделка)	Напряжения	0.04	0.00
16	Проверка правильности	Сейсмическое воз-	(2-	Прямая тру-	Собственные	1.22	0.00

№	Наименование теста	Сочетание нагрузок/воздействий	Тип проверки результатов	Элементы	Оцениваемые параметры	Максимальное расхождение, %	
						Эталон	АСТРА-АЭС 6.1
	ности расчета частот и форм собственных колебаний и сейсмической реакции	действие	CANPIPE), (7)	ба, отвод (гиб, колено), мертвая опора (заделка)	частоты		
17	Расчет трубопровода с учетом трения в опорах	Температура, сосредоточенная статическая нагрузка	(1), (3), (7)	Прямая труба, отвод (гиб, колено), опора трения двусторонняя, мертвая опора (заделка)	Перемещения	5.40	0.00
					Силы трения	3.82	0.64
18	Моделирование тонкостенного тройникового соединения с учетом оболочечной податливости. Сопоставление с аналитическими формулами	Сосредоточенные статические нагрузки (торцевые моменты)	(1), (6)	Тройник, прямая труба, жесткий элемент-вставка, мертвая опора (заделка)	Перемещения	3.68	–
19	Моделирование линзовых/сильфонных компенсаторов	Сосредоточенная статическая нагрузка	(6)	Компенсатор линзовый/сильфонный, прямая труба, мертвая опора (заделка)	Перемещения	0.00	–
20	Моделирование конических переходов	Сосредоточенная статическая нагрузка	(6)	Переход, прямая труба, мертвая опора (заделка)	Перемещения	0.00	–
21	Моделирование днищ (крышек, доннышек)	Внутреннее давление	(1)	Прямая труба, доннышко (днище, крышка), мертвая опора	Внутренние усилия	0.00	
22	Моделирование арматуры с учетом штока (привода). Сопоставление с аналитическим решением.	Весовая нагрузка	(1), (6)	Прямая труба, арматура, мертвая опора (заделка)	Опорные нагрузки (реакции)	0.00	
					Собственные частоты и формы	0.00	
23	Моделирование односторонних опор с трением, жестких подвесок и амортизаторов	Внутреннее давление, температура, распределенная весовая нагрузка, расчет собственных частот и форм	(6)	Прямая труба, отвод (гиб, колено), опора трения односторонняя, жесткая подвеска, амортизатор, опора общего вида, мертвая опора (заделка)	Перемещения	0.00	
					Напряжения	0.00	
					Собственные частоты и формы	0.00	
24	Расчетная проверка герметичности фланцевых соединений	Внутреннее давление, сосредоточенная статическая сила	(1)	Прямая труба, мертвая опора (заделка), фланец	Условное давление	0.00	

№	Наименование теста	Сочетание нагрузок/воздействий	Тип проверки результатов	Элементы	Оцениваемые параметры	Максимальное расхождение, %	
						Эталон	АСТРА-АЭС 6.1
25	Расчет НДС и оценка прочности высокотемпературных трубопроводов. Сопоставление с аналитическим решением	Температура, внутреннее давление, распределенная статическая нагрузка (собственный вес), собственные линейные смещения концов трубопровода	(1), (2 - РАМПА), (3)	Прямая труба, отвод (гиб, колено), мертвая опора (заделка)	Реакции в опорах	3.35	
					Изгибающий момент	0.84	
26	Расчет трубопроводной системы на сейсмическое воздействие по линейно-спектральной теории с учетом высших собственных форм колебаний (учета «потерянной массы»)	Сейсмическое воздействие (спектр ответа)	(2 - ANSYS), (3)	прямая труба, отвод (гиб, колено), опора общего вида	Собственные частоты	4.49	
					Реакции в опорах	5.76 (31.45)	
27	Трехмерный расчет температурного поля и термонапряженного состояния ортогонального Т-образного тройникового соединения (АСТРА-СТАДИО)	Температура, конвективный теплообмен	(2 - ANSYS)	Объемный 20-узловой шестигранный КЭ изопараметрического семейства	Температура	0.01	
					Напряжения	1.82	
28	Уточненный расчет ортогонального сварного тройникового соединения на статические нагрузки (АСТРА-СТАДИО)	Внутреннее давление, изгибающие моменты	(4), (3)	Оболочечный 8-ми узловый СПКЭ; 16, 20-ти узловый объемный ИПКЭ	Напряжения (коэффициенты интенсификации)	5.00	
29	Уточненный расчет криволинейной трубы с примыкающими прямыми участками (гиба) на статические нагрузки (АСТРА-СТАДИО)	Изгибающие моменты	(1), (3)	Оболочечный 8-ми узловый СПКЭ	Напряжения (коэффициенты интенсификации)	12.73	
30	Уточненный расчет конического перехода на статические нагрузки (АСТРА-СТАДИО)	Внутреннее давление, изгибающий момент	(2 - ANSYS)	Оболочечный 8-ми узловый СПКЭ	Напряжения	11.00	
31	Уточненный расчет линзового компенсатора на статические нагрузки (АСТРА-СТАДИО)	Внутреннее давление, изгибающий момент	(2 - ANSYS)	Оболочечный 8-ми узловый СПКЭ	Напряжения	3.62	
32	Суперэлементный динамический расчет трубопроводной системы. Алгоритм Крейга-Бемптона (формирование и учет редуцированных матриц)	Расчет собственных частот и форм	(6)	Прямая труба, стержень не кольцевого сечения, отвод (гиб, колено), тройник, арматура, пружинная подвеска, односторонняя опора	Собственные частоты и формы	0.00	

№	Наименование теста	Сочетание нагрузок/воздействий	Тип проверки результатов	Элементы	Оцениваемые параметры	Максимальное расхождение, %	
						Эталон	АСТРА-АЭС 6.1
				трения, мертвая опора (заделка), матричный суперэлемент Крейга-Бемптона			
33	Применение матричных суперэлементов для моделирования деталей трубопроводов (на примере криволинейных труб. АСТРА-СТАДИО)	Температура, сосредоточенная статическая нагрузка	(6)	Прямая труба, отвод (гиб, колено), мертвая опора, матричный суперэлемент Крейга-Бемптона	Перемещения	12.64	
34	Тесты на размерность задачи	Расчет собственных частот и форм	(5)	Прямая труба, стержень неколецевого сечения, отвод (гиб, колено), тройник, опора трения односторонняя, опора трения двусторонняя, мертвая опора, арматура, пружинная подвеска	Собственные частоты и формы	0.00	
35	Суперэлементный динамический расчет трубопроводной системы. Алгоритм Крейга-Бемптона (формирование и учет редуцированных матриц)	Расчет собственных частот и форм	(6)	Прямая труба, тройник, мертвая опора (заделка), матричный суперэлемент Крейга-Бемптона	Собственные частоты и формы	0.00	

Примечание:

- (1) – сравнение с аналитическим решением (в т.ч., с нормативными формулами);
 (2) – сравнение с альтернативными аттестованными ПС;
 (3) – данные из литературных источников;
 (4) – эксперимент;
 (5) – анализируется сходимость решения в зависимости от качества (подробности) расчетной модели;
 (6) – анализируется инвариантность решения по отношению к конкурирующим вариантам моделирования;
 (7) – сравнение с ранее аттестованной версией ПС АСТРА-АЭС 6.1.

ПК АСТРА-АЭС'2009. Матрица верификации №2**Элементы трубопроводной системы**

Элемент ТС	Номера верификационных примеров
Прямая труба	1, 2, 3, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 32, 33, 34
Отвод (гиб, колено)	1, 2, 3, 10, 13, 14, 15, 16, 17, 23, 25, 26, 32, 33, 34
Тройник	13, 14, 15, 18, 32, 34
Компенсатор (линзовый/сильфонный)	19
Переход	20
Фланец	24
Донышко (днище, крышка)	21
Арматура	22, 32, 34
Опора трения односторонняя	23, 32, 34
Опора трения двусторонняя	17, 34
Опора трения направляющая	7, 8, 14
Неподвижная опора (шарнир)	10
Опора мертвая (заделка)	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 32, 33, 34
Пружинная подвеска	13, 32, 34
Жесткая подвеска	23
Опора общего вида	7, 8, 13, 14, 23, 26
Амортизатор	23
Стержневой общего вида (некольцевого сечения)	4, 5, 6, 9, 32, 34
Жесткий элемент (вставка)	18
Матричный суперэлемент (Крейга-Бемптона)	32, 33, 35

Конечные элементы модели деталей трубопроводов (АСТРА-СТАДИО)

КЭ	Номера верификационных примеров
Оболочечный 8-ми узловый СПКЭ	28, 29, 30, 31
Трехмерный 16-ти узловый ИПКЭ	28
Трехмерный 20-ти узловый ИПКЭ	27, 28

ПК АСТРА-АЭС'2009. Матрица верификации №3 (элемент ТС/ вид расчета / номер примера)

Вид расчета	Прямая труба	Гиб (отвод)	Тройник	Компенсатор	Переход	Фланец	Арматура	Доннышко (днище, крышка)	Опора трения одно-сторонняя	Опора трения двусторонняя	Опора трения направляющая	Неподвижная опора (шарнир)	Опора мертвая (заделка)	Пружинная подвеска	Жесткая подвеска	Опора общего вида	Амортизатор	Стержень общего вида (нескольцевого сечения)	Жесткая вставка	Матричный суперэлемент	Оболочечный СПКЭ (8 узлов)	Трехмерный ИПКЭ (16 узлов)	Трехмерный ИПКЭ (20 узлов)
Расчет на статическую и циклическую прочность (АСТРА-СТАЦ)	1, 2, 3, 6, 7, 15, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 33	1, 2, 3, 15, 17, 25, 33	15, 18	19	20	24	22	21	23	17	7		1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 15, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 33		23	7	23	4, 5, 6	18	33			
Расчет собственных частот и формы колебаний (АСТРА-ФОРМ)	8, 9, 10, 13, 14, 16, 23, 26, 32, 34	10, 13, 14, 16, 23, 26, 32, 34	13, 14, 32, 34				32, 34		32, 34	34	8, 14	10	8, 9, 10, 13, 14, 16, 23, 32, 34, 35	13, 32, 34		8, 13, 14, 23, 26	23	9, 32, 34		32			

Вид расчета	Прямая труба	Гиб (отвод)	Тройник	Компенсатор	Переход	Фланец	Арматура	Доннышко (днище, крышка)	Опора трения одно-сторонняя	Опора трения двух-сторонняя	Опора трения направляющая	Неподвижная опора (шарнир)	Опора мертвая (заделка)	Пружинная подвеска	Жесткая подвеска	Опора общего вида	Амортизатор	Стержень общего вида (нескольцевого сечения)	Жесткая вставка	Матричный суперэлемент	Оболочечный СПКЭ (8 узлов)	Трехмерный ИПКЭ (16 узлов)	Трехмерный ИПКЭ (20 узлов)
Расчет на сейсмические воздействия (АСТРА-СЕЙСМ)	16, 26	16, 26											16			26							
Расчет на вибропрочность (АСТРА-ВИБР)	11												11										
Расчет на Динамические воздействия (АСТРА-ДИН)	12												12										
Уточненный расчет деталей трубопровода (АСТРА-СТАДИО)																					28, 29, 30, 31	28	27, 28

7. Описание верификационных примеров (задач, тестов)

Подробное описание верификационных примеров (задач, тестов), включенных в матрицы верификации (см. раздел 6), приведено в Приложениях 1 (подтверждение возможностей ранее аттестованной версии АСТРА-АЭС 6.1) и Приложении 2 (обоснование заявленных новых возможностей АСТРА-АЭС'2009).

В Приложении 3 собраны некоторые показательные практические примеры проектируемых-эксплуатируемых трубопроводных систем (пространственных разветвленных, протяженных, с включением оборудования и опорных конструкций, большой размерности), демонстрирующие возможности использования верифицируемого “промышленного” программного комплекса в проектно-конструкторских организациях и прогресс в численном моделировании вообще.

8. Результаты верификации

8.1. Результаты верификации ПК АСТРА-АЭС представлены в последней колонке матрицы верификации 1 (см. раздел 6), а также в Приложениях 1 и 2 настоящего отчета.

8.2. “Погрешности” (расхождения) полученных результатов по АСТРА-АЭС'2009 с “эталонными” решениями определяются как (δ ,%)

$$\delta = | (A - B) / B | \cdot 100,$$

где A – расчетный АСТРА-параметр, B – величина “эталонного” решения.

8.3. Практическая точность расчётов определяется точностью задания физико-механических характеристик материалов и точностью самой модели (в особенности, при учете нелинейных факторов).

Погрешности расчетных параметров (значимых компонент) по результатам тестирования имеют следующие значения:

- | | |
|--|-----------|
| 1) температуры (для деталей ТС) | – до 1%, |
| 2) статические перемещения, усилия и напряжения | – до 5%, |
| 3) собственные частоты колебаний | – до 2%, |
| 4) сейсмические реакции по линейно-спектральной теории | – до 10%, |
| 5) параметры динамического расчета | – до 15%. |

9. Проект аттестационного паспорта

Федеральный надзор России по ядерной и радиационной безопасности
Научно технический центр по ядерной и радиационной безопасности

АТТЕСТАЦИОННЫЙ ПАСПОРТ ПРОГРАММНОГО СРЕДСТВА

№ 614
регистрационный номер ПС в Центре
по организации экспертизы ПС

№ _____
регистрационный номер
аттестационного паспорта ПС

16.09.2009
дата регистрации

дата выдачи

Название программного средства: Комплекс программ АСТРА-АЭС (версия АСТРА-АЭС'2009). Автоматизированный расчет низко- и высокотемпературных трубопроводных систем на статическую и циклическую прочность, на сейсмические воздействия, вибропрочность и неустановившиеся динамические процессы в соответствии с требованиями Норм ПНАЭ Г-7-002-86.

ЭВМ: IBM-совместимые ПЭВМ

Операционная система: Windows 9x/2000/NT/XP/Vista

Языки программирования: Intel Visual Fortran 11.1, Builder C++, Visual C++

Имя авторов: Белостоцкий А.М., Воронова Г.А., Потапенко А.Л., Шишкина А.Н.,
Клепец О.Ю., Аул А.А., Островский К.И.

Разработчик: ЗАО «Научно-исследовательский центр СтаДиО» (ЗАО НИЦ СтаДиО)

Заявители: ЗАО НИЦ СтаДиО, ОАО «Атомэнергопроект», ОАО «ОКБ Гидропресс»

Решение Экспертного Совета: Аттестовать комплекс программ АСТРА-АЭС
на срок 10 лет.

Приложение: на 8 стр.

**Председатель Экспертного Совета
по аттестации ПС при Ростехнадзоре**

И.Р. Уголева

ПРИЛОЖЕНИЕ К АТТЕСТАЦИОННОМУ ПАСПОРТУ ПС № ____

Комплекс программ АСТРА-АЭС, версия АСТРА-АЭС'2009

1. Перечень регистрируемых программных модулей, их регистрационные номера в Центре по организации экспертизы ПС.

Программный комплекс АСТРА-АЭС не содержит отдельно регистрируемых модулей, инвентарный номер **614 ОФАП-ЯР от 16.09.2009.**

2. Назначение и область применения ПС.**2.1. Назначение.**

ПК АСТРА-АЭС предназначен для автоматизированного расчета пространственных разветвленных и протяженных трубопроводных систем на статическую и циклическую (для однопакетного нагружения) прочность, на сейсмические воздействия, заданные спектрами ответа и акселерограммами, на вибропрочность для установившихся режимов колебаний и на неустановившиеся динамические процессы в соответствии с требованиями действующих “Норм расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. ПНАЭ Г-7-002–86”.

Трубопроводные системы (ТС) рассматриваются как пространственно-стержневые (с учетом оболочечных эффектов в гibaх-коленах и ортогональных тройниках) и линейно-упругие (с жесткостными и инерционными характеристиками, соответствующими заданному распределению давления и температуры, и с возможным учетом в статических расчетах эффектов трения Кулона и отрыва в опорах). ТС может содержать замкнутые контуры, свободные, шарнирно опертые и защемленные концы, промежуточные опоры (мертвые, пружинные, скользящие и катковые, включая односторонние опоры и жесткие тяги), линзовые и сильфонные компенсаторы, стержневые элементы произвольного сечения и другие элементы (включая оборудование и нестандартные опорные конструкции), характерные для трубопроводов АЭС.

ПК АСТРА-АЭС позволяет проводить расчеты как с учетом суммарной прибавки к толщине стенки (Приложение 5 Норм ПНАЭ Г-7-002–86), так и по номинальным размерам (п.5.1.1 Норм).

Задаются и учитываются в статических расчетах следующие нагрузки и воздействия для режимов НЭ (нормальных условий эксплуатации), ННЭ (нарушения нормальных условий эксплуатации), ГИ (гидроиспытаний) и АС (аварийных ситуаций):

- внутреннее или внешнее давление,
- статические силы и моменты в произвольных сечениях,
- распределенная нагрузка по 3-м направлениям (включая весовую от продукта, металла и изоляции),
- распределенный момент от неравномерного по высоте сечения нагрева (например, при стратифицированных течениях),
- температура нагрева (охлаждения),
- температурные перемещения опор,
- монтажный натяг (растяг).

Для динамических задач задаются амплитудно-частотные и (или) временные характеристики сейсмических, вибрационных (гидродинамических), импульсно-переходных и аварийных (МПА) воздействий.

Комплекс программ АСТРА-АЭС (аттестуемая часть) состоит из 7-и программных модулей (ПРЕ-АСТРА, АСТРА-СТАЦ, АСТРА-ФОРМ, АСТРА-СЕЙСМ, АСТРА-ВИБР, АСТРА-ДИН и ПОСТ-АСТРА), имеющих единые методические и нормативные основы, способ построения расчетной модели, совместимых по исходным данным, их заданию и форме представления результатов, и модуля АСТРА-СТАДИО для уточненного расчета деталей трубопроводов.

1) ПРЕ-АСТРА – многофункциональный “препроцессор” комплекса, обеспечивающий диалоговый многооконный режим задания, генерации и визуализации рациональных

пространственно-стержневых расчетных моделей трубопроводных систем (с возможностями использования баз данных по материалам, опорам, пружинным подвескам и фланцевым соединениям, ранее заданных моделей, расстановки опор и распределение динамических степеней свободы), связь с предыдущими версиями АСТРА-НОВА, импорт-экспорт моделей, поиск и отображение коллизий (пересечений, касаний и недопустимо малых зазоров труб), глубокая диагностика ошибок;

2) АСТРА-СТАЦ – расчет на статическую и циклическую прочность низко- и высокотемпературных (в соответствии с методикой, приведенной в [1, 2]) трубопроводов АЭС. Для опорных конструкций, задаваемых в общей и местной системах координат, проводится рациональный выбор их характеристик. Пружинные подвески сортамента МВН-043–63, ОСТ 108.764.01–80, ОСТ 24.125.109–01, “спецпружины” (ВНИПИЭТ) и LISEGA могут иметь заданные характеристики или характеристики, выбранные программно путем определения нагрузок в рабочем и холодном состоянии, структуры пружинных цепей, их затяжки и осадки; возможен учет наклона пружинных подвесок при температурных перемещениях трубопровода. Для «спецпружины» учитываются также удлинения тяг и изменение термомеханических характеристик пружин при нагреве. Предусмотрены все практически значимые виды и режимы прочностных расчетов на нормативно регламентируемые сочетания квазистатических и малоцикловых воздействий: давления, распределенной массы и сосредоточенных нагрузок, температурного нагрева трубопровода, смещений его заземленных концов, монтажного растяга и др.

Результатами расчета для каждого этапа являются перемещения (линейные и угловые), приведенные и допускаемые напряжения во всех расчетных сечениях участков (включая гибы и колена) и в тройниковых узлах, вычисленные по упрощенным и уточненным методикам Приложения 5 Норм ПНАЭ Г-7-002-86, оценки статической и циклической (для однопакетного нагружения) прочности, силовые факторы (в общей и местной системах) в заданных сечениях, нагрузки на оборудование (концевые опоры) и узлы участков, а также на опорные конструкции, пружинные подвески и жесткие тяги в рабочем и холодном состояниях, режиме гидро(пнеumo)испытаний; типы и характеристики выбранных пружинных подвесок.

3) АСТРА-ФОРМ – позволяет определить требуемое число (или в требуемом частотном диапазоне) низших собственных частот и форм колебаний трубопроводной системы для жесткостных и инерционных характеристик, соответствующих заданному распределению давления и температуры и "статусу" опор. Массы трубопроводов и технологического оборудования представляются в виде сосредоточенных масс и массовых моментов, приведенных в заданные точки (сечения) расчетной модели или в сечения, генерируемые средствами препроцессора ПРЕ-АСТРА (до шести степеней свободы).

Вычисленные собственные частоты и формы колебаний могут либо непосредственно использоваться при оценке вибропрочности (отстройка от резонанса), либо применяются программами АСТРА-СЕЙСМ, АСТРА-ВИБР и АСТРА-ДИН при расчетном анализе сейсмической, вибрационной и динамической реакции трубопроводов.

4) АСТРА-СЕЙСМ – расчет трубопроводных систем АЭС на сейсмические воздействия; только сейсмических нагрузок или суммарного действия давления, собственной массы и сейсмических нагрузок, соответствующих режимам НЭ+МРЗ и НЭ+ПЗ. В качестве сейсмического воздействия можно задавать спектры ответов и/или ответные акселерограммы землетрясения на отметке крепления трубопровода в одно- или трехкомпонентном виде.

Результатами расчета являются линейные и угловые сейсмические перемещения и ускорения, сейсмические нагрузки на пружинные подвески и опорные конструкции, приведенные напряжения групп $(\sigma_s)_1$ и $(\sigma_s)_2$ в сечениях суперэлементов ("участков") и в тройниках, силовые факторы в местной и общей системах координат. При одновременном задании нескольких вариантов сейсмических воздействий возможен выбор максимальных перемещений, напряжений и нагрузок по всем введенным воздействиям.

5) АСТРА-ВИБР – расчет на вибропрочность трубопроводных систем АЭС; проводится спектральный анализ параметров вынужденных установившихся детерминирован-

ных колебаний системы. Силовое нагружение задается для произвольных сечений схемы в полигармоническом виде. Выполняется два вида расчета:

- определение допускаемых амплитуд виброперемещений (усилий, нагрузок на опоры и оборудование) при колебаниях трубопровода по каждой учитываемой собственной форме из условия достижения допускаемого значения максимальными напряжениями;
- расчет параметров вынужденных установившихся колебаний (амплитуд перемещений, нагрузок и напряжений).

Результатами расчета являются амплитуды вибрационных перемещений и напряжений, допускаемые напряжения, силовые факторы в местной системе координат для каждой собственной или вынуждающей частоты.

6) АСТРА-ДИН – расчет трубопроводных систем АЭС на неустановившиеся динамические процессы. Определяются параметры неустановившихся вынужденных колебаний, необходимые для оценки прочности при нестационарных (переходных) режимах. Упрощенный анализ аварийных ситуаций, связанных с разрывами трубопроводов, проводится в "сильном" предположении малости (геометрическая линейность) и упругости (физическая линейность) колебаний.

Силовые динамические воздействия задаются в произвольных точках системы трубопровода в виде временных зависимостей давления и/или сосредоточенных сил. При этом жесткостные характеристики приведенной линейно-упругой системы соответствуют заданным статическому давлению и температуре.

Результатами расчета являются динамические перемещения, усилия, нагрузки на опоры и узлы, амплитуды приведенных напряжений для всех моментов времени, а также максимальные значения (за время воздействия)

7) ПОСТ-АСТРА – «постпроцессор» комплекса обеспечивает следующие режимы работы с результатами статических и динамических расчетов:

- диагностика превышений расчетными параметрами (напряжения, нагрузки на опоры, взаимные перемещения труб) критериальных значений;
- визуализация перемещений для всех значимых этапов расчета, включая определение коллизий – недопустимо малых зазоров, касаний и пересечений труб в деформированных состояниях;
- визуализация усилий и напряжений с оценкой прочности по нормативным критериям;
- визуализация нагрузок на опоры и пружины;
- анимация собственных форм колебаний и динамической реакций;
- таблицы максимальных перемещений, напряжений, усилий и нагрузок, выборки по сортаментам труб, гибов и тройников;
- полные таблицы результатов расчета;
- формирование отчета;
- сохранение, переименование и удаление файлов результатов.

8) АСТРА-СТАДИО – уточненный расчет по пространственно-оболочечным и объемным схемам метода конечных элементов (МКЭ) стационарных температурных полей и напряженно-деформированного состояния (НДС), статической, циклической и сейсмической прочности следующих тяжело нагруженных элементов трубопроводов при действии полной системы квазистатических нагрузок (внутреннее давление, температурные деформации, осевая и поперечные силы, изгибающие и крутящий моменты на границах-торцах):

- тройников ортогональных и неортогональных (косых) радиальных (сварных, штампосварных, штампованных и кованных, с накладками и плакирующим слоем);
- отводов (гибов, колен) гнутых, крутоизогнутых, штампованных и секторных с учетом эллиптичности, разностенности (переменной толщины сечения) и примыкающих прямых труб, косых стыков;
- конических переходов концентрических;
- линзовых и сильфонных компенсаторов осевых, угловых и сдвиговых (многоволновых с учетом примыкающих прямых труб).

Полностью совместима с АСТРА-АЭС'2009 (экспорт геометрических характеристик,

физико-механических свойств и нагрузок значимых этапов статического и сейсмического расчетов, импорт уточненных напряжений и матриц жесткости/податливости).

Основные реализованные гипотезы: изотропия и линейная упругость металла (физическая линейность) и малость деформаций-перемещений (геометрическая линейность).

2.2. Тип объекта использования атомной энергии.

Трубопроводные системы АЭУ

2.3. Моделируемые режимы.

Задаются и учитываются в статических расчетах следующие нагрузки и воздействия для режимов НЭ (нормальных условий эксплуатации), ННЭ (нарушения нормальных условий эксплуатации), ГИ (гидроиспытаний) и АС (аварийных ситуаций):

- внутреннее или внешнее давление,
- статические силы и моменты в произвольных сечениях,
- распределенная нагрузка по 3-м направлениям (включая весовую от продукта, металла и изоляции),
- распределенный момент от неравномерного по высоте сечения нагрева (например, при стратифицированных течениях),
- температура нагрева (охлаждения),
- температурные перемещения опор,
- монтажный натяг (растяг).

Для динамических задач задаются амплитудно-частотные и (или) временные характеристики сейсмических, вибрационных (гидродинамических), импульсно-переходных и аварийных (МПА) воздействий.

2.4. Ограничения на применение

Ограничения на геометрию, величины нагрузок и реакцию системы: трубопроводные системы рассматриваются как стержневые (с учетом оболочечных эффектов в гйбах и тройниках) и линейно-упругие, нелинейность «представлена» односторонними опорами и опорами трения (только в статических расчетах).

Количественные ограничения на параметры расчетной модели ТС для версии АСТРА-АЭС'2009:

- 1) для всей модели:
 - узлов стыковки участков-суперэлементов (неразветвленных) – 0 - 4 000,
 - суперэлементов (неразветвленных участков) – 1 - 4 000,
 - тройниковых соединений и днищ (крышек) – 0 - 4 000,
 - динамических степеней свободы – 1 - 60 000,
 - вычисляемых/учитываемых собственных частот и форм колебаний – 1 - 4 000,
 - точек задания сейсмического спектра ответов – 1 - 10 000,
 - точек задания акселерограммы (шагов интегрирования) – 1 - 60 000,
 - сечений/элементов задания трехкомпонентных динамических нагрузок – 1-2 000.
- 2) для каждого суперэлемента (неразветвленного участка с общими физико-механическими характеристиками):
 - элементов (отрезков) прямо- и криволинейных труб и переходов – 1 - 400,
 - пружинных подвесок, опорных конструкций, “жестких элементов” (вставок), произвольно ориентированных в пространстве сосредоточенных нагрузок – 0 – 400,
 - линзовых/сильфонных компенсаторов – до 30,
 - фланцев – до 100,
 - неколецевых сечений – до 100,
 - арматура (клапаны, задвижки) – до 100,
 - сечений с дополнительными напряжениями – до 100,
 - монтажный растяг – в одном сечении,

– полигармонических (вибрационных) сил – до 30, число гармоник в силе – до 50.

На каждом участке-суперэлементе может быть дополнительно (к «статическим» опорам) задано до 100 амортизаторов – опор, обладающих заданными динамическими жесткостями, но не препятствующих статическим и температурным перемещениям трубопровода.

Уточненный КЭ-расчет температурного и напряженно-деформированного состояния деталей трубопроводов (АСТРА-СТАДИО) ведется в предположении:

- стационарности температурного поля;
- малости перемещений и упругости деформаций-напряжений.

В частности, не учитывается важный для тонкостенных отводов-гибов нелинейный фактор влияния давления на жесткость системы.

Число узлов – до 100 000, конечных элементов (криволинейных оболочечных суперпараметрического семейства или объемных изопараметрических) – до 50 000.

2.5. Допустимые значения параметров.

Упругая область деформирования (физическая линейность), малые деформации-перемещения (геометрическая линейность), нелинейная работа опорно-подвесной системы (трение скольжения/качения и отрывы) при статических и температурных воздействиях, линейная (с возможным наследованием "статического" статуса опор) – при сейсмических, вибрационных и динамических воздействиях.

2.6. Погрешность, обеспечиваемая в области допустимых значений параметров.

Практическая точность расчётов определяется точностью задания физико-механических характеристик материалов и точностью самой модели. Погрешности расчётов по результатам тестирования имеют следующие значения:

- | | |
|---|--------|
| – статические перемещения, усилия и напряжения | – 5%, |
| – собственные частоты и формы колебаний | – 2%, |
| – сейсмические расчёты по линейно-спектральной теории | – 10%, |
| – параметры динамического расчета | – 15%. |

3. Сведения о методиках расчета, используемых в ПС.

Реализован единый алгоритм расчета трубопроводов (определение перемещений, нагрузок на опоры и усилий в сечениях) как пространственных многократно статически неопределимых стержневых систем, сочетающий суперэлементный подход метода перемещений, методы начальных параметров и прогонки (для каждого суперэлемента) и спектральную методику решения динамических задач. Для каждого этапа статических расчетов и для динамических расчетов задачи решаются в линейно-упругом приближении для заданного распределения внутреннего давления и температур. По программно реализованным аналитическим зависимостям учитывается повышенная оболочечная податливость криволинейных труб (эффекты Кармана) и ортогональных тройниковых соединений, по заданным коэффициентам жесткости – податливость врезок "труба-оборудование". Эффекты ползучести и релаксации для высокотемпературных трубопроводов учитываются эквивалентными (скорректированными) температурами и смещениями опор для рабочего и холодного состояний по методике РТМ 24.038.08–72.

Трение Кулона в опорах скольжения и качения в статике (АСТРА-СТАЦ) моделируется системой эквивалентных фиктивных горизонтальных связей, жесткостные характеристики которых определяются в гарантированно сходящемся итерационном процессе. Также в итерационном процессе определяется для каждого этапа статического расчета статус односторонней опоры (труба лежит на опоре или не контактирует) и жесткой тяги (подвески).

Осевые, угловые, сдвиговые и комбинированные линзовые и сильфонные компенсаторы схематизируются прямолинейными элементами (отрезками) с эквивалентными ха-

рактиками сечения на растяжение-сжатие, сдвиг, изгиб и кручение. Арматура (заводские, вентили, клапаны) моделируется жесткими вставками с эквивалентными нагрузочными и инерционными характеристиками.

Решение результирующей алгебраической системы уравнений равновесия суперэлементной модели (определение вектора перемещений в узлах) проводится для статических задач (АСТРА-СТАЦ) и при определении матриц податливости (АСТРА-СЕЙСМ, АСТРА-ВИБР и АСТРА-ДИН) по схеме квадратного корня (Холецкого) с учетом положительной определенности, симметричности, блочности и разреженности матрицы жесткости.

Значимые собственные частоты и соответствующие им формы колебаний (в требуемом частотном диапазоне и/или заданное число) динамической модели системы, учитываемые в расчетах по программам АСТРА-СЕЙСМ, АСТРА-ВИБР и АСТРА-ДИН, определяются из решения частной проблемы собственных значений блочным методом Ланцоша.

Расчет трубопроводной системы на сейсмические воздействия, заданные трехкомпонентными спектрами ответов (АСТРА-СЕЙСМ), проводится по линейно-спектральному методу; расчет на сейсмозодействия, заданные ответными акселерограммами, выполняется интегрированием уравнений движения спектральным методом с разложением по собственным формам колебаний (по схеме Дюамеля).

При расчете на вибропрочность (АСТРА-ВИБР) используется спектральный анализ параметров вынужденных установившихся детерминированных колебаний системы. Силовое нагружение задается в полигармоническом виде.

В расчете на неустановившиеся динамические процессы (АСТРА-ДИН) реализована спектральная методика расчета неустановившихся вынужденных колебаний для оценки прочности при нестационарных (переходных) режимах. Силовые воздействия задаются в виде временных зависимостей давления и/или сосредоточенных сил.

Метод подконструкций реализован также для построения редуцированных матриц влияния системы или учета этих матриц при суперэлементной сборке. Реализован алгоритм метода динамического синтеза подконструкций в форме подхода Крейга-Бемптона (с фиксированными границами) для формирования и учета матричных суперэлементов. Редуцированные матрицы жесткости, масс и нагрузок импортируются-экспортируются через текстовые файлы, формат которых учитывает их блочно-диагональную структуру, а также через бинарные файлы структуры АСТРА-АЭС'2009. Используется в расчетах на статическую и циклическую прочность (АСТРА-СТАЦ) и определении собственных частот и форм колебаний (АСТРА-ФОРМ).

АСТРА-СТАДИО – уточненный расчет стационарного температурного состояния деталей ТС в выполняется по объемным схемам метода конечных элементов (МКЭ) в линейной постановке, напряженно-деформированного состояния – по пространственно-оболочечным и объемным схемам МКЭ в перемещениях в предположении малости перемещений-деформаций и упругой работы, оценка статической, циклической (для однопакетного нагружения) и сейсмической прочности по группам категорий напряжений на срединной, внутренней и наружной поверхностях деталей – согласно положениям Норм ПНАЭ Г-7-002-86.

4. Сведения о базах данных (библиотеках констант), используемых в ПС.

Программа редактирования и пополнения баз данных (по характеристикам материалов, сортаментам деталей, нагрузкам и воздействиям) – не аттестуются.

5. Перечень организаций, эксплуатирующих ПС (коммерческие версии):

ЗАО НИЦ СтаДиО, ОАО "Атомэнергопроект", ОАО "ОКБ "Гидропресс", ПКФ "Росэнергоатом", ОАО ЗИОМАР, АО РОСЭП, ЗАО "Сельэнергопроект", "СвердНИИХимМаш", ГОУ ВПО МГСУ (Россия), "Киевэнергопроект", "Харьковэнергопроект", "Украинатомэнергопроект", НПО "Вектор", НТЦ ЯРБ Госатомнадзора Украины (Украина), Игналлинская АЭС (Литва), ДФ "Енергопроект" (Болгария).

6. Дополнительная информация.

Нет

7. Особые условия.

Нет

8. Официальные эксперты.

Бедняков В.Г., к.т.н., начальник отдела НТЦ ЯРБ

Панов В.А., д.т.н., зам. начальника отдела ОКБМ им Африкантова

Рубцов В.С., к.т.н., начальник отдела НТЦ ЯРБ

Синицын Е.Н., д.т.н., зав. лабораторией прочности ОАО "ВНИИАМ"

Ткачев В.В., к.т.н., начальник лаборатории РНЦ "Курчатовский институт"

Председатель Экспертного совета

И.Р. Уголева

Председатель Секции №4 Экспертного совета

Ю.И. Лихачев

10. Перечень источников

1. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. ПНАЭ Г-7-002–86. М., Энергоатомиздат, 1989 г.
2. Нормы расчета на прочность стационарных котлов и трубопроводов пара и горячей воды. РД 10-249–98 (с Изменениями №1 РДИ 10-413(249) –01 от 13.07.2001). М., 2001 г.
3. Указания по расчету на прочность и вибрацию технологических стальных трубопроводов. РТМ 38.001–94. М., 1995 г.
4. Нормы расчета на прочность трубопроводов тепловых сетей. РД 10-400–01. М., 2001 г.
5. Магистральные трубопроводы. СНиП 2.05.06–85. М., 1985 г.
6. Расчет трубопроводных систем атомных электростанций на прочность. РТМ 108.020.01–75. М., 1975 г.
7. ASME Boiler & Pressure Vessel Code. Section III. NB-3630.
8. Выбор упругих опор для трубопроводов тепловых и атомных электростанций. РТМ 24.038.12–72. М., 1972 г.
9. Руководство по расчету и конструированию тройников технологических трубопроводов. М., Гидропроект, 1984 г.
10. Руководство по обоснованию прочности трубопроводов АЭС (3 редакция). М., АЭП, НИЦ СтаДиО, 1991 г.
11. Пружины винтовые цилиндрические для подвесок трубопроводов ТЭС и АЭС. Конструкция, размеры и технические требования. ОСТ 108.764.01–80, НПО ЦКТИ, 1981 г.
12. Детали и сборочные единицы из сталей аустенитного класса для трубопроводов АЭС $D_H=14-325$ мм. Типы, конструкция и размеры. ОСТ 24.125.01–89 – ОСТ 24.125.26–89. М., 1991 г.
13. Детали и сборочные единицы из сталей перлитного класса для трубопроводов АЭС $D_H=16-720$ мм. Типы, конструкция и размеры. ОСТ 24.125.30–89 – ОСТ 24.125.57–89. М., 1991 г.
14. Подвески трубопроводов ТЭС и АЭС. Пружины винтовые цилиндрические. Конструкция и размеры. ОСТ 24.125.109–01, НПО ЦКТИ, 2001 г.
15. Комплекс программ **АСТРА-АЭС** (DOS-версия 6.1). Автоматизированный расчет трубопроводных систем АЭС на статическую и циклическую прочность, на сейсмические воздействия, на вибропрочность и неустановившиеся динамические процессы в соответствии с требованиями Норм ПНАЭ Г-7-002–86. Общее описание комплекса. М., НИЦ СтаДиО, 1991 г.
16. Комплекс программ **АСТРА-АЭС** (DOS-версия 6.2). Автоматизированный расчет трубопроводных систем АЭС на статическую и циклическую прочность, на сейсмические воздействия, на вибропрочность и неустановившиеся динамические процессы в соответствии с требованиями Норм ПНАЭ Г-7-002–86. Общее описание комплекса. М., НИЦ СтаДиО, 1996 г.
17. Комплекс программ **АСТРА-НЕФТЕХИМ** (DOS-версия 6.2). Автоматизированный расчет трубопроводных систем нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств на статическую и циклическую прочность и на вибропрочность с требованиями РТМ 38.001–94. Общее описание комплекса. М., НИЦ СтаДиО, 1996 г.
18. Комплекс программ **АСТРА-АЭС-99** (Windows-версия). Автоматизированный расчет трубопроводных систем АЭС на статическую и циклическую прочность, на сейсмические воздействия, на вибропрочность и неустановившиеся динамические процессы в соответствии с требованиями Норм ПНАЭ Г-7-002–86. Общее описание комплекса. М., НИЦ СтаДиО, 1999 г.
19. Комплекс программ **АСТРА-НЕФТЕХИМ-99** (Windows-версия). Автоматизированный расчет трубопроводных систем нефтехимических и нефтеперерабатывающих

производств на статическую и циклическую прочность и на вибропрочность с требованиями РТМ 38.001–94. Общее описание комплекса. М., НИЦ СтаДиО, 1999 г.

20. Комплекс программ **АСТРА-АЭС-2001** (Windows-версия). Автоматизированный расчет трубопроводных систем АЭС на статическую и циклическую прочность, на сейсмические воздействия, на вибропрочность и неустановившиеся динамические процессы в соответствии с требованиями Норм ПНАЭ Г-7-002–86. Общее описание комплекса. М., НИЦ СтаДиО, 2001 г.

21. Комплекс программ **АСТРА-НЕФТЕХИМ-2001** (Windows-версия). Автоматизированный расчет трубопроводных систем нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств на статическую и циклическую прочность и на вибропрочность с требованиями РТМ 38.001–94. Общее описание комплекса. М., НИЦ СтаДиО, 2001 г.

22. Комплекс программ **АСТРА-ТЭС-2001** (Windows-версия). Автоматизированный расчет трубопроводов пара и горячей воды на статическую и циклическую прочность, на сейсмические воздействия и на вибропрочность в соответствии с требованиями Норм РД 10-249–98. Общее описание комплекса, М., НИЦ СтаДиО, 2001 г.

23. Комплекс программ **СТАДИО** (версии 6.10/99/2001/2003/2005/2007/2009). Решение методами конечных элементов и суперэлементов линейных и нелинейных задач теории поля, статики, устойчивости, динамики, механики разрушения и оптимизации пространственных комбинированных систем. Общее описание, верификационный отчет, инструкции пользователя. М., НИЦ СтаДиО. 1993 – 2009 гг.

24. “Семейство” программных комплексов **АСТРА-2001** (Windows-версия). Подсистема уточненного расчета напряженного состояния и прочности типовых трубопроводов при действии полной системы квазистационарных нагрузок. **АСТРА-СТАДИО**. М., НИЦ СтаДиО, 2001 г.

25. “Семейство” программных комплексов **АСТРА-НОВА’2009** (Windows-версия). Автоматизированное проектирование и расчеты трубопроводных систем на статическую и циклическую прочность, на сейсмические воздействия, вибропрочность и неустановившиеся динамические процессы в соответствии с российскими нормативными требованиями. Общее описание. М., НИЦ СтаДиО, 2008-2009 г..

26. “Семейство” программных комплексов **АСТРА-НОВА’2009** (Windows-версия). Автоматизированное проектирование и расчеты трубопроводных систем на статическую и циклическую прочность, на сейсмические воздействия, вибропрочность и неустановившиеся динамические процессы в соответствии с российскими нормативными требованиями. Сеанс работы с комплексом. М., НИЦ СтаДиО, 2008-2009 гг.

27. Комплекс программ АСТРА-АЭС. Верификационный отчет. М., НИЦ СтаДиО, 1992 – 1995 гг.

28. Справочник проектировщика. Проектирование тепловых сетей. Под ред. А.А.Николаева. М., 1965 г.

29. Зверьков Б.В., Костовецкий Д.Л. и др. Расчет и конструирование трубопроводов. Справочное пособие. Ленинград. Машиностроение. 1979 г.

30. Айбиндер А.Б., Камерштейн А.Г. Расчет магистральных трубопроводов на прочность и устойчивость. М., Недра, 1982 г.

31. Самарин А.А. Вибрации трубопроводов энергетических трубопроводов и методы их устранения. М., Энергия, 1979 г.

32. Магалиф В.Я., Шапиро Е.Е. Программа расчета прочности и жесткости трубопроводов (СТАРТ). Межотраслевой фонд алгоритмов и программ автоматизированных систем в строительстве. М., ЦНИИПРОЕКТ, 1986 г., вып. 1-225-1.

33. Intel Visual Fortran Version 11.1 Copyright ©. 2002-2009 Intel Corporation

34. Бате К., Вилсон Е. Численные методы анализа и метод конечных элементов. М., Стройиздат, 1982 г.

35. Парлетт Б. Симметричная проблема собственных значений. Численные методы. М., Мир, 1983 г.

36. Белостоцкий А.М. Модификация и применение численных методов к расчетам плитно-оболочечных систем на сейсмические воздействия. В кн. “Динамические характе-

ристики и колебания элементов энергетического оборудования”. М., Наука, 1980 г., стр. 41-58.

37. Белостоцкий А.М. Упругий расчет сварных и штампованных тройников на произвольные статические нагрузки. – Сб. научных трудов ВНИПИнефть: “Автоматизированное проектирование трубопроводных систем нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств”, ЦНИИТЭнефтехим, М, 1982 г., с. 121-131.

38. Белостоцкий А.М., Малявин В.П., Дикарев А.И. и др. Экспериментальные и численные исследования напряженного состояния тройниковых соединений при действии моментных нагрузок. – Сб. трудов МИСИ им.В.В.Куйбышева, 1982 г., № 188, с. 35-49.

39. Белостоцкий А.М., Головин В.В., Фрадкин Б.В. Исследование напряженного состояния и разработка инженерной методики расчета на прочность тройниковых соединений при действии полной системы квазистатических нагрузок. – “Вопросы атомной науки и техники”. Серия: Физика и техника ядерных реакторов, 1985 г., вып. 6, с. 76-83.

40. Белостоцкий А.М., Вашуров Е.А., Воронова Г.А., Якубович Н.И. Автоматизированный расчет на прочность трубопроводных систем с учетом динамических воздействий. – “Вопросы атомной науки и техники”. Серия: Физика и техника ядерных реакторов, 1985 г., вып. 6, с. 33-38.

41. Белостоцкий А.М., Кириллов А.П., Прудовский А.М. и др. Изучение вибрации трубопроводов сброса пара на АЭС и оценки их долговечности. Тяжелое машиностроение, М., 1990 г., № 10, с. 28-31.

42. Белостоцкий А.М. Пространственное напряженное состояние ортогональных тройниковых соединений различных типов при комплексном нагружении, Материалы семинара кафедры сопротивления материалов Российского университета дружбы народов. Исследование пространственных систем. М., 1996 г., с. 55-60.

43. Белостоцкий А.М. Численное моделирование комплексного напряженно-деформированного состояния конструкций и сооружений энергетических объектов. “Гидротехническое строительство”, 1999 г., № 8, с. 45-54.

44. Белостоцкий А.М., Белый М.В., Пичугин Д.В. Численное исследование алгоритма расчета упругих систем при учете контактного трения. – Вопросы прикладной математики и вычислительной механики. Сб. научных трудов МГСУ, М, 1999 г., с. 68-78.

45. 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”. ВЕМ&FEM-2000, С-Петербург, 2000 г., с. 72-76.

46. Белостоцкий А.М., Белый М.В. Суперэлементные алгоритмы решения пространственных нелинейных статических и динамических задач большой размерности. Реализация в программном комплексе СТАДИО и опыт расчетных исследований. Труды XVIII Международной конференции “Математическое моделирование в механике сплошных сред на основе методов граничных и конечных элементов”. ВЕМ&FEM-2000, С-Петербург, 2000 г., с. 65-69.

47. Белостоцкий А.М., Белый М.В., Рассказов Л.Н., Желанкин В.Г. Численное моделирование пространственного напряженно-деформированного состояния систем “сооружение-основание” с учетом нелинейных реологических свойств грунтов. – Вопросы прикладной математики и вычислительной механики. Сб. научных трудов МГСУ, М, 2001 г., с. 22-29.

48. Белостоцкий А.М., Воронова Г.А., Потапенко А.Л. “Семейство” программ АСТРА-НОВА для автоматизированных нормативных расчетов на прочность трубопроводных систем различного назначения. САПР и Графика, 2002 г., № 8, с. 12-16.

49. Белостоцкий А.М., Воронова Г.А., Потапенко А.Л. АСТРА-НОВА'2003: Автоматизированные расчеты на прочность трубопроводных систем различного назначения. САПР и Графика, 2003 г., № 4, с. 8-12.

50. Белостоцкий А.М., Пеньковой С.Б. Конечноэлементное моделирование НДС ёмкостного оборудования АЭС. Сб. научных трудов МГСУ “Вопросы прикладной математики и вычислительной механики”, М., 2005 г., с. 71-83.
51. Потапенко А.Л. Визуализация расчетных моделей и результатов расчетов в пре- и постпроцессорных модулях программных комплексов. Сб. научных трудов МГСУ “Вопросы прикладной математики и вычислительной механики”, М., 2005 г., с. 397-408.
52. Потапенко А.Л. Интеграция расчетных комплексов с САПР и другими программными комплексами. Сб. научных трудов МГСУ “Вопросы прикладной математики и вычислительной механики”, М., 2005 г., с. 408-420.
53. Белостоцкий А.М., Воронова Г.А., Потапенко А.Л., Клепец О.Ю. Современные численные методы и САПР-технологии в прочностных расчётах трубопроводных систем. Программный комплекс АСТРА-НОВА'2005. Труды XXI Международной конференции “Математическое моделирование в механике сплошных сред на основе методов граничных и конечных элементов”. ВЕМ&FEM-2005 г., С-Петербург, 2006 г., с. 65-69.
54. Белостоцкий А.М., Пеньковой С.Б. Численное моделирование напряженного состояния и оценка прочности тройниковых соединений трубопроводов АЭУ. Сб. научн. трудов МГСУ “Вопросы прикладной математики и вычислительной механики”, М., 2006 г., с. 285-292.
55. Белостоцкий А.М. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния и нормативная оценка прочности трубопроводных систем: достижения, проблемы и перспективы. “Машиностроение и инженерное образование”, 2006 г., № 9, с. 111-119.
56. Белостоцкий А.М., Дубинский С.И., Потапенко А.Л. Методы динамического синтеза подконструкций в задачах моделирования сложных инженерных систем. “Строительная механика и расчет сооружений”, 2006 г., № 6, с. 45-51.
57. Белостоцкий А.М., Потапенко А.Л., Клепец О.Ю. Реализация и верификация алгоритма Крейга-Бемптона в программных комплексах СТАДИО и АСТРА-НОВА. Труды XXII Международной конференции “Математическое моделирование в механике сплошных сред на основе методов граничных и конечных элементов”. ВЕМ&FEM-2007 г., С-Петербург, 2007 г., с. 65-69.
58. Белостоцкий А.М., Потапенко А.Л. Программно-алгоритмическая разработка и верификация подсистемы уточненного конечноэлементного моделирования деталей трубопроводов (АСТРА-СТАДИО). Сб. научных трудов МГСУ “Вопросы прикладной математики и вычислительной механики”, М., 2008 г., №11, с. 185-192
59. CEN TC 107 (Draft Standart 12/96): Design, Calculation & Installation for Pre-insulated Bonded Pipes for District Heating.
60. Стальные трубопроводы с заводской теплоизоляцией. Руководство НПО “Стройполимер” по проектированию и монтажу. М., 2002 г.
61. Бородавкин П.П., Подземные магистральные трубопроводы (проектирование и строительство), М., Недра, 1982 г.
62. Стальные трубопроводы с заводской теплогидроизоляцией. М., НПО “Стройполимер”, 2002 г.
63. Гайан Р. Приведение матриц жесткости и массы. – Ракетная техника и космонавтика, 1965 г., т.3, № 2, с. 277-278.
64. Программный комплекс “Рампа-93”, Аттестационный Паспорт ПС №183 от 28.10.2004.
65. ANSYS 11. Verification manual. 2007, ANSYS 12. Verification manual. 2009
66. Верификационный отчет по программному комплексу ANSYS Mechanical (4 тома), М., ЗАО НИЦ СтаДиО, МГСУ, 2009 (в системе РААСН).
67. Craig R.R., Jr., Bampton M.C.C. Coupling of substructures for dynamic analysis - AIAA Journal, 1968, vol. 6, No. 7, p. 1313-1319.
68. Benfield W.A., Hruda R.F. Vibration analysis of structures by component mode substitution. – AIAA Journal J., 1976, vol. 9, p. 1255-1261.

69. MacNeal R.H. A hybrid method of component mode synthesis. - Computers and structures, 1971, vol. 4, p. 591-601.
70. Hurty W.C. Dynamic analysis of structural systems using component modes. – AIAA Journal., 1984, vol. 4, p. 733-738.
71. “Семейство” программных комплексов **АСТРА-НОВА’2009**. Автоматизированное проектирование и расчеты трубопроводных систем на статическую и циклическую прочность, на сейсмические воздействия, вибропрочность и неустановившиеся динамические процессы в соответствии с российскими нормативными требованиями. Общее описание (Приложения). М., НИЦ СтаДиО, 2008-2009 г..
72. “Семейство” программных комплексов **АСТРА-НОВА’2009**. Программный модуль **АСТРА-СТАДИО**. Уточненный расчет температурного и напряженно-деформированного состояния (по пространственно-оболочечным и объемным схемам МКЭ), статической, циклической и сейсмической прочности деталей трубопроводов. М., НИЦ СтаДиО, 2008-2009 гг.
73. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. М. Мир, 1975, 539 с.
74. Оден Дж. Конечные элементы в нелинейной механике сплошных сред. М., Мир, 1976, 464 с.
75. Стренг Г., Фикс ДЖ. Теория метода конечных элементов. М., Мир, 1977, 349 с.

Основные условные обозначения и сокращения

- АС** – атомная станция, аварийная ситуация
АЭС – атомная электростанция
АЭУ – атомные энергетические установки
ГИ – гидро(пневмо) испытания
Г – гигабайт
ИПКЭ – трехмерные (объемные) криволинейные КЭ изопараметрического семейства
К – килобайт
КЭ – конечный(е) элемент(ы)
ЛСМ – линейно-спектральный метод (расчет на сейсмические воздействия)
М – мегабайт
МКЭ – метод конечных элементов
МПА – максимальная проектная авария
МРЗ – максимальное расчетное землетрясение (1 раз в 10000 лет)
ПК – программный комплекс
ПЭВМ – персональные ЭВМ типа Pentium и IBM-совместимые
Windows 98, NT, 2000, XP, Vista – операционные системы для ПЭВМ
НДС – напряженно-деформированное состояние
Нормы ПНАЭ Г-7-002–86 – Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов АЭУ. ПНАЭ Г-7-002–86.
ННУЭ – нарушение нормальных условий эксплуатации
НУЭ – нормальные условия эксплуатации
ПЗ – проектное землетрясение (повторяемость 1 раз в 100 лет)
РТМ – руководящие технические материалы
РД – руководящий документ
САПР – автоматизированная система проектирования
СНиП – строительные нормы и правила
СПКЭ – оболочечные КЭ суперпараметрического семейства, реализующие гипотезы Тимошенко
СЭ – суперэлемент
СЭМ – суперэлементная модель
ТС – трубопроводная система
ЭВМ – электронная вычислительная машина
(σ)₁ – группа приведенных напряжений, определяемая по составляющим общих мембранных напряжений (группа 1), от действия весовой нагрузки и рабочего давления, МПа;
(σ)₂ – расчетные приведенные напряжения (группа 2), определяемые по суммам составляющих общих или местных мембранных и общих изгибных напряжений, от действия весовой нагрузки и давления, МПа;
(σ)_{РК} – максимальный размах приведенных напряжений (группа 3), определяемых по суммам составляющих ранее упомянутых напряжений, общих температурных, местных изгибных и сдвиговых напряжений, от действия давления, компенсации температурных расширений и смещения опор (концов), МПа;
(σ_{aF})_К – амплитуда приведенных “низкочастотных” напряжений (группа 4), определяемая от действия тех же факторов, что и (σ)_{РК} с учетом концентрации напряжений и овальности сечений (для колен и гибов);
(σ_s)₂ – расчетные приведенные напряжения, определяемые как напряжения группы (σ)₂ от действия давления, весовой нагрузки и сейсмических воздействий уровня **ПЗ** или **МРЗ**, МПа;

Единицы измерения (исходные данные и результаты)

СИ – мм, рад, с, МПа, кН/м, кН, кН·м, m , Гц, рад/с

СГС – см, рад, с, кг/см², кг/см, кг, кг·см, Гц, рад/с

Программы комплекса АСТРА-АЭС'2009

ПРЕ-АСТРА	– диалоговый препроцессор для задания и верификации расчетной модели трубопровода
АСТРА-СТАЦ	– расчет на статическую и циклическую прочность
АСТРА-ФОРМ	– расчет собственных частот и форм колебаний
АСТРА-СЕЙСМ	– расчет на сейсмические воздействия
АСТРА-ВИБР	– расчет на вибропрочность
АСТРА-ДИН	– расчет на неустановившиеся динамические процессы
ПОСТ-АСТРА	– диалоговый постпроцессор для визуализации и построения таблиц результатов расчета
АСТРА-СТАДИО	– уточненный расчет температурного и напряженно-деформированного состояния, статической, циклической и сейсмической прочности типовых элементов трубопроводов при действии полной системы квазистатических нагрузок