

Содержание

| | |
|--|----|
| 1. Введение | 3 |
| 2. Назначение и область применения ПС..... | 6 |
| 3. Нормативно-методические основы, исходные данные и результаты расчетов | 10 |
| 4. Расчетные модели трубопроводных систем | 18 |
| 5. Вычислительные алгоритмы | 28 |
| 6. Обоснование расчётной методики..... | 47 |
| 7. Матрицы верификации | 48 |
| 8. Описание верификационных примеров (задач, тестов)..... | 58 |
| 9. Результаты верификации | 59 |
| Литература | 60 |
| Основные условные обозначения и сокращения..... | 65 |

Приложение 1 (том 2). Верификационные примеры

1. Введение

Настоящий документ содержит материалы по верификации программного комплекса (ПК) АСТРА-СВД, 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 РД РТМ 26-01-44-78 и ГОСТ Р 55600-2013.

1.1 Название ПС

Программный комплекс АСТРА-СВД.

1.2 Самостоятельные модули ПС

| Наименование | Описание | Программные файлы |
|---------------------|--|--|
| ПРЕ-АСТРА | Препроцессор – ввод и проверка исходных данных | AstraNova.exe, CADModel.exe, LFC.dll, Dbedit.exe, Dispmass.exe SecAn.exe |
| ПОСТ-АСТРА | Постпроцессорная обработка результатов | AstraNova.exe, AstraNova.dll, Report.exe, LFC.dll |
| АСТРА-ДЕТАЛЬ | Расчёт по выбору основных размеров | Sdetail.exe |
| АСТРА-СТАЦ | Расчёт ТС на статическую и циклическую прочность | Stac.exe |
| АСТРА-ФОРМ | Расчёт собственных частот и форм колебаний ТС. Подготовка данных для динамических расчетов | Form.exe |
| АСТРА-СЕЙСМ | Расчёт ТС на сейсмические воздействия, заданные спектрами ускорений и акселерограммами | Seism.exe |
| АСТРА-ВИБР | Расчёт ТС на вибропрочность | Vibr.exe |
| АСТРА-ДИН | Расчёт ТС на динамические воздействия | Dyn.exe |
| АСТРА-СТАДИО | Уточненный расчет температурного и напряженно-деформированного состояния с учётом автофретирования по пространственно-оболочечным и трехмерным КЭ-моделям, оценка статической, циклической и сейсмической прочности деталей трубопровода | AstraStd.exe, inpdata.exe, massol.exe, stdsolve.exe, Outres.exe, astreport.exe, mumps.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., Кушнарченко И.В.

1.4 Организация-разработчик ПС

ЗАО НИЦ СтаДиО (www.stadyo.ru stadyo@stadyo.ru), 2017

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 №2016619490 от 22 августа 2016 г. (рис. 1.1).

1.5 Организация-заявитель ПС

ЗАО “Научно-исследовательский центр СтаДиО” (НИЦ СтаДиО).
АО НПО «Пластполимер»

1.6 Перечень организаций, использующих (применяющих) ПС

ПК АСТРА-СВД находится в производственной эксплуатации ряда ведущих организаций отрасли:

- ЗАО “Научно-исследовательский центр СтаДиО” (НИЦ СтаДиО);
- АО «НПО «Пластполимер».

1.7 Операционная система

Windows 98, NT, 2000, XP, Vista, 7, 8, 10.

1.8 Языки программирования

Используемые компиляторы и библиотеки

Intel Fortran 2015 (вычислительные модули), Intel C++ 2015, Microsoft Visual C++ 2015, Borland C++ Builder 2007 for Microsoft Windows с использованием трехмерной графики OpenGL (визуализация расчетных моделей и результатов, диалоговая система), генератор отчетов FastReport 5.3, CodeGear™ C++Builder® 2007, FastReports 5.5.5, Qt 5.6, MinGW 4.9.2.

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, 7, 8, 10.).

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 в максимальной комплектации требуется около 170 Мб дисковой памяти. Дисковая память для хранения программных модулей зависит от выбранной пользователем конфигурации комплекса.



Рис.1.1 Свидетельство Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам об официальной регистрации ПК АСТРА-СВД для ЭВМ №2016619490 от 22 августа 2016 г

2. Назначение и область применения ПС

2.1 Отраслевая “ветвь” АСТРА-СВД комплекса программ АСТРА-НОВА предназначена для автоматизированного расчета произвольных пространственных разветвленных и протяженных трубопроводных систем на статическую и циклическую прочность, на сейсмические воздействия, заданные спектрами отклика и акселерограммами, на вибропрочность для установившихся режимов колебаний и на неустановившиеся динамические процессы в соответствии с требованиями действующих РД РТМ 26-01-44-78 «Детали трубопроводов на давление свыше 10 до 100 МПа. Нормы и методы расчета на прочность» и ГОСТ Р 55600-2013 «Трубы и детали трубопроводов на давление свыше 100 до 320 МПа. Нормы и методы расчета на прочность».

Суммируя многочисленные преимущества АСТРА-НОВА, 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 сильфонные 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 различных режимов:

- 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),
- температурный перепад по толщине стенки,
- давление автофретирования.

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

Комплекс программ АСТРА-СВД (верифицируемая часть) состоит из 7-и программных модулей (ПРЕ-АСТРА, АСТРА-ДЕТАЛЬ 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 напряженного состояния (в том числе с учётом автофретирования), оценок прочности деталей трубопроводов, оценок предельной пластической нагрузки на детали трубопровода.

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), вычисление требуемого давления автофретирования, импорт-экспорт моделей, поиск и отображение коллизий (пересечений, касаний и недопустимо малых зазоров труб), глубокая диагностика ошибок;

2) **АСТРА-ДЕТАЛЬ** – расчет по выбору основных размеров деталей в соответствии с требованиями [9, 10]. Реализован расчёт деталей трубопроводов – *прямых труб, отводов (гибов), переходов, тройников, угольников, приварных патрубков* – на действие давления.

Предусмотрено 2 вида расчета:

- выбор минимальной расчетной и номинальной (с учетом прибавок) толщины стенки деталей;
- выбор деталей, подходящих по толщине стенки, из сортаментов.

Результатами расчета (в зависимости от вида) являются:

- минимальная толщина стенки каждой детали и, для тройников, площади сечения укрепляющих элементов;
- перечень выбранных деталей с указанием их сортамента и геометрических параметров.

2) **АСТРА-СТАЦ** – расчет на статическую и циклическую прочность низко- и высокотемпературных (в соответствии с методикой, приведенной в [11] трубопроводов. 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, “спецпружин” 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 “спецпружин” 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, температурного перепада по толщине стенки, давления автофретирования.

Результатами расчета являются перемещения (линейные и угловые), расчетные приведенные и допускаемые напряжения во всех расчетных сечениях участков (включая гибы и колена); 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(пневно)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. 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, расчетные приведенные и допускаемые напряжения во всех расчетных сечениях участков (включая гибы и

колена), 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, 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 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 внутренних усилий;

– визуализация напряжений с оценкой прочности по нормативным критериям;

– визуализация напряжений по компонентам;

– 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, с 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) конических *переходов* концентрических и с эксцентриситетом;

4) *косых стыков*;

5) *сварных швов*;

6) *подземных трубопроводов* (труб, отводов и косых стыков с изоляцией/компенсирующими подушками в грунте).

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* [28], имеющий богатый послужной список исследованных сложных объектов атомной, тепловой и гидроэнергетики, различных отраслей строительства и машиностроения.

Предусмотрены следующие виды расчетов:

- стационарная задача теплопроводности;
- расчет НДС и прочности (в том числе с учётом автофретирования);
- комбинированный расчет (определение температурного поля и использование его в качестве температурной нагрузки для определения НДС);

– формирование матрицы жесткости детали (элемента);

– определение предельной пластической нагрузки;

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;
- оценка статической, циклической и сейсмической прочности по критериям [9, 10].

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

Основные реализованные гипотезы: изотропия, линейная упругость (физическая линейность), и упругопластическое поведение (физическая нелинейность – модель изотропного упрочнения) металла и малость деформаций-перемещений (геометрическая линейность). Для грунта (подземные трубопроводы) принята физически нелинейная реологическая модель энергетического типа, зарекомендовавшая себя при численном моделировании трехмерных систем “основание-сооружение” [52].

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-СВД накладывает следующие единые количественные ограничения на расчетную модель в целом и каждый суперэлемент, позволяющие свободно анализировать трубопроводные системы “предельной” сложности:

| Характеристики | Диапазон изменения |
|---------------------------------------|--------------------|
| Число узлов (суперэлементных) | 0 - 4 000 |
| Число неразветвленных суперэлементов | 1 - 4 000 |
| Число “матричных” суперэлементов | 0 - 4 000 |
| Число элементов (отрезков) | 1 - 8 000 000 |
| Число динамических степеней свободы | 1 - 60 000 |
| Число собственных частот и форм | 1 - 4 000 |
| Число шагов интегрирования по времени | 1 - 60 000 |

Специфические ограничения, связанные с использованием тех или иных элементов при проведении характерных расчетов приведены в соответствующих пунктах раздела 5 “Общего описания *ПК АСТРА-НОВА* [30].

2.3 В рамках своих вычислительных возможностей *ПК АСТРА-СВД* может использоваться для выполнения как проектных, так и эксплуатационных расчетов, а также служить для выполнения лицензионных расчетов для обоснования безопасности трубопроводов высокого и сверхвысокого давления.

3. Нормативно-методические основы, исходные данные и результаты расчетов

3.1. Расчёт по выбору основных размеров осуществляется в соответствии с положениями **Норм** [9, 10].

Расчет выполняется на основании следующих исходных данных:

1) геометрия (осевая линия) детали (-ей) трубопровода. Для её внесения в расчётную модель возможны два подхода:

1.1. При необходимости расчёта отдельных деталей трубопровода допускается их задание не связанными друг с другом. В этом случае необходимы исходные данные, перечисленные в 3.1.1 – 3.1.3;

1.2. При проведении расчёта по выбору основных размеров для уже скомпонованной трубопроводной системы возможно внесение в расчёт деталей трубопровода с привязкой к их местоположению. В этом случае дополнительно требуются следующие данные:

а) аксонометрическая схема трубопроводной системы, как правило и желательно, в общей со строительными конструкциями (при их наличии) правосторонней декартовой системе координат X_1 (X), X_2 (Y), X_3 (Z), где ось X_3 , как правило, направлена вертикально вверх, ось X_1 – в направлении, обратном обозначению строительных осей, ось X_2 – в направлении, обратном нумерации строительных рядов; допускается (а для ряда компоновок – удобно) задание схемы или ее фрагментов в цилиндрической и (или) сферической системах координат;

б) указание местоположения и спецификации сортамента прямых труб, переходников, отводов (гибов, колен и секторных) и косых стыков, тройниковых узлов (сварных, сварных с усиливающими накладками, штампованных и штампосварных, кованных).

Не смотря на большую трудоёмкость второго подхода, он оказывается более рациональным, если после расчёта по выбору основных размеров будет проводиться поверочный расчёт трубопроводной системы на прочность. В этом случае оказывается, что большая часть исходной информации (геометрия, детализация, физико-механические характеристики материалов, часть расчётных нагрузок и воздействий) по трубопроводу уже сформирована, и, таким образом, модель для расчёта по выбору основных размеров как с внесёнными в неё результатами этого расчёта (номинальной толщиной стенки s , либо деталями трубопроводов из сортамента) так и без таковых, может являться прототипом модели поверочного расчёта на прочность трубопроводной системы (см. 3.3).

Первые две группы данных, составляющие 95% всего объема исходной информации, в современных условиях можно (и должно) сформировать с использованием встроенных пополняемых баз данных (по деталям и свойствам материалов) и аналогов-прототипов либо в “традиционном” препроцессоре **ПРЕ-АСТРА**, либо в САПР-оболочке семейства **АСТРА-САПР**, либо средствами САПР ПГС (например, CADWorx/PIPE, PDS, SmartPlant), а затем «через» **АСТРА-САПР** экспортировать в **АСТРА-НОВА**.

На основании указанной выше информации с привлечением соответствующих нормативных документов [84-86] формируются (непосредственно или с использованием встроенных баз данных по деталям, свойствам материалов и параметрам нагрузок-воздействий) приведенные ниже исходные данные, непосредственно используемые в расчетах.

3.1.1. Расчёт по РД РТМ 26-01-44-78 [9]

3.1.1.1. Геометрические характеристики деталей

D_y – условный диаметр (проход) деталей трубопровода. Задаётся в случае выбора деталей из сортамента, мм;

d – номинальный внутренний диаметр сечения трубы (разделки под сварку, колена, гiba, перехода, корпуса и отвода тройника, угольника, приварного патрубка). Задаётся при подборе толщины стенки, мм;

c – общая прибавка к толщине стенки детали, мм;

c₁ – технологическая прибавка к толщине стенки, мм;

c₂ – прибавка на износ, мм;

c₃ – дополнительная прибавка, мм;

D – номинальный наружный диаметр сечения трубы. Задаётся при подборе толщины

стенки трубы, мм;

R – радиус оси криволинейной трубы (гиба, колена), мм;

α_k – угол в переходе между осью и образующей конуса, град;

3.1.1.2. Нагрузки и воздействия

p_i – расчётное внутреннее давление в трубопроводе для i -го расчетного режима, МПа;

t_{in} – температура на наружной поверхности детали, °С;

t_{iv} – температура на внутренней поверхности детали, °С;

3.1.1.3. Физико-механические характеристики материалов

– тип стали (углеродистая, низколегированная, аустенитная);

η – поправочный коэффициент, учитывающий условия эксплуатации трубопроводов;

$R_{m/t}$ – минимальное значение временного сопротивления (предела прочности) материала для расчётных режимов, МПа;

$R_{T/t}$ – минимальное значение предела текучести материала для расчётных режимов, МПа;

σ_d – среднее значение условного предела длительной прочности материала (напряжения, вызывающего разрушение при расчетной температуре через 10^5 час), МПа;

σ_p – среднее значение условного предела ползучести материала (напряжения, вызывавшего накопление остаточной деформации при расчетной температуре 1% за 10^5 час), МПа;

ϕ – коэффициент прочности продольного сварного соединения;

3.1.2. Расчёт по ГОСТ Р 55600-2013 [10]

3.1.2.1. Геометрические характеристики деталей

D_y – условный диаметр (проход) деталей трубопровода. Задаётся в случае выбора деталей из сортамента, мм;

D – наружный диаметр сечения трубы (колена, гiba, перехода), мм;

d – внутренний диаметр сечения трубы (колена, гiba, перехода, основной трубы и отвода тройника, угольника). Задаётся при подборе толщины стенки, мм;

c – общая прибавка к толщине стенки детали, мм;

c_1 – прибавка, учитывающая плюсовой допуск на наружный диаметр детали, мм;

c_2 – прибавка, учитывающая минусовой допуск на толщину стенки детали, мм;

$c_{3в}, c_{3н}$ – прибавки на износ внутренней и наружной поверхности детали соответственно (для основной трубы и отвода тройника значения задаются отдельно), мм;

c_3 – прибавка на износ суммарная ($c_3 = c_{3н} + c_{3в}$), мм;

R – радиус оси криволинейной трубы (гиба, колена, секторного колена), мм;

α_k – угол в переходе между осью и образующей конуса, град;

3.1.2.2. Нагрузки и воздействия

p_i – расчётное внутреннее давление в трубопроводе для i -го расчетного режима, МПа;

t_{in} – температура на наружной поверхности детали, °С;

t_{iv} – температура на внутренней поверхности детали, °С;

3.1.2.3. Физико-механические характеристики материалов

$R_{m/t}$ – минимальное значение временного сопротивления (предела прочности) материала для расчётных режимов, МПа;

$R_{T/t}$ – минимальное значение предела текучести материала для расчётных режимов, МПа;

3.2. Результатом каждого вида расчета является, прежде всего, определение расчётных и проектных толщин стенок деталей трубопровода, максимальных предельно-допускаемых давлений в деталях. Кроме того, определяются размеры укрепленных участков тройников и угольников, толщины усиления приварных патрубков, диаметры и толщины стенок заготовок гнутых отводов. Предусмотрен также режим подбора деталей из отраслевых сортаментов.

3.2.1. Расчёт по РД РТМ 26-01-44-78 [9]

s_T – толщина стенки трубы (разделки под сварку, колена, гiba, перехода, корпуса и/или отвода тройника, угольника, приварного патрубка), мм;

s_p – расчётная толщина стенки трубы (разделки под сварку, колена, гiba, перехода, корпуса и/или отвода тройника, угольника, приварного патрубка), мм;

D_1, D_2 – наружные диаметры цилиндрических частей тройника/угольника, мм;

D_{T1}, D_{T2} – диаметры укрепленных участков тройника/угольника, мм;

L_1, L_2 – расчетные длины укрепленных участков тройника/угольника, мм;

H – высота приварного патрубка, мм;

$[p]$ – максимальное предельно-допускаемое давление детали, МПа;

D_3 – номинальный наружный диаметр исходной заготовки гиба, мм;

s_3 – толщина стенки исходной заготовки гиба, мм;

3.2.2. Расчет по ГОСТ Р 55600-2013 [10]

s_n – проектная толщина стенки трубы (колена, гиба, перехода), мм;

s – исполнительная толщина стенки трубы (разделки под сварку, колена, гиба, перехода), мм;

s_p – расчетная толщина стенки трубы (колена, гиба, перехода, основной трубы и отвода тройника, угольника), мм;

$[s]_{\min}$ – минимальная предельно-допускаемая (отбраковочная) толщина стенки трубы (колена, гиба, перехода), мм;

$d_{нт}, d_{но}$ – наружные диаметры цилиндрических частей основной трубы и отвода тройника, мм;

$D_{рт}, D_{ро}$ – расчетные наружные диаметры укрепленных участков основной трубы и отвода тройника, мм;

D_t, D_o – размеры укрепленных участков основной трубы и отвода тройника, мм;

$[p]$ – максимальное предельно-допускаемое давление, МПа;

$n_{тф}$ – фактический коэффициент запаса прочности по пределу прочности для трубы;

$n_{вф}$ – фактический коэффициент запаса прочности по пределу текучести для трубы;

3.3. Поверочный расчет на прочность проводят после расчета (см. п. 3.2) по выбору основных размеров (номинальных толщин стенок s элементов) для низко-(средне-) и высокотемпературных трубопроводов в соответствии с положениями **РД РТМ 26-01-44-78, ГОСТ Р 55990-2014** [9, 10] (**АСТРА-СВД**), **РТМ** [11, 13] и на основании следующих исходных данных.

Первоначальными данными для поверочного расчета на прочность являются:

1) аксонометрическая схема трубопроводной системы, как правило и желательно, в общей со строительными конструкциями (при их наличии) правосторонней декартовой системе координат X_1 (X), X_2 (Y), X_3 (Z), где ось X_3 , как правило, направлена вертикально вверх, ось X_1 – в направлении, обратном обозначению строительных осей, ось X_2 – в направлении, обратном нумерации строительных рядов; допускается (а для ряда компоновок – удобно) задание схемы или ее фрагментов в цилиндрической и (или) сферической системах координат;

2) указание местоположения и спецификации сортамента прямых труб, переходников, отводов (гибов, колен и секторных) и косых стыков, тройниковых узлов (сварных, сварных с усиливающими накладками, штампованных и штампованных, кованных) и врезок, фланцевых соединений, “арматуры” (клапаны, задвижки и т.п.), оборудования (включенного в расчетную модель), пружинных подвесок (по **МВН-043-63, ОСТ 108.764.01-80, ОСТ 24.125.109-01**, “спецпружины” **ВНИПИЭТ**, пружинных опор фирмы **LISEGA**, “пружин постоянного усилия” и пружин пользователя), жестких подвесок-тяг, опор скольжения, катковых и направляющих опор, пружинных опор (**ОСТ 24.125.166-01, ОСТ 108.275.69-80**), специальных опорных конструкций, сейсмо- и виброамортизаторов и (или) демпферов, противоаварийных опор-ограничителей;

3) величины монтажного натяга, заданных температурных перемещений промежуточных и “мертвых” опор, статических и температурных нагрузок для различных режимов нагружения;

4) амплитудно-частотные и (или) временные характеристики сейсмических, вибрационных (гидродинамических), импульсных и аварийных воздействий.

Первые две группы данных, составляющие 80-95% всего объема исходной информации, в современных условиях можно (и должно) сформировать с использованием встроенных пополняемых баз данных (по деталям и свойствам материалов) и аналогов-прототипов либо в “традиционном” препроцессоре **ПРЕ-АСТРА**, либо в САПР-оболочке семейства **АСТРА-САПР**, либо средствами САПР ПГС (например, **CADWork/PIPE, PDS**), а затем «через» **АСТРА-САПР** экспортировать в **АСТРА-НОВА**.

На основании указанной выше информации с привлечением соответствующих **ОСТов**,

ГОСТов и Норм [84-86] формируются (непосредственно или с использованием встроенных баз данных по деталям, свойствам материалов и параметрам нагрузок-воздействий) приведенные ниже исходные данные, непосредственно используемые в расчетах.

3.3.1. Геометрические характеристики сечений прямых труб, отводов и тройников

D – номинальный наружный диаметр сечения детали (прямо- и криволинейной трубы, перехода), мм;

S – номинальная толщина стенки детали (прямо- и криволинейной трубы, перехода), мм;

R – радиус оси криволинейной трубы (гиба, колена), мм;

3.3.2. Характеристики опорных конструкций, арматуры и оборудования:

k_{x1}, k_{x2}, k_{x3} – линейные жесткости опорных конструкций, в том числе, опор скольжения, катковых и направляющих опор по направлениям общей (глобальной) X_1, X_2, X_3 или местной (локальной) x_1', x_2', x_3' декартовой системы, кН/м;

$k_{\alpha}, k_{\beta}, k_{\gamma}$ – угловые жесткости опорных конструкций (связей) вокруг осей X_1, X_2, X_3 или x_1', x_2', x_3' , кН м/рад;

f_{r1}, f_{r2} – коэффициенты трения в опорах скольжения, катковых и направляющих опорах в направлениях вдоль и поперек оси трубы (для опор скольжения обычно принимается $f_{r1}=f_{r2}=0,3$, для катковых опор $f_{r1}=0,1, f_{r2}=0,3$);

$n_{ц}$ – количество цепей пружинной опоры (подвески);

l – длина тяги пружинной/жесткой подвески, мм;

$k_{ц}$ – жесткости цепи пружинной подвески, кН/м (задается для выбранной структуры);

P_y – рабочая нагрузка на пружинную опору, кН (для выбранных пружин); для пружин постоянного усилия – постоянная нагрузка;

s_{x1}, s_{x2}, s_{x3} – линейные жесткости “врезок” (узлов “штуцер-сосуд”, “штуцер-оборудование”) по направлениям местной (локальной) x_1', x_2', x_3' декартовой системы, кН/м;

$s_{\alpha}, s_{\beta}, s_{\gamma}$ – угловые жесткости “врезок” вокруг осей x_1', x_2', x_3' , кН м/рад;

$k_{x1}^d, k_{x2}^d, k_{x3}^d$ – линейные динамические жесткости сейсмо- и виброамортизаторов, кН/м (учитываются при динамических расчетах);

C_{x1}, C_{x2}, C_{x3} – коэффициенты демпфирования линейных сейсмо- и вибродемпферов, кН-с/м (в динамических расчетах);

$\{M_{x1}, M_{x2}, M_{x3}, J_{x1}, J_{x2}, J_{x3}\}$ – сосредоточенные массы (m) и моменты инерции вращения ($m \cdot m^2$) относительно осей X_1, X_2, X_3 , которыми может моделироваться жесткое оборудование и арматура, включенные в расчетную модель;

3.3.3. Нагрузки и воздействия:

n_j – коэффициент(ы) надежности по нагрузке (перегрузки);

N_i – “штатное” или фактическое число циклов нагружения для i -го расчетного режима (за время эксплуатации);

r_i – коэффициент асимметрии цикла для i -го расчетного режима (за время эксплуатации);

p_i – расчетное внутреннее давление в трубопроводе для i -го расчетного режима, МПа;

p_a – давление автофретирования детали, МПа;

T_i – расчетная температура стенки детали (средняя температура), °С;

$T_i(s)$ – распределение температуры по толщине стенки, °С;

$T_i(h)$ – распределение температуры по высоте сечения, °С;

$\{q\}=\{q_1, q_2, q_3\}$ – вектор распределенных погонных статических нагрузок на трубопровод по направлениям X_1, X_2, X_3 (q_3 – весовая нагрузка), кН/м;

m_3 – погонный распределенный момент от неравномерного распределения температуры по высоте сечения, кН;

$\{P\}=\{P_1, P_2, P_3\}$ – вектор заданных сосредоточенных нагрузок (по осям X_1, X_2, X_3) имитирующий статическое действие арматуры и оборудования, а также возможную статическую составляющую реакции сейсмо- и виброопор, кН;

$\{u\}_0=\{u_1, u_2, u_3, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3\}_0$ – вектор заданных начальных (температурных) линейных (u_1, u_2, u_3 – в мм) и угловых ($\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ – в рад.) перемещений “мертвых” концов и опор; имитирует влияние оборудования и других систем, не включенных в расчетную схему;

- $\{\delta'\} = \{\delta'_1, \delta'_2, \delta'_3\}$ – монтажный натяг, заданный в местной системе координат (x'_1, x'_2, x'_3) сечения прямолинейной части трубопровода, мм;
- $\{a_i(f_i)\}_{1,2,3}$ – расчетные спектры ответа; задаются в виде таблиц (оцифрованных графиков) максимальных реакций (ускорений a_i м/с², по направлениям X_1, X_2, X_3) линейного осциллятора, установленного на отметке крепления трубопровода, на сейсмическое воздействие уровня ПЗ и (или) МРЗ в зависимости от его собственной частоты f_i (Гц или рад/с) при заданном уровне демпфирования;
- $\{a_i(t_i)\}_{1,2,3}$ – расчетные акселерограммы: задаются в виде таблиц (оцифрованных графиков) сейсмических ускорений a_i (м/с²) отметки крепления трубопровода по направлениям X_1, X_2, X_3 в дискретные моменты времени t_i (с);
- $\{a_i(t_i)\}_{1,2,3}, \{v_i(t_i)\}_{1,2,3}, \{u_i(t_i)\}_{1,2,3}$ – набор расчетных акселерограмм (ускорения, м/с²), велосиграм (скорости, м/с) и (или) сейсмограмм (перемещений, м) на различных отметках крепления трубопровода (для учета “неплатформенного” эффекта);
- θ_k – k -я частота детерминированного (гидро)динамического воздействия (включая собственные частоты акустических колебаний теплоносителя), Гц или рад/с;
- $\{F_k(\theta_k)\}_l$ – детерминированные полигармонические силовые воздействия, заданные в сечениях гибов, колен, тройников, переходников и арматуры в виде таблицы их амплитуд F_k (кН) и частот (рад/с или Гц), l – номер сечения, k – номер гармоники силы в этом сечении.

3.3.4. Физико-механические характеристики материалов:

- E – модуль (модули) упругости материала трубы для расчетных режимов, МПа;
- $\nu^T (\mu^T)$ – коэффициент Пуассона (для стали обычно принимается $\nu^T = 0,3$);
- $\beta^T (\alpha^T)$ – коэффициент линейного температурного расширения; 1/°K; 1/°C;
- χ, δ – коэффициенты усреднения и релаксации компенсационных напряжений, принимаются по [1–3], задаются для расчета высокотемпературных трубопроводов;
- δ – декремент колебаний, зависящий от внутренней диссипации энергии в металле, сварных соединениях и системе “труба-теплоноситель” и т.п. (для оценки сейсмостойкости, вибропрочности и динамической реакции);

3.3.4.1. Расчёт по РД РТМ 26-01-44-78 [9]

- $R_{m/t}$ – минимальное значение временного сопротивления (предела прочности) материала для расчётных режимов, МПа;
- $R_{T/t}$ – минимальное значение предела текучести материала для расчётных режимов;
- ϕ, ϕ_n – коэффициент прочности продольного и поперечного сварного соединения;
- n_N – коэффициент запаса прочности по числу циклов;
- n_σ – коэффициент запаса прочности по напряжениям;
- q – коэффициент чувствительности материала к концентрации;
- a_σ – теоретический коэффициент концентрации;

3.3.4.2. Расчёт по ГОСТ Р 55600-2013 [10]

- $R_{m/t}$ – минимальное значение временного сопротивления (предела прочности) материала для расчётных режимов, МПа;
- $R_{T/t}$ – минимальное значение предела текучести материала для расчётных режимов;
- ψ_t – относительное сужение материала детали для расчетных режимов;
- δ_t – относительное удлинение материала детали для расчетных режимов;
- n_σ – коэффициент запаса прочности по напряжениям;
- n_N – коэффициент запаса прочности по числу циклов;
- K_σ – теоретический коэффициент концентрации приведенных упругих напряжений;

3.4. Результатом каждого вида расчета является, прежде всего, оценка напряженно-деформированного состояния и прочности всех элементов (сечений) трубопроводов по соответствующему критерию. Кроме того, определяются нагрузки на патрубки арматуры и оборудования, на опорные и строительные конструкции. Предусмотрен автоматизированный режим выбора “оптимальной” структуры пружинных подвесок сортамента ОСТ, МВН, специальных пружин ВНИПИЭТ (учет температурного удлинения тяг) и пружин фирмы LISEGA. Вычисляются также перемещения и силовые факторы (усилия и моменты) в торцевых сечениях фасонных элементов,

которые затем могут быть использованы как граничные условия для их уточненного расчета (а также анализа устойчивости) или для расчета существенно более гибких трубопроводных систем, примыкающих к этим сечениям.

$\{\mathbf{u}\}=\{\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \mathbf{u}_3, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3\}$ – вектор перемещений (линейных $\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \mathbf{u}_3$, мм, и угловых $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$, рад.) сечений и узлов расчетной модели;

$\{\mathbf{N}\}=\{\mathbf{Q}_{x1}, \mathbf{Q}_{x2}, \mathbf{Q}_{x3}, \mathbf{M}_{x1}, \mathbf{M}_{x2}, \mathbf{M}_{x3}\}$ – вектор нагрузок на “мертвую” опору (патрубок арматуры и оборудования, заземляющие опорные и строительные конструкции): силы $\mathbf{Q}_{x1}, \mathbf{Q}_{x2}, \mathbf{Q}_{x3}$ (кН) и моменты $\mathbf{M}_{x1}, \mathbf{M}_{x2}, \mathbf{M}_{x3}$ (кН·м);

$\{\mathbf{N}'\}=\{\mathbf{N}_{z'}, \mathbf{M}_{x'}, \mathbf{M}_{y'}, \mathbf{M}_{z'}\}$ – вектор значимых силовых факторов в расчетных сечениях:
 $\mathbf{N}_{z'}$ – осевое усилие, кН;

$\mathbf{M}_{x'}, \mathbf{M}_{y'}, \mathbf{M}_{z'}$ – изгибающие и крутящий моменты, кН·м;

$\{\mathbf{P}\}_i=\{\mathbf{P}_{x1}, \mathbf{P}_{x2}, \mathbf{P}_{x3}\}$ – вектор нагрузок на опорные конструкции (пружинные подвески, опоры скольжения и др.), кН;

ω_i – i -я собственная частота колебаний, $i=1, 2, \dots, p$ (Гц или рад/с);

$\{\varphi\}_i$ – i -я собственная форма колебаний системы;

$\sigma_{\varphi(\theta)}, \sigma_{z(y)}, \sigma_r$ – окружная (кольцевая), продольная и радиальная компоненты нормальных напряжений, МПа;

τ – касательные (от кручения) напряжения, МПа;

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные напряжения, МПа;

$[\mathbf{N}]$ – допускаемое число циклов нагружения, соответствующее амплитудам низко- или высокочастотных напряжений;

$\mathbf{a}=\Sigma \mathbf{N}_i/[\mathbf{N}]_i$ – накопленное усталостное повреждение от групп циклов за срок эксплуатации;

3.4.1. АСТРА-СВД (РД РТМ 26-01-44-78)

$\sigma_{\text{экр}}^B$ – эквивалентные напряжения на внутренней поверхности стенки детали от действия давления и температурного перепада по толщине стенки, МПа;

$\sigma_{\text{экр}}^H$ – эквивалентные напряжения на наружной поверхности стенки детали от действия давления и температурного перепада по толщине стенки, МПа;

$\sigma_{\text{экр}\Delta T}^B$ – эквивалентные напряжения на внутренней поверхности стенки детали от действия температурного перепада по толщине стенки, МПа;

$\mathbf{F}/[\mathbf{F}]$ – суммарное соотношение расчётных и допускаемых нагрузок (давления и внутренних усилий) в детали при проверке прочности от действия всех нагружающих факторов;

σ_a – амплитуда напряжений от действия давления, температурного перепада по толщине стенки, компенсации температурных расширений и заданных смещений опор, МПа;

$[\mathbf{N}]$ – допускаемое количество циклов нагружения;

3.4.2. АСТРА-СВД (ГОСТ Р 55600-2013)

$\sigma_{\text{экр}}$ – эквивалентные напряжения в стенке детали при расчете на статическую прочность, МПа;

σ_i – интенсивность напряжений в стенке детали при расчете на статическую прочность, МПа;

σ_a – амплитуда эквивалентных напряжений в стенке детали при расчете на циклическую прочность, МПа;

σ_z – осевые напряжения в стенке гнутых отводов при расчете на статическую прочность, МПа;

r_T – радиус границы, отделяющая упругую область от пластической в деталях, подвергнувшихся автофретированию, мм;

3.5. По программе *АСТРА-СВД* проводятся следующие виды (разделы) поверочного расчета на прочность трубопроводов высокого и сверхвысокого давления [9, 10] (“звездочками” помечены те расчеты, которые не регламентированы действующими российскими нормами, но потребны как по запросам практики, так и по современным мировым стандартам).

1) расчеты на статическую прочность;

2) расчет на циклическую прочность;

3) расчет на прочность при нерабочем состоянии и испытаниях;

4*) расчет на сейсмические воздействия;

5*) расчет на вибропрочность;

6*) расчет на динамические воздействия.

Кроме перечисленных, нормативно регламентированных расчетов, может проводиться в линейно-упругой динамической постановке расчет последствий “мгновенного” разрыва трубопроводов и расчет от кинематических (спектры и акселерограммы) воздействий, вызванных внешними нагрузками на строительные конструкции (удар самолета, ударная воздушная волна и т.п.).

3.6. Поверочный расчет основан на оценке прочности по допускаемым напряжениям, перемещениям и деформациям, собственным частотам колебаний и усталостным повреждениям.

3.7. Расчетные напряжения на соответствующих этапах расчета определяются по теории наибольшей удельной потенциальной энергии формоизменения для прямых труб, отводов (гибов, колен) по заданному рабочему давлению и вычисленным значимым внутренним силовым факторам (осевая сила, изгибающие и крутящий моменты в сечении) и сопоставляются с допускаемыми значениями – непосредственно (оценки несущей способности, статической прочности и сейсмостойкости) или через суммирование повреждений от циклов и (или) факторов (оценки циклической прочности в том числе с учетом высокочастотных составляющих – вибраций).

3.7.1. АСТРА-СВД (РД РТМ 26-01-44-78). Расчетные эквивалентные напряжения σ_e от давления и перепада температур по толщине стенки (этап 2), амплитуды напряжений σ_a , от давления, перепада температур по толщине стенки и усилий самокомпенсации (этап 3), определяемые по теории наибольшей удельной потенциальной энергии формоизменения через компоненты (нормальные окружные σ_ϕ , осевые σ_y и радиальные σ_r и касательные τ) для прямых труб, криволинейных труб и переходов сопоставляемые с допускаемыми значениями, определяются согласно формулам [9]. Оценка прочности от действия дополнительных нагрузок осуществляется через суммирование соотношений расчётных и предельных силовых и нагружающих факторов на этапе 2.

3.7.2. АСТРА-СВД (ГОСТ Р 55600-2013). Расчетные эквивалентные напряжения σ_e от всех нагрузок (этап 2) и амплитуды σ_a от давления, перепада температур по толщине стенки, автофретирования и усилий самокомпенсации (этап 3), определяемые по теории наибольшей удельной потенциальной энергии формоизменения через компоненты (нормальные окружные σ_ϕ , осевые σ_y и радиальные σ_r и касательные τ) для прямых труб, отводов 2-х типов (гнутой из труб или нет) и переходов, осевые напряжения σ_z в гнутой отводах сопоставляются с допускаемыми значениями, определяются согласно формулам [10].

3.8. В комплексах реализованы дополнительные, по сравнению с нормативно регламентированными [9-10], возможности и (или) обоснованно скорректированы нестрогие или ошибочные формулы.

3.8.1. АСТРА-СВД (РД РТМ 26-01-44-78).

1). При подборе деталей реализована возможность учёта коэффициента снижения прочности продольного сварного шва.

2). Проверочный расчёт на совместное действие давления и температуры, а также на дополнительные нагрузки проводится в том числе для криволинейных труб и переходов.

3.8.2. АСТРА-СВД (ГОСТ Р 55600-2013).

1). Учёт напряжений от самокомпенсации производится в том числе и в прямых автофретированных трубах, в любых криволинейных трубах и в переходах.

2). Расчёт эквивалентных напряжений проводится также и в прямых автофретированных трубах, в любых криволинейных трубах и в переходах.

3). Корректировка формул:

а). Осевые напряжения от давления в автофретированных трубах в пределах радиуса текучести вычисляются по формуле:

$$\sigma_z = \frac{R_{T/20}}{\sqrt{3}} \left[2 \ln \frac{r}{r_T} + \frac{r_T^2}{r_H^2} \right] - \frac{p_a - p}{\beta^2 - 1}$$

б) Давление автофретирования для криволинейных труб определяется по формуле:

$$p_a = \frac{R_{T/20}}{\sqrt{3}} \left[\frac{r_{T\theta}^2 (\sin \theta)^2}{R^2} \ln \frac{r_{T\theta} (R + r_H \sin \theta)}{r_H (R + r_{T\theta} \sin \theta)} + \frac{r_{T\theta}}{R} - \frac{r_{T\theta}^2 \sin \theta}{R r_H} + 1 - \frac{r_{T\theta}^2}{r_H^2} + \ln \frac{r_{T\theta}^2 (R + r_{T\theta} \sin \theta)}{r_b^2 (R + r_b \sin \theta)} \right]$$

в) Радиальные напряжения от давления в автофретированных трубах в пределах радиуса текучести вычисляются по формуле:

$$\sigma_r = \frac{R_{T/20}}{\sqrt{3}} \left[\frac{r_T^2 (\sin \theta)^2}{R^2} \ln \frac{r_H (R + r_T \sin \theta)}{r_T (R + r_H \sin \theta)} - \frac{r_T \sin \theta}{R} + \frac{r_T^2 \sin \theta}{R r_H} + 2 \ln \frac{r (R + r \sin \theta)}{r_T (R + r_T \sin \theta)} + \frac{r_T^2}{r_H^2} - 1 \right] - \frac{p_a - p}{m_2} \left[\frac{1}{r_H^2} - \frac{1}{r^2} + \frac{\sin \theta}{R r_H} - \frac{\sin \theta}{R r} + \frac{(\sin \theta)^2}{R^2} \ln \frac{r_H (R + r \sin \theta)}{r (R + r_H \sin \theta)} \right]$$

$$\sigma_\theta = \frac{R_{T/20}}{\sqrt{3}} \left[\frac{r_T^2 (\sin \theta)^2}{R^2} \ln \frac{r_H (R + r_T \sin \theta)}{r_T (R + r_H \sin \theta)} - \frac{r_T \sin \theta}{R} + \frac{r_T^2 \sin \theta}{R r_H} + 2 \ln \frac{r (R + r \sin \theta)}{r_T (R + r_T \sin \theta)} + \frac{r_T^2}{r_H^2} + 1 \right] - \frac{p_a - p}{m_2} \left[\frac{1}{r_H^2} + \frac{1}{r^2} + \frac{\sin \theta}{R r_H} - \frac{\sin \theta}{R r} + \frac{(\sin \theta)^2}{R^2} \ln \frac{r_H (R + r \sin \theta)}{r (R + r_H \sin \theta)} \right]$$

$$\sigma_z = \frac{R_{T/20}}{\sqrt{3}} \left[\frac{r_T^2 (\sin \theta)^2}{R^2} \ln \frac{r_H (R + r_T \sin \theta)}{r_T (R + r_H \sin \theta)} - \frac{r_T \sin \theta}{R} + \frac{r_T^2 \sin \theta}{R r_H} + 2 \ln \frac{r (R + r \sin \theta)}{r_T (R + r_T \sin \theta)} + \frac{r_T^2}{r_H^2} \right] - \frac{p_a - p}{m_2} \left[\frac{1}{r_H^2} + \frac{\sin \theta}{R r_H} - \frac{\sin \theta}{R r} + \frac{(\sin \theta)^2}{R^2} \ln \frac{r_H (R + r \sin \theta)}{r (R + r_H \sin \theta)} \right]$$

Обозначения, принятые в формулах соответствуют таковым в [10].

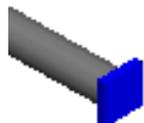
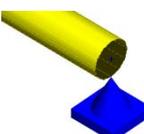
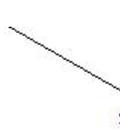
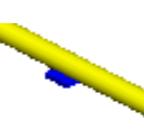
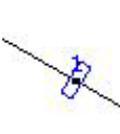
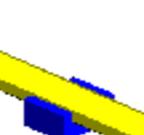
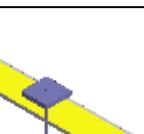
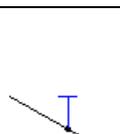
4. Расчетные модели трубопроводных систем

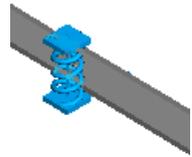
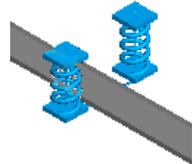
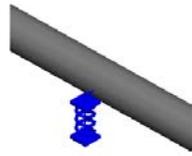
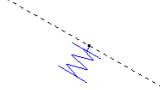
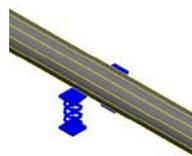
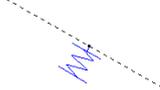
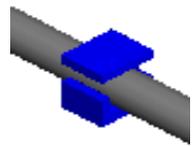
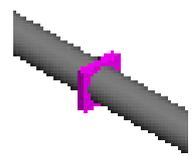
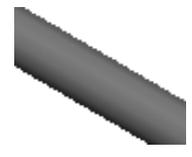
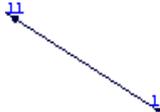
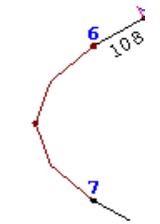
4.1. Произвольный разветвленный трубопровод, содержащий, в общем случае, тройниковые узлы, замкнутые петли, заземленные и консольные концы, рассматривается как пространственная стержневая система. Система состоит из пространственных неразветвленных суперэлементов (СЭ) – “участков”, каждый из которых набирается, в свою очередь, из прямо- и/или криволинейных стержневых элементов – “отрезков”. Суперэлементы соединяются в узлах суперэлементной модели (СЭМ); узлами СЭМ являются тройниковые узлы, консольные концы.

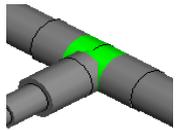
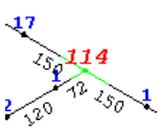
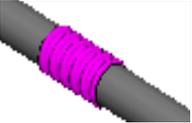
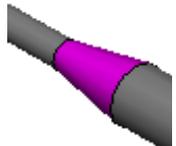
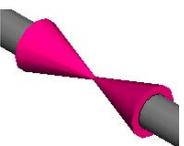
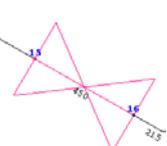
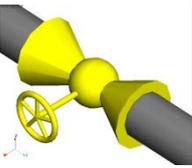
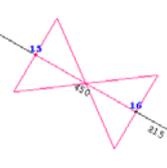
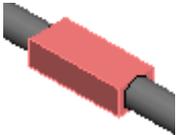
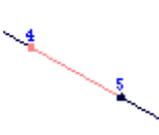
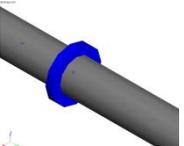
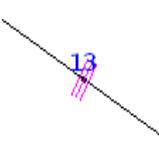
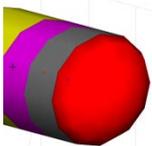
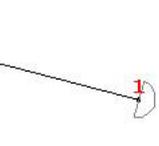
Нумерация внутренних (незаземленных) узлов СЭМ проводится произвольно, все заземленные узлы имеют номера, большие максимального номера внутреннего узла. Нумерация элементов (отрезков, сечений) проводится без “разрывов” от начального узла к конечному узлу СЭ. Суперэлемент полностью идентифицируется номерами начального и конечного узлов, а при наличие нескольких СЭ с одинаковыми номерами начального и конечного узлов – также его программно генерируемом порядковым номером. Для замкнутых суперэлементов-петель начальный и конечный узлы совпадают.

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

Таблица 4.1

| № | 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 |

| № | Изображение | | Элемент АСТРА-модели | Описание/ примечание |
|-----|---|---|--|--|
| | 3D модель | осевая модель | | |
| 6. |  |  | Пружинная подвеска (ОСТ, МВН, спецпружины, постоянного усилия, пользователя) | Подвеска на одной тяге |
| |  |  | | Подвеска, имеющая две или более тяг. |
| 7. |  |  | Пружинная опора (ОСТ 24.125.165-01, ОСТ 108.275.69-80, пользователя) | Опора с одной тягой |
| 8. |  |  | | Опора с двумя и более тяг |
| 9. |  |  | Опора общего вида | Конкретный вид опоры зависит от заданных характеристик опоры |
| 10. |  |  | Амортизатор | Воспринимает только динамические нагрузки |
| 11. |  |  | Прямая труба | 3D-модель отражает реальный диаметр трубы |
| 12. |  |  | Отвод (гиб, колено) | Выделяется от сечения начала вставки отвода до сечения его конца. Имеет сечение серединыгиба (вставляется программой автоматичес |

| № | Изображение | | Элемент АСТРА-модели | Описание/ примечание |
|-----|---|---|---|---|
| | 3D модель | осевая модель | | |
| | | | | ки) |
| 13. |  |  | Тройник (сварной, с накладками, штампованный, ..) | Выделяется цветом от узла до середины ближайшего отрезка. |
| 14. |  |  | Компенсатор (линзовый, сильфонный,...) | Количество гофров на изображени и – условное |
| 15. |  |  | Переход(ник) (концентрическ ий, эксцентрически й) | Размер (длина) изображени соответстvue т фактической длине перехода |
| 16. |  |  | “Арматура” (клапан, вентиль, задвижка,...) | Размер (длина) изображени соответстvue т фактической длине арматуры |
| 17. |  |  | “Арматура” с приводом (клапан, вентиль, задвижка,...) | Размеры изображени соответстvue ют длине арматуры и центру масс привода |
| 18. |  |  | Элемент некольцевого (произвольного) сечения | Задается приведенны ми жесткостны ми характерист иками сечения |
| 19. |  |  | Фланец | В любом сечении прямой трубы |
| 20. |  |  | Днище/крышка | Можно установить только в консольных узлах |

| № | Изображение | | Элемент АСТРА-модели | Описание/ примечание |
|-----|---|---|--------------------------------|--|
| | 3D модель | осевая модель | | |
| 21. |  |  | “Жесткий элемент” (вставка) | Обеспечивает абсолютно жесткую невесомую связь между сечениями |

Некоторые из этих элементов-деталей в составе фрагмента АСТРА-модели характерной пространственной разветвленной трубопроводной системы показаны ниже на рис. 3.1.

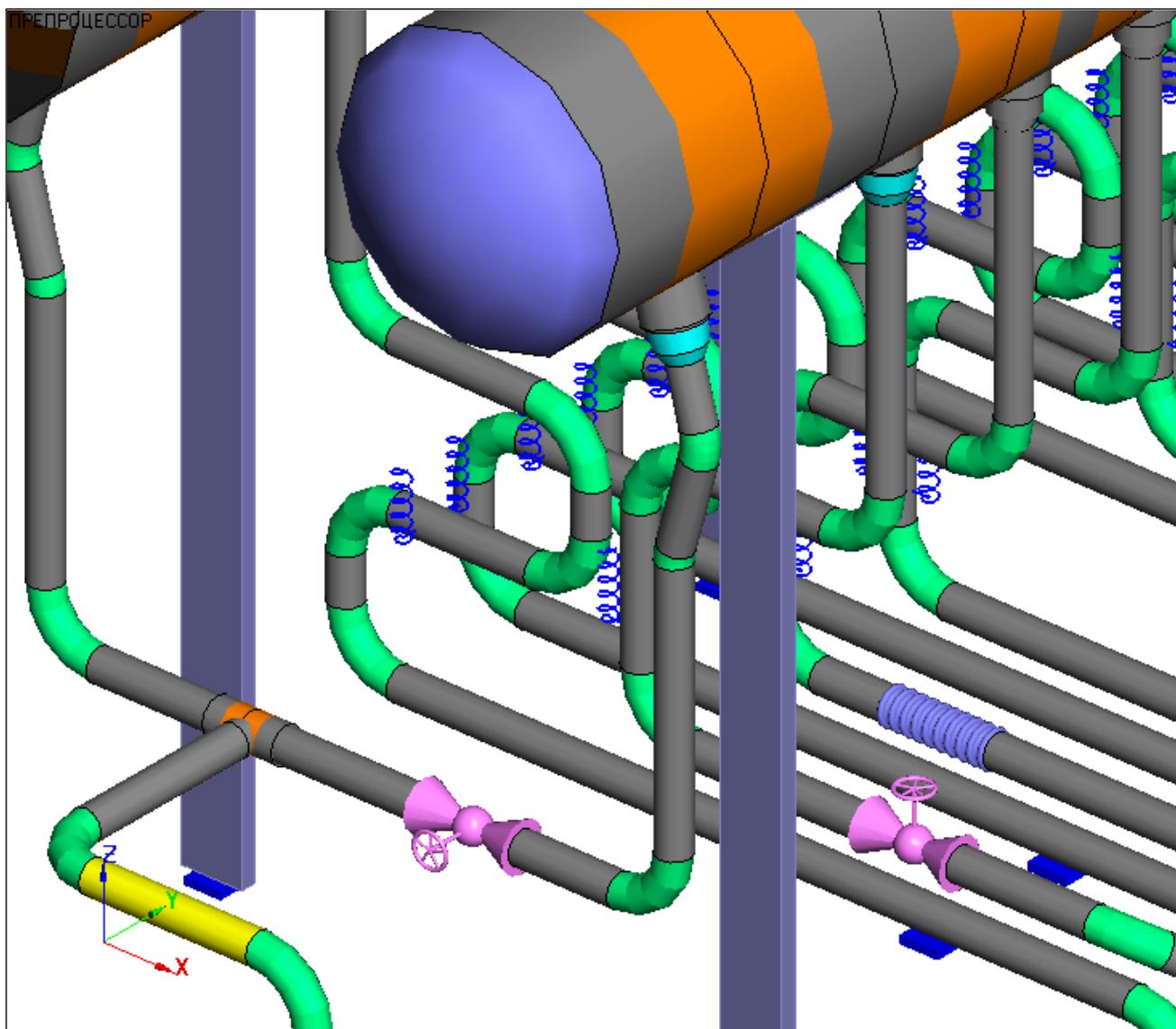


Рис. 4.1 Элементы трубопровода в составе АСТРА-модели ТС (фрагмент)

4.2. Пружинные подвески и растяжки, жесткие тяги, опоры скольжения, катковые и направляющие опоры, пружинные 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 “низкотемпературного” (в настоящей версии – и “высокотемпературного”) трубопровода.

4.3. 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;

В частности, алгоритм учета “штока” (привода) арматуры следует известным соотношениям теоретической механики:

статические расчеты (АСТРА-СТАЦ)

$$G = G^{арм} + G^{шток},$$

$$M_x = -G^{шток} \cdot y,$$

$$M_y = G^{шток} \cdot x,$$

динамические расчеты (АСТРА-ФОРМ, АСТРА-СЕЙСМ, АСТРА-ВИБР, АСТРА-ДИН)

$$M_{x,y,z} = M^{арм} + M^{шток},$$

$$I_x = M^{шток} \cdot (y^2 + z^2),$$

$$I_y = M^{шток} \cdot (x^2 + z^2),$$

$$I_z = M^{шток} \cdot (x^2 + y^2),$$

где:

x, y, z – заданные пользователем декартовы координаты центра масс “штока”-привода относительно центрального сечения арматуры (на оси трубы),

$G^{арм}$ – заданный вес арматуры (без учета веса “штока”),

$G^{шток}$ – заданный вес “штока”-привода,

M_x – приведенный изгибающий момент от “штока” относительно глобальной оси X ,

M_y – приведенный изгибающий момент от “штока” относительно глобальной оси Y ,

$M^{арм} = G^{арм} g$ – масса арматуры без “штока”,

$M^{шток} = G^{шток} g$ – масса “штока”-привода,

$M_{x,y,z}$ – суммарные массы, приведенные к центральному сечению арматуры,

$I_{x,y,z}$ – массовые моменты инерции, приведенные к центральному сечению арматуры.

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

4.4. 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.).

4.5. Система действующих и учитываемых нагрузок и воздействий на *станционные, надземные и подземные в каналах (на опорах)* трубопроводы включает:

– квазистатическое равномерное внутреннее или внешнее давление p ;

– давление автофретирования

– 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 СЭ-модели 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”;

– квазистационарный перепад температур по толщине стенки трубопровода в рабочем состоянии;

– 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* (рис. 3.2 и рис.3.3);

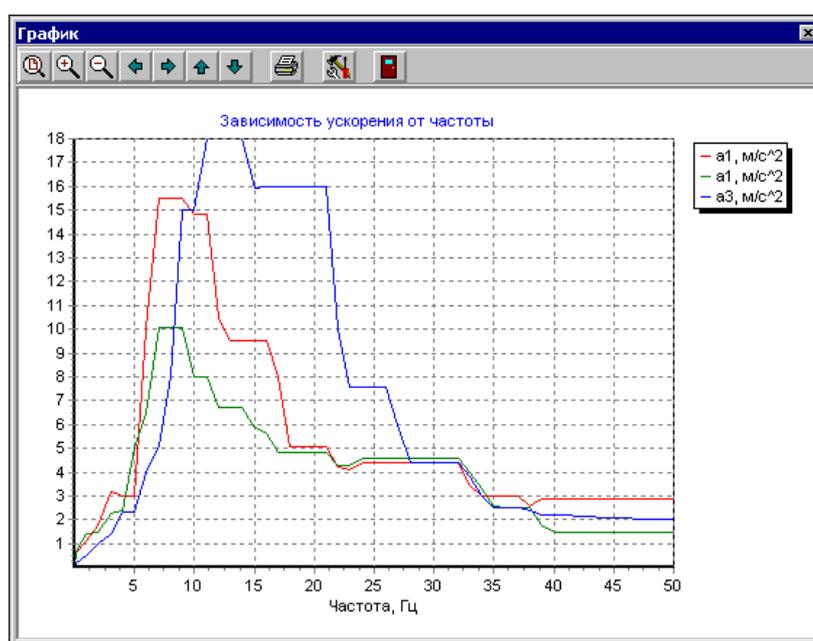


Рис. 4.2 Трехкомпонентный спектр сейсмических ускорений

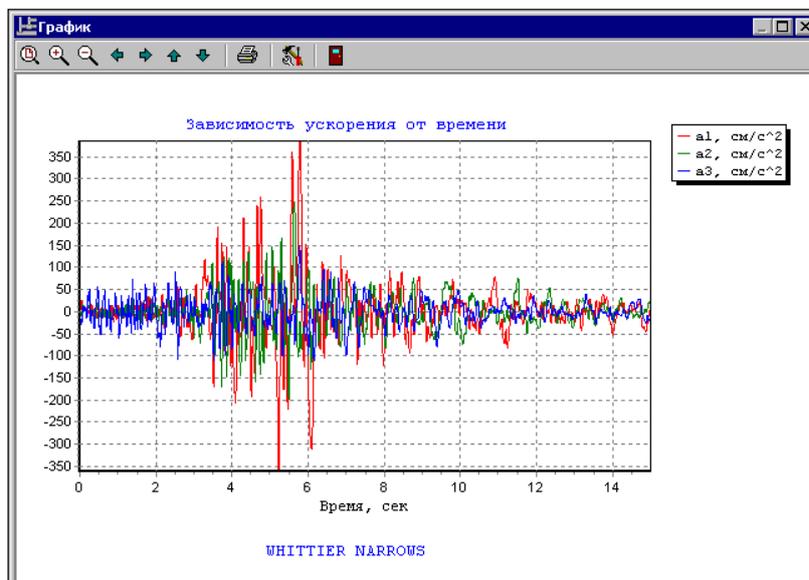


Рис. 4.3 Трехкомпонентная акселерограмма сейсмического воздействия

– 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**.

На подземные (бесканальной прокладки) и наземные (в насыпи) трубопроводы дополнительно действуют нагрузки, обусловленные взаимодействием с грунтом (вес и давление грунта, транспортные – от подвижного состава).

4.6. 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 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, а для подземных участков трубопроводов – и к зонам изменения характеристик изоляции, компенсирующих подушек и грунта.

Кроме того, вводится такое количество расчетных сечений на “длинных” ($L > 5 \div 10D$) прямолинейных элементах, которое может обеспечить удовлетворительную аппроксимацию распределения и максимальных уровней стационарных и (или) динамических перемещений и напряжений. В частности, должно быть задано по крайней мере одно сечение в середине каждого “длинного” элемента.

Для подземных участков трубопроводов дополнительным (по умолчанию – программно реализуемым) является требование достаточно равномерного расположения сечений по длине, имея в виду достаточно подробное и хорошо вычислительно обусловленное моделирование взаимодействие системы “труба-изоляция-подушки” с грунтом засыпки и основания.

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

4.9. Для подземных трубопроводов бесканальной прокладки изоляция, компенсирующие подушки (при их наличии) и грунт моделируются распределенными по длине опорами, жесткость которых (коэффициенты постели) нелинейно зависит от величины и направления перемещений. При этом сетка вынужденно сгущается до следующих характерных расстояний между сечениями (с “грунтовыми псевдоопорами”): $(2-4) D$ – на прямолинейных участках, $(0,2-1,0) D$ – в зонах отводов, косых стыков, тройников, опор и выходов из грунта.

4.10. В подсистеме уточненного расчета температурного и напряженно-деформированного состояний, оценки прочности 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) расчетных конечноэлементных моделей – см. таблица 4.2.

Таблица 4.2

| Деталь (элемент, узел) | Типы КЭ, вид сетки | Виды расчета |
|---|--|--------------|
| Тройник сварной с зачищенным 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) |
| Тройник сварной с зачищенным швом и плакирующим слоем | <ul style="list-style-type: none"> ИПКЭ16, ИПКЭ12 ИПКЭ20, ИПКЭ15 Многослойная схема. | (1-4) |

| Деталь (элемент, узел) | Типы КЭ, вид сетки | Виды расчета |
|--|--|--------------|
| <i>Тройник штампованный и штампосварной</i> (с тянутой горловиной) | • СПКЭ8, СПКЭ6 | (2) |
| | • ИПКЭ16, ИПКЭ12 • ИПКЭ20, ИПКЭ15 Многослойная схема. | (1-4) |
| <i>Тройник штампованный и штампосварной</i> с плакирующим слоем | • ИПКЭ16, ИПКЭ12 • ИПКЭ20, ИПКЭ15 Многослойная схема. | (1-4) |
| <i>Тройник сварной</i> с зачищенным швом и накладкой | • СПКЭ8, СПКЭ6 (пересечение штуцера и магистрали по верхней и нижней поверхности); • СПКЭ8, СПКЭ6 (пересечение штуцера и магистрали по срединной поверхности) | (2) |
| | • ИПКЭ16, ИПКЭ12 • ИПКЭ20, ИПКЭ15 Многослойная схема. | (1-4) |
| <i>Тройник сварной</i> с зачищенным швом, накладкой и плакирующим слоем | • ИПКЭ16, ИПКЭ12 • ИПКЭ20, ИПКЭ15 Многослойная схема. | (1-4) |
| <i>Тройник сварной</i> со швом (“треугольник”) “штуцер-магистраль” | • ИПКЭ16, ИПКЭ12 • ИПКЭ20, ИПКЭ15 Многослойная схема. | (1-3) |
| <i>Тройник сварной</i> с накладкой и швами “штуцер-магистраль-накладка” и “магистраль-накладка” | • ИПКЭ16, ИПКЭ12 • ИПКЭ20, ИПКЭ15 Многослойная схема. | (1-3) |
| <i>Отвод гнутый</i> (с примыкающими трубами) | • СПКЭ8 | (1-4) |
| | • ИПКЭ16, • ИПКЭ20 Многослойная схема. | (1-3) |
| <i>Отвод гнутый</i> с плакирующим слоем (с примыкающими трубами) | • ИПКЭ16, • ИПКЭ20 Многослойная схема. | (1-3) |
| <i>Отвод секторный</i> (с примыкающими трубами) | • СПКЭ8 –пересечение по верхней и нижней поверхности • СПКЭ8 –пересечение по срединной поверхности | (2) |
| | • ИПКЭ16, • ИПКЭ20 Многослойная схема. | (1-3) |
| <i>Отвод секторный</i> с плакирующим слоем (с примыкающими трубами) | • ИПКЭ16, • ИПКЭ20 Многослойная схема. | (1-3) |

| Деталь (элемент, узел) | Типы КЭ, вид сетки | Виды расчета |
|--|--|--------------|
| <i>Косой стык</i> | <ul style="list-style-type: none"> СПКЭ8 –пересечение по верхней и нижней поверхности СПКЭ8 –пересечение по срединной поверхности | (2) |
| | <ul style="list-style-type: none"> ИПКЭ16, ИПКЭ20 Многослойная схема. | (1-3) |
| <i>Косой стык с плакирующим слоем</i> | <ul style="list-style-type: none"> ИПКЭ16, ИПКЭ20 Многослойная схема. | (1-3) |
| <i>Косой стык со сварным швом</i> | <ul style="list-style-type: none"> ИПКЭ20, ИПКЭ15 Многослойная схема. | (1-3) |
| <i>Прямая труба с кольцевым сварным швом</i> | <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 (сильфонный, линзовый)</i> | <ul style="list-style-type: none"> СПКЭ8 | (2) |

(1) – стационарная задача теплопроводности

(2) – расчет НДС и прочности

(3) – комбинированный расчет (определение температурного поля и использование его в качестве температурной нагрузки для определения НДС)

(4) – формирование матрицы жесткости 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.

5. Вычислительные алгоритмы

5.1. В модуле *АСТРА-ДЕТАЛЬ* реализованы нормативные [9, 10] алгоритмы расчета по выбору основных размеров деталей трубопровода, в двух вариантах:

1) расчёт минимальной толщины стенки деталей по наружному диаметру D_n – расчёт минимальной толщины стенки деталей трубопровода, исходя из заданных пользователем расчётных параметров; При этом непосредственно определяется номинальные толщины стенок деталей трубопровода и площади сечения дополнительных укрепляющих элементов тройниковых соединений.

2) выбор деталей с минимальной толщиной стенки из сортамента по условному диаметру D_y . В этом случае по сортаменту выбираются детали с подходящим условным диаметром, определяется их наружный диаметр. Затем, для каждого наружного диаметра вычисляется требуемая номинальная толщина стенки и сравнивается с толщиной стенки соответствующих деталей из сортамента, после чего выбирается деталь с минимально возможной для вычисленного диаметра толщиной стенки.

5.2. В модулях *АСТРА-СТАЦ*, *-ФОРМ*, *-СЕЙСМ*, *-ВИБР* и *-ДИН* реализован алгоритм 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, изложенный в **РТМ 108.020.01-75** [11] 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), опор с зазорами;

6) учета совместной нелинейной работы системы “труба-изоляция-грунт” подземных трубопроводов бесканальной прокладки (теплосети), подземных и наземных (в насыпи) магистральных трубопроводов;

7) расчета собственных частот и форм колебаний;

8) расчета на сейсмические, вибрационные и динамические воздействия;

9) формирования и учета т.н. матричных суперэлементов (редуцированных матриц жесткости, масс и нагрузок – Крейга-Бемптона).

Алгоритм сочетает суперэлементный подход метода перемещений (см. п. 5.13) 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* [28], 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).

5.3. Предусмотрен режим статического расчета (этап 3 расчета 1, *АСТРА-СТАЦ*) с автоматическим выбором характеристик пружинных подвесок сортамента ОСТ, МВН, пружинных опор и “спецпружины” ВНИПИЭТ, проводимым итерационным путем в соответствии с рекомендациями **РТМ 24.038.12-72** [13], и пружин LISEGA. Сходимость процесса (как правило, задается критерий не более чем 35%-го отличия нагрузок на пружины в “рабочем” и “холодном” состояниях) достигается в большинстве случаев за 2-4 итерации.

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

Также реализован учет т.н. “пружин постоянного усилия”, обеспечивающих заданные нагрузки на трубопровод (пружину) для всех значимых режимов-этапов эксплуатации, включая рабочее, холодное и испытаний (при незаклинённых пружинах).

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

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

По методике **НПО ЦКТИ** [34] 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 “**Типрокаучук**” [37] 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 .

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.

5.5. “Условные” жесткости пружинных подвесок (на этапе 1 расчета с выбором пружин), жесткости “абсолютно” жестких опорных конструкций, пружинных опор 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.

5.6. Решение результирующей алгебраической системы уравнений равновесия суперэлементной модели (определение вектора перемещений в узлах $\{U\}$) проводится для статических задач (*АСТРА-СТАЦ*) и при определении матриц податливости (*АСТРА-ФОРМ*, см.п. 5.7) по схеме квадратного корня (Холецкого) с учетом положительной определенности, симметричности, блочности и разреженности матрицы жесткости $[K]$:

$$\begin{aligned} [K] &= [L]^T [L], \\ [L]^T \{Z\} &= \{F\}, \\ [L]\{U\} &= \{Z\}, \end{aligned}$$

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.

5.7. 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-ФОРМ** (результаты используются программами **АСТРА-СЕЙСМ**, **АСТРА-ВИБР** и **АСТРА-ДИН**) эффективным блочным методом Ланцоша, 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 опор без трения* (формально строгий подход, отвечающий ограничениям спектральной динамической методики);
- 2) жесткости *односторонних опор с трением*, определенные из статического расчета (**АСТРА-СТАЦ**) – оригинальный инженерный прием авторов ПК.

5.8. 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.

5.8.1. 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

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

5.8.2. Для каждой i -й учитываемой собственной 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 $\{S\}_i$ (п.5.8.1).

5.8.3. Определяются расчетные величины сейсмических перемещений $\{\bar{U}_s\}$, внутренних усилий $\{\bar{N}_s\}$ и нагрузок на опоры и оборудование $\{\bar{P}_s\}$

$$\begin{aligned} \{\bar{U}_s\} &= \left(\sum_{i=1}^{KI} \{U_s\}_i^2 \right)^{1/2}; \\ \{\bar{N}_s\} &= \left(\sum_{i=1}^{KI} \{N_s\}_i^2 \right)^{1/2}; \\ \{\bar{P}_s\} &= \left(\sum_{i=1}^{KI} \{P_s\}_i^2 \right)^{1/2}; \end{aligned}$$

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

5.8.4. 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 $\{\varphi\}_i$ ($i=1,2, \dots, KI$) определяются максимальные сейсмические ускорения в сечениях с динамическими степенями свободы

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

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 $\{A_s\}_i$

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

5.8.5. 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:

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

и вызванных ею перемещений, нагрузок на опоры, усилий и напряжений в сечениях и элементах трубопровода.

5.8.6. Три расчетные компоненты спектра ускорений a_i могут быть не только явно заданы пользователем (или выбраны им из базы сейсмоз воздействий), но и определены по заданной трехкомпонентной акселерограмме численным интегрированием по времени (с использованием безусловно устойчивой разностной схемы) уравнений колебаний линейных осцилляторов с представительным набором собственных частот ω_k ($k = 1,2, \dots$) при уровне демпфирования $\xi = const$ (по умолчанию, в соответствии с нормативными положениями для трубопроводов, $\xi = 0,02$):

$$\ddot{u}_i(t) + 2\xi\omega_k\dot{u}_i(t) + \omega_k^2 u_i(t) = -\ddot{q}_i(t)$$

$$a_i(\omega_k) = \max_{t_k} \{ \ddot{u}_i(t) + \ddot{q}_i(t) \}$$

$\ddot{q}_i(t)$ - i -я компонента акселерограммы.

5.9. 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 схемам Дюамеля, Ньюмарка или центральных разностей (по выбору пользователя) 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 интегрирования. 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, графических и анимационных 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.

5.10. 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**.

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

$$\{U\}_j = \left(\{U\}_{jc}^2 + \{U\}_{js}^2 \right)^{1/2}$$

$$\{U\}_{jc} = \sum_{i=1}^{KI} \frac{F_{cij} (\omega_i^2 - \theta_j^2) - 2F_{sij} \xi_i \omega_i \theta_j}{(\omega_i^2 - \theta_j^2)^2 + 4\xi_i^2 \omega_i^2 \theta_j^2} \{\varphi\}_i$$

$$\{U\}_{js} = \sum_{i=1}^{KI} \frac{F_{sij} (\omega_i^2 - \theta_j^2) + 2F_{cij} \xi_i \omega_i \theta_j}{(\omega_i^2 - \theta_j^2)^2 + 4\xi_i^2 \omega_i^2 \theta_j^2} \{\varphi\}_i$$

где:

$$F_{cij} = \{\varphi\}_i^T \{F\}_{jc} / M_i$$

$$F_{sij} = \{\varphi\}_i^T \{F\}_{js} / M_i$$

$$M_i = \{\varphi\}_i^T [M] \{\varphi\}_i$$

5.10.2. 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) $\{F\}_i = \theta_j^2 [M] \{U\}_j$ (см. п. 5.6).

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

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

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

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:

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

5.11. 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 $\{F(t)\}$.

5.12. В *АСТРА-НОВА'2017* реализованы и доступны пользователям две методики *статического расчета (СТАЦ)* подземных трубопроводов бесканальной прокладки:

1) упрощенная – жесткость “распределенных” опор, моделирующих взаимодействие с грунтом во всех сечениях, определяется по заданным пользователем коэффициентам постели по трем локальным осям трубы: продольной (x_3'), горизонтальной поперечной (x_1') и вертикальной (x_2');

2) уточненная (*рекомендуемая*) – на каждом шаге итераций эквивалентные “распределенные” опоры, жесткость которых нелинейно зависит от коэффициентов постели изоляции, подушек и грунта, рассматриваются как упруго-подвижные с тремя линейно-упругими связями по локальным осям трубы: x_3' , x_1' и x_2' . Итерационная процедура завершается при установлении слабо меняющихся перемещений по направлению связей.

Параметры эквивалентной стержневой модели на нелинейном основании и итерационного процесса строятся как на основе отечественного и зарубежного опыта анализа подобных систем, так и на инженерной интерпретации результатов трехмерного конечноэлементного моделирования НДС систем “трубопровод-изоляция-компенсирующие подушки-грунт” в линейно-упругой и нелинейной постановках по комплексу *СТАДИО* (рис. 5.7).

Для “блока” *динамических расчетов (ФОРМ, СЕЙСМ, ВИБР, ДИН)* в *АСТРА-НОВА'2017* реализована вновь разработанная инженерная методика учета/коррекции жесткости эквивалентных опор, моделирующих взаимодействие с грунтом и заданных/определенных в *статическом* расчете. Возможная коррекция, учитывающая существенное увеличение жесткости грунта при динамических воздействиях, выполняется умножением статических жесткостей по локальным осям на заданные пользователем масштабные коэффициенты.

Изложенные выше возможности статических и динамических расчетов доступны также и для подземных и комбинированных (надземно-подземных) трубопроводов.

5.13. В актуальной версии *АСТРА-НОВА* метод суперэлементов (МСЭ), известный также как метод подконструкций, реализован также для построения редуцированных матриц влияния системы или учета этих матриц при суперэлементной сборке. Ключевой процедурой МСЭ является статическая конденсация [68] – 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 $\{u_b\}$:

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

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-НОВА*.

5.14. 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: [69–70] – для закрепленной границы, [71] – для свободной границы, [72] – 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 [69], 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.

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

5.15. “Исследовательская” подсистема программного комплекса прочностных расчетов трубопроводных систем – **АСТРА-СТАДИО** – полностью совместимая с **АСТРА-НОВА’2017** (экспорт геометрических характеристик, физико-механических свойств и нагрузок значимых этапов статического и сейсмического расчетов, импорт уточненных напряжений и матриц жесткости/податливости), обеспечивает уточненный расчет по пространственно-оболочечным и объемным схемам метода конечных элементов (МКЭ) стационарных температурных полей, напряженно-деформированного состояния (НДС), статической, циклической и сейсмической 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 и неортогональных (косых) радиальных (сварных, штампосварных, штампованных и кованных, с 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) конических *переходов* концентрических и с эксцентриситетом;
- 4) косых *стыков*;
- 5) сварных *швов*;
- 6) *подземных трубопроводов* (труб, отводов и косых стыков с изоляцией/компенсирующими подушками в грунте).

Подсистема аккумулирует мировой и собственный многолетний 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 и системы “трубопровод-изоляция-грунт”) расчетных конечноэлементных моделей. Вычислительным “ядром” служит мощный верифицированный конечно/суперэлементный комплекс **СТАДИО** [28], имеющий богатый послужной список исследованных сложных объектов атомной, тепловой и гидроэнергетики, различных отраслей строительства и машиностроения.

Предусмотрены следующие виды расчетов:

- стационарная задача теплопроводности;
- расчет НДС и прочности (в том числе с учётом упругопластического поведения материала);
- комбинированный расчет (определение температурного поля и использование его в качестве температурной нагрузки для определения НДС);
- формирование матрицы жесткости детали (элемента);
- определение предельной пластической нагрузки;
- расчёт НДС и прочности деталей с учётом их автофретирования.

5.15.1 Согласно теории пластического течения, связь между малыми приращениями пластических деформаций и напряжений устанавливается в виде соотношения (ассоциированный закон течения):

$$\{d\varepsilon_{pl}\} = d\lambda \cdot \nabla_{\sigma} F(\{d\sigma\}, H)$$

где $d\lambda$ - пластический мультипликатор,

$\{d\varepsilon_{pl}\}$ – вектор приращений пластических деформаций,

$\{d\sigma\}$ – вектор приращений компонент тензора напряжений,

$F(\{d\sigma\}, H)$ – соотношение, описывающее поверхность пластичности в пространстве компонент тензора напряжений, градиент функции F :

$$\nabla_{\sigma} F = \begin{pmatrix} \partial F / \partial \sigma_1 \\ \vdots \\ \partial F / \partial \sigma_6 \end{pmatrix}$$

Для условия текучести Мизеса и случая отсутствия упрочнения уравнение поверхности пластичности имеет вид:

$$\sigma_e - \sigma_T = 0$$

где σ_T - предел текучести материала, σ_e – эквивалентное напряжение.

Эквивалентные напряжения по Мизесу вычисляются по формуле:

$$\sigma_e = \sqrt{1/2 \cdot (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + 1/2 \cdot (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + 1/2 \cdot (\sigma_3 - \sigma_1)^2 + 3 \cdot \sigma_4^2 + 3 \cdot \sigma_5^2 + 3 \cdot \sigma_6^2},$$

или в терминах девиаторов напряжений

$$\sigma_e = \sqrt{3/2 \cdot s_1^2 + 3/2 \cdot s_2^2 + 3/2 \cdot s_3^2 + 3 \cdot s_4^2 + 3 \cdot s_5^2 + 3 \cdot s_6^2},$$

где

$$s_1 = \sigma_1 - \sigma_0$$

$$s_2 = \sigma_2 - \sigma_0$$

$$s_3 = \sigma_3 - \sigma_0$$

$$s_4 = \sigma_4$$

$$s_5 = \sigma_5$$

$$s_6 = \sigma_6,$$

где σ_0 - гидростатическое напряжение.

$$\sigma_0 = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}.$$

Градиент поверхности пластичности для критерия Мизеса:

$$\nabla_{\sigma} F = \left\{ \frac{3s_1}{2\sigma_e} \quad \frac{3s_2}{2\sigma_e} \quad \frac{3s_3}{2\sigma_e} \quad \frac{3s_4}{\sigma_e} \quad \frac{3s_5}{\sigma_e} \quad \frac{3s_6}{\sigma_e} \right\}^T$$

5.15.2. При изотропном упрочнении предполагается, что поверхность пластичности может равномерно по всем направлениям расширяться. Уравнение поверхности пластичности имеет вид

$$F(\{\sigma\}, H) = \sigma_e - \sigma_T + H = 0,$$

где H – параметр изотропного упрочнения. В случае билинейного изотропного упрочнения (Рис. 4.1)

$$dH = d\lambda \cdot h_c$$

где параметр h_c связан с модулем упругости E и тангенциальным модулем E_T материала соотношением:

$$h_c = \frac{E \cdot E_T}{E - E_T}$$

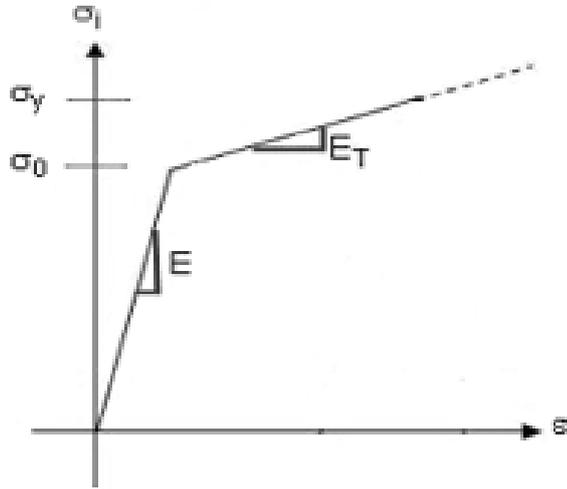


Рис. 5.1. Билинейная диаграмма деформирования

Для определения пластических деформаций при достигнутом уровне напряжений $\{\sigma\}$ и упрочнении H относительно неизвестных $\{d\sigma\}$, $d\lambda$, dH решается нелинейная система уравнений

$$\begin{cases} \{d\sigma\} - [D] \cdot \{d\varepsilon\} + d\lambda \cdot [D] \cdot \nabla_{\sigma} F(\{\sigma\} + \{d\sigma\}, H + dH) = 0 \\ F(\{\sigma\} + \{d\sigma\}, H + dH) = 0 \\ dH = d\lambda \cdot h_c \end{cases}$$

где $[D]$ – матрица упругих постоянных.

Решение данной системы осуществляется итерационно методом Ньютона. Якобиан имеет следующий вид:

$$[J] = \begin{bmatrix} [I] + d\lambda \cdot [D] \cdot \nabla_{\sigma\sigma}^2 F & [D] \cdot \nabla_{\sigma} F & 0 \\ (\nabla_{\sigma} F)^T & 0 & -1 \\ 0 & -h_c & 1 \end{bmatrix},$$

где матрица вторых производных

$$\nabla_{\sigma\sigma}^2 F = \begin{bmatrix} \frac{\partial(\nabla_{\sigma} F)_1}{\partial \sigma_1} & \dots & \frac{\partial(\nabla_{\sigma} F)_6}{\partial \sigma_1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial(\nabla_{\sigma} F)_1}{\partial \sigma_6} & \dots & \frac{\partial(\nabla_{\sigma} F)_6}{\partial \sigma_6} \end{bmatrix}.$$

Для критерия Мизеса можно записать

$$\nabla_{\sigma\sigma}^2 F = \begin{bmatrix} [B_{11}] & [B_{12}] \\ [B_{21}] & [B_{22}] \end{bmatrix},$$

где

$$[B_{11}]: b_{ij} = \begin{cases} \frac{-1/2 - (\nabla_{\sigma} F)_i \cdot (\nabla_{\sigma} F)_j}{\sigma_e}; i=1,3; j=1,3; i \neq j \\ \frac{1 - (\nabla_{\sigma} F)_i^2}{\sigma_e}; i=1,3; j=1,3; i=j \end{cases}$$

$$[B_{12}]: b_{ij} = \frac{-(\nabla_{\sigma} F)_i \cdot (\nabla_{\sigma} F)_j}{\sigma_e}; i=1,3; j=4,6;$$

$$[B_{21}]: b_{ij} = \frac{-(\nabla_{\sigma} F)_i \cdot (\nabla_{\sigma} F)_j}{\sigma_e}; i=4,6; j=1,3;$$

$$[B_{22}] : b_{ij} = \begin{cases} -\frac{(\nabla_{\sigma} F)_i \cdot (\nabla_{\sigma} F)_j}{\sigma_e} ; i=4,6 ; j=4,6 ; i \neq j \\ \frac{3 - (\nabla_{\sigma} F)_i^2}{\sigma_e} ; i=4,6 ; j=4,6 ; i = j \end{cases}$$

Основные реализованные гипотезы: изотропия, линейная упругость (физическая линейность), и упругопластическое поведение (физическая нелинейность – модель изотропного упрочнения) металла и малость деформаций-перемещений (геометрическая линейность). Для грунта (подземные трубопроводы) принята физически нелинейная реологическая модель энергетического типа, зарекомендовавшая себя при численном моделировании трехмерных систем “основание-сооружение” [52]. Реализованный трехмерный многоэтапный расчет с учётом упругопластического (билинейная или реальная диаграмма деформирования материала) по ассоциированному закону течения с изотропным упрочнением, включает важные практические приложения: 1) учет автофретирования (давление автофретирования — разгрузка — давление эксплуатационное) для основных толстостенных деталей трубопроводов высокого/сверхвысокого давления (трубы, отводы, тройники); 2) оценка предельных нагрузок (прежде всего, давления) для тройниковых соединений и других деталей с существенно неоднородным НДС по современному интегральному энергетическому критерию статической прочности – максимума скорости изменения удельной пластической работы.

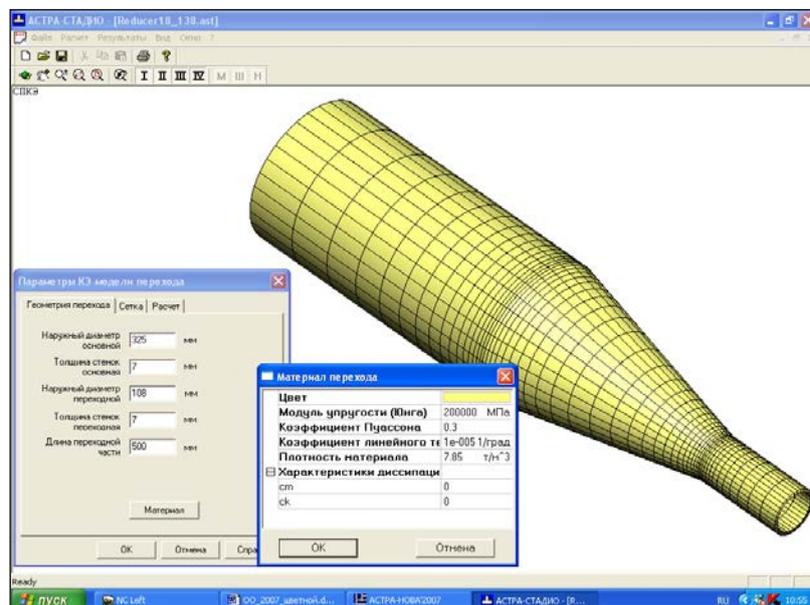
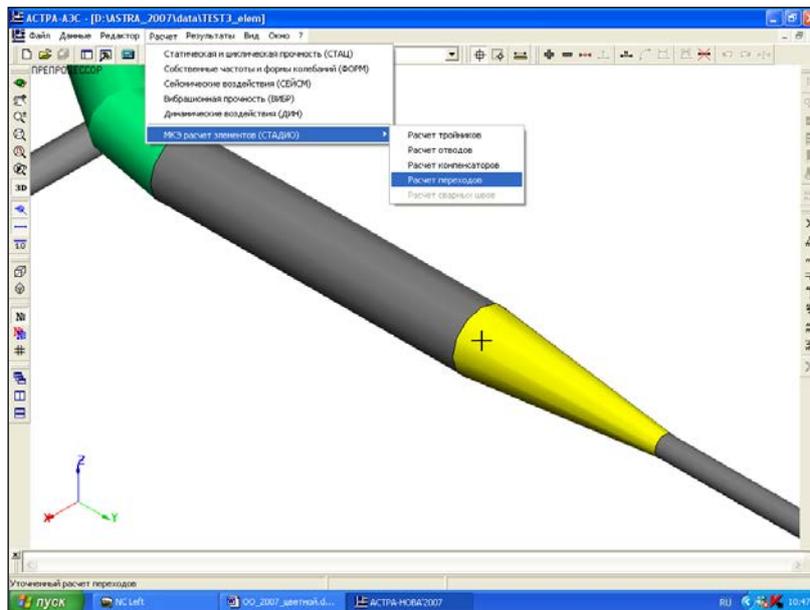
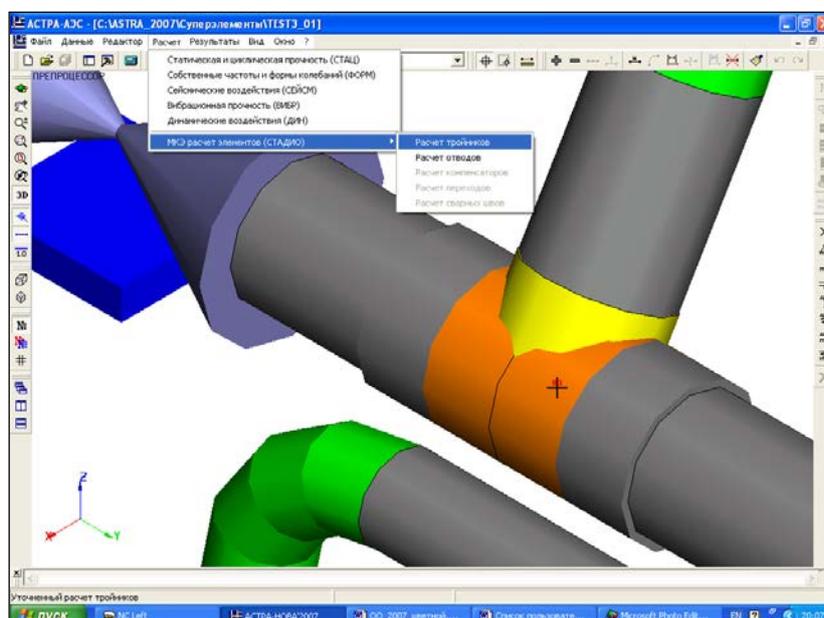


Рис. 5.2 АСТРА-СТАДИО. Импорт данных из АСТРА-НОВА и генерация конечноэлементных моделей деталей (на примере конического перехода)



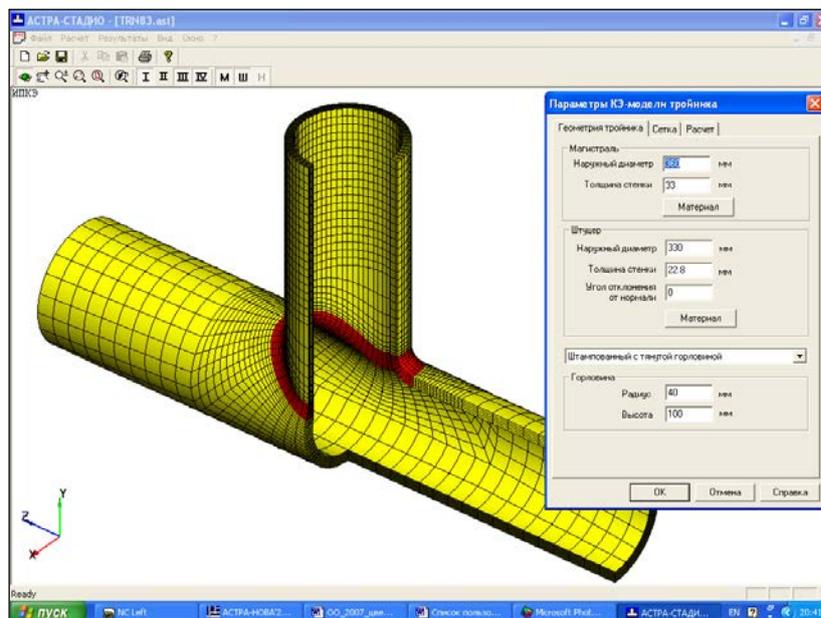


Рис. 5.3 АСТРА-СТАДИО. Импорт данных из АСТРА-НОВА и генерация конечноэлементных моделей деталей (на примере штампованного тройника)

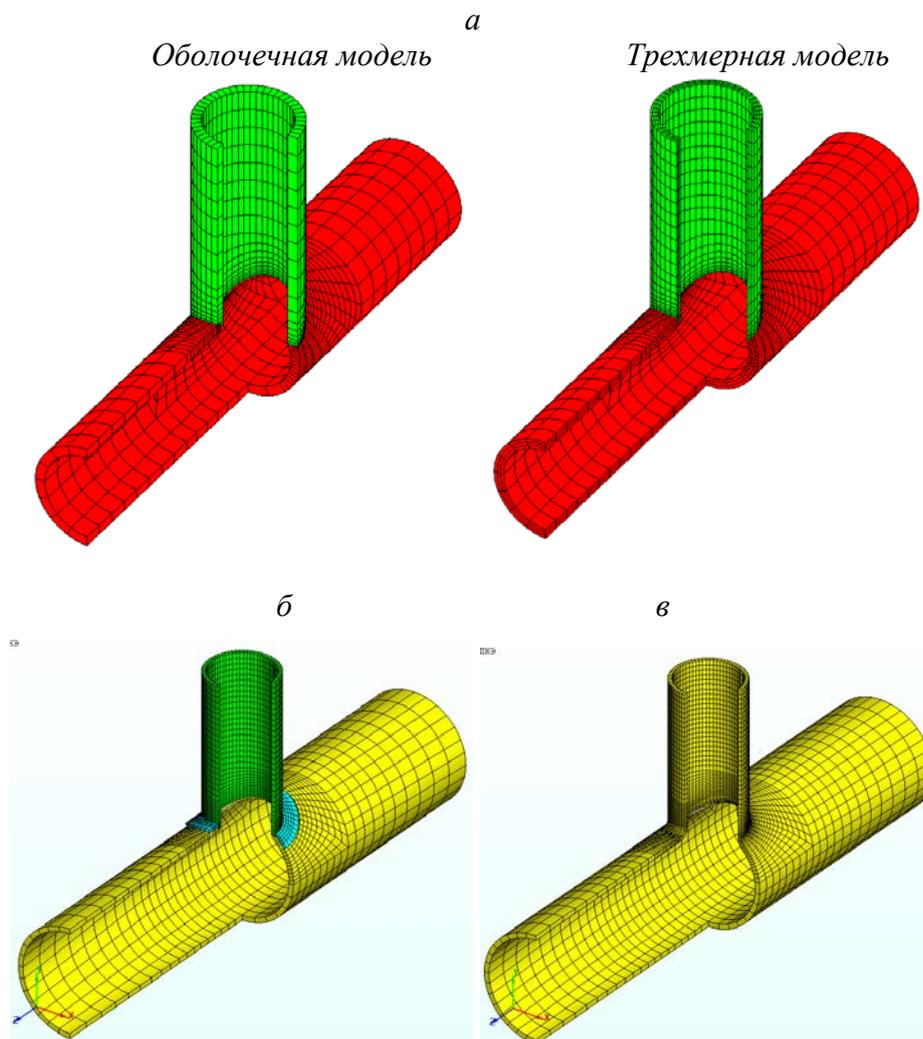


Рис. 5.4 *АСТРА-СТАДИО*. Конечноэлементные модели ортогональных радиальных тройниковых соединений.
а) сварной с зачищенным швом; б) сварной с накладкой;
в) штампованный с тянутой горловиной.

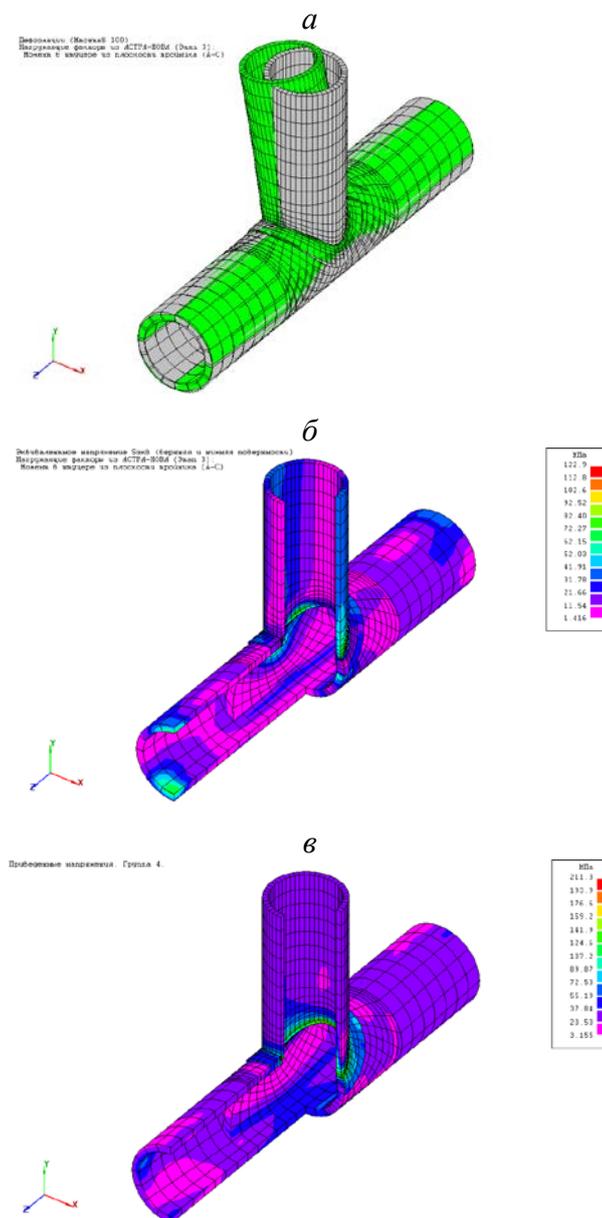
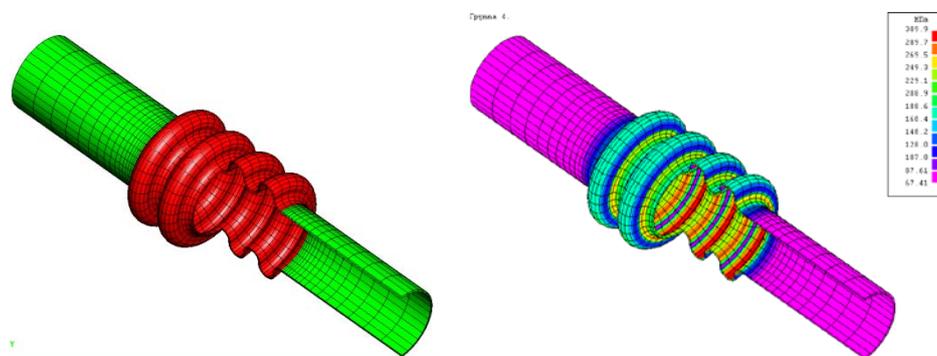


Рис. 5.5 АСТРА-СТАДИО. Деформированное (а) и напряженное (б) состояния при заданных сочетаниях нагрузок, расчетная группа напряжений (в, этап 3, группа $(\sigma_{aF})_K$) тройникового соединения

Линзовый и сильфонный компенсатор



Переход конический концентрический

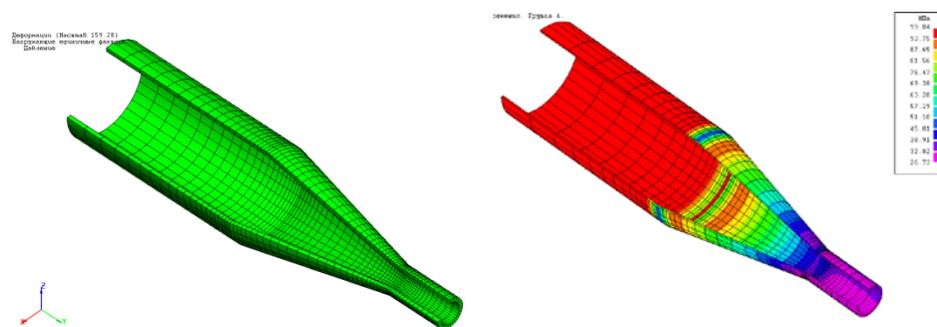


Рис. 5.66 АСТРА-СТАДИО. Конечноэлементные оболочечные модели, расчетные напряжения и оценки прочности деталей трубопроводов

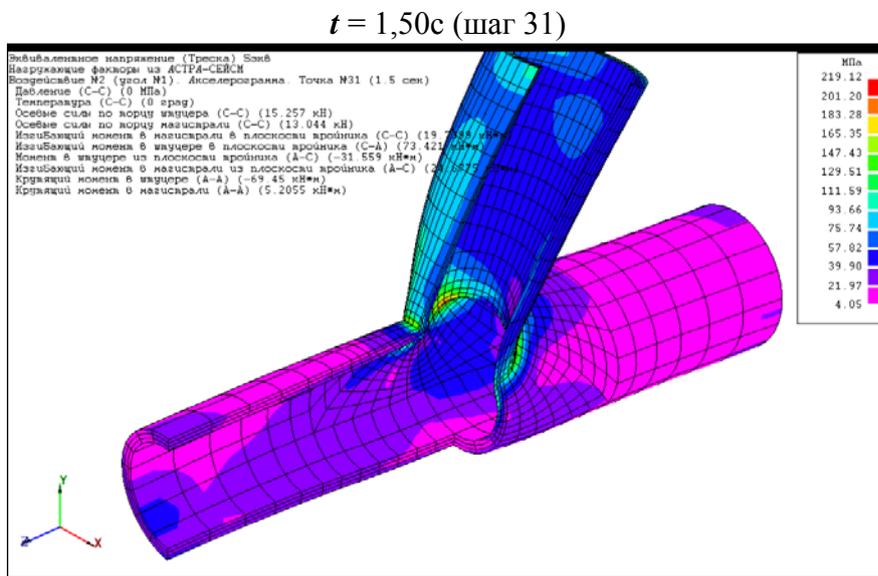
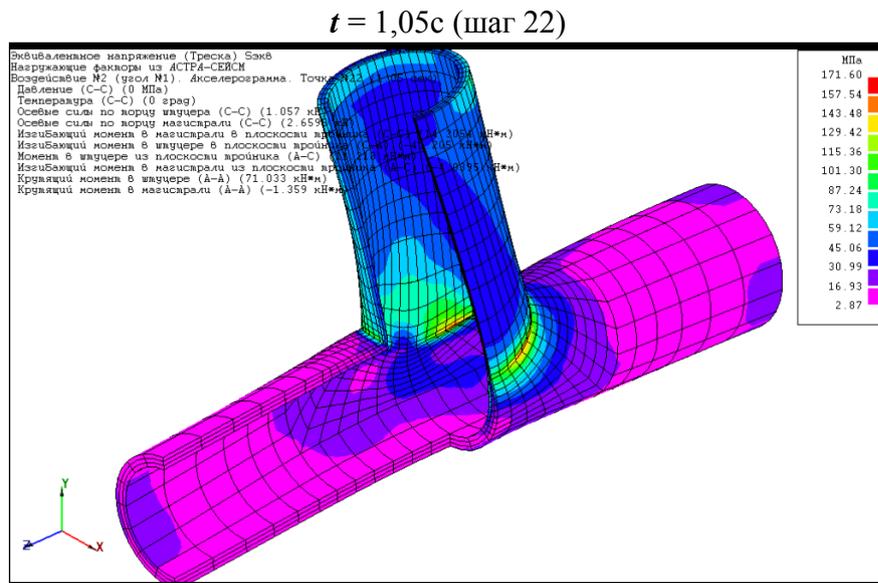
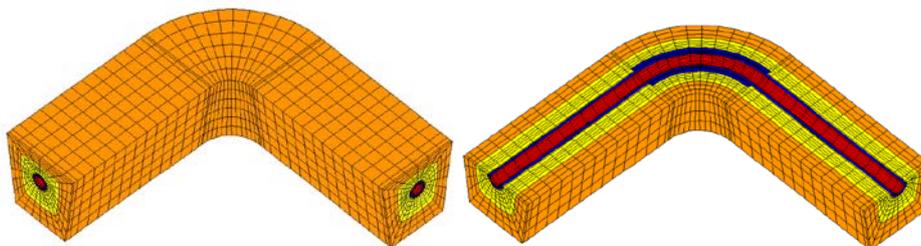
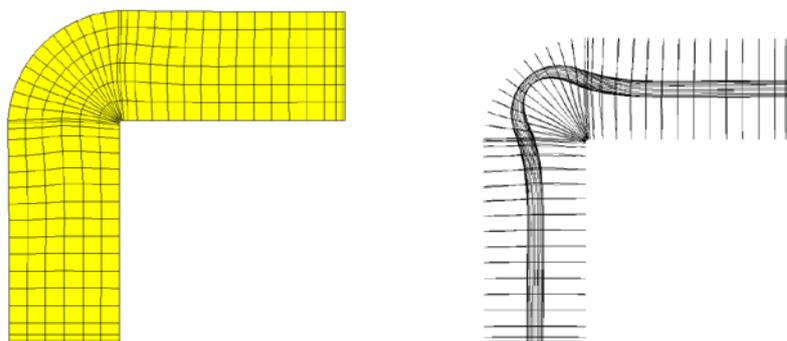


Рис. 5.7 АСТРА-СТАДИО. Кадры видеоролика динамики НДС тройника от сейсмического воздействия, заданного акселерограммой



Расчетное деформированное состояние при температурном нагружении



Расчетное напряженное состояние при температурном нагружении

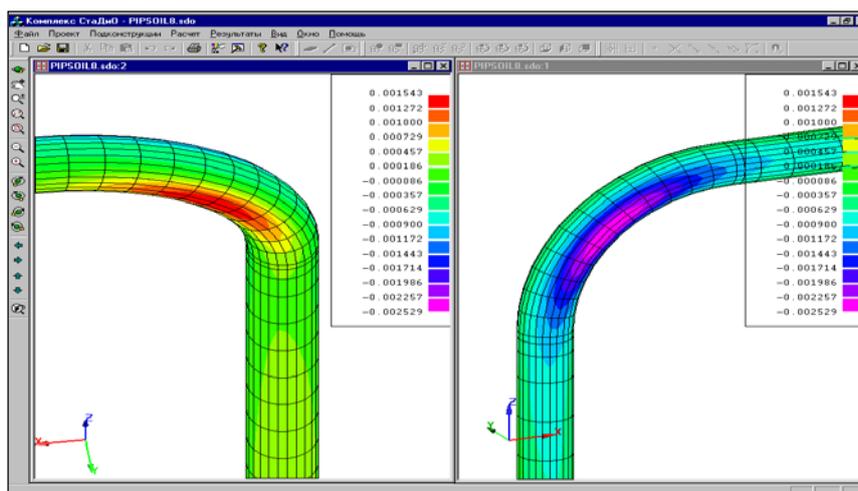


Рис. 5.8 Трехмерная конечноэлементная **СТАДИО**-модель “трубопровод-изоляция (ППУ+ПЭ)-компенсирующая подушка-грунт в траншее”

6. Обоснование расчётной методики

6.1 Методика, реализованная в программном комплексе АСТРА-СВД (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 [11] 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 напряженного состояний деталей трубопроводов (АСТРА-СТАДИО) основан на пространственно-оболочечных и трехмерных схемах “традиционного” метода конечных элементов в перемещениях в предположении упругой или упругопластической работы материала и малости деформаций-перемещений.

6.2 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).

6.3. 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;

6.4 Влияние перечисленных и ряда других факторов на точность и устойчивость решения исследуется в верификационных задачах (см. раздел 6, Приложения 1, 2).

7. 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) *ТС* – суперэлементный подход метода перемещений, методы начальных параметров и прогонки (для каждого неразветвленного суперэлемента), 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 анализа, шагово-итерационные процедуры решения нелинейных задач.

2) *детали (тройники, отводы,...)* – 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.

ПК АСТРА-СВД. Матрица верификации №1

| № | Наименование теста | Сочетание нагрузок/воздействий | Тип проверки результатов | Элементы | Оцениваемые параметры | Максимальное расхождение, % | |
|---|---|---|--------------------------|--|-------------------------------|-----------------------------|----------------|
| | | | | | | Эталон | АСТРА-АЭС'2009 |
| 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 некольцевого сечения, мертвая опора (заделка) | Перемещения | 0.00 | 0.00 |
| 5 | Консоль под равномерно распределенной нагрузкой (сечение общего вида). Сопоставление с аналитическим решением | Распределённая статическая нагрузка (собственный вес) | (1), (7) | Стержень некольцевого 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 некольцевого 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 | 0.00 | 0.00 |

| № | Наименование теста | Сочетание нагрузок/воздействий | Тип проверки результатов | Элементы | Оцениваемые параметры | Максимальное расхождение, % | |
|----|--|--|--------------------------|--|-----------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| | | | | | | Эталон | АСТРА-АЭС'2009 |
| 8 | Собственные частоты прямолинейной трубы с опорными конструкциями, заданными в местной системе координат | Собственные частоты и формы колебаний | (6), (7) | Прямая труба, направляющая опора, мертвая опора (заделка), опора общего вида | Собственные частоты | 0.00 | 0.00 |
| 9 | Собственные частоты стержня с поперечным сечением общего вида. Сопоставление с аналитическим решением | Собственные частоты и формы колебаний | (1), (5), (7) | Стержень некольцевого 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 пространственной трубопроводной системы АЭС с РБМК (подвода и сброса пара за ГПК) | Собственные частоты и формы колебаний | (2 - РАМПА), (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 напряжений в элементах трубопровода (прямолинейная труба под действием давления) | Температура, давление, распределённая статическая нагрузка (собственный вес) | (1) | Прямая труба, мертвая опора (заделка) | Напряжения | 0.00 | - |

| № | Наименование теста | Сочетание нагрузок/воздействий | Тип проверки результатов | Элементы | Оцениваемые параметры | Максимальное расхождение, % | |
|----|---|--|--------------------------|--|-----------------------|-----------------------------|----------------|
| | | | | | | Эталон | АСТРА-АЭС'2009 |
| 16 | Проверка правильности определения расчетных напряжений в элементах трубопровода (прямолинейная труба под действием температурного перепада по толщине стенки) | Температура, давление, распределённая статическая нагрузка (собственный вес) | (1) | Прямая труба, мертвая опора (заделка) | Напряжения | 0.00 | - |
| 17 | Проверка правильности определения расчетных напряжений в элементах трубопровода (прямолинейная автофретированная труба под действием давления) | Температура, давление, распределённая статическая нагрузка (собственный вес) | (1) | Прямая труба, мертвая опора (заделка) | Напряжения | 0.00 | - |
| 18 | Проверка правильности определения расчетных напряжений в элементах трубопровода (криволинейная труба под действием давления) | Температура, давление, распределённая статическая нагрузка (собственный вес) | (1) | Криволинейная труба (отвод гиб, колено), мертвая опора (заделка) | Напряжения | 0.00 | - |
| 19 | Проверка правильности определения расчетных напряжений в элементах трубопровода (криволинейная автофретированная труба под действием давления) | Температура, давление, распределённая статическая нагрузка (собственный вес) | (1) | Криволинейная труба (отвод гиб, колено), мертвая опора (заделка) | Напряжения | 0.00 | - |
| 20 | Проверка правильности определения расчетных усилий и напряжений в элементах трубопровода | Температура, давление, распределённая статическая нагрузка (собственный вес) | (1) | Прямая труба, мертвая опора (заделка) | Напряжения | 0.00 | - |
| 21 | Проверка правильности расчета частот и форм собственных колебаний и сейсмической реакции | Сейсмическое воздействие | (2-CANPIPE), (7) | Прямая труба, отвод (гиб, колено), мертвая опора (заделка) | Собственные частоты | 1.22 | 0.00 |
| 22 | Расчет трубопровода с учетом трения в опорах | Температура, сосредоточенная статическая нагрузка | (1), (3), (7) | Прямая труба, отвод (гиб, колено), опора трения двусторонняя, | Перемещения | 5.40 | 0.00 |

| № | Наименование теста | Сочетание нагрузок/воздействий | Тип проверки результатов | Элементы | Оцениваемые параметры | Максимальное расхождение, % | |
|----|--|--|--------------------------|--|--|-----------------------------|----------------|
| | | | | | | Эталон | АСТРА-АЭС'2009 |
| | | | | мертвая опора (заделка) | Силы трения | 3.82 | 0.64 |
| 23 | Моделирование конических переходов | Сосредоточенная статическая нагрузка | (6) | Переход, прямая труба, мертвая опора (заделка) | Перемещения | 0.00 | - |
| 24 | Моделирование днищ (крышек, доньшек) | Внутреннее давление | (1) | Прямая труба, доньшко (днище, крышка), мертвая опора | Внутренние усилия | 0.00 | |
| 25 | 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 | |
| 26 | 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 | |
| 27 | Расчетная проверка герметичности фланцевых соединений | Внутреннее давление, сосредоточенная статическая сила | (1) | Прямая труба, мертвая опора (заделка), фланец | Условное давление | 0.00 | |
| 28 | Расчет НДС 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 | |
| 29 | 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) | |
| 30 | Трехмерный расчет температурного поля и термонапряженного состояния ортогонального Т-образного тройникового соединения | Температура, конвективный теплообмен | (2 - ANSYS) | Объемный 20-узловой шестигранный КЭ изопараметрического семейства | Температура | 0.01 | |
| | | | | | Напряжения | 1.82 | |
| 31 | Уточненный расчет ортогонального сварного тройникового соединения на статические нагрузки (АСТРА-СТАДИО) | Внутреннее давление, изгибающие моменты | (4), (3) | Оболочечный 8-ми узловые СПКЭ; 16, 20-ти узловые объемные ИПКЭ | Напряжения (коэффициенты интенсификации) | 5.00 | |

| № | Наименование теста | Сочетание нагрузок/воздействий | Тип проверки результатов | Элементы | Оцениваемые параметры | Максимальное расхождение, % | |
|----|--|---|--------------------------|--|--|-----------------------------|----------------|
| | | | | | | Эталон | АСТРА-АЭС'2009 |
| 32 | Уточненный расчет криволинейной трубы с примыкающими прямыми участками (гиба) на статические нагрузки (АСТРА-СТАДИО) | Изгибающие моменты | (1), (3) | Оболочечный 8-ми узловой СПКЭ | Напряжения (коэффициенты интенсификации) | 12.73 | |
| 33 | Уточненный расчет конического перехода на статические нагрузки (АСТРА-СТАДИО) | Внутреннее давление, изгибающий момент | (2 - ANSYS) | Оболочечный 8-ми узловые СПКЭ | Напряжения | 11.00 | |
| 34 | Расчет толстостенной трубы на действие внутреннего давления (АСТРА-СТАДИО) | Внутреннее давление | (2 - ANSYS) | Объемный 20-узловой шестигранный КЭ изопараметрического семейства | Напряжения, деформации | 11,55 | |
| 35 | Расчет толстостенной автофретированной прямолинейной трубы на действие внутреннего давления (АСТРА-СТАДИО) | Внутреннее давление | (2 - ANSYS) | Объемный 20-узловой шестигранный КЭ изопараметрического семейства | Перемещения, напряжения, деформации | 2,75 | |
| 36 | Расчет толстостенной автофретированной криволинейной трубы на действие внутреннего давления (АСТРА-СТАДИО) | Внутреннее давление | (2 - ANSYS) | Объемный 20-узловой шестигранный КЭ изопараметрического семейства | Перемещения, напряжения, деформации | 2,10 | |
| 37 | Суперэлементный динамический расчет трубопроводной системы. Алгоритм Крейга-Бемптона (формирование и учет редуцированных матриц) | Расчет собственных частот и форм | (6) | Прямая труба, стержень некольцевого сечения, отвод (гиб, колено), тройник, арматура, пружинная подвеска, односторонняя опора трения, мертвая опора (заделка), матричный суперэлемент Крейга-Бемптона | Собственные частоты и формы | 0.00 | |
| 38 | Применение матричных суперэлементов для моделирования деталей трубопроводов (на примере криволинейных труб) | Температура, сосредоточенная статическая нагрузка | (6) | Прямая труба, отвод (гиб, колено), мертвая опора, матричный суперэлемент Крейга-Бемптона | Перемещения | 12.64 | |
| 39 | Тесты на размерность задачи | Расчет собственные частот и форм | (5) | Прямая труба, стержень некольцевого сечения, отвод (гиб, колено), тройник, опора трения односторонняя, опора трения двусторонняя, мертвая опора, арматура, пружинная подвеска | 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'2009.

ПК АСТРА-СВД. 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, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 37, 38, 39 |
| Отвод (гиб, колено) | 1, 2, 3, 10, 13, 14, 15, 18, 19, 21, 22, 26, 28, 29, 37, 38, 39 |
| Тройник | 37, 39 |
| Переход | 23 |
| Фланец | 27 |
| Доньшко (днище, крышка) | 24 |
| Арматура | 25, 37, 39 |
| Опора трения односторонняя | 26, 37, 39 |
| Опора трения двусторонняя | 22, 39 |
| 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, 26, 27, 28, 29, 37, 38, 39 |
| Пружинная подвеска | 13, 37, 39 |
| Жесткая подвеска | 26 |
| Опора общего вида | 7, 8, 13, 14, 26, 29 |
| Амортизатор | 26 |
| Стержневой общего вида (некольцевого сечения) | 4, 5, 6, 9, 37, 39 |
| Матричный суперэлемент (Крейга-Бемптона) | 37, 38 |

Конечные элементы модели деталей трубопроводов (АСТРА-СТАДИО)

| КЭ | Номера верификационных примеров |
|-------------------------------|--|
| Оболочечный 8-ми узловой СПКЭ | 31, 32, 33 |
| Трехмерный 16-ти узловой ИПКЭ | 31 |
| Трехмерный 20-ти узловой ИПКЭ | 30, 31, 34, 35, 36 |

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

| Вид расчета | Прямая труба | Гиб (отвод) | Тройник | Переход | Фланец | Арматура | Доньшко (днище, крышка) | Опора трения односторонняя | Опора трения двусторонняя | Опора трения направляющая | Неподвижная опора (шарнир) | Опора мертвая (заделка) | Пружинная подвеска | Жесткая подвеска | Опора общего вида | Амортизатор | Стержень общего вида (нескольцового вида) | 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, 16, 17, 20, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 38 | 1, 2, 3, 18, 19, 22, 26, 38 | | 23 | 27 | 25 | 24 | 26 | 22 | 7 | | 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 38 | | 26 | 7 | 26 | 4, 5, 6 | 38 | | | |
| Расчет собственных частот и формы колебаний | 8, 9, 10, 13, 14, 21, 26, | 10, 13, 14, 21, 26, | 13, 14, 37, 39 | | | 37, 39 | | 37, 39 | 39 | 8, 14 | 10 | 8, 9, 10, 13, 14, 21, | 13, 37, 39 | | 8, 13, 14, 26, 29 | 26 | 9, 37, 39 | 37 | | | |

| Вид расчета | Прямая труба | Гиб (отвод) | Тройник | Переход | Фланец | Арматура | Доншико (днище, крышка) | Опора трения односторонняя | Опора трения двусторонняя | Опора трения направляющая | Неподвижная опора (шарнир) | Опора мертвая (заделка) | Пружинная подвеска | Жесткая подвеска | Опора общего вида | Амортизатор | Стержень общего вида (некольцевового типа) | Матричный суперэлемент | Оболочечный СПКЭ (8 узлов) | Трехмерный ИПКЭ (16 узлов) | Трехмерный ИПКЭ (20 узлов) | |
|---|----------------|-------------|---------|---------|--------|----------|-------------------------|----------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|-------------------------|--------------------|------------------|-------------------|-------------|--|------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|--|
| (АСТРА-ФОРМ) | 26, 29, 37, 39 | 26, 37, 39 | | | | | | | | | | 26, 37, 39 | | | | | | | | | | |
| Расчет на сейсмические воздействия (АСТРА-СЕЙСМ) | 21, 29 | 21, 29 | | | | | | | | | | 21 | | | 29 | | | | | | | |
| Расчет на вибропрочность (АСТРА-ВИБР) | 11 | | | | | | | | | | | 11 | | | | | | | | | | |
| Расчет на Динамические воздействия (АСТРА-ДИН) | 12 | | | | | | | | | | | 12 | | | | | | | | | | |
| Уточненный расчет деталей трубопровода (АСТРА-СТАДИО) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 31, 32, 33 | 31 | 30, 31, 34, 35, 36 | |

8. Описание верификационных примеров (задач, тестов)

Подробное описание верификационных примеров (задач, тестов), включенных в матрицы верификации (см. раздел 6), приведено в Приложении 1.

9. Результаты верификации

Результаты верификации ПК АСТРА-СВД представлены в последней колонке матрицы верификации 1 (см. раздел 6), а также в Приложении 1 настоящего отчета.

“Погрешности” (расхождения) полученных результатов по АСТРА-СВД с “эталонными” решениями определяются как ($\delta, \%$)

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

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

Литература

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 г.). 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. Магистральные трубопроводы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.06-85*. СП 36.13330.2012. М., 2013 г.
7. Магистральные газопроводы. Нормы проектирования на давление свыше 10 МПа. Основные требования. ГОСТ Р 55989-2014. М., 2015 г.
8. Месторождения нефтяные и газонефтяные. Промысловые трубопроводы. Нормы проектирования. ГОСТ Р 55990-2014. М., 2015 г.
9. Детали трубопроводов на давление свыше 10 до 100 МПа. Нормы и методы расчёта на прочность. РД РТМ 26-01-44-78, М., 1978 г.
10. Трубы и детали трубопроводов на давление свыше 100 до 320 МПа. Нормы и методы расчёта на прочность. ГОСТ Р 55600-2013, М., 2015 г.
11. Расчет трубопроводных систем атомных электростанций на прочность. РТМ 108.020.01–75. М., 1975 г.
12. ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III “Rules for Construction of Nuclear Facility Components”, Division 1 – Subsection NB, Class 1 – Components, NY 2010
13. Выбор упругих опор для трубопроводов тепловых и атомных электростанций. РТМ 24.038.12–72. М., 1972 г.
14. Руководство по расчету и конструированию тройников технологических трубопроводов. М., Гидропроект, 1984 г.
15. Руководство по обоснованию прочности трубопроводов АЭС (3 редакция). М., АЭП, НИЦ СтаДиО, 1991 г.
16. Пружины винтовые цилиндрические для подвесок трубопроводов ТЭС и АЭС. Конструкция, размеры и технические требования. ОСТ 108.764.01–80, НПО ЦКТИ, 1981 г.
17. Детали и сборочные единицы из сталей аустенитного класса для трубопроводов АЭС DN=14-325мм. Типы, конструкция и размеры. ОСТ 24.125.01–89 – ОСТ 24.125.26–89. М., 1991 г.
18. Детали и сборочные единицы из сталей перлитного класса для трубопроводов АЭС DN=16-720мм. Типы, конструкция и размеры. ОСТ 24.125.30–89 – ОСТ 24.125.57–89. М., 1991 г.
19. Подвески трубопроводов ТЭС и АЭС. Пружины винтовые цилиндрические. Конструкция и размеры. ОСТ 24.125.109–01, НПО ЦКТИ, 2001 г.
20. 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.
21. 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.
22. 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.
23. 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.

24. 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.

25. 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.

26. 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.

27. 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.

28. Комплекс программ СТАДИО (версии 6.10/99/2001/2003/2005/2007/2009/2011/2013). 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 – 2015 гг.

29. “Семейство” программных комплексов АСТРА-НОВА’2015. АСТРА-СТАДИО’2015. Уточненный расчет температурного и напряженно-деформированного состояния (по пространственно-оболочечным и объемным схемам МКЭ), статической, циклической и сейсмической прочности деталей трубопроводов. Общее описание. Сеанс работы. М., НИЦ СтаДиО, 2003 – 2015 гг.

30. “Семейство” программных комплексов АСТРА-НОВА’2015. 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., ЗАО НИЦ СтаДиО, 2003 – 2015 гг.

31. “Семейство” программных комплексов АСТРА-НОВА’2015. 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., ЗАО НИЦ СтаДиО, 2003 – 2015 гг.

32. Комплекс программ АСТРА-АЭС.

– Версия АСТРА-АЭС 6.1. Верификационный отчет. М., НИЦ СтаДиО, 1992 – 1995 гг.

– Версия АСТРА-АЭС'2009. Верификационный отчет (4 тома). М., НИЦ СтаДиО, 2009 – 2011 гг.

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

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

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

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

37. 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.

38. DIGITAL Visual Fortran Version 6.0 Copyright ©1997 – 1998, DIGITAL Equipment Corporation. Intel Visual Fortran Version 11.1 Copyright © 2006 – 2009.

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

40. Парлетт Б. Симметричная проблема собственных значений. Численные методы. М., Мир, 1983 г.
41. Белостоцкий А.М. Модификация и применение численных методов к расчетам плитно-оболочечных систем на сейсмические воздействия. В кн. “Динамические характеристики и колебания элементов энергетического оборудования”. М., Наука, 1980 г., с. 41-58.
42. 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.
43. 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.
44. 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.
45. 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.
46. 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.
47. 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.
48. Белостоцкий А.М. Численное моделирование комплексного напряженно-деформированного состояния конструкций и сооружений энергетических объектов. “Гидротехническое строительство”, 1999 г., № 8, с. 45-54.
49. 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.
50. 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.
51. 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.
52. 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.
53. 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.
54. 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.
55. 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.

56. 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.
57. 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.
58. 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.
59. 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.
60. 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.
61. 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.
62. 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.
63. 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
64. CEN TC 107 (Draft Standart 12/96): Design, Calculation & Installation for Pre-insulated Bonded Pipes for District Heating.
65. Стальные трубопроводы с заводской теплоизоляцией. Руководство НПО “Стройполимер” по проектированию и монтажу. М., 2002 г.
66. Бородавкин П.П., Подземные магистральные трубопроводы (проектирование и строительство), М., Недра, 1982 г.
67. Стальные трубопроводы с заводской теплогидроизоляцией. М., НПО “Стройполимер”, 2002 г.
68. Гайан Р. Приведение матриц жесткости и массы. – Ракетная техника и космонавтика, 1965 г., т.3, № 2, с. 277-278.
69. Craig R.R., Jr., Bampton M.C.C. Coupling of substructures for dynamic analysis – AIAA Journal, 1968, vol. 6, No. 7, p. 1313-1319.
70. Benfield W.A., Hruda R.F. Vibration analysis of structures by component mode substitution. – AIAA Journal J., 1976, vol. 9, p. 1255-1261.
71. MacNeal R.H. A hybrid method of component mode synthesis. - Computers and structures, 1971, vol. 4, p. 591-601.
72. Hurty W.C. Dynamic analysis of structural systems using component modes. – AIAA Journal., 1984, vol. 4, p. 733-738.
73. PD 5500:2009 “Specification for unfired fusion welded pressure vessels”.
74. Bijlaard P.P. “Stresses From Radial Loads in Cylindrical Pressure Vessels”, The Welding Journal, 33, 1954
75. L.C. Peng and Alvin Peng “Pipe Stress Engineering”, ASME-Press 2009.
76. ГОСТ Р 52857.2-2007 “Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет цилиндрических и конических обечаек, выпуклых и плоских днищ и крышек”.

77. ГОСТ Р 52857.3-2007 “Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Укрепление отверстий в обечайках и днищах при внутреннем и внешнем давлениях. Расчет на прочность обечаек и днищ при внешних статических нагрузках на штуцер”.
78. Айнбиндер А.Б. Расчет магистральных и промысловых трубопроводов на прочность и устойчивость. М., Недра, 1991 г.
79. Рудомино Б.В., Ремжин Ю.Н. Проектирование трубопроводов тепловых электростанций. Л., Энергия, 1970 г.
80. Костовецкий Д.Л. Об изгибе кривой тонкостенной трубы, сечение которой имеет форму, близкую к круговой, при наличии внутреннего или наружного давления. Изв. АН СССР. Механика и машиностроение ОТН 1959, № 6.
81. Костовецкий Д.Л. Расчёт трубопроводов на компенсацию температурных расширений с учётом эллиптичности сечений криволинейных участков. «Электрические станции», 1963, № 3.
82. Pipe Stress Engineering by Liang-Chuan (L.C.) Peng and Tsen-Loong (Alvin) Peng PE, ASME Press, 2009, ISBN: 079180285X 9780791802854
83. Бирбраер А.Н. Расчёт конструкций на сейсмостойкость. СПб, Наука, 1998 г.
84. Сборочные единицы и детали трубопроводов на давление свыше 10 до 100 МПа. Общие технические условия. ГОСТ 22790-89. М., 1989.
85. Сборочные единицы и детали трубопроводов на давление свыше 10 до 100 МПа. Конструкция и размеры. Общие технические условия. ГОСТ 22791-83 – ГОСТ 22826-83. М., 1983.
86. Сборочные единицы и детали трубопроводов на давление свыше 10 до 100 МПа. Общие технические условия. ГОСТ Р 55599-2013. М., 2014
87. Gerdeen J.C. A critical evaluation of plastic behavior data and a unified definition of plastic loads for pressure components // WRC Bulletin. 1979. No. 254. P. 1–64.
88. Li H., Mackenzie D. Characterising gross plastic deformation in design by analysis. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 82, 2005.
89. Вожова Н.В. Определение предельного давления в пересекающихся цилиндрических оболочках на основе упругопластического анализа. Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук. МГИИ – 2011 г.
90. Скопинский В.Н., Берков Н.А., Вожова Н.В. Новый критерий определения предельной нагрузки в сосудах давления с патрубками на основе упругопластического анализа // Машиностроение и инженерное образование. - 2011. - № 3. - С. 50-57.
91. Save M. Experimental verification of plastic limit analysis of torispherical and toriconical heads // Pressure vessel piping: design and analysis, Vol. 1. New York: ASME; 1972. P. 382–416.
92. Muscat M., Mackenzie D., Hamilton R. A work criterion for plastic collapse // International Journal of Pressure Vessels and Piping. 2003. Vol. 80. No. 1. P. 49–58.
93. ASME. Boiler and pressure vessel code section VIII. New York: American Society for Mechanical Engineers; 2004.
94. EN 13445. Unfired pressure vessels—Part 3: design. European Committee for Standardisation (CEN); 2002.
95. Белостоцкий А. М., Аул А. А., Слуцкий В. А., Андронов Н. А. Численное моделирование трубопроводных систем высокого и сверхвысокого давления. // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering, Volume 11, Issue 4, 2015, pp.133-155.
96. Аул А. А., Белостоцкий А. М., Слуцкий В. А. и др. Актуальные проблемы прочностных расчетов трубопроводов высокого давления. Научно-производственный журнал «Безопасность труда в промышленности», № 5, 2016

Основные условные обозначения и сокращения

| | |
|---|--|
| Г | – гигабайт |
| ГОСТ | – государственный стандарт |
| 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 |
| 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, 7, 10 | – операционные системы для ПЭВМ |
| НДС | – напряженно-деформированное состояние |
| 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 |

Единицы измерения (исходные данные и результаты)

| | |
|------------|--|
| СИ | – мм, рад, с, МПа, кН/м, кН, кН \cdot м, m , Гц, рад/с |
| СГС | – см, рад, с, кг/см ² , кг/см, кг, кг \cdot см, Гц, рад/с |

Программы комплекса АСТРА-СВД

| | |
|---------------------|---|
| ПРЕ-АСТРА | – диалоговый препроцессор для задания и верификации расчетной модели трубопровода |
| АСТРА-ДЕТАЛЬ | – расчет по выбору основных размеров |
| 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 |