

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ И НОРМАТИВНАЯ ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМ: ДОСТИЖЕНИЯ, ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

А.М. Белостоцкий

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ПРОИЗВОДСТВА



БЕЛОСТОЦКИЙ
Александр Михайлович

Доктор технических наук, профессор Московского государственного строительного университета МГСУ (МИСИ). Генеральный директор ЗАО «Научно-исследовательский центр СтаДиО». Специализируется в области разработки численных методов и наукоемкого программного обеспечения для расчетного анализа сложных инженерных систем и ответственных объектов энергетики, строительства, машиностроения и других высокотехнологических отраслей с учетом статических и динамических нагрузок, физической и геометрической нелинейностей. Руководитель и разработчик известных программно-алгоритмических комплексов СТАДИО, АСТРА-НОВА. Автор 85 научных трудов, включая нормативные методики расчета.

Современный этап развития задач по расчету статического и динамического напряженно-деформированного состояния (НДС), по оценке прочности и надежности реальных пространственных конструкций и сооружений невозможен без использования численных методов. Практика выдвигает задачи многовариантного и оптимизационного исследования комбинированных систем с учетом факторов, ранее рассматривавшихся упрощенно и (или) без учета их взаимного влияния. Многолетний опыт показывает, что эффективность внедрения вычислительных подходов в практику расчетов конструкций, сооружений и комплексных систем зависит не только и не столько от мощности используемых ЭВМ, сколько от разработки рациональных моделей, вычислительных алгоритмов и реализующих их программ [1].

В последние 15 лет в России при уменьшении объемов нового строительства и проектирования «центр тяжести» исследований сместился в сторону оценки реального состояния и, при необходимости, продления ресурса (срока службы) эксплуатируемых объектов, что потребовало тесного взаимодействия при выполнении численного моделирования и натурных на-

блюдений: размещение, комплектация и характеристики контрольно-измерительной аппаратуры определяются предварительными расчетами, а математическая модель «калибруется» и совершенствуется по данным натурных испытаний. Современная концепция требует непрерывного использования численных моделей для соответствующего представления потенциально опасных объектов на всех этапах их существования – проектирования, строительства, эксплуатации, ремонта и реконструкции, обеспечивая адекватный и полный анализ и прогноз состояния с помощью компьютерных информационно-диагностических систем мониторинга.

Объектно-ориентированные программные комплексы, реализующие эффективные численные методы, должны обеспечивать на стадиях проектирования, эксплуатации-мониторинга и продления ресурса автоматизированные поверочные расчеты произвольных пространственных разветвленных трубопроводных систем на статическую и циклическую прочность, на сейсмические воздействия, вибропрочность и неустановившиеся динамические процессы в соответствии с требованиями российских нормативных документов, действующих в ряде отраслей [2–9], и с учетом достижений, закрепленных в отечественной и зарубежной научно-методической литературе [10–14].

Впервые комплексная и нормативно регламентированная расчетная оценка прочности трубопроводов, ориентированная на использование численных методов, алгоритмов и программ, была применена в отечественной тепловой энергетике (работы сотрудников НПО

ЦКТИ, Д.Л. Костовецкого и др.), в 1970-е годы были выпущены основополагающие руководящие технические материалы (РТМ), не потерявшие своего значения и сегодня. Намечившаяся на протяжении последних десятилетий тенденция состоит в том, что высокие требования к расчетному обоснованию прочности (как по точности моделирования, так и по «номенклатуре» прочностных расчетов), действующие в атомной энергетике с 1970–1980-х годов Нормы [2], регламентирующая документация НИКИЭТ, ИМАШ, НПО ЦКТИ, НПО «Прометей» и др. (применительно к трубопроводам – работы Д.Л. Костовецкого, А.М. Белостоцкого и др.) постепенно и в разумно сокращенном виде распространяются на другие отрасли: нефтехимию и нефтепереработку [4], тепловую энергетику [3] и тепловые сети [5].

В табл. 1 представлены основные виды поверочных расчетов на прочность, регламентируемые действующими российскими нормами.

Общим и требующим безусловного искоренения пороком всех перечисленных и ряда других отечественных нормативных документов является их косность: одни [2, 4, 6] не обновляются уже по 12–20 лет (и не соответствуют современному состоянию проектирования), другие, вышедшие относительно недавно [3, 5], содержат ошибки, двусмысленности и явные пробелы (см. табл. 1), требующие обязательного устранения. К сожалению, при общем понимании состояния дел ситуация с нормативной документацией не меняется.

Не вдаваясь в детальное описание разнообразия мирового рынка специализированных

Таблица 1

Расчет	ПНАЭ Г-7-002-86	РД 10-249-98	РТМ 38.001-94	РД 10-400-01	СНиП 2.05.06-85
Статическая прочность	+	+	+	+	+
Циклическая прочность	+	+	+	±	±
Длительная циклическая прочность	+	+	+	-	-
Сейсмостойкость	+	+	-	-	±
Вибропрочность	+	+	±	-	±
Динамические воздействия	+	+	-	-	±
Устойчивость	+	-	-	+	±
Хрупкая прочность	+	-	-	-	-

Примечание: + – есть; ± – есть в сокращенном виде (или без четкой регламентации); - – не существует

программных продуктов для трубопроводов со своей нормативной базой (общеизвестные лидеры – AutoPipe, CAESAR II, FE/Pipe), отметим контрастную бедность предложения коммерческих программных систем, в полной мере реализующих отечественные нормы расчета на прочность (см. табл. 2).

Остановимся более подробно на рассматриваемой теме на примере разработанного под руководством автора программного комплекса АСТРА-НОВА – лидера российского рынка автоматизированных наукоемких нормативно регламентированных прочностных расчетов трубопроводных систем различных отраслей. Прежде всего отметим достигнутый качественно новый уровень комплексного автоматизированного расчетного обоснования статической и циклической прочности, сейсмостойкости и вибропрочности на доступных ПЭВМ: *трубопроводные системы произвольной сложности можно (и следует) оперативно и точно моделировать, анализировать в полном соответствии с требованиями действующих российских норм и оптимизировать по прочностным критериям, не прибегая к вынужденным и зачастую необоснованным упрощениям, с использованием всех преимуществ САПР- и Windows-технологий.* Например, пользователь в рамках одной расчетной модели имеет возможность оперативно задать и комплексно проанализировать (на статическую и циклическую прочность, сейсмическое воздействие, вибрационную прочность и неустановившиеся динамические процессы) связанную ядерным реактором систему всех петель 1-го контура – «реактор – тру-

бопроводы – парогенераторы – насосы – ГЗЗ – компенсатор объема – ...» с адекватным учетом геометрико-жесткостных, инерционных и диссипативных характеристик и сложных условий крепления оборудования. На рис. 1 представлена подобная модель многоконтурной трубопроводной системы холодоснабжения атомной электростанции, содержащая как элементы трубопроводов, так и оборудование и сложные строительные (опорные) конструкции.

Существенно облегчена и обогащена новыми возможностями также процедура презентации (оформления) результатов расчетов в различных формах (сводные и выборочные таблицы, графики, визуализация и анимация, генерация отчетов). Совместимость и преемственность с предыдущими версиями, соответствие запросам проектной практики удовлетворяет опытных пользователей, а новые, по форме игровые, возможности привлекают молодежь, появляющуюся в успешных фирмах. Созданы и реализуются все предпосылки для полной интеграции расчетов на прочность трубопроводов в процессы автоматизированного трехмерного проектирования и (или) мониторинга объектов атомной и тепловой энергетики, нефтехимии и нефтепереработки, теплосетей и нефте- и газотранспортировки.

В программном комплексе АСТРА-НОВА реализован единый эффективный алгоритм расчета трубопроводов как линейно-упругих пространственных многократно статически неопределимых стержневых систем, сочетающий вариант суперэлементного подхода метода перемещений (для каждого суперэлемента,

Таблица 2

Программный комплекс	ПНАЭ Г-7-002-86	РД 10-249-98	РТМ 38.001-94	РД 10-400-01	СНиП 2.05.06-85
АСТРА-НОВА	+А	+С	+С	+С	+С
СТАРТ	-	±С	±С	+С	±С
РАМПА	±А	±	-	-	-
НЕВА	±	±	-	-	-
CANPipe	±А	-	-	-	-
DPipe	±А	±	-	-	-

Примечание: + – реализует нормативные требования в объеме, достаточном для проектирования и мониторинга; ± – не в полном объеме; - – не реализует; А – аттестован в ГАН РФ, С – сертифицирован в ЦПС Госстроя РФ

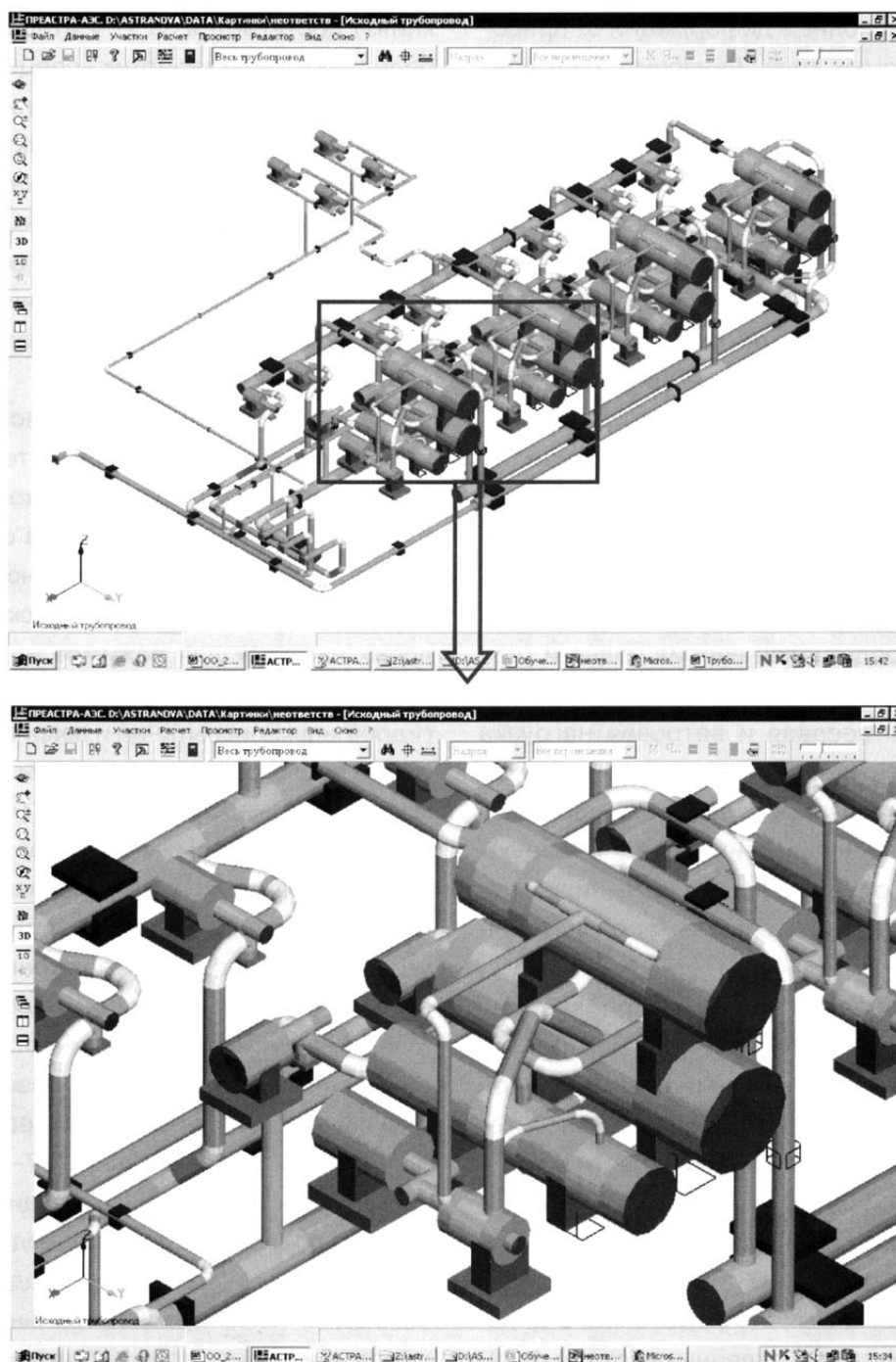


Рис. *1. Расчетная динамическая суперэлементная АСТРА-модель системы
«трубопроводы – оборудование – опорные конструкции» (2003 г.)

моделирующего неразветвленного участка трубопровода) и спектральную методику решения динамических задач [15]. Значимые собственные частоты и формы колебаний (для реальных трубопроводов, зачастую включающих много одинаковых ветвей, возможны случаи с кратностью порядка 10 и более) в требуемом диа-

пазоне определяются из решения частной проблемы собственных значений оптимизированными методами Ланцоша (блочный вариант) или итераций подпространства [16].

Повышенная «оболочечная» податливость криволинейных труб (эффекты Кармана) [10] и тройниковых соединений [12] учитывается со-

вместно со стеснением деформаций от присоединенных прямых труб. Линзовые, сильфонные и сальниковые компенсаторы, арматура (клапаны, задвижки и т.п.), фланцевые соединения, пружинные подвески и жесткие тяги, одно- и двусторонние опоры скольжения и качения, неподвижные опоры и амортизаторы (учет только динамической жесткости) – вот неполный перечень адекватно моделируемых элементов трубопроводов. Также предусмотрено задание стержневых элементов произвольного (не кольцевого) сечения, работающих на растяжение-сжатие, изгиб, сдвиг и кручение, для моделирования сложных опорных конструкций и оборудования в составе системы. Список факторов для многовариантных режимов нагружения представлен весьма полно и разнообразно: внутреннее и (или) внешнее давление, погонная весовая и ветровая нагрузка (включая моментные составляющие, например от стратифицированных жидкостей), перепады температур, заданные линейные и угловые перемещения опор (внешних и внутренних), монтажный натяг, дополнительные местные напряжения и др.

Эффективная программная реализация для ПЭВМ современных вычислительных алгоритмов позволяет выполнять прочностной анализ систем практически произвольной жесткостной и инерционной «контрастности» и вычислительной размерности (тысячи суперэлементов, сотни тысяч расчетных сечений, элементов и динамических степеней свободы, тысячи определяемых и учитываемых в динамических расчетах собственных частот и форм колебаний) при весьма умеренных затратах машинного времени.

Многоэтапный расчет на статическую и циклическую прочность низко- и высокотемпературных трубопроводов на опорах (модуль АСТРА-СТАЦ) содержит опции задания или рационального выбора пружинных подвесок из сортамента МВН, ОСТ и «спецпружины» [7]. Сходимость процесса (как правило, задается критерий не более чем 35 %-го отличия нагрузок на пружины в «рабочем» и «холодном» состо-

яниях) достигается за 2–4 итерации. При определении характеристик «специальных» пружин учитываются также удлинения тяг и изменение термомеханических характеристик пружин при нагреве. Предусмотрена возможность учета наклона тяг пружинных подвесок (упругих опор) и жестких подвесок, возникающего при температурных перемещениях трубопровода, для чего должны задаваться рабочие длины тяг подвесок.

Обеспечены все практически значимые виды прочностных расчетов (в том числе итерационного типа для учета возможного отрыва от опор и трения типа Кулона в опорах скольжения и качения) на нормативно регламентированные сочетания квазистатических и малоцикловых нагрузок для режимов нормальных условий эксплуатации (НУЭ), нарушения НУЭ, гидро(пнеumo)испытаний и аварийных ситуаций или их аналогов для нефтехимии, теплосетей и магистральных трубопроводов [4–6] – для постоянных и длительных нагрузок; для постоянных, длительных, кратковременных и особых нагрузок. Реализованы инженерные методики уточненного расчета напряжений в отводах, гibaх и коленax, в тройниковых соединениях (сварных, штампованных и др.), линзовых и сильфонных компенсаторах, базирующиеся на результатах многопараметрических конечно-элементных исследований [17–19] и оценке герметичности фланцевых соединений.

Для подземных трубопроводов бесканальной прокладки (теплосети), подземных и наземных (в насыпи) магистральных трубопроводов изоляция, компенсирующие подушки (при их наличии) и грунт моделируются распределенными по длине опорами, жесткость которых (коэффициенты постели) нелинейно зависит от величины и направления перемещений [11, 13, 23].

Критерии допустимости расчетных напряжений (статическая прочность) и усталостной циклической повреждаемости дополнены необходимой проверкой коллизий – недопустимо малых зазоров, касаний и пересечений труб в деформированных состояниях.

Расчет на сейсмические воздействия, заданные многокомпонентными спектрами ответа или ответными акселерограммами (АСТРА-СЕЙСМ), выполняется с учетом как всех энергетически значимых низших собственных частот и форм колебаний системы (в диапазоне от 0 до 33-35 Гц), так и «вклада» высших форм. По желанию пользователя может рассматриваться либо «идеальный» случай отсутствия трения и отрыва от односторонних опор, либо реальное состояние, определенное по результатам статического расчета. Для плотных спектров учитывается корреляция близких собственных форм. Реализованы также методики расчета на «высокочастотные» воздействия от воздушно-ударной волны и падения самолета, автоматизированный режим рациональной расстановки сейсмоопор. Определяются сейсмические нагрузки на строительные (опорные) конструкции и на оборудование. Выполняется как оценка прочности по допускаемым напряжениям, так и по накоплению усталостных повреждений. По вычисленным ускорениям оценивается сейсмостойкость арматуры в составе трубопроводной системы.

Предусмотрено три нормативно регламентированных вида *расчета на вибропрочность* (модуль АСТРА-ВИБР): оценка близости собственных и возбуждающих частот колебаний (отстройка от резонансных режимов – крайне редко реализуемый случай); определение допускаемых амплитуд перемещений (нормировка) по учитываемым собственным формам при различных коэффициентах асимметрии цикла напряжений (наиболее близкий к практике расчетно-экспериментальный подход); вычисление амплитуд реакций, вибропрочности и долговечности при заданных полигармонических вибрационных нагрузках («академическая» процедура) [21].

Реализован *расчет неустановившихся вынужденных колебаний* при заданных динамических нагрузках для различных переходных (пуск, остановка и т.п.) и аварийных режимов эксплуатации (модуль АСТРА-ДИН). Результаты динамических расчетов могут использовать-

ся как для оценки допустимости кинематических параметров (перемещений, скоростей и ускорений), так и при анализе циклической прочности.

Развитый пре- и постпроцессор со встроенными «отраслевыми» базами данных по физико-механическим характеристикам материалов (труб, изоляции и грунтов) и параметрам типовых элементов (деталей), многооконный Windows-интерфейс с настраиваемыми параметрами и трехмерная графика (исходное и деформированные состояния, анимация собственных форм и вынужденных колебаний, цветовое распределение заданных нагрузок и расчетных сил, моментов и напряжений) дают многовариантные возможности удобного задания исходных данных, анализа и представления результатов расчета (рис. 2–5).

Поддерживаются как традиционный табличный режим задания расчетной модели по суперэлементам и сечениям с визуализацией результата, так и полностью графический (характерный для САПР) интерактивный режим построения с возможным использованием баз данных и ранее заданных прототипов-аналогов (рис. 6).

Оптимизированная расчетная модель в последнем случае генерируется программно (с возможностью вмешательства пользователя на любом этапе), также производится и расстановка масс (динамических степеней свободы) для динамических моделей. Решена и эффективно реализована практически важная задача обнаружения возможных коллизий для сильно разветвленных трубопроводов – технологически недопустимых зазоров, пересечений или касаний труб в исходном, статических и динамических деформированных состояниях (рис. 7).

Обеспечена полная совместимость с ранними версиями АСТРА-НОВА и некоторыми другими программами расчета трубопроводов (СТАРТ, CAESAR II), ведутся работы по полноценной интеграции программного комплекса в мощные современные САПР (CADWorx/PIPE, PDS, PDMS и др.) (см. рис. 8).

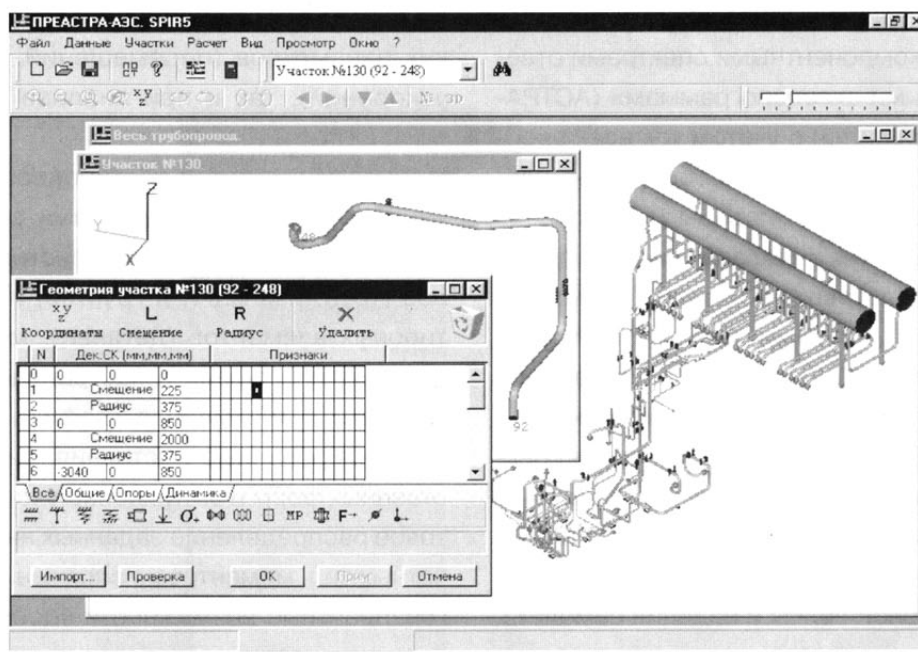


Рис. 2. Многооконный Windows-интерфейс модуля ПРЕ-АСТРА (объемная модель)

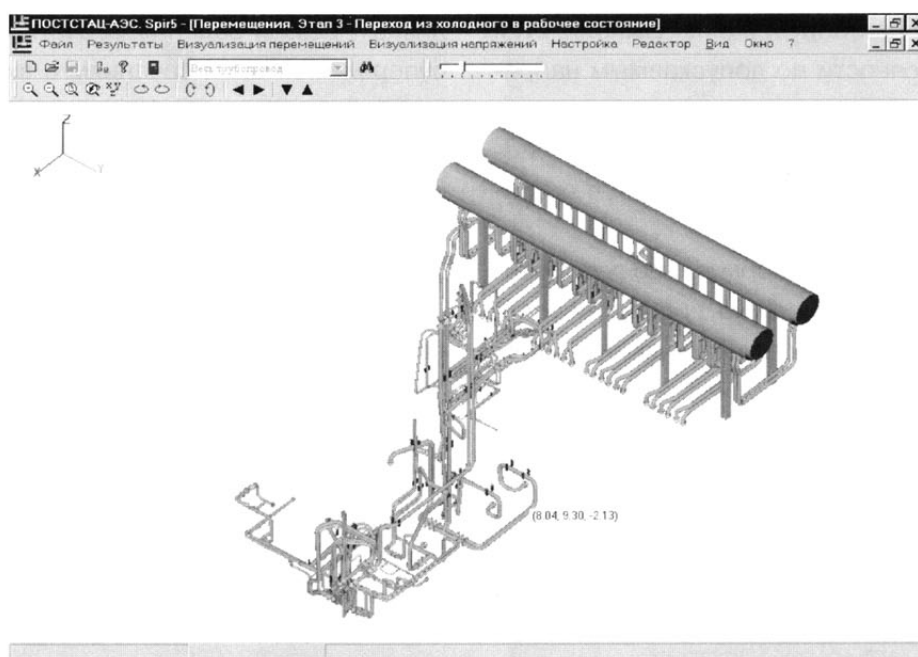


Рис. 3. Визуализация деформированного состояния системы

Проектный блок программ автоматизированного расчета поддерживается исследовательским, ориентированным на использование в необходимых случаях квалифицированными расчетчиками.

Так, разработана, верифицирована и прошла апробацию численная методика расчета последствий мгновенного аварийного разрыва

трубопроводов (движение трубопроводов с учетом больших перемещений и пластических деформаций, оценка ударных нагрузок на опоры-ограничители и близлежащие системы – модуль АСТРА-РАЗР), регламентированного для ответственных систем в атомной энергетике.

Подсистема уточненного расчета НДС и прочности типовых элементов трубопроводов

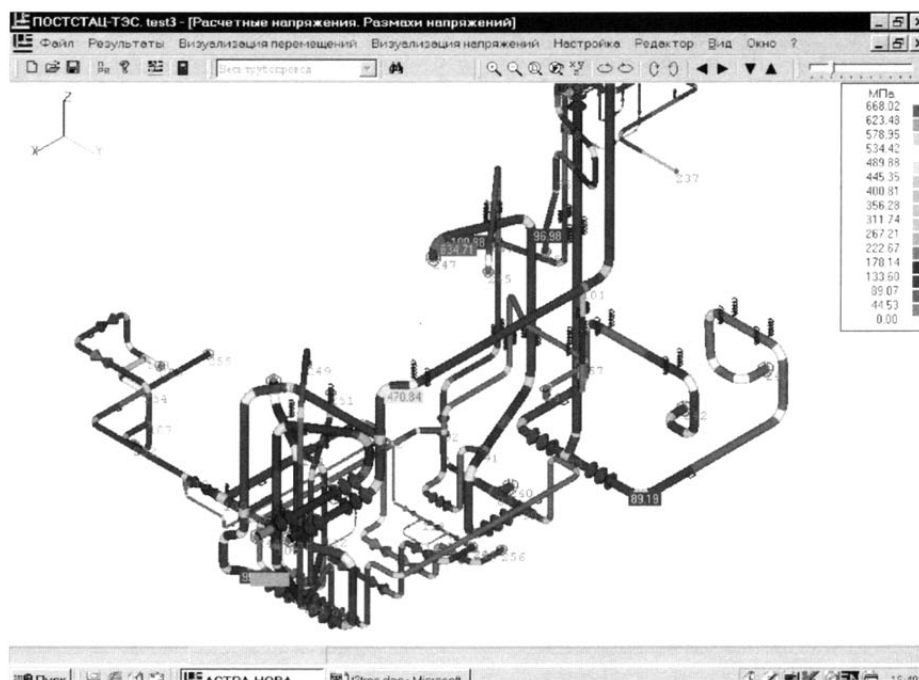


Рис. 4. Визуализация расчетных напряжений системы

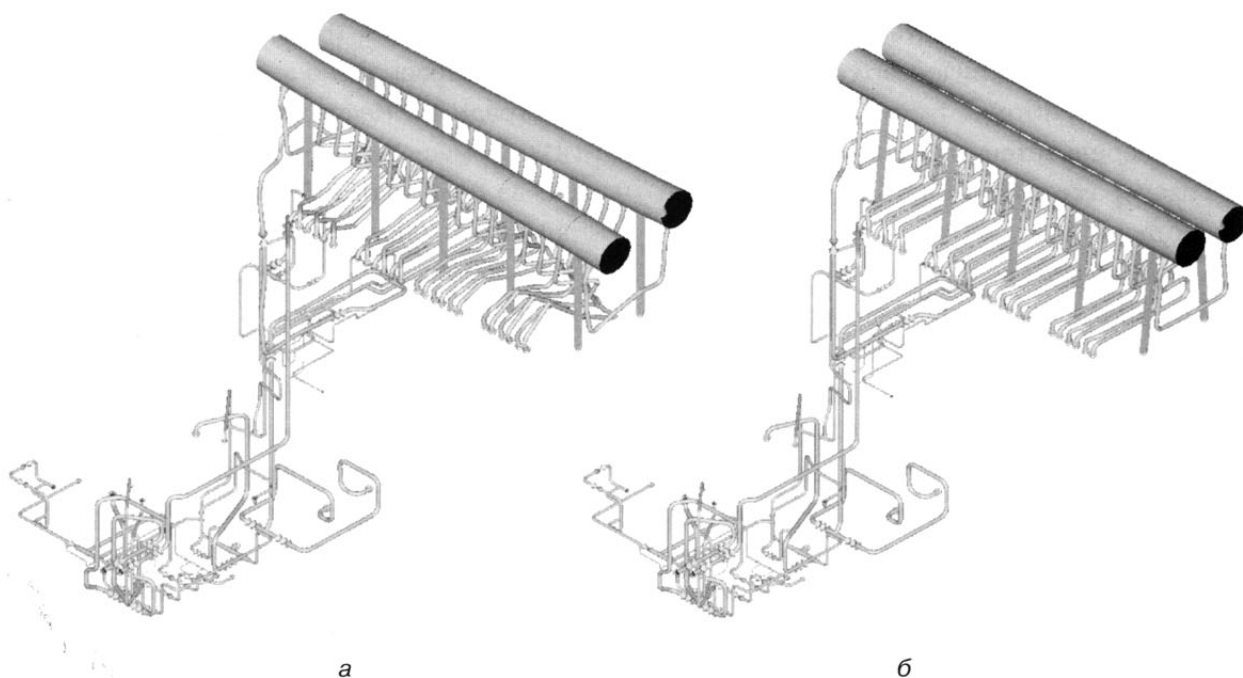


Рис. 5. Анимация вычисленных собственных форм колебаний системы (1999 г.).

а – 12-я частота ($f_{12}=1,41$ Гц); б – 399-я частота ($f_{399}=23,92$ Гц)

(сварных и штампованных тройников, отводов, гибов и колен, переходников, линзовых компенсаторов, зон сварных соединений) – модуль АС-ТРА-СТАДИО – обладает собственным развитым диалоговым пре- и постпроцессором, связана с базой данных типовых элементов и тре-

бует лишь необходимого минимума информации (рис. 9).

Вычислительным «ядром» подсистемы служит универсальный конечно-элементный программный комплекс СТАДИО [1,22,23], базовыми конечными элементами – криволиней-

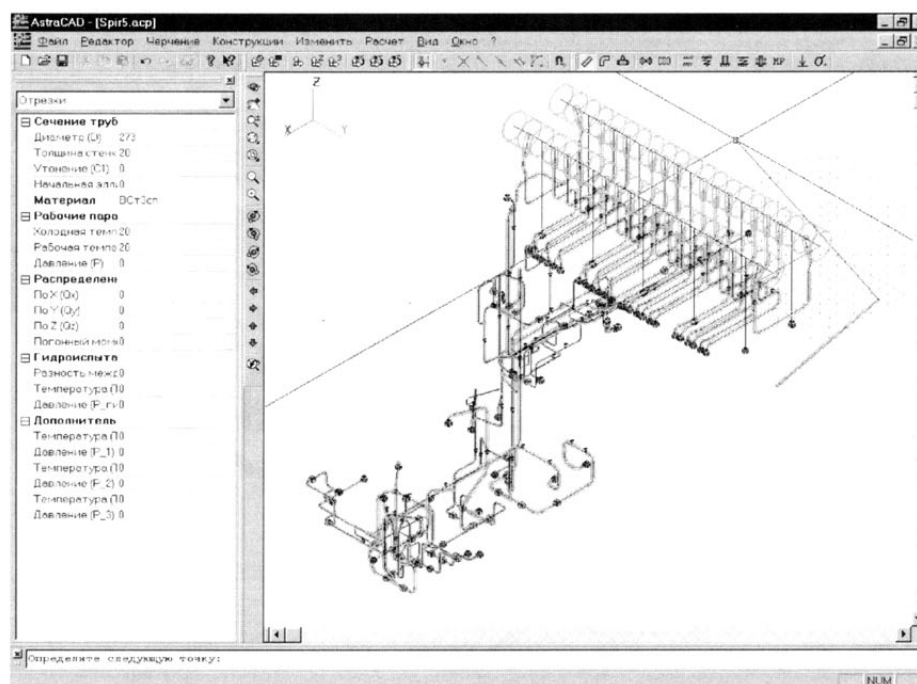


Рис. 6. Режим задания трубопроводной системы (в стиле САПР)

ные оболочечные элементы переменной толщины суперпараметрического семейства, реализующие гипотезы типа Тимошенко (для тонко- и среднестенных деталей), и трехмерные изопараметрические КЭ (для толстостенных деталей).

Программные комплексы *АСТРА-НОВА* детально верифицированы и документированы, аттестованы (*АСТРА-АЭС* – в Госатомнадзоре РФ еще в 1995 г.) и сертифицированы (*АСТРА-ТЭС*, *АСТРА-НЕФТЕХИМ*, *АСТРА-ТЕПЛОСЕТЬ*, *АСТРА-МАГИСТР* – в ЦПС Госстроя РФ в 2004 г.), интенсивно используются ведущими проектно-конструкторскими, исследовательскими, надзорными и эксплуатирующими организациями (всего – более 70-и), среди которых ФГУП «Атомэнергопроект» и ФГУП «С-П. Атомэнергопроект», ПКФ «Росэнергоатом», ВНИИАтомаш, ОКБ «Гидропресс», АО РОСЭП, СвердловНИИХимМаш, НТЦ Госатомнадзора России и Украины, Киевский и Харьковский «Энергопроект», Энергопроект (Болгария), Игналинская АЭС и Литовская ГРЭС (Литва), «Теплопроект», ВНИПИЭнергопром, УралОргрэнс, АО «Рязанский НПЗ», АО «ЛУКОЙЛ-ПермьНефтеОргСинтез», АО «Славнефть-ЯрославльНефтеОргСин-

тез», ПО «НАФТАН» (Новополюцк), ПО «Химтехнология» (Северодонецк), АО ВНИПИНефть и ВолгоградНИПИНефть, АО ЛенНефтехим и ЛенНИИХиммаш, Укрнефтехимпроект и ВНИПИТрансГаз (Украина), ГУП «Мосинжпроект», НТЦ «Надымгазпром» и Гипротюменнефтегаз. Имеются положительные референции специалистов ведущих зарубежных фирм, таких как Siemens AG (Германия), EDF (Франция), Westinghouse и COADE (США).

Накоплен более чем 29-летний опыт широкого использования программных комплексов в расчетном обосновании НДС, прочности и надежности пространственных разветвленных трубопроводов различных отраслей. Весьма показательно, что ни по одному трубопроводу, запроектированному и прошедшему экспертизу с применением комплекса *АСТРА-НОВА* (а общее число исследованных систем – десятки тысяч, для части из которых расчетный ресурс уже исчерпан), не было рекламаций и (или) каких-либо нештатных ситуаций, обусловленных использованием программного комплекса, что является свидетельством его надежности и квалификации пользователей.

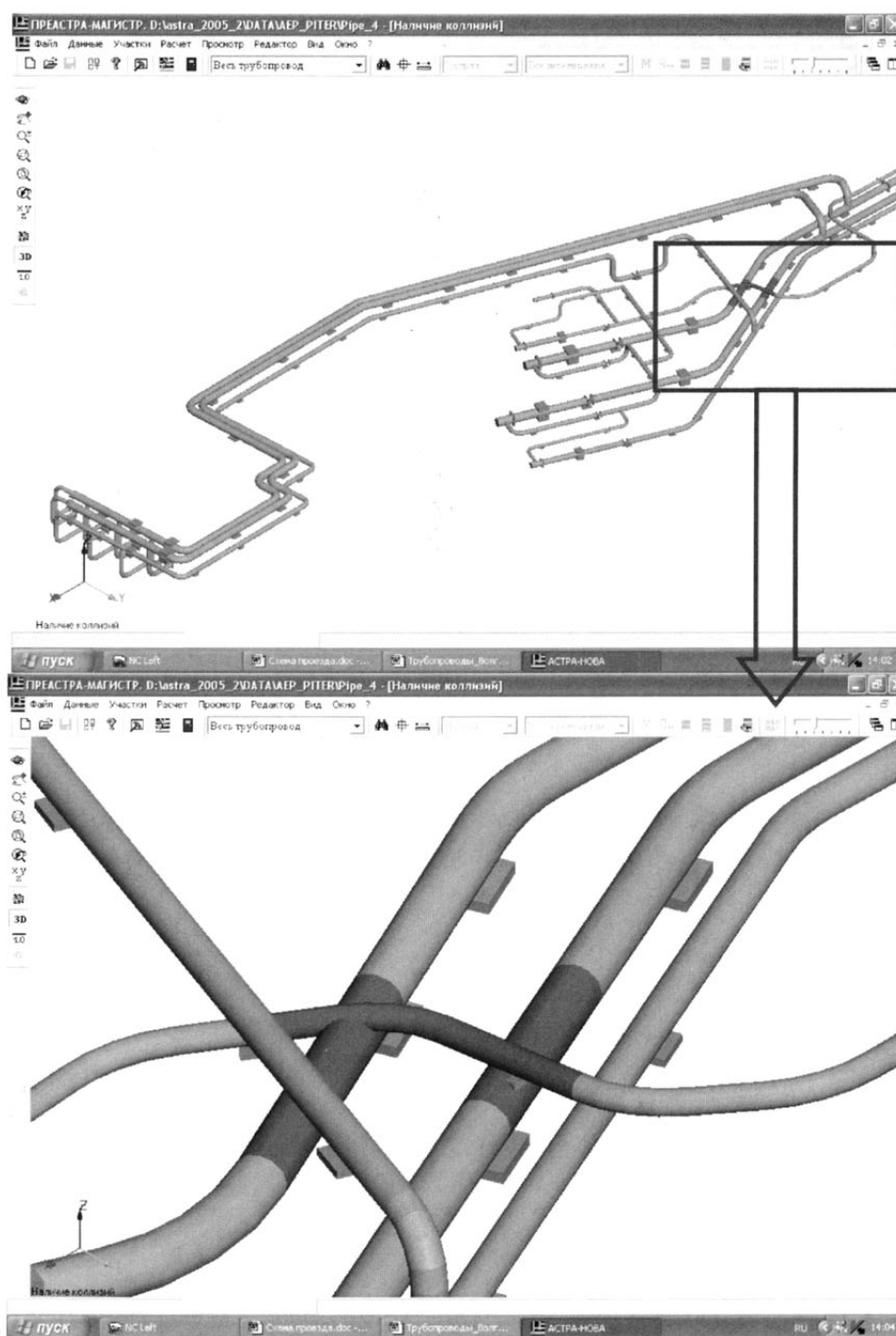


Рис. 7. Определение коллизий в модели магистрального трубопровода (2002 г.)

В обозримой перспективе основные акценты следует сделать на совершенствование существующей отечественной нормативно-методической базы и программно-алгоритмического обеспечения прочностных расчетов трубопроводных систем, на подготовке квалифицированных специалистов-расчетчиков и четкой регламентации деятельности надзорных органов.

Среди актуальных научно-практических задач, решение которых возможно в ближайшее время, можно назвать следующие:

- приведение нормативных документов, регламентирующих обоснование прочности трубопроводных систем различных отраслей, в соответствие с современными отечественными и мировыми требованиями и

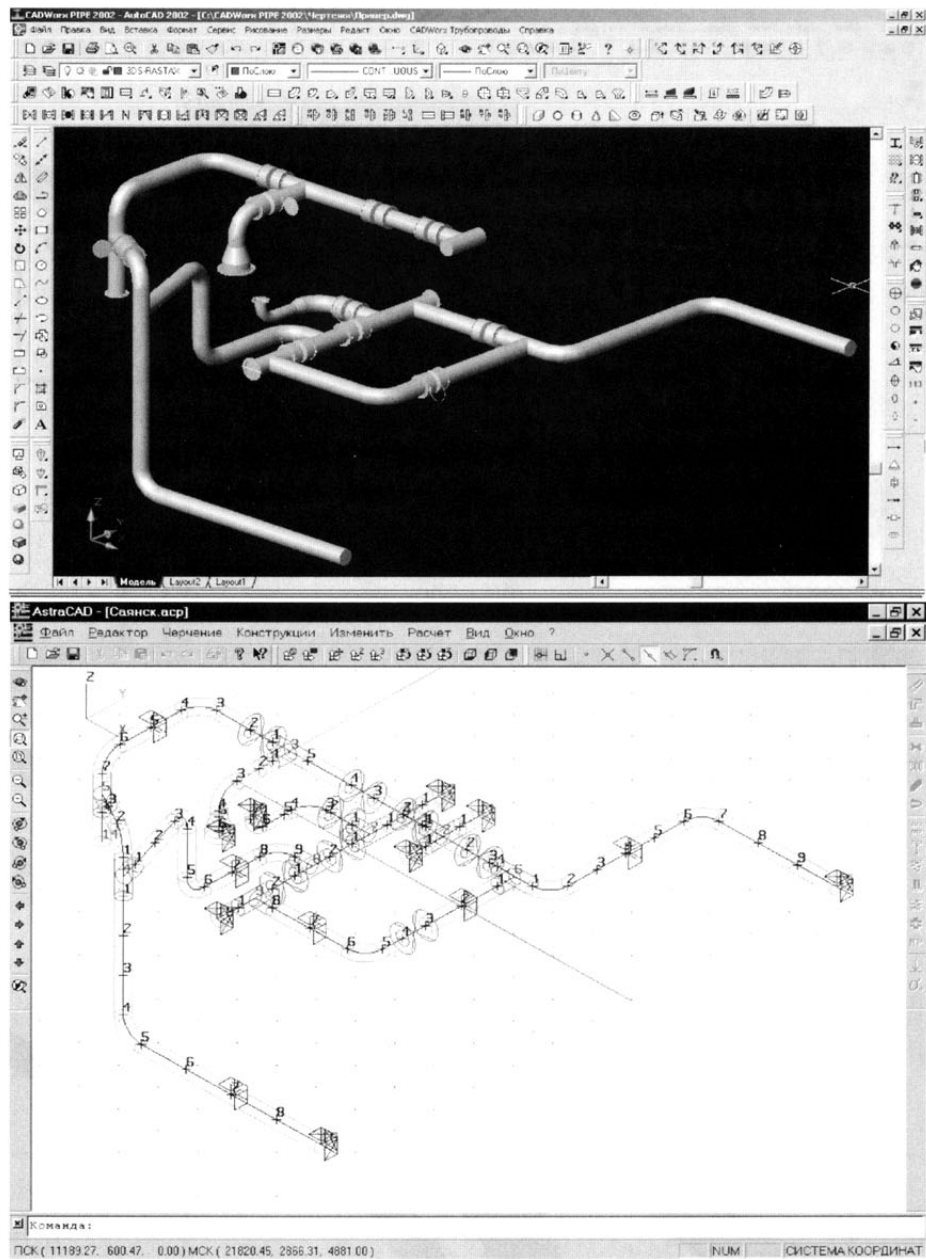
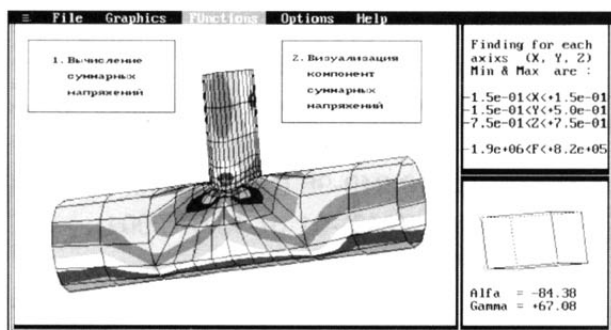


Рис. 8. Импорт модели, созданной в САПР CADWorx/PIPE, в АСТРА-САПР (2001 г.)

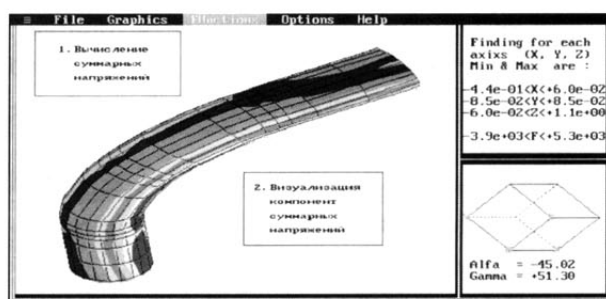
достижениями, а где это возможно – унификацию (устранение ненужной отраслевой обособленности) при сохранении возможностей для использования вновь разрабатываемых методик уточненного расчета;

- адекватный учет в единой расчетной модели геометрико-жесткостных, инерционных и диссипативных свойств и нагрузочных характеристик сложных конструктивных узлов, работающих совместно с трубопроводами (нестандартные опоры, неортого-

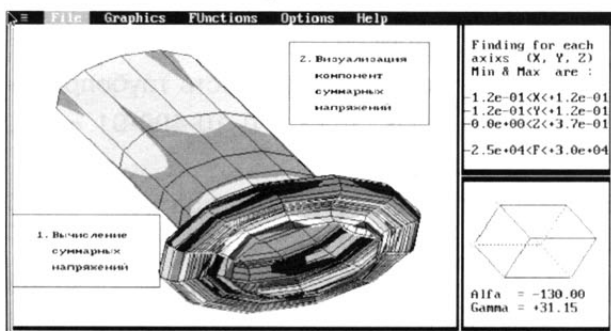
нальные тройники и развилки, сложные детали, технологическое оборудование и др.), путем построения и использования редуцированных матриц влияния (так называемых матриц Крейга-Бемптона) на основе подробного пространственного массивно-оболочечного конечноэлементного представления этих узлов. На рис. 10 приведены некоторые результаты расчета тонкостенного емкостного оборудования, для которого успешно применена как процеду-



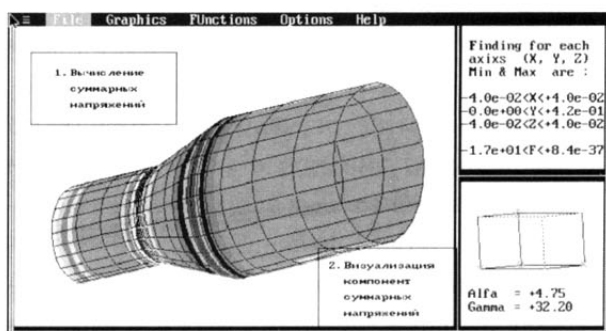
Тройники



Отводы, гибы, колена



Линзовые компенсаторы

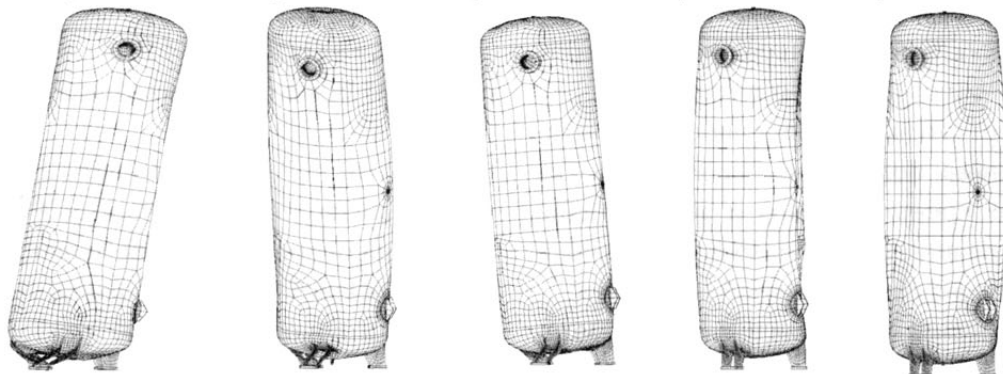


Переходники

Рис. 9. Подсистема уточненного расчета элементов трубопроводов АСТРА-СТАДИО (1995 г.)

Воздухосборник 171КУ

$$F_1 = 16,94 \text{ Гц} \quad f_2 = 17,13 \text{ Гц} \quad f_3 = 18,76 \text{ Гц} \quad f_4 = 29,48 \text{ Гц} \quad f_5 = 36,16 \text{ Гц}$$



Бак раствора 179КУ

$$F_1 = 24,73 \text{ Гц} \quad f_2 = 25,36 \text{ Гц} \quad f_3 = 28,61 \text{ Гц} \quad f_4 = 34,71 \text{ Гц} \quad f_5 = 40,69 \text{ Гц}$$

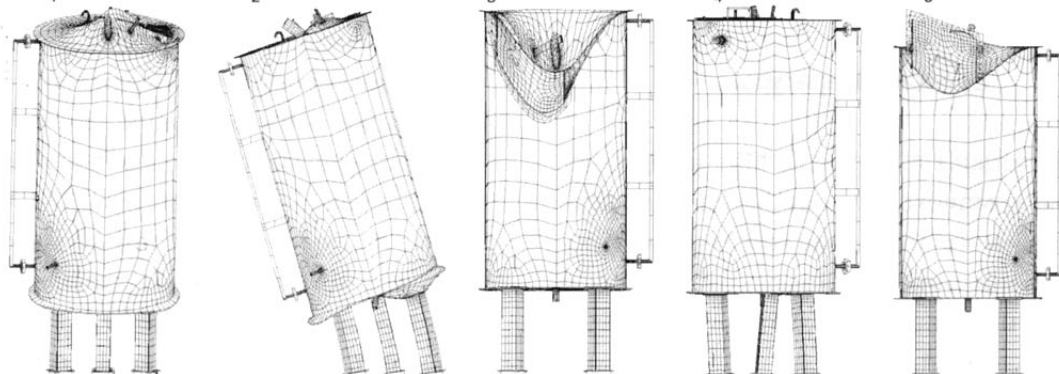


Рис. 10. Оборудование в составе трубопроводной системы. Оболочечные КЭ-модели (2004 г.).
Низшие сейсмически значимые собственные формы колебаний воздухосборника и бака раствора

ра интеграции в трубопроводную систему, так и уточненного конечно-элементного анализа НДС и прочности самого оборудования [25];

- анализ взаимодействия труб с грунтовым массивом для подземных трубопроводов тепловых сетей (бесканальной прокладки с пенополиуретановой изоляцией, полиэтиленовой оболочкой и компенсирующими подушками-матами) и магистральных нефте- и газопроводов (подземных и в насыпях) в рамках «инженерной» методики, базирующейся на результатах трехмерного численного анализа с использованием сложных нелинейных реологических моделей грунта [23];
- расчет на сейсмические воздействия трубопроводов на опорах с нелинейными характеристиками (трение, вязкоупругие демпферы) и в грунте;
- апробация уточненных методик расчетной оценки вибрационной прочности (долговечности) с учетом результатов натурных виброизмерений, в особенности, при близости возбуждаемых собственных частот и при их отличии от расчетных значений;
- разработка и включение в число автоматизированных подсистем, используемых на стадиях проектирования и эксплуатации оборудования, программно-алгоритмического модуля оценки хрупкой прочности;
- более «тесная» и полная интеграция математических моделей и результатов прочностной оптимизации в процесс автоматизации проектирования и мониторинга.

Список литературы

1. Белостоцкий А.М. Численное моделирование комплексного напряженно-деформированного состояния конструкций и сооружений энергетических объектов // Гидротехническое строительство. 1999. № 8. С. 45–54.
2. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. ПНАЭ Г-7-002-86. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.
3. Нормы расчета на прочность стационарных котлов и трубопроводов пара и горячей воды. РД 10-249-98 (с Изменениями № 1 РДИ 10-413(249)-01 от 13.07.2001). – М., 2001. – 254 с.
4. Указания по расчету на прочность и вибрацию технологических стальных трубопроводов: РТМ 38.001-94. – М., 1995. – 119 с.
5. Нормы расчета на прочность трубопроводов тепловых сетей. РД 10-400-01. – М., 2001. – 96 с.
6. Магистральные трубопроводы: СНиП 2.05.06-85. – М., 1985. – 53 с.
7. Выбор упругих опор для трубопроводов тепловых и атомных электростанций: РТМ 24.038.12-72. – М., 1972. – 77 с.
8. Руководство по расчету и конструированию тройников технологических трубопроводов. – М.: Гидропроект, 1984. – 66 с.
9. Руководство по обоснованию прочности трубопроводов АЭС (3 редакция). – М.: АЭП, НИЦ СтаДиО, 1991. – 455 с.
10. ASME Boiler & Pressure Vessel Code: Section III. NB-3630.
11. CEN TC 107 (Draft Standart 12/96): Design, Calculation & Installation for Pre-insulated Bonded Pipes for District Heating.
12. Зверьков Б.В., Костовецкий Д.Л. и др. Расчет и конструирование трубопроводов: Справочное пособие. – Л.: Машиностроение. 1979. – 257 с.
13. Айбиндер А.Б., Камерштейн А.Г. Расчет магистральных трубопроводов на прочность и устойчивость. – М.: Недра, 1982. – 335 с.
14. Самарин А.А. Вибрации трубопроводов энергетических трубопроводов и методы их устранения. – М.: Энергия, 1979. – 236 с.
15. Бате К., Вилсон Е. Численные методы анализа и метод конечных элементов. – М.: Стройиздат, 1982. – 446 с.
16. Парлетт Б. Симметричная проблема собственных значений: Численные методы. – М.: Мир, 1983. – 384 с.

17. 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. С. 41–58.
18. 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». – М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1982. С. 121–131.
19. 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. Вып. 6. С. 76–83.
20. 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. Вып. 6. 1985. С. 33–38.
21. 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. № 10. С. 28–31.
22. 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». BEM&FEM-2000. – С-Петербург, 2000. С. 65–69.
23. 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 // Сб. научных трудов МГСУ. 2001. С. 10–21.
24. 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. № 8. 2002. С. 12–16.
25. Белостоцкий А.М., Пеньковой С.Б. Конечноеэлементное моделирование напряженно-деформированного состояния емкостного оборудования АЭС // Сб. научных трудов МГСУ: Вопросы прикладной математики и вычислительной механики, 2005. С. 71–83.