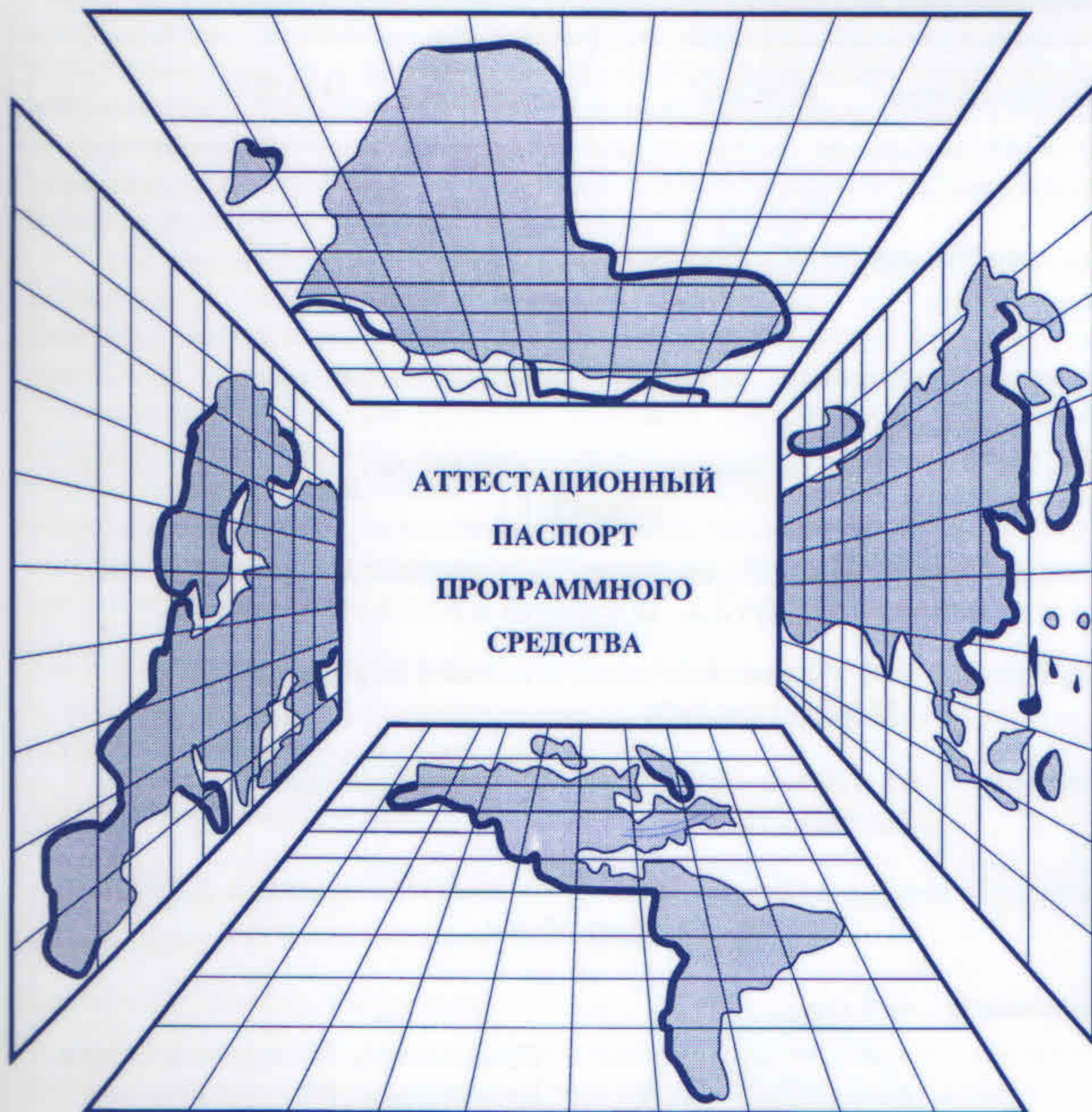


**ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО ЭКОЛОГИЧЕСКОМУ,  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМУ И АТОМНОМУ НАДЗОРУ**



Федеральное бюджетное учреждение  
«НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЦЕНТР  
ПО ЯДЕРНОЙ И РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ»





**ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО ЭКОЛОГИЧЕСКОМУ,  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМУ И АТОМНОМУ НАДЗОРУ**

**Федеральное бюджетное учреждение  
«НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЦЕНТР ПО ЯДЕРНОЙ И РАДИАЦИОННОЙ  
БЕЗОПАСНОСТИ»**

**АТТЕСТАЦИОННЫЙ ПАСПОРТ ПРОГРАММНОГО СРЕДСТВА**

<b>Регистрационный номер депонированного ПС</b> 614	<b>Регистрационный номер аттестационного паспорта ПС</b> 292
<b>Дата регистрации</b> 16.09.2009	<b>Дата выдачи</b> 14.04.2011

**Название ПС, версия ПС:** Программный комплекс АСТРА-АЭС  
(версия АСТРА-АЭС'2009)

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

**Язык (языки) программирования:** Intel Visual Fortran 11.1, Builder C++,  
Visual C++

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

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

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

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

**Приложение:** на 6 стр.



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

**И.Р. Уголева**



ПРИЛОЖЕНИЕ К АТТЕСТАЦИОННОМУ ПАСПОРТУ № 292  
Программный комплекс АСТРА-АЭС, версия АСТРА-АЭС'2009

**1. Перечень регистрируемых программных модулей,  
их регистрационные номера**

ПС не содержит отдельно регистрируемых модулей.

**2. Назначение и область применения ПС**

**2.1. Назначение**

Программный комплекс (ПК) предназначен для расчета параметров статического, сейсмического, вибрационного и динамического напряженно-деформированного состояния (перемещений, нагрузок на опоры и оборудование, усилий и напряжений) и динамических характеристик (собственных частот и форм колебаний), оценки статической, циклической, сейсмической и вибрационной прочности пространственных разветвленных и протяженных трубопроводных систем (ТС) в соответствии с требованиями "Норм расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. ПНАЭ Г-7-002-86".

Выполняется также уточненный расчет в трехмерной (объемной) постановке стационарных температурных полей и напряженно-деформированного состояния, статической, циклической и сейсмической прочности элементов - деталей трубопроводов при действии полной системы квазистатических нагрузок: тройников ортогональных радиальных (сварных, штампованных и штампованных, с накладками и плакирующим слоем); отводов (гибов, колен) гнутых, крутоизогнутых, штампованных и секторных с учетом эллиптичности, разностенности и примыкающих прямых труб, косых стыков; конических переходов концентрических; линзовых и сильфонных компенсаторов.

**2.2. Тип объекта использования атомной энергии**

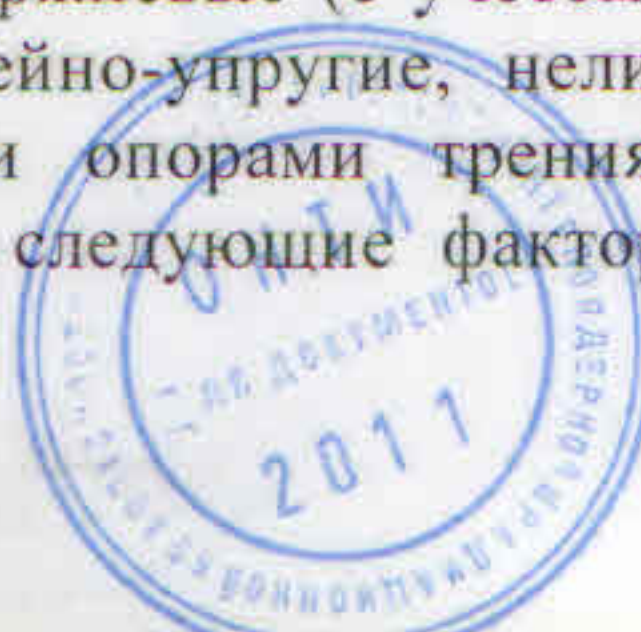
ТС ядерно-энергетических установок (ЯЭУ) в области действия Норм ПНАЭ Г-7-002-86 (раздел 1.1).

**2.3. Моделируемые режимы**

Все режимы, предусмотренные проектом ЯЭУ (нормальная эксплуатация, нарушение нормальной эксплуатации, аварии, внешние динамические, включая сейсмические, воздействия).

**2.4. Ограничения на применение**

Ограничения на геометрию, величины нагрузок и реакцию системы: ТС рассматриваются как стержневые (с учетом оболочечных эффектов в гibaх и тройниках) и линейно-упругие, нелинейность «представлена» односторонними опорами и опорами трения (только в статических расчетах). Не учитываются следующие факторы: особенности сварных





швов в трубопроводах (изменения геометрии под разделку, разный материал, остаточные напряжения), допущенные в эксплуатацию трещины в трубопроводах, влияние теплоносителя на циклическую прочность.

Количественные ограничения на параметры расчетной модели ТС:

1) для всей модели: количество узлов стыковки участков-суперэлементов (неразветвленных) – от 0 до 4 000, количество суперэлементов (неразветвленных участков) – от 1 до 4 000, количество динамических степеней свободы – от 1 до 60 000, вычисляемых/учитываемых собственных частот и форм колебаний – от 1 до 4 000.

2) для каждого суперэлемента (неразветвленного участка): количество элементов (отрезков) прямо- и криволинейных труб и переходов – от 1 до 400, количество пружинных подвесок, опорных конструкций, “жестких элементов” (вставок), произвольно ориентированных в пространстве сосредоточенных нагрузок – от 0 до 400.

Уточненный расчет температурного и напряженно-деформированного состояния деталей трубопроводов ведется в предположении: стационарности температурного поля в линейной постановке без учета внутреннего тепловыделения; малости перемещений и упругости деформаций-напряжений. Для тонкостенных отводов-гибов нелинейный фактор влияния давления на жесткость системы не учитывается.

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

## 2.5. Допустимые значения параметров

Максимальные напряжения ТС не должны превышать значений предела текучести (физическая линейность).

## 2.6. Погрешность, обеспечиваемая в области допустимых значений параметров

Практическая точность расчётов определяется точностью задания физико-механических характеристик материалов и нагрузок-воздействий и точностью самой модели. Погрешность расчетов, выполненных в обоснование безопасности ОИАЭ с использованием ПК, должна быть исследована и доказана в материалах, обосновывающих безопасность конкретного ОИАЭ.

Погрешности расчётов по результатам тестирования имеют следующие значения:

- |   |              |
|---|--------------|
| – статические перемещения, усилия и напряжения                            | $\pm 5\%$ ,  |
| – собственные частоты и формы колебаний                                   | $\pm 2\%$ ,  |
| – сейсмические расчёты по линейно-спектральной теории                     | $\pm 10\%$ , |
| – параметры динамического расчета<br>(перемещения, нагрузки и напряжения) | $\pm 15\%$ . |





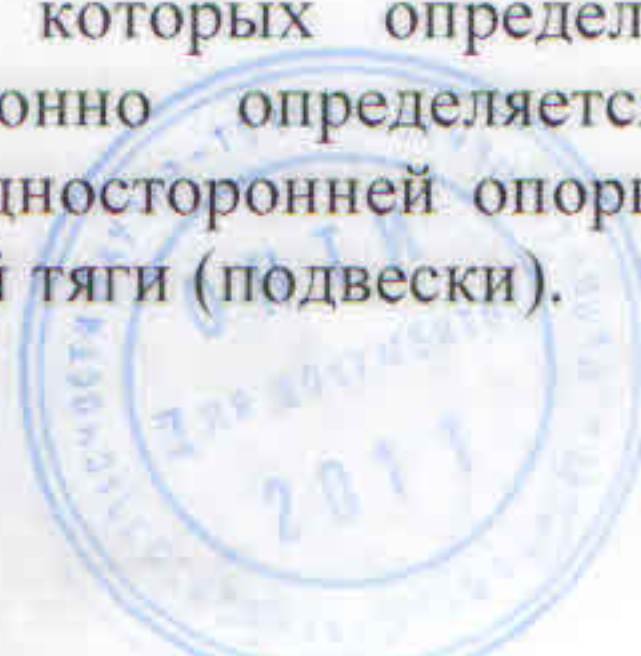
### 3. Сведения о методиках расчета, используемых в ПС

ТС рассматриваются как пространственно-стержневые (с учетом оболочечных эффектов в гibaх-коленах и тройниках) и линейно-упругие (с жесткостными и инерционными характеристиками, соответствующими заданному распределению давления и температуры, и с возможным учетом в статических расчетах эффектов трения Кулона и отрыва в опорах). ТС может содержать замкнутые контуры, свободные, шарнирно опертые и защемленные концы, промежуточные опоры (мертвые, пружинные, скользящие и катковые, включая односторонние опоры и жесткие тяги), линзовые и сильфонные компенсаторы, стержневые элементы произвольного сечения и другие элементы (включая оборудование и нестандартные опорные конструкции), характерные для трубопроводов АЭС. ПК позволяет проводить расчеты как с учетом суммарной прибавки к толщине стенки (Приложение 5 Норм ПНАЭ Г-7-002-86), так и по номинальным размерам (п.5.1.1 Норм).

Методика расчета использует предположение возникновения малых деформаций и перемещений (геометрическая линейность). Предполагается нелинейная работа опорно-подвесной системы (трение скольжения/качения и отрывы) при статических и температурных воздействиях, линейная работа опорно-подвесной системы (с возможным наследованием "статического" статуса опор) при сейсмических, вибрационных и динамических воздействиях.

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

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





Осевые, угловые, сдвиговые и комбинированные линзовые и сильфонные компенсаторы схематизируются стержневыми элементами с эквивалентными характеристиками сечения на растяжение-сжатие, сдвиг, изгиб и кручение. Арматура (задвижки, вентили, клапаны) моделируется жесткими вставками с эквивалентными нагрузочными и инерционными характеристиками.

Решение результирующей алгебраической системы уравнений равновесия суперэлементной модели (определение вектора перемещений в узлах) проводится для статических задач и при определении матриц податливости по схеме квадратного корня (Холецкого) с учетом положительной определенности, симметричности, блочности и разреженности матрицы жесткости. Значимые собственные частоты и соответствующие им формы колебаний (в требуемом частотном диапазоне и/или заданное число) динамической модели системы, учитываемые в расчетах на сейсмические, вибрационные и динамические воздействия, определяются из решения частной проблемы собственных значений блочным методом Ланцоша.

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

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

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

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

Метод подконструкций реализован также для построения редуцированных матриц влияния системы или учета этих матриц при суперэлементной сборке. Реализован алгоритм метода динамического синтеза подконструкций в форме подхода Крейга-Бемптона (с





фиксированными границами) для формирования и учета матричных суперэлементов. Используется в расчетах на статическую и циклическую прочность и определении собственных частот и форм колебаний.

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

Стратификация теплоносителя моделируется эквивалентным распределенным моментом. Реактивные силы и/или струи при разрывах трубопроводов учитываются динамическими нагрузками (без учета их следящего характера) в рамках линейно-упругого приближения.

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

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

#### **5. Перечень организаций, эксплуатирующих ПС**

Коммерческие версии ПК эксплуатируют ЗАО НИЦ СтаДиО, ОАО "Атомэнергопроект", ОАО "ОКБ ГИДРОПРЕСС", ПКФ "Росэнергоатом", ОАО ЗИОМАР, АО РОСЭП, ЗАО "Сельэнергопроект", "СвердНИИХимМаш", ГОУ ВПО МГСУ (Россия), "Киевэнергопроект", "Харьковэнергопроект", "Укратомэнергопроект", НПО "Вектор", НТЦ ЯРБ Госатомнадзора Украины, Игналинская АЭС (Литва), ДФ "Енергопроект" (Болгария).

#### **6. Дополнительная информация**

Нет.

#### **7. Особые условия**

ПС подлежит повторной аттестации в случае отмены или внесения изменений в ПНАЭ Г-7-002-86 (разделы 1, 2, 3, 5, приложения 5, 8, 9).

#### **8. Официальные эксперты**

- Бедняков В.Г., к.т.н., заведующий лабораторией ФБУ «НТЦ ЯРБ»
- Ложкин С.Н., к.т.н., ведущий научный сотрудник ФБУ «НТЦ ЯРБ»
- Панов В.А., д.т.н., заместитель начальника отдела ОАО «ОКБМ Африкантов»





- Рубцов В.С., к.т.н., начальник отдела ФБУ «НТЦ ЯРБ»
- Сеницын Е.Н., д.т.н., заведующий лабораторией прочности ОАО «ВНИИАМ»
- Ткачев В.В., к.т.н., начальник лаборатории НИЦ "Курчатовский институт"

Председатель Экспертного Совета

*Уголева*

И. Р. Уголева

/ Председатель Секции № 4 Экспертного Совета

*Лихачев*

Ю.И. Лихачев

