

Федеральный надзор России по ядерной и радиационной безопасности
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЦЕНТР ПО ЯДЕРНОЙ И РАДИАЦИОННОЙ
БЕЗОПАСНОСТИ

АТТЕСТАЦИОННЫЙ ПАСПОРТ ПРОГРАММНОГО СРЕДСТВА

№ _____
регистрационный номер ПС в Центре
по организации экспертизы ПС

№ _____
регистрационный номер
аттестационного паспорта ПС

дата регистрации

дата выдачи

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

ЭВМ: *IBM-совместимые ПЭВМ*

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

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

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

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

Заявитель: *ЗАО НИЦ СтаДиО, ОАО «Атомэнергoproject», ОАО «ОКБ Гидропресс»*

Решение Совета по аттестации ПС:

Приложение: на 6 стр. в 1 экз.

М.П.

Председатель Совета по аттестации ПС

(Гербовая печать НТЦ ЯРБ)

Ученый Секретарь Совета по аттестации ПС

ПРИЛОЖЕНИЕ К АТТЕСТАЦИОННОМУ ПАСПОРТУ ПС №
(Комплекс программ АСТРА-АЭС, версия АСТРА-АЭС'2009)

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

Программный комплекс не содержит отдельно регистрируемых модулей.

2. Назначение и область применения ПС.

2.1. Назначение.

ПК АСТРА-АЭС предназначен 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 "Норм расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. ПНАЭ Г-7-002-86".

Трубопроводные системы (ТС) рассматриваются как пространственно-стержневые (с учетом оболочечных эффектов в гibaх-коленах и ортогональных тройниках) и линейно-упругие (с возможным учетом эффектов трения Кулона и отрыва в опорах). ТС может содержать замкнутые контуры, свободные, шарнирно опертые и заземленные 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 режимов НУЭ (нормальных условий эксплуатации), ННУЭ (нарушения нормальных условий эксплуатации), ГИ (гидроиспытаний) и АС (аварийных ситуаций):

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

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

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

1) ПРЕ-АСТРА – многофункциональный "препроцессор" комплекса, обеспечивающий диалоговый многооконный режим задания, генерации и визуализации рациональных пространственно-стержневых расчетных моделей трубопроводных систем (с возможностями использования баз данных по материалам, опорам, пружинным подвескам и фланцевым соединениям, ранее заданных моделей, расстановки

опор и распределение динамических степеней свободы), связь с предыдущими версиями АСТРА-НОВА, импорт-экспорт моделей, поиск и отображение коллизий (пересечений, касаний и недопустимо малых зазоров труб), глубокая диагностика ошибок;

2) АСТРА-СТАЦ – расчет на статическую и циклическую прочность низко- и высокотемпературных (в соответствии с методикой, приведенной в [1, 2]) трубопроводов АЭС. Для опорных конструкций, задаваемых в общей и местной системах координат, проводится рациональный выбор их характеристик. Пружинные подвески сортамента МВН-043–63, ОСТ 108.764.01–80, ОСТ 24.125.109–01, “спецпружин” (ВНИПИЭТ) и LISEGA могут иметь заданные характеристики или характеристики, выбранные программно путем определения нагрузок в рабочем и холодном состоянии, структуры пружинных цепей, их затяжки и осадки; возможен учет наклона пружинных подвесок при температурных перемещениях трубопровода. Для «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 и др.

Результатами расчета являются перемещения (линейные и угловые), расчетные приведенные и допускаемые напряжения во всех расчетных сечениях участков (включая гибы и колена) и в тройниковых узлах, вычисленные по упрощенной и уточненной методикам; силовые факторы (в общей и местной системах) в заданных сечениях, нагрузки на оборудование (концевые опоры) и узлы участков, а также на опорные конструкции, пружинные подвески и жесткие тяги в рабочем и холодном состояниях, режиме гидро(пневмо)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, приведенные напряжения группы $(\sigma_3)_2$ в сечениях суперэлементов ("участков") и в тройниках, силовые факторы в местной и общей системах координат. При одновременном задании нескольких вариантов сейсмических воздействий возможен выбор максимальных перемещений, напряжений и нагрузок по всем введенным воздействиям.

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

– определение допускаемых амплитуд виброперемещений (усилий, нагрузок на опоры и оборудование) при колебаниях трубопровода по каждой учитываемой собственной форме из условия достижения допускаемого значения максимальными напряжениями;

– расчет параметров вынужденных установившихся колебаний (амплитуд перемещений, нагрузок и напряжений).

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

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

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

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

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

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

8) АСТРА-СТАДИО – 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, штампованных, штампованных и кованых, 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) косых стыков;

4) конических переходов концентрических и с эксцентриситетом;

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

Полностью совместима с АСТРА-АЭС'2009 (экспорт геометрических характеристик, физико-механических свойств и нагрузок значимых этапов статического

и сейсмического расчетов, импорт уточненных напряжений и матриц жесткости/податливости).

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

2.2. Тип объекта использования атомной энергии.

Трубопроводные системы АЭУ

2.3. Моделируемые режимы.

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

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

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

2.4. Ограничения на применение

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

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

1) для всей модели:

- узлов стыковки участков-суперэлементов (неразветвленных) – 0 - 4 000,
- суперэлементов (неразветвленных участков) – 1 - 4 000,
- тройниковых соединений и днищ (крышек) – 0 - 4 000,
- “матричных” суперэлементов (жесткости, масс, нагрузок) – 0 - 4 000,
- динамических степеней свободы – 1 - 60 000,
- вычисляемых/учитываемых собственных частот и форм колебаний – 1 - 4 000,
- точек задания сейсмического спектра ответов – 1 - 10 000,
- точек задания акселерограммы (шагов интегрирования) – 1 - 60 000,
- сечений/элементов задания трехкомпонентных динамических нагрузок – 1-2 000.

2) для каждого суперэлемента (неразветвленного участка с общими физико-механическими характеристиками):

- элементов (отрезков) прямо- и криволинейных труб и переходов – 1 - 400,
- пружинных подвесок, опорных конструкций, “жестких элементов” (вставок), произвольно ориентированных в пространстве сосредоточенных нагрузок – 0 – 400,
- линзовых/сильфонных компенсаторов – до 30,
- фланцев – до 100,
- невольцевых сечений – до 100,

- арматура (клапаны, задвижки) – до 100,
- сечений с дополнительными напряжениями – до 100,
- монтажный растяг – в одном сечении,
- полигармонических (вибрационных) сил – до 30, число гармоник в силе – до 50.

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

2.5. Допустимые значения параметров.

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

2.6. Погрешность, обеспечиваемая в области допустимых значений параметров.

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

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

3. Сведения о методиках расчета, используемых в ПС.

Реализован единый алгоритм расчета трубопроводов (определение перемещений, нагрузок на опоры и усилий в сечениях) как линейно-упругих пространственных многократно статически неопределимых стержневых систем, сочетающий суперэлементный подход метода перемещений, методы начальных параметров и прогонки (для каждого суперэлемента) и спектральную методику решения динамических задач. По программно реализованным аналитическим зависимостям учитывается повышенная оболочечная податливость криволинейных труб (эффекты Кармана) и ортогональных тройниковых соединений, по заданным коэффициентам жесткости – податливость врезок “труба–оборудование”. Эффекты ползучести и релаксации для высокотемпературных трубопроводов учитываются эквивалентными (скорректированными) температурами и смещениями опор для рабочего и холодного состояний по методике РТМ 24.038.08–72 [1].

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

Осевые, угловые, сдвиговые и комбинированные линзовые и сильфонные компенсаторы схематизируются прямолинейными элементами (отрезками) с эквивалентными 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 (АСТРА-СТАЦ) и при определении матриц податливости (АСТРА-СЕЙСМ, АСТРА-ВИБР и АСТРА-ДИН) по схеме квадратного корня (Холецкого) с учетом

положительной определенности, симметричности, блочности и разреженности матрицы жесткости.

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

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

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

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

Уточненный расчет температурного и напряженно-деформированного состояния деталей ТС (АСТРА-СТАДИО) выполняется по пространственно-оболочечным и объемным схемам метода конечных элементов (МКЭ) в перемещениях

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

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

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

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

6. Дополнительная информация.

Нет

7. Особые условия.

Нет

8. Официальные эксперты (Ф.И.О., место работы, занимаемая должность).

Ученый Секретарь Совета по аттестации ПС

М.П.

Председатель секции №_ Совета по аттестации ПС