



Федеральное бюджетное учреждение  
«Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности»  
(ФБУ «НТЦ ЯРБ»)



## АТТЕСТАЦИОННЫЙ ПАСПОРТ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИН

«АСТРА-АЭС»

регистрационный № 292 от 28 декабря 2021 г.  
выдан Закрытому акционерному обществу «Научно-исследовательский центр СтаДиО» (ЗАО НИЦ СтаДиО)  
Адрес: Россия, 123098, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1, стр. 388, офис 205

срок действия до 14 апреля 2031 г. (при соблюдении условий, установленных в пункте 6 настоящего аттестационного паспорта).

Заместитель директора ФБУ «НТЦ ЯРБ»,  
Председатель Экспертного совета  
по аттестации программ для ЭВМ  
при Ростехнадзоре, канд. техн. наук



С.Н. Богдан

М.П. (подпись)

**ETSON**

EUROPEAN  
TECHNICAL SAFETY  
ORGANISATIONS  
NETWORK



## 1. Общие сведения

### 1.1. Правообладатель программы для ЭВМ

Согласно свидетельству о государственной регистрации программы для ЭВМ от 12.01.2006 № 2006610288 правообладателем программы для ЭВМ является ЗАО НИЦ СтаДиО.

### 1.2. Авторы программы для ЭВМ

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

### 1.3. Сведения о регистрации и тестировании программы для ЭВМ и её компонентов

Акт о результатах тестирования программы для ЭВМ № 98 от 28.10.2021.

### 1.4. Сведения о ранее выданных аттестационных паспортах на программу для ЭВМ

Аттестационный паспорт рег. № 292 от 14.04.2011 программы для ЭВМ «АСТРА-АЭС». Специалисты, проводившие экспертизу программы для ЭВМ в 2011 году: Бедняков В.Г., канд. техн. наук, ФБУ «НТЦ ЯРБ»; Панов В.А., д-р техн. наук, АО «ОКБМ Африкантов»; Рубцов В.С., канд. техн. наук, ФБУ «НТЦ ЯРБ»; Синицын Е.Н., д-р техн. наук, АО «ВНИИАМ»; Ткачев В.В., канд. техн. наук, НИЦ «Курчатовский институт».

### 1.5. Специалисты, проводившие анализ и оценку программы для ЭВМ

Рубцов В.С., канд. техн. наук, ФБУ «НТЦ ЯРБ».

## 2. Назначение и область применения программы для ЭВМ

### 2.1. Назначение программы для ЭВМ

Программа для ЭВМ предназначена для расчёта перемещений, нагрузок, динамических характеристик (собственных частот и форм колебаний), напряженно-деформированного состояния при статическом, динамическом (включая сейсмическое), вибрационном нагружении пространственных разветвленных и протяженных трубопроводных систем (ТС), а также для оценки статической, циклической, сейсмической и вибрационной прочности в соответствии с требованиями федеральных норм и правил в области использования атомной энергии «Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок» ПНАЭ Г-7-002–86.

Программа для ЭВМ обеспечивает проведение расчета в трехмерной (объемной) постановке стационарных температурных полей и напряженно-деформированного состояния, статической, циклической и сейсмической прочности элементов-деталей трубопроводов при воздействии 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. Область применения программы для ЭВМ по типу объекта использования атомной энергии

ТС ЯЭУ, подпадающих под действие ПНАЭ Г-7-002-86.

## 2.3. Режимы эксплуатации объекта использования атомной энергии

Нормальная эксплуатация, нарушение нормальной эксплуатации, включая аварии, внешние динамические (включая сейсмические) воздействия.

## 2.4. Область применения программы для ЭВМ по условиям и параметрам расчета

Программа для ЭВМ не предназначена для расчета напряженно-деформированного состояния и оценки прочности сборочных единиц, входящих в состав ТС (арматура, насосы).

При проведении расчетов по программе для ЭВМ имеются следующие ограничения. ТС рассматриваются как стержневые (с учетом оболочечных эффектов в гibaх и тройниках) и линейно-упругие, нелинейность «моделируется» односторонними опорами и опорами трения (только в статических расчетах). Не учитываются следующие факторы:

- особенности сварных швов в трубопроводах (изменения геометрии под разделку, различие между основными и сварочными материалами, остаточные и монтажные напряжения);
- особенности монтажных или технологических вставок в трубопроводы, изготовленные из материалов, отличающихся от основного металла трубопровода;
- допущенные в эксплуатацию дефекты в трубопроводах;
- влияние теплоносителя на циклическую прочность;
- наложение на основное циклическое нагружение высокочастотного нагружения.

Количественные ограничения на параметры расчетной модели ТС:

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.

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 о стационарности температурного поля в линейной постановке без учета внутреннего тепловыделения; и о 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.

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

#### 2.5. Погрешность, обеспечиваемая программой для ЭВМ в области ее применения

Погрешности результатов расчетов по программе для ЭВМ, оценённые на основе верификационных тестов, представленных в обосновывающих материалах, 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 (перемещения, нагрузки и напряжения)  $\pm 15 \%$ .

Погрешность результатов расчётов по программе для ЭВМ обусловлена, в том числе, неопределенностью принимаемых физико-механических характеристик конструкционных материалов и нагрузок-воздействий и расчетной модели ТС.

Погрешность результатов расчётов по программе для ЭВМ, выполненных в обоснование безопасности конкретного ОИАЭ, должна быть подтверждена в материалах, обосновывающих безопасность конкретного ОИАЭ.

### 3. Сведения о методиках расчета, реализованных в программе для ЭВМ

При проведении расчетов по программе для ЭВМ ТС принимаются как пространственно-стержневые (с учетом оболочечных эффектов в гибох-

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 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. В программе для ЭВМ расчёты проводятся как с учетом суммарной прибавки к толщине стенки (Приложение 5 ПНАЭ Г-7-002–86), так и по номинальным размерам (п.5.1.1 ПНАЭ Г-7-002–86).

В реализованной в программе для ЭВМ методике расчёта используется допущение о возникновении 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.

В программе для ЭВМ 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 из РТМ 24.038.08–72 «Руководящий технический материал. Расчет трубопроводов энергетических установок на прочность».

В программе для ЭВМ трение Кулона в опорах скольжения и качения в статике моделируется с использованием системы 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 в программе для ЭВМ 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.

В программе для ЭВМ 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.

В программе для ЭВМ 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 в программе для ЭВМ используется спектральный анализ параметров вынужденных установившихся детерминированных колебаний системы. Силовое нагружение задается в полигармоническом виде.

В программе для ЭВМ при 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 по программе для ЭВМ 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 ПНАЭ Г-7-002-86, оценки статической, циклической (для одно пакетного 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.

Используемый в программе для ЭВМ 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 одно пакетного нагружения) и сейсмической прочности по группам категорий напряжений на срединной, внутренней и наружной поверхностях деталей – согласно положениям ПНАЭ Г-7-002-86.

В программе для ЭВМ стратификация теплоносителя моделируется эквивалентным распределённым моментом. Реактивные силы и/или струи при разрывах трубопроводов учитываются динамическими нагрузками (без учёта их следящего характера) в рамках линейно-упругого приближения.

#### **4. Сведения о базах данных (библиотеках констант), используемых в программе для ЭВМ**

Программа редактирования и пополнения баз данных (по характеристикам конструкционных материалов, сортаментам деталей, нагрузкам и воздействиям) не аттестуется. Обоснование применимости указанных баз данных необходимо проводить для каждого конкретного расчета при обосновании безопасности ОИАЭ.

#### **5. Организации, специалисты которых прошли обучение по применению программы для ЭВМ**

АО «Концерн Росэнергоатом», ЗАО НИЦ СтаДиО,  
АО «Атомэнергопроект», АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС»,  
АО «ЗИО-ПОДОЛЬСК», АО РОСЭП, ЗАО «Сельэнергопроект»,  
АО «СвердНИИхиммаш», ФГБОУ ВО «НИУ МГСУ», АО «РАОПРОЕКТ»,  
ФГБОУ ВО «НИУ МЭИ», ООО «Энергомашпроект»,  
АО «Атомтехэнерго», АО «ГНЦ НИИАР», АО «Институт Гидропроект»,  
АО «ЦКБ МТ «Рубин», ОАО «ГСПИ».

#### **6. Особые условия**

Срок действия настоящего аттестационного паспорта ограничен сроком действия ПНАЭ Г-7-002-86. После прекращения действия ПНАЭ Г-7-002-86 материалы, обосновывающие применение программы для

ЭВМ, и настоящий аттестационный паспорт подлежат оценке на соответствие федеральным нормам и правилам и национальными стандартами в области использования атомной энергии, которые будут выпущены взамен ПНАЭ Г-7-002-86.

## 7. Перечень документов, сопровождавших экспертизу программы для ЭВМ

Заявление о проведении экспертизы программы для ЭВМ (письмо ЗАО НИЦ СтаДиО от 06.08.2021 № 471/2021).

Программный комплекс АСТРА-АЭС для автоматизированных расчетов 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. Верификационный отчет (4 тома), № 2021-НТЦ ЯРБ-01/1, ЗАО НИЦ СтаДиО, 2021 (письмо ЗАО НИЦ СтаДиО от 06.08.2021 № 471/2021).

Справка об опыте использования и соответствия современному уровню развития науки и техники программы для ЭВМ «АСТРА-АЭС» (в приложении к тому 4 верификационного отчета) (письмо ЗАО НИЦ СтаДиО от 06.08.2021 № 471/2021).

Заключение о результатах анализа обосновывающих материалов программы для ЭВМ «Экспертиза программы для ЭВМ «АСТРА-АЭС» в рамках переоформления аттестационного паспорта рег. № 292 от 14.04.2011 по истечении срока его действия», Инв. № АО-282/2021, ФБУ «НТЦ ЯРБ», Москва, 2021.

Рекомендации секции № 4 «Прочность и ресурс элементов, оборудования, систем» Экспертного совета по аттестации программ для ЭВМ при Ростехнадзоре по составу группы экспертов и решение (протокол заседания секции № 4 от 30.11.2021 № 9/с4-2021).

Решение Президиума Экспертного совета по аттестации программ для ЭВМ при Ростехнадзоре (протокол заседания от 28.12.2021 № 82).

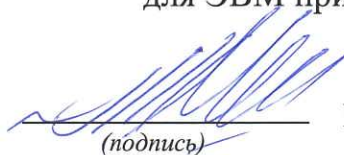
Ученый секретарь Экспертного совета по аттестации программ для ЭВМ при Ростехнадзоре, канд. техн. наук



(подпись)

С.А. Шевченко

Председатель секции № 4 «Прочность и ресурс элементов, оборудования, систем» Экспертного совета по аттестации программ для ЭВМ при Ростехнадзоре, канд. техн. наук



(подпись)

В.С. Рубцов