



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, штампосварных 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 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. 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 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.

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 однопакетного 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).

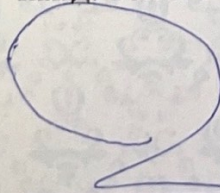
Справка об опыте использования и соответствия современному уровню развития науки и техники программы для ЭВМ «АСТРА-АЭС» (в приложении к тому 4 верификационного отчета) (письмо ЗАО НИЦ СтаДиО от 06.08.2021 № 471/2021).

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).

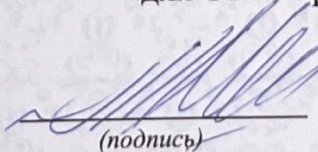
Ученый секретарь Экспертного совета по аттестации программ для ЭВМ при Ростехнадзоре, канд. техн. наук



(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