

Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом»  
АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО  
«ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ  
НЕОРГАНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ИМЕНИ АКАДЕМИКА А.А.БОЧВАРА»  
(АО «ВНИИНМ»)

## **Краткое описание СТАРТ-4А**

Москва 2023

Программное средство СТАРТ–4А предназначено для прочностных и теплофизических расчетов ТВЭЛ в целях исследования, обоснования и лицензирования ТВС реакторов на тепловых нейтронах с топливом на основе диоксида урана, включая топливо с интегрированным поглотителем, в режимах нормальной эксплуатации и нарушения нормальной эксплуатации.

Ниже приведены сведения о коде, необходимые для его аттестации в Ростехнадзоре России, в соответствии с требованиями документа РД–03–34–2000 [1].

*Название программного средства:*

Программное средство для расчетов прочностных и теплофизических характеристик полномасштабных и экспериментальных ТВЭЛ ядерных энергетических реакторов (СТАРТ–4А)

*Структурная организация кода.*

Код организован в виде исполняемого файла, к которому статически подключаются библиотеки свойств, организованные в виде отдельных модулей.

К аттестуемой фиксированной версии кода подключены следующие модули:

- lib110 – свойства сплава Э110;
- lib110opt - свойства сплава Э110о.ч.;
- lib110m - свойства сплава Э110М;
- lib42hnm - свойства сплава ХНМ;
- libuo2 - свойства топлива  $UO_2$ ,  $UO_2+Gd_2O_3$ ;
- libueg - свойства топлива  $UO_2+Er_2O_3$ ;
- librmx - свойства топлива РЕМИКС;
- libumo - свойства топлива УМо;

*Организация разработчик и авторы ПС:*

Акционерное общество «Высокотехнологический институт неорганических материалов имени академика А.А. Бочвара»

- Кузнецов Владимир Иванович – заместитель генерального директора, директор отделения;
- Медведев Анатолий Васильевич – старший научный сотрудник;
- Крупкин Антон Владимирович – начальник отдела;
- Демьянов Павел Геннадьевич – старший научный сотрудник;
- Еременко А.С. – начальник отдела;

- Локтаев К.В – ведущий специалист.

### *Технические характеристики ПС.*

Код создан с использованием следующих языков программирования:

- Фортран 90 [2];
- C++ v.11 [3].

В ПС СТАРТ-4А на языке программирования C++ реализованы следующие модули:

- ввод/вывод данных;
- термомеханического поведения;
- модель газовыделения;
- модель газового распухания.

Все остальные модули ПС реализованы на языке FORTRAN

Для реализации кроссплатформенного отображения файла в оперативную память (технология filemapping) используется библиотека BOOST [4].

Код был протестирован на платформах:

- Windows XP;
- Windows 7;
- Windows Server 2016;
- Astra Linux Common Edition Орел 2.12.43;
- Ubuntu 22.10;
- Cent OS Linux 8.

Системные требования: для эффективной работы требуется наличие свободной оперативной памяти, вмещающей в себя код, внутренние переменные программы, а также входные и выходные данные. Для типичного расчета твэла эта величина составляет 10 Мб. Также, требуется память на жестком диске для хранения входных и выходных данных 20 Мб.

Характерное время расчета типичной истории облучения твэла (250 шагов по времени, 64 аксиальных сечений) на процессоре с частотой 3 ГГц составляет 30 с.

Специальных требований к электронным вычислительным машинам не предъявляется.

### *Описание функциональных характеристик*

Программа для ЭВМ предназначена для связанных расчетов следующих параметров:

- осевые напряжения оболочки твэла и топлива;

- окружные напряжения оболочки твэла и топлива;
- коэффициент теплопередачи в зазоре топливо-оболочка твэла;
- температура топлива и оболочки твэла;
- давление газа под оболочкой твэла;
- диаметр твэла;
- удлинение твэла;
- толщина оксидной пленки оболочки твэла;

применительно к полномасштабным и экспериментальным твэлам ядерных энергетических и исследовательских реакторов.

*Область применения программы для ЭВМ по типу объекта использования атомной энергии*

Ядерные энергетические и исследовательские реакторы на тепловых нейтронах, с активной зоной, укомплектованной твэлами стержневого типа с цилиндрической оболочкой и таблеточным ядерным топливом (с возможностью профилирования по высоте твэла), включая:

- диоксид урана;
- уран-гадолиниевое топливо с содержанием Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> до 8 %;
- уран-эрбиевое топливо;
- ремикс-топливо;
- уран-молибденовое металлическое топливо;
- твэлы с оболочкой из сплавов Э110, Э110о.ч., Э110М;
- ATF-твэлы с оболочкой из сплава 42ХНМ и циркониевых сплавов с хромовым покрытием.

#### *Регистрация ПС*

Код зарегистрирован в Федеральной службе по интеллектуальной собственности. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 12.01.2021. Свидетельство: №2021610089.

#### *Аналоги.*

Аналогами ПС СТАРТ–4А являются такие ПС, как TRANSURANUS, FRAPCON и PIN-MICRO.

#### *История развития кода*

Первоначальную версию ПС СТАРТ (СТАРТ–2) разработал сотрудник

«ВНИИНМ» А.В. Медведев в конце 70-х годов.

Ввиду ограниченности машинных ресурсов (программа предназначалась для использования на вычислительных машинах «Минск–32»), эта версия рассчитывала одно или несколько осевых сечений твэла.

В дальнейшем, после появления в институте более совершенных вычислительных машин сотрудниками «ВНИИНМ» была разработана версия ПС для расчета полномасштабных твэлов - СТАРТ–3.

С помощью версии кода СТАРТ–3 осуществлено проектирование и лицензирование топлива действующих реакторов на тепловых нейтронах (ВВЭР–1000, ВВЭР–440, РБМК–1000, РБМК–1500).

Версия кода СТАРТ–3 была аттестована в Госатомнадзоре в 1997 г. - регистрационный номер 76 паспорта аттестации программного средства от 22.09.1997.

Код СТАРТ–3 успешно участвовал в «слепых» расчетах в рамках международной программы FUMEX I (1993–1996 гг.) в числе 19–ти кодов из 14–ти стран, в Международной Программе МАГАТЭ по совершенствованию моделей кодов для анализа поведения топлива при повышенных выгораниях, FUMEX II (2002–2006 гг.), в программе FUMEX III (2008–2012 гг.), посвященной исследованию газовой выделению при повышенных выгораниях, взаимодействию топлива с оболочкой.

Основной целью программ FUMEX было улучшение качества анализа поведения твэлов при помощи компьютерных кодов. В ходе выполнения кейсов программ был просчитан ряд историй облучения, включающих в себя скачки и твэлы с высоким выгоранием.

По результатам верификационных работ, выполненных как по специальным программам, так и по международным программам FUMEX код СТАРТ–3 был модернизирован и преобразован в версию СТАРТ–3А.

Версия кода СТАРТ–3А аттестована в ФБУ «НТЦ ЯРБ» Ростехнадзора (Федеральное бюджетное учреждение «Научно–технический центр по ядерной и радиационной безопасности») в 2013 г. - регистрационный номер 328 паспорта аттестации программного средства от 18.04.2013.

Код СТАРТ–3А находится в производственной эксплуатации на предприятии - Главном конструкторе–технологе твэлов энергетических реакторов (АО «ВНИИНМ») как средство для исследования, проектирования и лицензирования твэлов ядерных энергетических и исследовательских реакторов на тепловых нейтронах.

Дальнейшие модификации кода были связаны с внедрением новой перспективной конструкции твэла (с топливом без центрального отверстия и крупным зерном) и проведением большого комплекса экспериментальных работ (тестов со скачком мощности) на этом топливе.

Эти исследования показали, что крупное зерно удерживает больше газообразных продуктов деления в своей матрице и поэтому показывает большие значения распухания при скачках мощности (газовое распухание).

Следующим направлением изменения кода было внедрение библиотек материалов для ATF–топлива, Ремикс–топлива. Это материалы оболочек 42ХНМ, Э110о.ч. с хромовым покрытием, Ремикс–топливо с содержанием Рu до 5 %.

Эти усовершенствования были интегрированы в представленную версию СТАРТ–4А. «ВНИИНМ» была разработана версия ПС для расчета полномасштабных твэлов – СТАРТ–3.

С помощью версии кода СТАРТ–3 осуществлено проектирование и лицензирование топлива действующих реакторов на тепловых нейтронах (ВВЭР–1000, ВВЭР–440, РБМК–1000, РБМК–1500).

Версия кода СТАРТ–3 была аттестована в Госатомнадзоре в 1997 г. – регистрационный номер 76 паспорта аттестации программного средства от 22.09.1997.

Код СТАРТ–3 успешно участвовал в «слепых» расчетах в рамках международной программы FUMEX I (1993–1996 гг.) в числе 19–ти кодов из 14–ти стран, в Международной Программе МАГАТЭ по совершенствованию моделей кодов для анализа поведения топлива при повышенных выгораниях, FUMEX II (2002–2006 гг.), в программе FUMEX III (2008–2012 гг.), посвященной исследованию газовой выделению при повышенных выгораниях, взаимодействию топлива с оболочкой.

Основной целью программ FUMEX было улучшение качества анализа поведения твэлов при помощи компьютерных кодов. В ходе выполнения кейсов программ был просчитан ряд историй облучения, включающих в себя скачки и твэлы с высоким выгоранием.

По результатам верификационных работ, выполненных как по специальным программам, так и по международным программам FUMEX код СТАРТ–3 был модернизирован и преобразован в версию СТАРТ–3А.

Версия кода СТАРТ–3А аттестована в ФБУ «НТЦ ЯРБ» Ростехнадзора (Федеральное бюджетное учреждение «Научно–технический центр по ядерной и радиационной безопасности») в 2013 г. - регистрационный номер 328 паспорта аттестации программного средства от 18.04.2013.

Код СТАРТ–3А находится в производственной эксплуатации на предприятии – Главном конструкторе–технологе твэлов энергетических реакторов (АО «ВНИИНМ») как средство для исследования, проектирования и лицензирования твэлов ядерных энергетических и исследовательских реакторов на тепловых нейтронах.

Дальнейшие модификации кода были связаны с внедрением новой перспективной конструкции твэла (с топливом без центрального отверстия и крупным зерном) и проведением большого комплекса экспериментальных работ (тестов со скачком

мощности) на этом топливе.

Эти исследования показали, что крупное зерно удерживает больше газообразных продуктов деления в своей матрице и поэтому показывает большие значения распухания при скачках мощности (газовое распухание).

Следующим направлением изменения кода было внедрение библиотек материалов для ATF–топлива, Ремикс–топлива. Это материалы оболочек 42ХНМ, Э110о.ч. с хромовым покрытием, Ремикс–топливо с содержанием Рu до 5 %.

Эти усовершенствования были интегрированы в представленную версию СТАРТ–4А.

### **Список литературы**

1. Требования к составу и содержанию отчета о верификации и обосновании программных средств, применяемых для обоснования безопасности объектов использования атомной энергии, РД–03–34–2000. – Москва. 2000.

2. ISO. - ISO/IEC 1539:2010 Information technology - Programming languages - Fortran – Part I: Base Language. – International Organization for Standardization. Geneva, Switzerland. 2010.

3. ISO. - ISO/IEC 14882:2017 Information technology - Programming languages - C++. - International Organization for Standardization. Geneva, Switzerland. 2017.

4. R. Demming, D. J. Duffy. – Intorduction The Boost C++ Libraries; Volume I – Foundations. - Datasim Education BV. 1832 AK Koedijk, The Netherlands. 2021.