

Сведения об области применения программы для ЭВМ БЕРКУТ-У/V2.1

Сведения о назначении программы для ЭВМ, включая перечень расчётных моделей, построение которых обеспечивает программа для ЭВМ

Назначение программы для ЭВМ

Программа для ЭВМ предназначена для расчетного моделирования напряженно-деформированного состояния и температурного распределения в стержневых твэлах, наработки и радиоактивных взаимопревращений и миграции продуктов деления в топливе, внутризёрного и межзёрного переноса радиоактивных продуктов деления, термохимических превращений в топливе, включая распределение продуктов деления по молекулярным и фазовым состояниям, формирование пористости, эволюции микроструктуры топлива и его распухания, как газового, так и твердотельного, выхода радиоактивных продуктов деления под оболочку твэла и их перераспределения в зазоре «топливо–оболочка» в твэлах с нитридным или оксидным топливом с газовым или жидкометаллическим подслоем при облучении в реакторных установках на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем в стационарных и переходных режимах нормальной эксплуатации.

Область применения программы для ЭВМ по типу объекта использования атомной энергии

Действующие и проектируемые установки с реакторной установкой с натриевым теплоносителем типа БОР-60, МБИР, БН-600, БН-800, БН-1200.

Проектируемые установки с реакторной установкой со свинцовым теплоносителем типа БРЕСТ-ОД-300.

Область применения программы для ЭВМ по моделируемым режимам

Термомеханическое поведение твэла в квазистационарных и переходных режимах с изменением/маневрированием тепловой мощностью.

Сведения о рассчитываемых параметрах, получение которых обеспечивается в результате применения расчетных моделей, построенных с использованием программы для ЭВМ

Программа для ЭВМ обеспечивает расчётное моделирование термомеханических, термохимических и диффузионных процессов, а также процессов наработки и эволюции изотопного состава топлива в стержневом твэле с таблеточным нитридным (СНУП) или оксидным (UO_2 , МОКС) топливом, газовым или жидкометаллическим подслоем и оболочкой из стали.

Допустимые значения параметров в области применения для РУ БР:

- температура оболочки твэла изменяется от 293 К до температуры плавления оболочки (с учётом коэффициента запаса);
- температура нитридного топлива в таблетке изменяется от 293 К до температуры диссоциации (с учётом коэффициента запаса);
- максимальное выгорание нитридного топлива не превышает 12,1% тяж. ат.

- температура оксидного топлива в таблетке изменяется от 293 К до температуры плавления (с учётом коэффициента запаса);
- максимальное выгорание оксидного топлива не превышает 11,8% тяж. ат.

Программа для ЭВМ обеспечивает расчётное моделирование только стержневых твэлов с таблеточным нитридным (СНУП) или оксидным (UO_2 , МОКС) топливом, газовым или жидкометаллическим подслоем и оболочкой из стали.

Программа для ЭВМ не обеспечивает проведение расчетов режимов с плавлением твэла.

При проведении расчетов по программе для ЭВМ не учитываются такие локальные эффекты, как деформация и овализация оболочки, наличие сколов топливных таблеток в зазоре, смещение топливных таблеток относительно оси симметрии, повреждение дебрис-частицами и износ оболочки из-за взаимодействия с дистанционирующей проволокой или дистанционирующей решёткой, эрозионное или коррозионное повреждение оболочки твэлов, эффект Ребиндера.

При проведении расчётов по программе для ЭВМ не учитывается изгиб твэлов.

Сведения о структуре программы для ЭВМ и её модулей

В программе для ЭВМ реализованы следующие модули:

- управляющий модуль — обеспечивает ввод и обмен данными между модулями, организацию процесса вычислений, создание точек возобновления расчетов и вывод расчётных результатов конкретной задачи;
- тепловой модуль — моделирует осевое и радиальное распределение температуры в твэле при заданных источниках тепловыделения и определённых условиях теплопередачи на внешней поверхности оболочки тепловыделяющего элемента;
- деформационный модуль — прогнозирует текущие размеры, напряженно-деформированное и механическое состояние топлива и оболочки твэла;
- усовершенствованный топливный модуль — моделирует микроструктурные изменения, происходящие при облучении топлива, наработку, радиоактивные взаимопревращения и миграцию продуктов деления в топливе, эволюцию пористости и распухания топлива, выход радиоактивных продуктов деления под оболочку твэла;
- модуль, описывающий зазор «топливо–оболочка» — моделирует перераспределение радиоактивных продуктов деления по фазовым (конденсированным и газовым) состояниям и их перенос по зазору «топливо–оболочка», для газового зазора рассчитывает теплопроводность газовой смеси в зависимости от состава газа, для жидкометаллического подслоя моделирует растворение оболочки и перенос продуктов коррозии в жидком свинце или натрии;
- модуль базы данных теплофизических и механических свойств материалов твэла — рассчитывает механические и теплофизические свойства материалов твэлов РУ БР и выдает их по запросу всех модулей кода.

Сведения о методике расчета, используемой в программе для ЭВМ, включая информацию о решаемых уравнениях и исходных данных, необходимых для проведения расчетов

В программе для ЭВМ при расчётном моделировании учитывается:

- зависимость теплофизических и механических свойств материалов твэла от температуры;
- деградация теплопроводности топлива с выгоранием;
- изменение толщины зазора «топливо–оболочка»;
- изменение давления газа под оболочкой;
- изменение состава газа под оболочкой из-за выхода ГПД;
- возникновение контактной теплопроводности между топливом и оболочкой при исчезновении зазора;
- наработка и изменение состава ПД;
- термохимические процессы в топливе;
- эволюция микроструктуры топлива;
- внутривзёрный и межвзёрный перенос ПД, выход ПД в открытую пористость.

Температурное поле, напряжения и деформации рассчитываются в программе для ЭВМ в одномерном приближении в поперечных сечениях твэла, достаточно (несколько диаметров твэла) удаленных по высоте от торцов (концевых деталей) и от мест приложения внешних сосредоточенных нагрузок. Объединение всех сечений в единую систему производится на основе вычисления общего для всех сечений газового давления под оболочкой твэла.

Одномерное уравнение теплопроводности в каждом сечении твэла, в предположении осевой симметрии многослойной структуры твэла, аппроксимируется линейной неявной схемой и решается методом прогонки.

Для нахождения напряжённо-деформированного состояния, в предположении осевой симметрии многослойной структуры твэла, из рассмотрения условий неразрывности радиальных перемещений и обобщенной плоской деформации формируется система нелинейных алгебраических уравнений относительно неизвестных осевых усилий и межслойных давлений, которая линеаризуется. Для решения систем линейных уравнений используется метод Гаусса.

Расчеты в программе для ЭВМ проводятся в предположении о том, что осевые перетечки газа в зазоре между топливными таблетками и оболочкой твэла происходят мгновенно.

Программа для ЭВМ БЕРКУТ-У/V2.1 работает в виде отдельного приложения, предназначенного для проведения самостоятельных расчётов по моделированию поведения твэлов РУ. Основным режимом работы этого приложения является пакетный режим проведения расчётов, в котором вся входная информация подается в программу в виде заранее подготовленной группы входных файлов текстового формата. Выходные файлы также имеют текстовый формат и приспособлены для последующей их обработки стандартными программными средствами обработки данных, таких как Grapher, Excel и т.п. Для проведения длительных расчётов программа для ЭВМ оснащена системой сохранения состояния расчёта и режимом

самопродолжения для восстановления процесса вычислений после планового либо аварийного прерывания работы кода.

Сведения о базах данных (библиотеках констант), используемых в программе для ЭВМ, включая сведения о стандартных справочных данных о физических константах и свойствах веществ и материалов

В программе для ЭВМ БЕРКУТ-У/V2.1 используется база данных теплофизических и физико-механических свойств материалов твэла, в основу которой положены данные из «Временные руководящие материалы по использованию данных по свойствам конструкционных материалов и СНУП топлива для обоснования работоспособности экспериментальных твэлов ЭТВС реактора БН-600», 3-ая редакция. Инв.№.67ВРМ от 17.08.2018, учет Частного учреждения «ИТЦП «ПРОРЫВ», 2018, 83 с.

По умолчанию в программе для ЭВМ используются свойства материалов, реализованные в виде отдельного модуля. В программе для ЭВМ реализована возможность самостоятельного задания пользователем программы свойств материалов через файл ввода входных данных.

Сведения о диапазонах параметров расчетных моделей, для которых определены погрешности результатов расчетов, с указанием значений этих погрешностей

Значения погрешностей расчета напряженно-деформированного состояния и максимальной температуры топлива взяты из аттестационного паспорта №451 от 24 октября 2018 г., выданного программе для ЭВМ БЕРКУТ-V1.1 (версия 1.1). Программы для ЭВМ БЕРКУТ-У/V2.1 и БЕРКУТ-V1.1 имеют идентичные температурный и деформационный модули, а, следовательно, и расчетные погрешности. В свою очередь приведенная оценка погрешностей программы для ЭВМ БЕРКУТ-V1.1 проводилась посредством сравнения полученных с использованием программы для ЭВМ БЕРКУТ-V1.1 результатов с аналитическими решениями задач теплопроводности и механики деформированного твердого тела. При оценке погрешностей моделирования нелинейных процессов использовалось сравнение полученных с использованием программы для ЭВМ БЕРКУТ-V1.1 результатов с численными результатами конечно-элементного кода MSC.MARC. Для сравнения результатов вычислялась либо абсолютная погрешность, либо относительная, в которой за истинное значение принималось либо аналитическое решение, либо численное решение кода MSC.MARC.

Погрешность расчёта максимальной температуры топлива оценивалась с помощью статистического анализа неопределённостей результатов расчетов по программе для ЭВМ, обусловленных разбросом значений конструкторских и технологических параметров твэла, эксплуатационных параметров, физико-механических и теплофизических свойств материалов твэла.

Значения погрешностей расчётного моделирования программой для ЭВМ БЕРКУТ-У/V2.1 выхода ГПД, изменения наружного диаметра твэлов, изменения наружного диаметра таблеток, изменения величины диаметрального зазора, распухания топлива, средней пористости топлива и концентраций компонентов топлива и продуктов деления получены на основе анализа отклонений результатов расчётов по программе для ЭВМ от экспериментальных данных. При оценке значений расчетных погрешностей экспериментальные погрешности учтены не были.

Указанные в таблице 1 погрешности расчёта оценены при использовании свойств материалов, принятых в базе данных программы для ЭВМ БЕРКУТ-У/V2.1. При проведении расчётов по программе для ЭВМ с использованием других свойств

материалов, погрешности расчёта по программе для ЭВМ должны быть обоснованы самостоятельно пользователем программы для ЭВМ. Используемые по умолчанию в программе для ЭВМ БЕРКУТ-У/V2.1 свойства материалов не аттестованы.

Таблица 1 – Значения погрешностей расчётного моделирования по программе для ЭВМ БЕРКУТ-У/V2.1

Параметр	Диапазон изменения	Значение погрешности
<i>Напряженно-деформированное состояние твэла</i>		
Радиальные, окружные и осевые напряжения в оболочке и топливной таблетке для условий упругого деформирования	до предела текучести	±1 %
Радиальные, окружные и осевые напряжения в оболочке и топливной таблетке для условий упруго-пластического деформирования	до предела прочности	±2 %
Упругие радиальные, окружные и осевые деформации оболочки и топливной таблетки	–	±1,5 %
Радиальные, окружные и осевые деформации термической ползучести оболочки и топливной таблетки	–	±5 %
<i>Температура</i>		
Максимальная температура нитридного топлива	от 293 К до температуры диссоциации топлива	±16 %
Максимальная температура оксидного топлива	от 293 К до температуры плавления топлива	±16 %
<i>Геометрия твэла</i>		
Наружный диаметр оболочки твэла с нитридным топливом	до выгорания топлива 12,1 % тяж. ат.	±1 %
Наружный диаметр топливной таблетки из нитридного топлива	до выгорания топлива 12,1 % тяж. ат.	±0,5 %
Величина диаметрального зазора «топливо–оболочка» твэла с нитридным топливом	до выгорания топлива 12,1 % тяж. ат.	±43 %
Среднее набухание нитридного топлива	до выгорания топлива 12,1 % тяж. ат.	±28 %
Наружный диаметр оболочки твэла с оксидным топливом	до выгорания топлива 11,8 % тяж. ат.	±1 %
Наружный диаметр топливной таблетки из оксидного топлива	до выгорания топлива 11,8 % тяж. ат.	±1,5 %
Величина диаметрального зазора «топливо–оболочка» твэла с оксидным топливом	до выгорания топлива 11,8 % тяж. ат.	±66 %

Параметр	Диапазон изменения	Значение погрешности
<i>Выход ГПД</i>		
Нитридное топливо: – общий объем ГПД – ксенон – гелий	до выгорания топлива 12,1 % тяж. ат.	±19 % ±32 % ±25 %
Оксидное топливо: – общий объем ГПД – ксенон – гелий	до выгорания топлива 11,8 % тяж. ат.	±24 % ±30 % ±14 %
<i>Радиальные профили в топливе</i>		
Средняя пористость нитридного топлива	до выгорания топлива 12,1 % тяж. ат.	±18 %
Концентрации компонентов нитридного топлива и продуктов деления: – ксенон – цезий – молибден – цирконий – неодим – уран – плутоний – азот	до выгорания топлива 12,1 % тяж. ат.	±35 % ±37 % ±10 % ±12 % ±13 % ±8 % ±6 % ±9 %

Для обеспечения консервативного подхода при обосновании безопасности получаемые по программе для ЭВМ результаты расчета должны использоваться в совокупности с обоснованными коэффициентами запаса.