

# ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

## 1. Наименование программы для ЭВМ

Усовершенствованная версия твэльного кода БЕРКУТ, моделирующего поведение в быстрых реакторах твэла с нитридным и оксидным топливом. Версия 2.1 (БЕРКУТ-У/V2.1).

Программа для ЭВМ БЕРКУТ-У/V2.1.

## 2. Краткое описание программы для ЭВМ

Программа для ЭВМ БЕРКУТ-У/V2.1 предназначена для численного моделирования напряженно-деформированного состояния и температурного распределения в стержневых тепловыделяющих элементах, 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 (СНУП) или оксидным ( $UO_2$ , МОКС) топливом с газовым или жидкометаллическим подслоем при облучении в реакторных установках на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем (натрий, свинец, свинец-висмут) в стационарных и переходных режимах нормальной эксплуатации, а также для расчётного обоснования работоспособности (обоснование безопасности).

При решении учитывается:

- зависимость теплофизических и механических свойств материалов твэла от условий эксплуатации;
- деградация теплопроводности топлива с выгоранием;
- изменение толщины зазора;
- изменение давления газа под оболочкой;
- изменение состава газа под оболочкой из-за выхода ГПД;
- изменение микроструктуры топлива.

В программе для ЭВМ БЕРКУТ-У/V2.1 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 набухания 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.

### 3. Список авторов программы для ЭВМ

Болдырев А.В., Долинский И.О., Задорожный А.В., Озрин В.Д., Тарасов В.И., Чернов С.Ю., Шестак В.Е.

4. Данные контактного лица, к которому можно обращаться по вопросам, связанным с работой программы для ЭВМ, её установкой и запуском

Долинский Илья Олегович: [dolinski@ibrae.ac.ru](mailto:dolinski@ibrae.ac.ru).

## 5. Общие сведения о программе для ЭВМ

### 5.1 Язык программирования

C++, FORTRAN-2003

### 5.2 Поддерживаемые операционные системы

Операционные системы Microsoft Windows XP/7/10 x32.

### 5.3 Версии транслятора

Microsoft Visual Studio 2010\2017 C++ + Intel Parallel Studio XE 2015 for Fortran, Professional Edition (Windows)

## 6. Инструкция по установке

Системные требования:

- а) 2 ГБ ОЗУ или больше.
- б) Размер дискового пространства: непосредственно исполняемый файл, динамические библиотеки и база данных топливного модуля MFPR. занимают около 20 мегабайт. Текстовые выходные файлы с расширением \*.out и \*.dat могут занимать до нескольких гигабайт дискового пространства в зависимости от решаемой задачи. Размер этих файлов можно уменьшить путём изменения частоты записи или списка записываемых переменных во входном xml-файле кода.
- в) Процессор с частотой от 2 ГГц.

Для работы с программой для ЭВМ BERKUT-У/V2.1 необходимо создать отдельную директорию (например, BERKUT) и в ней поддиректории Output и Out\_MFPR. В созданную директорию (в примере это папка BERKUT) необходимо скопировать из папки BIN файлы динамических библиотек (UniLib\_Win32\_Release.dll, vcomp100d.dll), каталог BONUS\_DB базы данных топливного модуля MFPR и исполняемый файл BERKUT-MFPR.exe. В папку Output и Out\_MFPR будут помещены результаты расчёта.

Для запуска тестовой задачи сначала необходимо скопировать её входной файл из соответствующего каталога (например, файл KETVS-1-5\_NM.xml из каталога TESTS\Nitride Fuel Rods\KETVS-1) в папку с исполняемым файлом кода, затем запустить исполняемый файл BERKUT-MFPR.exe: находясь в директории BERKUT, набрать в окне консоли команду «BERKUT-MFPR.exe KETVS-1-5\_NM.xml».

## 7. Описание комплекта поставки

В комплект поставки входят:

- программа для ЭВМ в виде динамических библиотек, базы данных топливного модуля и исполняемого файла (папка BIN);
- тестовые примеры для программы для ЭВМ БЕРКУТ-У/V2.1 (папка TESTS и её подкаталоги). Полный список тестовых примеров приведён ниже в таблице 2;
- исходные тексты программы для ЭВМ БЕРКУТ-У/V2.1 на языке C++ и Fortran (папка SOURCE);
- документация к программе для ЭВМ БЕРКУТ-У/V2.1 (папка DOCS).

## 8. Описание основного содержимого материалов (папок, директорий) программы для ЭВМ. Инструкция по запуску программы для ЭВМ

Описание директорий, входящих в комплект поставки, и их содержимого приведено в таблице 1.

Таблица 1 – Описание директорий, входящих в комплект поставки программы для ЭВМ БЕРКУТ-У/V2.1

Директория / путь к файлу	Краткое пояснение
./BIN	Содержит исполняемый файл кода, необходимые динамические библиотеки.
./BIN/BERKUT-MFPR.exe	Исполняемый файл программы для ЭВМ БЕРКУТ-У/V2.1.
./BIN/BONUS_DB	Содержит базу данных топливного модуля MFPR.
./BIN/UniLib_Win32_Release.dll	Библиотека для работы с базой данных SmartDB.
./BIN/vcomp100d.dll	Системная библиотека для использования OpenMP.
./TESTS	Содержит входные файлы тестовых примеров.
./SOURCE	Содержит исходные тексты программы для ЭВМ БЕРКУТ-У/V2.1.
./SOURCE/ CPP	Содержит исходные тексты, написанные на языке C++.
./SOURCE/ FOR	Содержит исходные тексты, написанные на языке FORTRAN-2003.

./DOCS	Содержит документацию, необходимую для подачи кода на аттестацию.
--------	---

## 9. Описание тестовых задач

Папка TESTS содержит входные файлы для тестовых задач. Каждый каталог тестового расчёта содержит соответствующий входной файл формата xml. Краткое описание тестовых примеров приведено в таблице 2.

Таблица 2 – Описание тестовых задач программы для ЭВМ БЕРКУТ-У/V2.1

№	Директория; Имя входного файла	Краткое описание задачи
1	TESTS\Nitride Fuel Rods\Bora-Bora; BB_Pu45_CT.xml BB_Pu45_NM.xml BB_Pu60_CT.xml BB_Pu60_NM.xml	Моделирование поведения твэлов со СНУП топливом в экспериментах БОРА-БОРА
2	TESTS\Nitride Fuel Rods\ETVS-4; ETVS-4-06_CT.xml ETVS-4-06_NM.xml ETVS-4-15_CT.xml ETVS-4-15_NM.xml ETVS-4-22_CT.xml ETVS-4-22_NM.xml ETVS-4-27_CT.xml ETVS-4-27_NM.xml	Моделирование поведения твэлов со СНУП топливом в условиях эксплуатации ЭТВС-4 в реакторе БН-600
3	TESTS\Nitride Fuel Rods\ETVS-5; ETVS-5-32_CT.xml ETVS-5-32_NM.xml ETVS-5-37_CT.xml ETVS-5-37_NM.xml ETVS-5-42_CT.xml ETVS-5-42_NM.xml ETVS-5-51_CT.xml ETVS-5-51_NM.xml	Моделирование поведения твэлов со СНУП топливом в условиях эксплуатации ЭТВС-5 в реакторе БН-600
5	TESTS\Nitride Fuel Rods\KETVS-1; KETVS-1-005_CT.xml KETVS-1-005_NM.xml KETVS-1-064_CT.xml KETVS-1-064_NM.xml KETVS-1-099_CT.xml KETVS-1-099_NM.xml	Моделирование поведения твэлов со СНУП топливом в условиях эксплуатации КЭТВС-1 в реакторе БН-600

	KETVS-1-123_CT.xml KETVS-1-123_NM.xml	
6	TESTS\Nitride Fuel Rods\KETVS-2; KETVS-2-22_CT.xml KETVS-2-22_NM.xml KETVS-2-26_CT.xml KETVS-2-26_NM.xml KETVS-2-31_CT.xml KETVS-2-31_NM.xml KETVS-2-35_CT.xml KETVS-2-35_NM.xml	Моделирование поведения твэлов со СНУП топливом в условиях эксплуатации КЭТВС-2 в реакторе БН-600
7	TESTS\Nitride Fuel Rods\KETVS-3; KETVS-3-26_CT.xml KETVS-3-26_NM.xml KETVS-3-31_CT.xml KETVS-3-31_NM.xml KETVS-3-35_CT.xml KETVS-3-35_NM.xml KETVS-3-40_CT.xml KETVS-3-40_NM.xml	Моделирование поведения твэлов со СНУП топливом в условиях эксплуатации КЭТВС-3 в реакторе БН-600
8	TESTS\Nitride Fuel Rods\KETVS-6; KETVS-6-005_CT.xml KETVS-6-005_NM.xml KETVS-6-064_CT.xml KETVS-6-064_NM.xml KETVS-6-099_CT.xml KETVS-6-099_NM.xml KETVS-6-123_CT.xml KETVS-6-123_NM.xml	Моделирование поведения твэлов со СНУП топливом в условиях эксплуатации КЭТВС-6 в реакторе БН-600
9	TESTS\Nitride Fuel Rods\KETVS-7; KETVS-7-005_CT.xml KETVS-7-005_NM.xml KETVS-7-064_CT.xml KETVS-7-064_NM.xml KETVS-7-099_CT.xml KETVS-7-099_NM.xml KETVS-7-123_CT.xml KETVS-7-123_NM.xml	Моделирование поведения твэлов со СНУП топливом в условиях эксплуатации КЭТВС-7 в реакторе БН-600
10	TESTS\Nitride Fuel Rods\OU-2; OU-2_5_CT.xml OU-2_5_NM.xml	Моделирование поведения твэлов со СНУП топливом в условиях эксплуатации ОУ-2 в реакторе БОР-60
11	TESTS\Nitride Fuel Rods\OU-4;	Моделирование поведения твэла со СНУП топливом в условиях эксплуатации ОУ-2 в

	OU-4_2_NM.xml	реакторе БОР-60
12	TESTS\Oxide Fuel Rods\ETVS C-63; ETVS_C-63_CT.xml ETVS_C-63_NM.xml	Моделирование поведения твэлов с оксидным топливом в условиях эксплуатации ЭТВС Ц-63 в реакторе БН-600
13	TESTS\Oxide Fuel Rods\ETVS C-95; ETVS_C-95_CT.xml ETVS_C-95_NM.xml	Моделирование поведения твэлов с МОКС топливом в условиях эксплуатации ЭТВС Ц-95 в реакторе БН-600
14	TESTS\Oxide Fuel Rods\ETVS-1042; ETVS-1042_CT.xml ETVS-1042_NM.xml	Моделирование поведения твэлов с оксидным топливом в условиях эксплуатации ЭТВС-1042 в реакторе БН-600
15	TESTS\Oxide Fuel Rods\KETVS-1; KETVS-1_008_CT.xml KETVS-1_008_NM.xml KETVS-1_077_CT.xml KETVS-1_077_NM.xml KETVS-1_105_CT.xml KETVS-1_105_NM.xml KETVS-1_120_CT.xml KETVS-1_120_NM.xml	Моделирование поведения твэлов с оксидным топливом в условиях эксплуатации КЭТВС-1 в реакторе БН-600
16	TESTS\Oxide Fuel Rods\KETVS-2; KETVS-2_CT.xml KETVS-2_NM.xml	Моделирование поведения твэлов с МОКС топливом в условиях эксплуатации КЭТВС-2 в реакторе БН-600
17	TESTS\Oxide Fuel Rods\KETVS-3; KETVS-3_CT.xml KETVS-3_NM.xml	Моделирование поведения твэлов с оксидным топливом в условиях эксплуатации КЭТВС-3 в реакторе БН-600
18	TESTS\Oxide Fuel Rods\KETVS-6; KETVS-6_CT.xml KETVS-6_NM.xml	Моделирование поведения твэлов с оксидным топливом в условиях эксплуатации КЭТВС-6 в реакторе БН-600
19	TESTS\Oxide Fuel Rods\KETVS-7; KETVS-7_CT.xml KETVS-7_NM.xml	Моделирование поведения твэлов с оксидным топливом в условиях эксплуатации КЭТВС-7 в реакторе БН-600

Входной файл программы для ЭВМ БЕРКУТ-У/V2.1 имеет иерархическую структуру, на верхнем уровне которой располагается корневой элемент задачи – <Task>. В общем случае тег <Task> состоит из блоков <MainBERKUT>, пяти блоков <MeshSet>, как минимум одного блока <Camp>. В теге <MainBERKUT> задаются основные параметры расчёта (конструкционные материалы твэла, давления теплоносителя и газа наполнителя и

другие), определяются списки указателей на рассчитываемые кампании, списки создаваемых выходных файлов, параметры участвующих в расчёте модулей. Теги <MeshSet> задают геометрические размеры твэла. В тегах <Camp> описываются рассчитываемые кампании: их длительность, расписание временных шагов интегрирования и печати, функции тепловыделения, повреждающей дозы и температуры теплоносителя в течение кампании.