

РАСЧЁТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КАМПАНИИ РЕАКТОРА СО СВИНЦОВЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОДА ЕВКЛИД/V1

**Белов А.А., Березнев В.П., Блохина Г.С., Вепрев Д.П., Колташев Д.А.,
Потапов В.С., Чертовских О.И., Шершов А.В.**

ИБРАЭ РАН

115191, г. Москва, Большая Тульская ул., д. 52



Представлены результаты доработки динамического интегрального универсального расчетного кода ЕВКЛИД/V1, предназначенного для анализа и обоснования безопасности реакторных установок на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем, в части моделирования кампании реактора. Актуальность разработки заключается в необходимости формирования состояний активной зоны на любой момент времени кампании. Это позволяет иметь полный набор данных для последующего моделирования динамических режимов реактора (переходных и аварийных). Разработан топливный архив для организации хранения расчетных данных в формате HDF5. Создан редактор расчетной модели для формирования входных данных в формате топливного архива. Приведен пример расчета кампании модели быстрого реактора со свинцовым теплоносителем для трех вариантов представления активной зоны. В первом варианте основной массив ТВС центральной зоны моделировался одним представителем, во втором – тремя, в третьем – все ТВС в расчете были уникальны. Приведены изменения полных масс актинидов в активной зоне от времени. Сделан вывод о незначительном влиянии различного представления активной зоны на эволюцию полных масс актинидов. Приведены значения глубины выгорания ТВС для трех вариантов представления активной зоны. Для третьего варианта получена наибольшая разница между минимальным и максимальным значениями глубины выгорания ТВС при практически совпадающем среднем по совокупности ТВС. Представлена зависимость запаса реактивности от времени для трех вариантов представления активной зоны. Значения и поведение запаса реактивности на протяжении трех микрокампаний практически совпадают. С четвертой по шестую микрокампанию значение запаса реактивности для третьего варианта становится ниже, чем для первого и второго вариантов. Сделан вывод о желательности детального представления активной зоны при оценке поведения запаса реактивности для кампаний быстрого реактора со свинцовым теплоносителем.

Ключевые слова: реактор на быстрых нейтронах, кампания реактора, ЕВКЛИД/V1, ТВС, выгорание, BPSD, нейтронно-физические параметры.

© Белов А.А., Березнев В.П., Блохина Г.С., Вепрев Д.П., Колташев Д.А., Потапов В.С., Чертовских О.И., Шершов А.В., 2022

ВВЕДЕНИЕ

Необходимость расчетного обоснования безопасности реакторных установок с жидкометаллическим теплоносителем инициирует разработку современных расчетных инструментов, позволяющих моделировать различные режимы работы установок на протяжении всего её жизненного цикла. Одним из таких инструментов является интегральный код ЕВКЛИД/V1, разрабатываемый в ИБРАЭ РАН. В данной работе рассматривается реализация расчетного моделирования кампаний реакторной установки с применением кода ЕВКЛИД/V1.

ОПИСАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНОГО КОДА ЕВКЛИД/V1

Динамический интегральный универсальный расчетный код для анализа и обоснования безопасности реакторных установок на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем ЕВКЛИД/V1 разрабатывается в ИБРАЭ РАН с 2012 г. в рамках проекта «Коды нового поколения» проектного направления «Прорыв» [1, 2]. Код предназначен для моделирования реакторных установок на базе связанных нейтронно-физических, термомеханических и теплогидравлических расчетов. Область применимости кода ЕВКЛИД/V1 включает в себя как условия нормальной эксплуатации (стационарные состояния на разрешённых уровнях мощности, штатные переходные режимы), так и условия нарушения нормальной эксплуатации. В 2019 г. получен аттестационный паспорт программы для ЭВМ «ЕВКЛИД/V1.2» применительно к установкам со свинцовым и натриевым теплоносителями [3].

Код ЕВКЛИД/V1 имеет модульную структуру и содержит три основных модуля: теплогидравлический, твэльный и нейтронно-физический. Нейтронно-физический расчет в интегральном коде ЕВКЛИД/V1 осуществляется на базе модуля DN3D, реализующего диффузионную (одноточечная, семиточечная, гибридная расчетные схемы) и кинетическую опции (на базе метода дискретных ординат). Диффузионная и кинетическая опции базируются на использовании кодов DOLCE VITA [4] и CORNER [5] соответственно, автономные версии которых аттестованы в 2021 г.

РЕАЛИЗАЦИЯ РАСЧЕТА МИКРОКАМПАНИЙ В КОДЕ ЕВКЛИД/V1

В 2019 г. была начата доработка кода ЕВКЛИД/V1 для возможности расчетов режимов работы реакторной установки с учетом выгорания активной зоны и перегрузки ТВС в рамках микрокампаний на базе актуальной версии программы BPSD [6] (код аттестован в 2021 г. [7]). Для этого в коде выполнены следующие доработки:

- создан топливный архив для организации хранения расчетных данных в формате HDF5 [8];
- создан редактор расчетной модели для формирования входных данных в формате топливного архива;
- реализованы в нейтронно-физическом модуле DN3D интерфейсы для обмена данными с топливным архивом и модулем BPSD;
- организована подготовка сечений с использованием топливного архива для нейтронно-физического расчета по модулю DN3D.

HDF5 – это формат иерархического хранения данных. Поскольку описание модели и результаты расчётов могут иметь большой объём данных, был выбран формат HDF5, предназначенный для обработки и хранения такого типа данных.

Расчет режимов, учитывающих выгорание, сопряжен с обработкой и хранением больших объемов данных, что обуславливает применение топливного архива.

Топливный архив содержит данные о параметрах расчетной модели, тепловыделяющих сборок, органов СУЗ, о материальном составе активной зоны, управляющих параметрах расчета и др.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В ОБЪЕКТАХ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Редактор расчетной модели имеет пользовательские интерфейсы для удобного задания и корректировки параметров РУ (рис. 1).

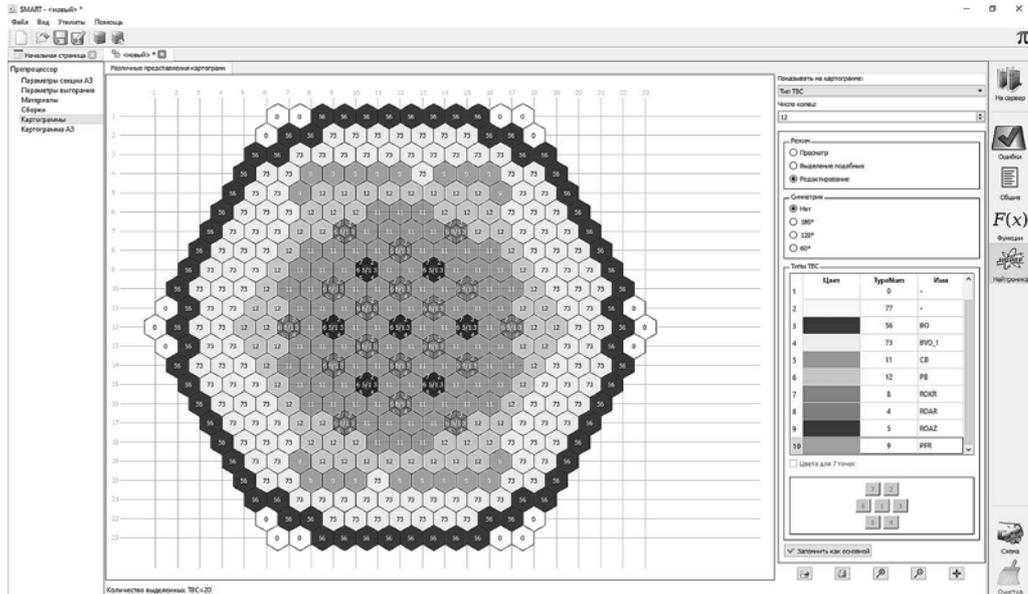


Рис. 1. Вид рабочей области задания картограммы, полученной с помощью конструктора а.з.

Для учета изменения нуклидного состава в процессе расчета микрокампании выполняется подготовка групповых сечений после каждого шага выгорания с помощью программы CONSYST [9]. С использованием подготовленных сечений проводится стационарный расчет, полученное в результате которого распределение плотности потока нейтронов используется в модуле BPSD для определения новых материальных составов. После этого осуществляются запись архива и подготовка нейтронно-физических сечений. Для расчета равновесных полей температур и плотностей на каждом шаге выгорания проводится расчет процесса установления с применением теплогидравлического и твэльного модулей. Блок-схема подпрограммы для моделирования кампаний в коде ЕВКЛИД/V1 представлена на рис. 2.

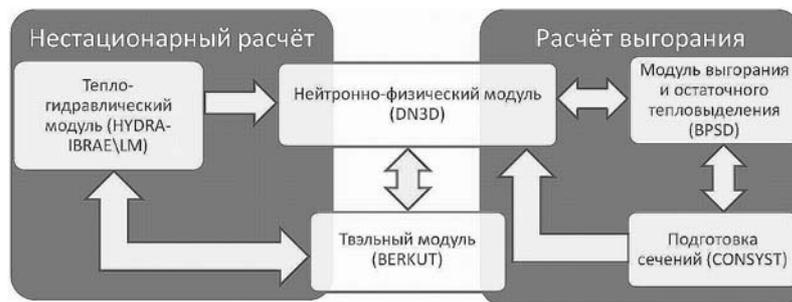


Рис. 2. Блок-схема подпрограммы для моделирования кампаний в коде ЕВКЛИД/V1

Для снижения временных и вычислительных затрат в расчетах используется объединение схожих по нейтронно-физическим и теплогидравлическим характеристикам сборок в виде единых представителей. Данные представители используются для дальнейшего моделирования активной зоны с учетом наборов усредненных параметров. Пример картограммы с представителями ТВС приведён на рис. 3, где отображены два различных варианта разбиения с учётом конструктивных особенностей

сборок: топливные сборки имеют тип «11», сборки с органами СУЗ имеют типы «4», «5», «8», «14» в зависимости от типа СУЗ (рис. 3а); все сборки уникальны (рис. 3б).

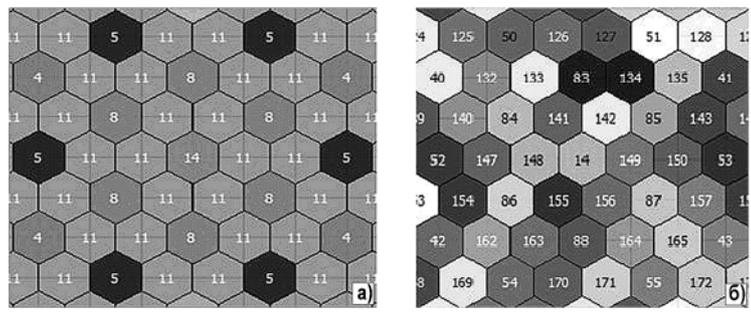


Рис. 3. Варианты разбиения: а) – с объединением по конструкционным особенностям сборок; б) – с уникальным типом для каждой ТВС

ОПИСАНИЕ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ СО СВИНЦОВЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ

Рассматривается пример модельной кампании реакторной установки со свинцовым теплоносителем длительностью 900 суток. Кампания разбивается на шесть микрокампаний по 150 эффективных суток с остановками на 30 суток.

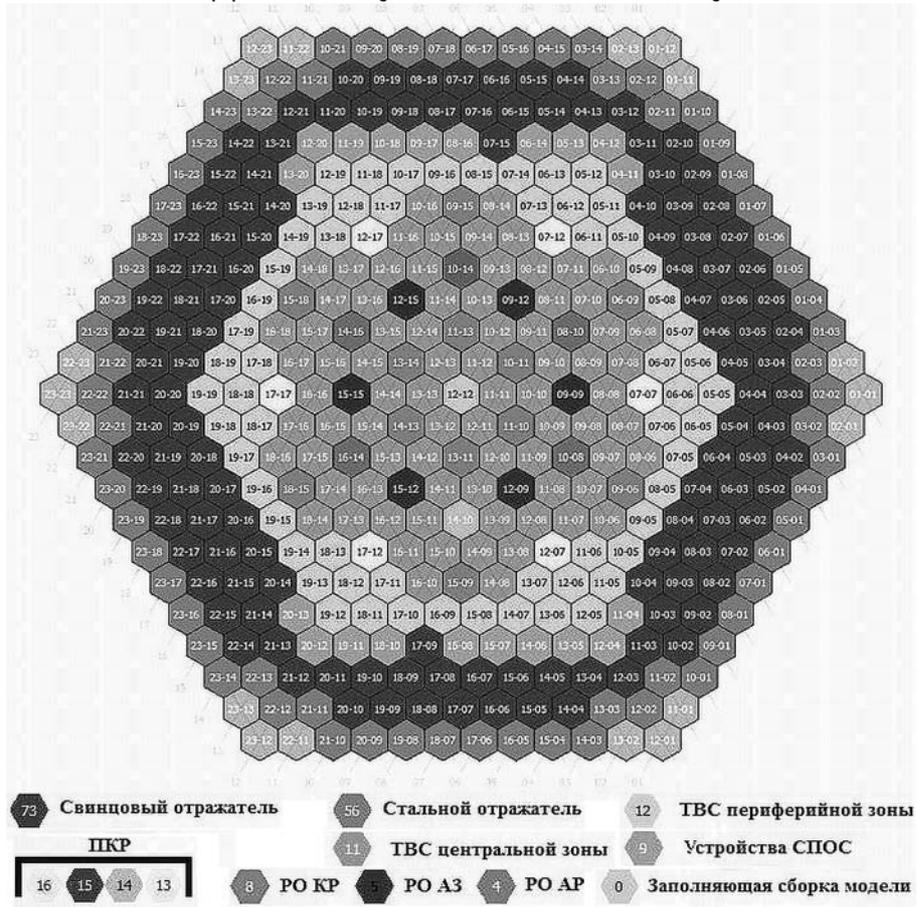


Рис. 4. Картограмма загрузки расчетной модели

На рисунке 4 представлена картограмма стартовой загрузки расчетной модели с

косоугольной нумерацией ТВС [10].

В процессе кампании проводятся перестановки (замены) некоторых ПКР, ТВС. При этом распределения температуры материалов на протяжении всего расчета задаются постоянными.

Проведены три расчета кампании реактора с различным разбиением для ТВС центральной и периферийной зон без РО СУЗ (ТВС ЦЗ и ТВС ПЗ) (табл. 1). Для ТВС с РО СУЗ задано отдельное разбиение с учётом типа поглотителя (борный или диспрозиевый).

Таблица 1

Описание разбиения в различных вариантах

	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
Разбиение	Один представитель для ТВС ЦЗ и один представитель для ТВС ПЗ	Три представителя для ТВС ЦЗ (по концентрическим слоям) и один представитель для ТВС ПЗ	Каждая ТВС уникальна

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА МОДЕЛЬНОЙ КАМПАНИИ

Для ТВС ЦЗ и ТВС ПЗ получены значения выгорания на конец шестой микрокампании (табл. 2).

Таблица 2

Глубина выгорания, % т. ат.

Сборка	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
ТВС ЦЗ			
Среднее	4,023	4,023	4,024
Минимальное	–	3,5324	3,0837
Максимальное	–	4,7501	4,7622
ТВС ПЗ			
Среднее	2,4749	2,4748	2,4745
Минимальное	–	–	1,7965
Максимальное	–	–	3,1941

Для ^{235}U , ^{238}U , ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu , ^{242}Pu и ^{241}Am получены зависимости изменений полных масс нуклидов в активной зоне от времени. На рисунках 5, 6 показано относительное изменение массы, нормированное на массу данного нуклида в стартовой загрузке.

Изменения масс по всей зоне практически не зависят от типа разбиения. Это объясняется тем, что интегральная мощность реактора постоянна на протяжении всего расчёта для всех расчетных вариантов, т.е. суммарная энергия, выделяемая в активной зоне при взаимодействии нейтронов с ядрами, не зависит от типа разбиения модели. При этом распределения выгорания по ТВС в разных вариантах разбиения различаются (рис. 7). Для примера были взяты значения для ячеек по одному направлению от центра.

Зависимость запаса реактивности от времени для трёх вариантов демонстрируется на рис. 8.

Результаты, показанные на рис. 7, свидетельствуют, что тип разбиения оказывает влияние на значения запаса реактивности. Это связано с различиями в распределениях плотности потока нейтронов по зоне реактора, обусловленными разными распределениями выгорания в расчетах с разным типом представления. Для получения корректного значения изменения запаса реактивности в зависимости от выго-

рания реактора необходимо более детально задавать модель активной зоны. В свою очередь, если основной интерес при расчёте представляет изменение нуклидного состава зоны, то можно обойтись упрощённой моделью, которая считается в разы быстрее, поскольку содержит меньшее число уникальных расчётных ячеек.

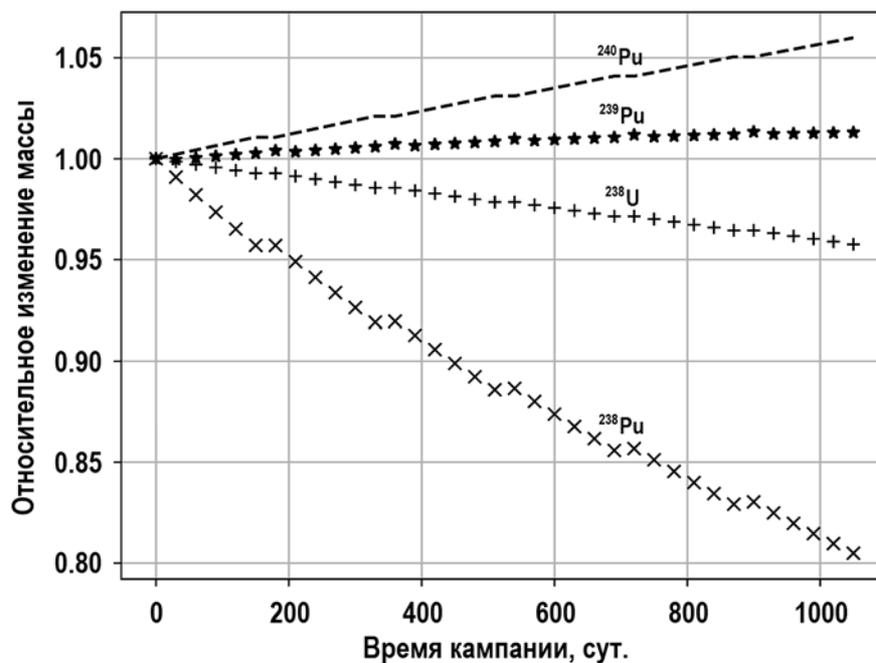


Рис. 5. Изменения масс нуклидов ^{238}U , ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu

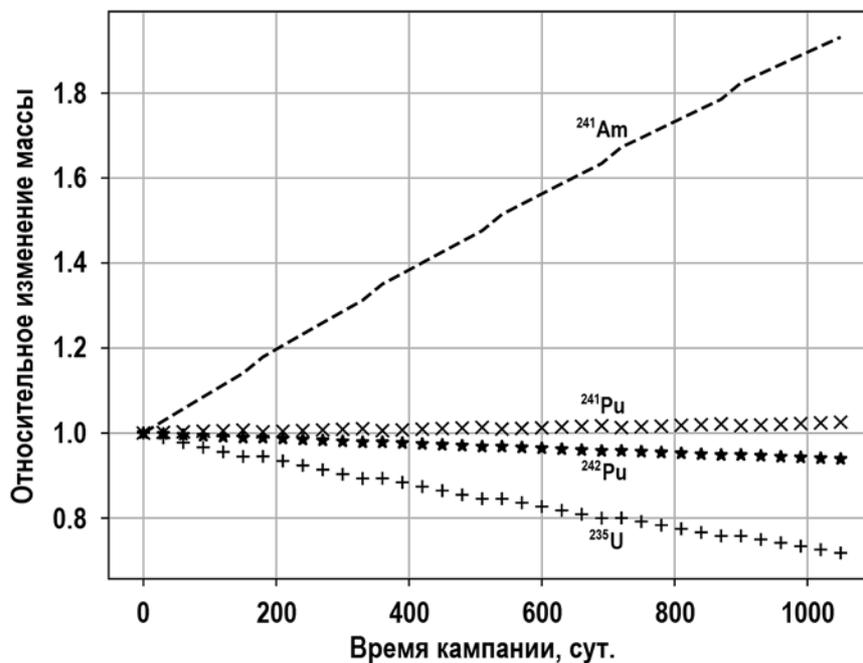


Рис. 6. Изменения масс нуклидов ^{235}U , ^{241}Pu , ^{242}Pu и ^{241}Am

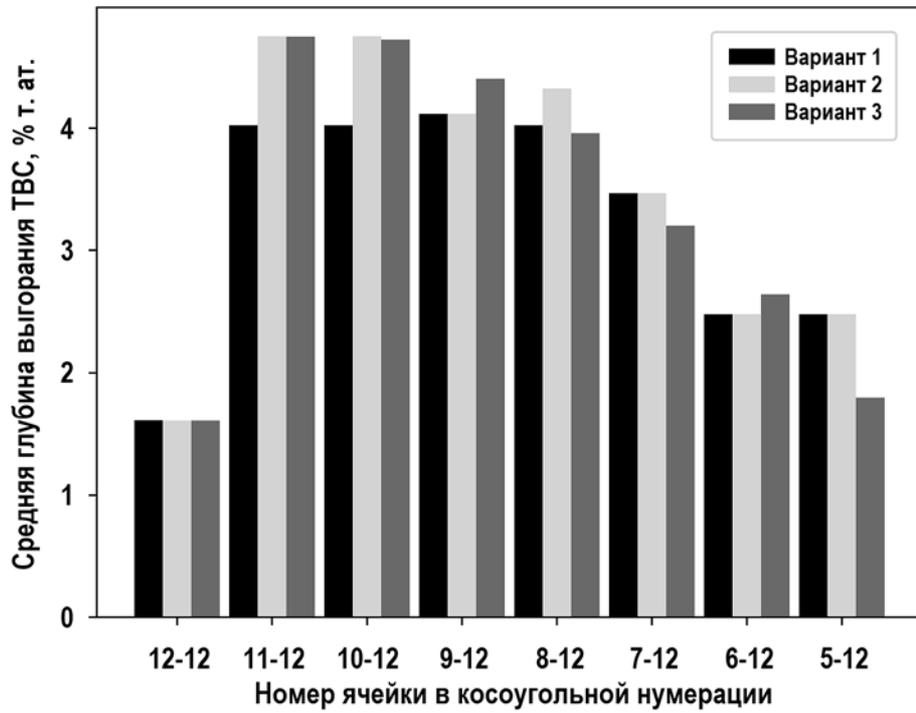


Рис. 7. Распределение средней глубины выгорания ТВС по радиусу для трёх вариантов разбиения

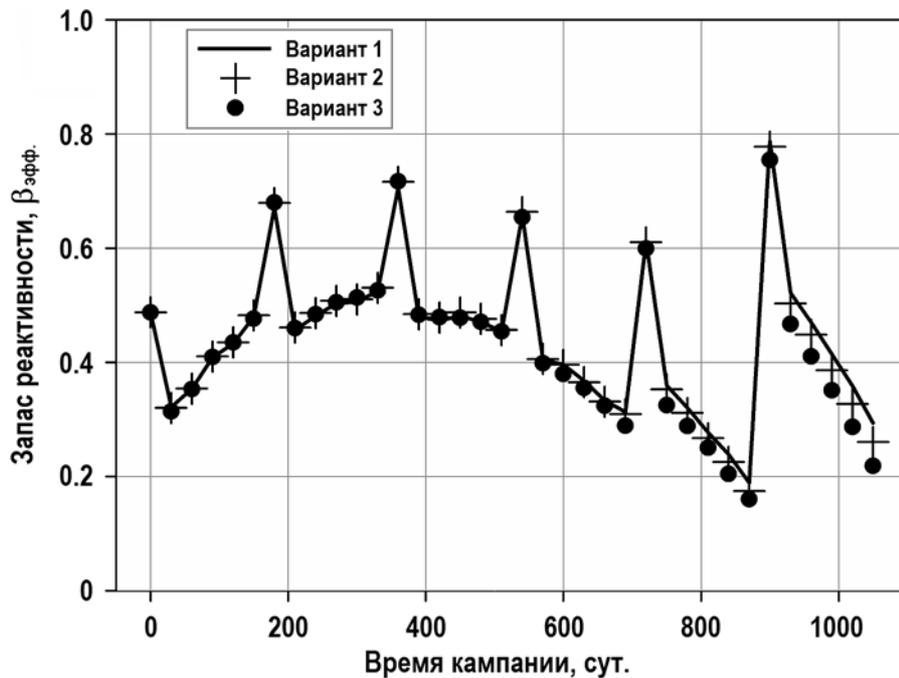


Рис. 8. Зависимость запаса реактивности от времени

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В коде ЕВКЛИД/V1 реализована технология расчета кампании модели реакторной установки с применением кода нуклидной кинетики BPSD, включающая в себя конструктор активной зоны и поддержку архива состояний в формате HDF5 с биб-

лиотекой функций доступа.

Проведена серия расчётов модельной кампании реакторной установки со свинцовым теплоносителем. Полученные результаты использованы в рамках работ по усовершенствованию расчетной методики и доработке функциональности кода.

Дальнейшие работы направлены на усовершенствование средств препроцессинга, алгоритмов расчета и формата архива состояния активной зоны. В последующих расчётах планируется использовать теплогидравлический и термомеханический модули кода ЕВКЛИД/V1 для учета влияния температурно-плотностных обратных связей на нейтронно-физические характеристики в течение всей кампании.

Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке Госкорпорации «Росатом» (в рамках Государственных контрактов № Н.4о.241.19.20.1027 от 20.03.2020 и № Н.4о.241.19.21.1068 от 14.04.2021).

Литература

1. Мосунова Н.А. Интегральный код ЕВКЛИД/V1 для обоснования безопасности реакторных установок на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем. Часть 1: Базовые модели. // Теплоэнергетика. – 2018. – № 5. – С. 69-84. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0040363618050065>.
2. Алипченков В.М. и др. Интегральный код ЕВКЛИД/V1 для обоснования безопасности реакторных установок на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем. Часть 2: Верификация. // Теплоэнергетика. – 2018. – № 9. – С. 57-72. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0040363618090011>.
3. Аттестационный паспорт программы для ЭВМ «ЕВКЛИД/V1.2», № 462 от 30.05.2019.
4. Селёзнев Е.Ф., Белов А.А., Белоусов В.И., Чернова И.С., Дробышев Ю.Ю. DOLCEVITA. / ВАНТ. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2018. – № 1. – С. 157-168.
5. Березнев В.П., Селёзнев Е.Ф., Асатрян Д.С. Нейтронно-физический расчетный код CORNER. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2015. – № 1. – С. 136-143. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2015.1.15>.
6. Селёзнев Е.Ф., Белов А.А., Белоусов В.И., Чернова И.С. Модернизация программы расчета задачи нуклидной кинетики BPSD. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2018. – № 4. – С. 115-127. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2018.4.10>.
7. Аттестационный паспорт программы для ЭВМ «BPSD/V2.1», № 516 от 30.01.2021.
8. Электронный ресурс: <https://www.hdfgroup.org/solutions/hdf5/> (дата доступа 11.05.2021).
9. Мантуров Г.Н., Николаев М.Н., Цибуля А.М. Программа подготовки констант CONSYST. Описание применения. Препринт ГНЦ РФ – ФЭИ-2828. – Обнинск: ГНЦ РФ – ФЭИ, 2000. – 72 с.
10. Баловнев А.В., Боровская Ж.В., Давыдов В.К., Журнов А.П., Калугина К.М., Кривошеин И.Н., Моисеев А.В. Предвестное моделирование экспериментов на стенде БФС-2 для обоснования характеристик активной зоны реактора БРЕСТ-ОД-300. / Труды VI Всероссийской научно-технической конференции молодых специалистов «Инновации в атомной энергетике – 2019». – С. 915-922.

Поступила в редакцию 27.10.2021 г.

Авторы

Потапов Владимир Сергеевич, инженер

E-mail: potapovvs@ibrae.ac.ru

Березнев Валерий Павлович, научный сотрудник, канд. техн. наук

E-mail: bvp@ibrae.ac.ru

Белов Александр Анатольевич, научный сотрудник

E-mail: belov@ibrae.ac.ru

Колташев Дмитрий Александрович, младший научный сотрудник

E-mail: kda@ibrae.ac.ru

Блохина Галина Сергеевна, инженер

E-mail: blokhina@ibrae.ac.ru

Вепрев Дмитрий Павлович, научный сотрудник

E-mail: veprev@ibrae.ac.ru

Чертовских Ольга Игоревна, инженер

E-mail: chertovskih@ibrae.ac.ru

Шершов Алексей Владимирович, инженер

E-mail: shershov@ibrae.ac.ru

UDC 621.039.526

SIMULATING A LEAD-COOLED REACTOR CAMPAIGN USING THE EUCLID/V1 CODE

Belov A.A., Bereznev V.P., Blokhina G.S., Veprev D.P., Koltashev D.A.,
Potapov V.S., Chertovskikh O.I., Shershov A.V.

Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences
52 Bolshaya Tulsкая Str., 115191 Moscow, Russia

ABSTRACT

The paper presents the results of the development of the EUCLID/V1 dynamic integrated calculation code designed to analyze and justify the safety of fast neutron reactor facilities with a liquid-metal coolant, in terms of simulating the reactor campaign. The relevance of this study lies in the need to simulate the behavior of the core at any time during the campaign. This will make it possible to obtain a full dataset for subsequent simulations of the reactor dynamic conditions (including transient states or accidents). The authors have developed a fuel archive to store calculated data in the HDF5 format, created a calculation model editor to generate input data in the fuel archive format, and also provided an example of calculating the campaign of a lead-cooled fast reactor for three core design models shown in this paper. The main array of fuel assemblies was simulated as a single unit in the first model and as three units in the second model, whereas in the third one all the assemblies were unique. In addition, the authors have shown changes in the total masses of actinides in the core, revealed that the different core models have an insignificant effect on the evolution of the total masses of actinides, and given the fuel assembly burnup values for the three core models. For the third model, the largest difference between the minimum and maximum burnup values was obtained with an almost identical average over the fuel assemblies. The reactivity margin over time for the three core models was presented. It was shown that the values and behavior of the reactivity margin during the three microcampaigns practically coincided. From the fourth to the sixth cycle, the reactivity margin value for the third core model was lower than for the first and the second ones. Finally, the authors conclude that it is desirable to evaluate the behavior of the reactivity margin for lead-cooled fast reactor campaigns based on a detailed model of the core.

Key words: fast-neutron reactor, reactor campaign, EUCLID/V1, fuel assembly, burnup, BPSD, neutron-physical parameters.

REFERENCES

1. Mosunova N.A. The EUCLID/V1 Integrated Code for Safety Assessment of Liquid Metal Cooled Fast Reactors. Part 1: Basic Models. *Teploenergetika*. 2018, v. 65, no. 5, pp. 304-316; DOI: <https://doi.org/10.1134/S0040363618050065> (in Russian).
2. Alipchenkov V.M., Boldyrev A.V., Veprev D.P., Zeygarnik Yu.A., Kolobaeva P.V., Moiseenko E.V., Mosunova N.A., Seleznyov E.F., Strizhov V.F., Usov E.V., Osipov S.L., Gorbunov V.S., Afremov D.A., Semchenkov A.A. The EUCLID/V1 Integrated Code for Safety Assessment of Liquid Metal Cooled Fast Reactors. Part 2: Validation and Verification. *Teploenergetika*. 2018, v. 65, no. 9. pp. 627-640; DOI: <https://doi.org/10.1134/S0040363618090011> (in Russian).
3. Attestation Certificate of the Computer Program «EUCLID/V1.2», No. 462 from 30.05.2019 (in Russian).
4. Seleznyov E.F., Belov A.A., Belousov V.I., Chernova I.S., Drobyshev Yu. Yu. DOLCEVITA. VANT. Ser. *Yadernye i Reaktornye Konstanty*. 2018, no. 1, pp. 157-168 (in Russian).
5. Bereznev V.P., Seleznyov E.F., Asatryan D.S. The «CORNER» Neutronics Calculation Code. *Izvestia Vysshikh Uchebnykh Zawedeniy. Yadernaya Energetika*. 2015, no. 1, pp. 136-143; DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2015.1.15> (in Russian).
6. Seleznyov E.F., Belov A.A., Belousov V.I., Chernova I.S. BPSD Code Upgrade for Solving the Nuclear Kinetics Problem. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2018, no. 4, pp. 115-127; DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2018.4.10> (in Russian).
7. Attestation Certificate of the Computer Program BPSD/V2.1, No. 516 from 30.01.2021 (in Russian).
8. Available at: <https://www.hdfgroup.org/solutions/hdf5/> (accessed 11.05.2021).
9. Manturov G.N., Nikolaev M.N., Tsibulya A.M. *CONSYST Code for Neutron Constants Preparation. Scope Statement: IPPE Preprint-2828*. Obninsk, FEI Publ., 2000, 72 p. (in Russian).
10. Balovnev A.V., Borovskaya G.V., Davydov V.K., Zhirnov A.P., Kalugina K.M., Krivoshein I.N., Moiseev A.V. Pre-Test Modeling of Experiments on the BFS-2 Stand to Evidence Characteristics of Core Reactor BREST-OD-300. *Proc. of the VI-th All-Russian Sci. and Techn. Conf. of Young Spec. «Innovations in Nuclear Power – 2019»*, pp. 915-922 (in Russian).

Authors

Potapov Vladimir Sergeevich, Engineer

E-mail: potapovvs@ibrae.ac.ru

Bereznev Valery Pavlovich, Researcher, Cand. Sci. (Engineering.)

E-mail: bvp@ibrae.ac.ru

Belov Aleksandr Anatolievich, Researcher

E-mail: belov@ibrae.ac.ru

Koltashev Dmitry Aleksandrovich, Junior Researcher

E-mail: kda@ibrae.ac.ru

Blokhina Galina Sergeevna, Engineer

E-mail: blokhina@ibrae.ac.ru

Veprev Dmitry Pavlovich, Researcher

E-mail: veprev@ibrae.ac.ru

Chertovskikh Olga Igorevna, Engineer

E-mail: chertovskih@ibrae.ac.ru

Shershov Aleksey Vladimirovich, Engineer

E-mail: shershov@ibrae.ac.ru