

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗОТОПНОЙ КИНЕТИКИ В СИСТЕМЕ С ЦИРКУЛИРУЮЩИМ ТОПЛИВОМ НА ПРИМЕРЕ ПЕТЛИ РЕАКТОРА МБИР

**Д.С. Кузенкова, В.Ю. Бландинский**

*НИЦ «Курчатовский институт»*

*123182, Москва, пл. Академика Курчатова, 1*



Приведены результаты работы по моделированию изменения изотопного состава жидкосолевой топливной композиции, циркулирующей в экспериментальном канале реакторной установки МБИР. Произведена проверка адаптации программной среды ISTAR для решения задач расчета энерговыделения в зонах с переменной мощностью. Для корректного усреднения плотности потока нейтронов и оценки времени прохождения топливной соли через внешний контур оценены характеристики петли, в том числе размеры двух вариантов промежуточного теплообменника и объем петлевого канала для каждого из них.

Рассматриваются две задачи моделирования системы (петли) с циркулирующим топливом:

- моделирование равновесного изотопного состава соли в системе с циркулирующим топливом;
- разработка методики моделирования нестационарной изотопной кинетики в петле реактора МБИР.

Моделирование нестационарной изотопной кинетики может быть реализовано в виде последовательного выгорания нуклидов в поле нейтронов (петля в активной зоне реактора) и выдержки во время движения во внешнем контуре.

Разработан алгоритм моделирования изменения изотопного состава топливной соли при циркуляции с учетом последовательного переноса заданного объема соли из зоны выгорания в зону за пределами активной зоны реактора и программное средство на языке программирования Python 3.9 с использованием модулей ПС ISTAR. Описана методика расчетов и представлены некоторые результаты расчетов с использованием разработанной программы.

В процессе работы с программой было выявлено, что при заданных временах нахождения топлива в каждой из зон (2 и 200 секунд) моделирование изменения изотопного состава на протяжении кампании топлива (500 суток) потребует расчета более 500 тысяч шагов. В целях сокращения времени счета исследуется возможность уменьшения количества вызовов программы нейтронно-физического расчета ввиду незначительного изменения изотопного состава топлива в петле за один шаг выгорания. Ведутся работы по оптимизации этого процесса.

**Ключевые слова:** МБИР, жидкосолевая петля, ISTAR, моделирование циркуляции топливной соли, нейтронно-физические характеристики.

Кузенкова Д.С., Бландинский В.Ю. Моделирование изотопной кинетики в системе с циркулирующим топливом на примере петли реактора МБИР. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2022. – № 4. – С. 58-66. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2022.4.05> .

## ВВЕДЕНИЕ

Жидкосолевые топливные композиции могут использоваться как в перспективных реакторах деления [1 – 3], так и в бланкетах гибридных термоядерных реакторов. Внедрение ториевых топливных композиций в бланкет термоядерного источника нейтронов позволит наработать  $^{233}\text{U}$ , что дает возможность решить проблемы обеспеченности ресурсами рынка ядерного топлива на длительный период времени. Перспективный исследовательский реактор МБИР [4] планируется в качестве замены реактору БОР-60 и снабжен автономными петлевыми устройствами для проведения исследований материалов и топлива, в том числе расплавов топливных солей. Данная исследовательская работа является продолжением статьи [5].

Работа посвящена моделированию петлевого канала и эволюции изотопного состава жидкосолевой топливной композиции в экспериментальном канале реакторной установки МБИР.

## ПАРАМЕТРЫ ПЕТЛЕВОГО КАНАЛА

Петлевой канал условно можно разделить на два участка: в активной зоне реактора и внешний контур. Участок, который находится в поле нейтронов, подробно описан в статье [5]. Он имеет сложную структуру: труба из стали ЭП-450Ш, в которую с учетом газового зазора, заполненного аргоном, помещается труба из Хастеллой Н, контактирующая с циркулирующей топливной солью. Внешний контур представляет собой трубопроводы и промежуточный теплообменник. Промежуточный теплообменник передает тепло от топливной соли первого контура теплоносителю второго контура. Для дальнейших нейтронно-физических расчетов необходимо оценить объем топливной соли в каждой из частей контура.

## ВЫБОР ТЕПЛООБМЕННИКА

Для начала расчета теплообменника необходимо определить основные параметры топливной соли: плотность, удельную теплоемкость, динамическую вязкость и теплопроводность. Обоснование выбора системы  $\text{LiF}-\text{ThF}_4$  и расчет ее плотности описаны в работе [5]. Теплофизические свойства системы  $\text{LiF}-\text{ThF}_4$  для необходимого состава были оценены на основании опубликованных экспериментальных данных.

Теплоемкость соединения оценена по правилу Неймана-Коппа на основании известных данных для отдельных составляющих ( $\text{LiF}$  и  $\text{ThF}_4$  [6]) и равна 908,1 Дж/(К·кг).

Динамическая вязкость при рабочей температуре составляет 0,0209 Па·с [7]. Экспериментов для определения коэффициента теплопроводности с таким составом соли не проводилось, поэтому, согласно [7], предлагается принять  $\lambda = 1,5$  Вт/(м·К).

Рассмотрены два варианта теплоносителя теплоотводящего контура: жидкий натрий, который является теплоносителем реактора МБИР, и расплавленная соль – флайб ( $\text{LiF}-\text{BeF}_2$ ). Результаты расчетов основных величин двух вариантов промежуточного теплообменника оценены по методике из [8] и приведены в сводной табл. 1.

Произведена оценка размеров промежуточного теплообменника (ПТО) и рассчитан объем топливной соли в нем. При использовании в качестве теплоносителя жидкого натрия объем топливной соли составляет 0,14 м<sup>3</sup>, если теплоносителем явля-

ется жидкая соль, то – 0,76 м<sup>3</sup>.

Сводные данные об объемах всех элементов контура петлевого канала представлены в табл. 2.

Таблица 1

**Основные характеристики теплообменников**

Измеряемая величина	Теплоноситель второго контура	
	Na	LiF–BeF <sub>2</sub>
Массовый расход топливной соли первого контура, кг/с	22	22
Массовый расход теплоносителя второго контура, кг/с	16	9,5
Площадь теплопередающей поверхности, м <sup>2</sup>	80,8	458,7
Диаметр наружной обечайки, м	0,42	1,02
Потери давления, кПа	126	126
Объем топливной соли в ПТО, м <sup>3</sup>	0,14	0,76

Таблица 2

**Объем топливной соли в различных участках петлевого канала для двух вариантов теплоносителя, м<sup>3</sup>**

Участок петлевого канала	Теплоноситель второго контура	
	Na	LiF–BeF <sub>2</sub>
Реакторная часть канала	0,143	0,143
Трубопроводы	0,014	0,014
Теплообменник	0,136	0,759
Весы петлевой канал	0,293	0,915

**РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ И ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА**

Для моделирования изотопной кинетики циркулирующего топлива необходимы программные средства для расчета энерговыделения и выгорания топлива в зонах с переменной мощностью.

Энерговыделение в петле определяется по программе на основе метода Монте-Карло MCNP [9]. В петле реактора МБИР оно распределяется по содержащим топливные материалы зонам: активная зона, экраны, внутриреакторное хранилище, жидкосолевая петля. Распределение тепловыделения для каждой из зон рассчитано в [5]: активная зона – 88,17%, экраны – 8,61%, внутриреакторное хранилище – 3,16%, петлевой канал – 0,06%. Низкое значение мощности в петлевом канале обусловлено тем, что в стартовом состоянии в соли содержится только сырьевой изотоп <sup>232</sup>Th. По мере накопления <sup>233</sup>U мощность будет возрастать. Далее проводится нормировка на суммарную тепловую мощность МБИР 150 МВт.

Программная система ISTAR [10] позволяет рассчитать как равновесное состояние, так и изменение изотопного состава. Она предназначена для исследований сложных структур систем ядерной энергетики, включая разные процессы трансформации нуклидов в различных предприятиях ядерного энергетического комплекса. Модель ядерной энергетической установки задается как определенная структура, состоящая из набора процессов, физических зон, хранилищ, предприятий ЯТЦ и потоков нуклидов между ними. Расчеты могут проводиться как для стационарных, так и для нестационарных режимов выгорания и выдержки [11, 12]. В каждом процессе (физической зоне) приме-

няется модель точечной одногрупповой изотопной кинетики – предполагается, что все нуклиды имеют средние по зоне и интегральные по энергии параметры взаимодействия с нейтронами и находятся в усредненном по зоне и интегральном по энергии потоке нейтронов. Возникла необходимость проверки адаптации программной среды ISTAR для решения задач расчета нуклидной кинетики в зонах с переменной мощностью.

Тяжелые ядра, которые подвергаются делению, содержатся в активной зоне реактора, экранах и петлевом канале (итого четыре зоны). Принято решение смоделировать эти зоны, посчитать выгорание в каждой из них начиная со стартового состава соли с шагом 20 суток (10 шагов), зная суммарное энерговыделение в активной зоне, в экранах и в петлевом канале. В результате расчета выгорания помимо изотопного состава ISTAR сохраняет распределение энерговыделения по шагам в каждой из четырех зон. При известных значениях распределения энергии в петлевом канале для каждого шага по времени решена задача выгорания только для одной зоны выгорания (петлевого канала).

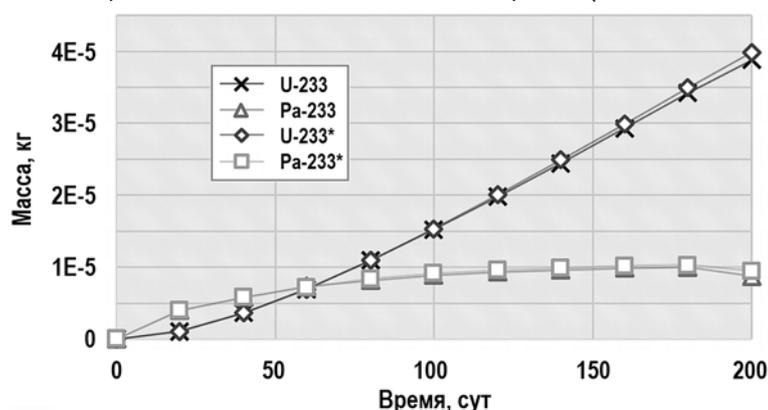


Рис. 1. Сравнительные графики массы  $^{233}\text{Pa}$  и  $^{233}\text{U}$  для двух типов расчетов в зависимости от времени. Звёздочкой (\*) обозначены расчеты с заданием энерговыделения внутри определенной зоны

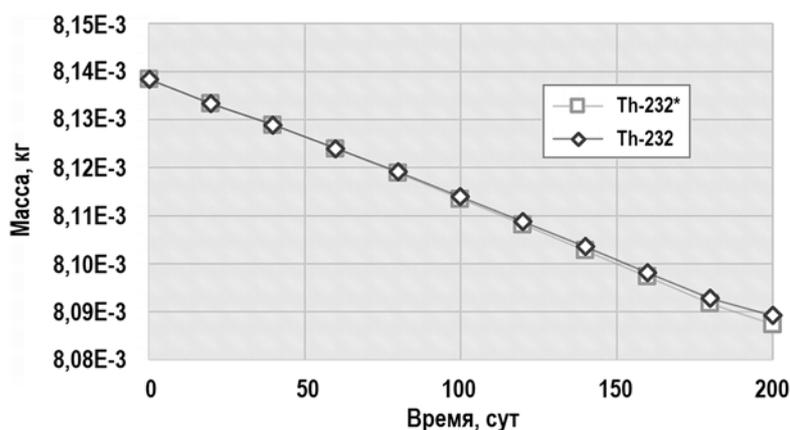


Рис. 2. Сравнительные графики массы  $^{232}\text{Th}$  для двух типов расчетов в зависимости от времени. Звёздочкой (\*) обозначены расчеты с заданием энерговыделения внутри определенной зоны

Были проведены сравнительные расчеты для решения задачи изотопной кинетики разными способами: с помощью задания суммарной мощности установки и энерговыделения только в петлевом канале, зная доли энерговыделения для каждой части. Получен новый изотопный состав на каждом расчетном шаге. На рисунках приведены сравнительные графики массы  $^{233}\text{Pa}$ ,  $^{233}\text{U}$  (рис. 1) и  $^{232}\text{Th}$  (рис. 2) для каждого из вышеописанных расчетов в зависимости от времени (в сутках). Расчёты изотопных составов с заданием суммарной мощности и энерговыделения внутри только петлевого канала за шаг совпадают,

что даёт возможность считать выгорание в зонах с переменной мощностью.

### **ПОДХОДЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ЦИРКУЛЯЦИИ**

Существует два подхода к моделированию системы (петли) с циркулирующим топливом:

- изменение изотопного состава топливной композиции в поле нейтронов с усредненной по всему петлевому контуру плотностью потока нейтронов;
- изменение изотопного состава при последовательном выгорании нуклидов в поле нейтронов (петля в активной зоне реактора) и выдержке во время движения во внешнем контуре.

Работа посвящена развитию второго подхода. Разработан алгоритм и реализовано программное средство на языке программирования Python 3.9 с использованием модулей ПС ISTAR для моделирования изотопной кинетики исследуемой топливной композиции, циркулирующей между зонами с полем нейтронов и без него, на любом наперед заданном интервале времени.

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦИРКУЛЯЦИИ ТОПЛИВНОЙ СОЛИ В ПЕТЛЕВОМ КАНАЛЕ**

Выполнен предварительный теплогидравлический расчет, который позволил оценить время нахождения топливной соли в поле нейтронов, т.е. непосредственно в петлевом канале реактора МБИР (две секунды), и во внешней части контура за пределами активной зоны (200 секунд).

Разработана «Программа для расчета изотопной кинетики в системах с циркулирующим топливом на базе ПС ISTAR» [13], предназначенная для расчета изотопного состава в топливной расплавленной соли при ее циркуляции в петлевом канале исследовательского реактора с использованием ПС ISTAR. Программа моделирует последовательный перенос заданного объема жидкого топлива из зоны выгорания в зону за пределами активной зоны реактора.

Для запуска программы требуется ввести ряд основных параметров: начальный состав топливной соли, энерговыделение в той части канала, которая находится в активной зоне реактора, количество шагов выгорания и время нахождения соли на каждом участке петли. Шагу соответствует один этап работы программы, который моделирует один из двух процессов – выгорание (реакции в нейтронном поле) или естественный распад.

Рассмотрим подробно работу программы. На первом шаге, как и на всех последующих нечетных шагах, происходит моделирование выгорания – запускается одноименный модуль ПС ISTAR, результатом работы которого является измененный изотопный состав топлива, далее запускается расчет, уточняющий энерговыделения для нового состава топлива, и полученные данные перезаписываются в качестве стартовых для следующего процесса. Второй, как и все остальные четные шаги, моделирует естественные распады нуклидов в топливе, состав которого получен на предыдущем шаге. Программа последовательно запускает исполняемые модули указанное количество раз. По итогу работы на каждом шаге создается текстовый файл с таблицей, содержащей данные об изотопном составе топлива, а также текстовый файл с пересчитанными значениями энерговыделения. Эти данные для каждого шага агрегируются в сводную таблицу (в формате CSV).

Проведена верификация разработанного программного средства. Выполнен в ручном режиме расчет 20-ти шагов работы программы. Результаты расчета энерговыделения и изотопного состава в ручном режиме и с использованием разработанного исследовательского инструмента совпали полностью (рис. 3). ПС ISTAR ранее

верифицировано для расчета выгорания [12].

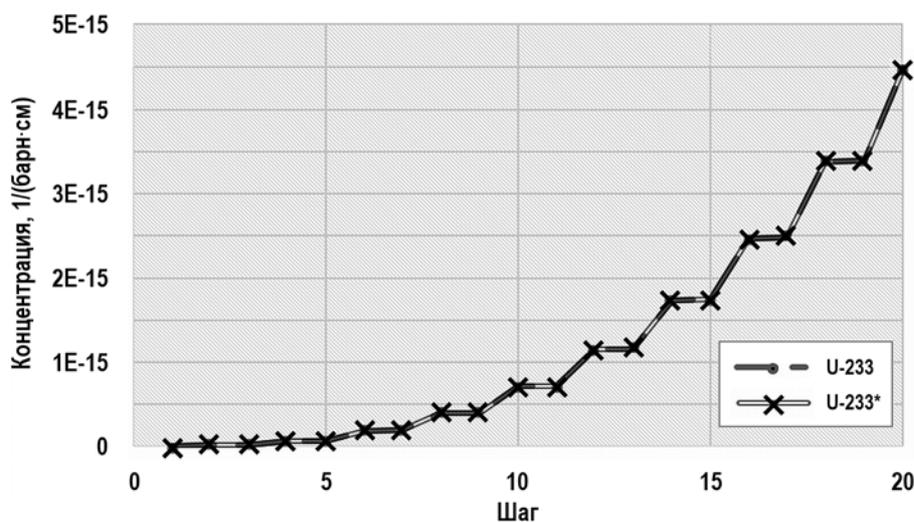


Рис. 3. Сравнительные графики изменения концентрации  $^{233}\text{U}$  со временем в ручном режиме и с использованием разработанного исследовательского инструмента. Звёздочкой (\*) обозначены расчеты, которые проводились в ручном режиме

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана расчетная модель и оценены основные параметры экспериментального петлевого канала. Произведено моделирование циркуляции топливной соли в петлевом канале – последовательный перенос заданного объема соли из зоны выгорания в зону за пределами активной зоны реактора.

В процессе работы с программой обнаружилось, что при заданных временах нахождения топлива в каждой из зон (2 и 200 секунд) время расчета каждого процесса имеет значение. Зная, что кампания реактора МБИР – 500 суток, количество таких шагов составит больше 500 тысяч. На один расчет могут уйти месяцы, поэтому в программу внесены модернизации. Исходя из того, что за 200 секунд (а тем более за две секунды) состав топлива меняется незначительно, можно пересчитывать энерговыделение раз в некоторое количество шагов. Ведутся работы по оптимизации этого процесса.

## Литература

1. Блинкин В.Л., Новиков В.М. Жидкосольевые ядерные реакторы. – М.: Атомиздат, 1978. – 112 с.
2. Новиков В.М., Слесарев И.С., Алексеев П.Н., Игнатъев П.Н., Субботин С.А. Ядерные реакторы повышенной безопасности (анализ концептуальных разработок). – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 348 с.
3. Игнатъев В.В., Кормилицын М.В., Кормилицына Л.А., Семченков Ю.М., Федоров Ю.С., Фейнберг О.С., Крюков О.В., Хаперская А.В. Жидкосольевой реактор для замыкания ядерного топливного цикла по всем актиноидам. // Атомная энергия. – 2018. – Т. 125. – Вып. 5. – С. 251-255. Электронный ресурс: <http://j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/2492/2469> (дата доступа 19.09.2022).
4. Драгунов Ю.Г., Третьяков И.Т., Лопаткин А.В., Романова Н.В., Лукасевич И.Б. Многоцелевой быстрый исследовательский реактор (МБИР) — инновационный инструмент для развития ядерных энерготехнологий. // Атомная энергия. – 2012. – Т. 113. – Вып. 1. – С. 25-28. Электронный ресурс: <http://j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/1355/1336> (дата доступа 19.09.2022).
5. Бландинский В.Ю., Кузенкова Д.С. Расчетное обоснование экспериментов с расплавленно-сольевыми торий-урановыми топливными композициями в петле реактора

МБИР. // Атомная энергия. – 2020. – Т. 128. – Вып. 5. – С. 254-258. Электронный ресурс: <http://j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/3180/4152> (дата доступа 19.09.2022).

6. *Capelli E.* Thermodynamic investigation of the LiF-ThF<sub>4</sub> system. // The Journal of Chemical Thermodynamics – 2013. – Vol. 58. – PP. 110-116. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jct.2012.10.013>.

7. *Benesh O., Konings R.J.M.* Thermodynamic properties and phase diagrams of fluoride salts for nuclear applications. // Journal of Fluorine Chemistry. – 2009. – Vol. 130. – No. 1. – PP. 22-29. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfluchem.2008.07.014>.

8. *Усынин Г.Б., Карabasов А.С., Чирков В.А.* Оптимизационные модели реакторов на быстрых нейтронах. – М.: Атомиздат, 1981. – 232 с.

9. MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code. Version 5 / X-5 Monte Carlo Team. LA-UR-03-1987, LLC, 2008. Электронный ресурс: [https://mcnp.lanl.gov/pdf\\_files/la-ur-03-1987.pdf](https://mcnp.lanl.gov/pdf_files/la-ur-03-1987.pdf) (дата доступа 19.09.2022).

10. *Дудников А.А.* Программа моделирования изотопной кинетики в многокомпонентных структурах ядерной энергетики «ISTAR». / Свидетельство о государственной регистрации ПрЭВМ, рег. № 2020619218 от 13.08.2020. Электронный ресурс: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43889370> (дата доступа 19.09.2022).

11. *Алексеевский Л.Д.* Поиск возможной структуры стационарной системы будущей ядерной энергетики с замкнутым ядерным топливным циклом на основе исследования нуклидных балансов. // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов. – 2008. – Вып. 2. – С. 21-26.

12. *Blandinskiy V.Y., Dudnikov A.A.* Calculations of Spent Fuel Isotopic Composition for Fuel Rod from VVER-440 Fuel Assembly Benchmark Using Several Evaluated Nuclear Data Libraries. // Kerntechnik. – 2018. – Vol. 83. – No. 4. – PP. 325-330. DOI: <https://doi.org/10.3139/124.110917>.

13. *Кузенкова Д.С., Бландинский В.Ю.* Программа для расчета изотопной кинетики в системах с циркулирующим топливом на базе ПС ISTAR. / Свидетельство о государственной регистрации ПрЭВМ, рег. № 2022614236 от 17.03.2022. Электронный ресурс: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48139601> (дата доступа 19.09.2022).

Поступила в редакцию 22.09.2022 г.

#### Авторы

*Кузенкова Дарья Сергеевна*, аспирант, младший научный сотрудник

E-mail: [Kuzenkova\\_DS@nrcki.ru](mailto:Kuzenkova_DS@nrcki.ru)

*Бландинский Виктор Юрьевич*, ученый секретарь, канд. техн. наук

E-mail: [Blandinskiy\\_VY@nrcki.ru](mailto:Blandinskiy_VY@nrcki.ru)

UDC 621.039.5

## MODELING ISOTOPE KINETICS IN A CIRCULATING FUEL SYSTEM: A CASE STUDY OF THE MBIR REACTOR LOOP

*Kuzenkova D.S., Blandinskiy V.Yu.*

National Research Center «Kurchatov Institute»

1 Academician Kurchatov Sq., 123182 Moscow, Russia

#### ABSTRACT

The paper presents the results of modeling changes in the isotopic composition of the liquid-salt fuel circulating in the experimental channel of the MBIR reactor facility. The authors tested the ISTAR software environment adapted for solving burnup equations in problems with variable power levels. The loop channel parameters, including

two heat exchanger options, were estimated to obtain the appropriate salt transit time through the loop channel zones.

Two problems of modeling a circulating fuel system (loop) are considered, namely: (1) modeling the equilibrium salt isotope composition in such a system; and (2) developing a technique for modeling nonstationary isotope kinetics in the MBIR reactor loop.

Non-stationary isotope kinetics can be modeled as sequential burnup of nuclides in the neutron field and decay during movement in the external circuit.

The authors also developed an algorithm for modeling changes in the isotopic composition of fuel salt during its circulation, taking into account the sequential transfer of a given salt volume from the burnup zone to the zone outside the reactor core. Based on this algorithm, a software package was created using the Python 3.9 programming language and ISTAR modules. In addition, a description of the calculation methodology was given and some calculation results obtained using the software were presented.

In the process of working with the program, it was found that, for the given times of the fuel being in each of the zones (2 and 200 seconds, respectively), modeling the change in the isotopic composition during the fuel campaign (500 days) will require the calculation of more than 500 thousand steps. In order to save time, it is necessary to find out whether it will be possible to reduce the number of calls to the neutronic calculation program due to a slight change in the isotopic composition of the fuel in the loop per one burnup step. Work is currently underway to optimize this process.

**Key words:** MBIR, molten-salt reactors, molten-salt loop, ISTAR software, modeling, neutronic characteristics.

Kuzenkova D.S., Blandinskiy V.Yu. Modeling Isotope Kinetics in a Circulating Fuel System: a Case Study of the MBIR Reactor Loop. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2022, no. 4, pp. 58-66; DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2022.4.05> .

#### REFERENCES

1. Blinkin V.L., Novikov V.M. *Molten Salt Nuclear Reactors*. Moscow. Atomizdat Publ., 1978, 112 p. (in Russian).
2. Novikov V.M., Slesarev I.S., Alekseev P.N., Ignatiev V.V., Subbotin S.A. *Nuclear Reactors of Increased Safety (Analysis of Conceptual Designs)*. Moscow. Energoatomizdat Publ., 1993, 348 p. (in Russian).
3. Ignatiev V.V., Kormilitsyn M.V., Kormilitsyna L.A., Semchenkov Y.M., Fedorov Y.S., Feinberg O.S., Kryukov O.V., Khaperskaya A.V. Molten-Salt Reactor for Nuclear Fuel Cycle Closure on All Actinides. *Atomic Energy*. 2019, v. 125, pp. 279-283; DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-019-00481-w> .
4. Dragunov Yu.G., Tretiyakov I.T., Lopatkin A.V., Romanova N.V., Lukasevich I.B. MBIR Multipurpose Fast Reactor – Innovative Tool for the Development of Nuclear Power Technologies. *Atomic Energy*. 2012, v. 113, no. 1, pp. 24-28; DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-012-9590-x> .
5. Blandinskiy V.Y., Kuzenkova D.S. Computational Validation of Experiments with Molten-Salt Thorium-Uranium Fuel Compositions in MBIR Test Loop. *Atomic Energy*. 2020, v. 128, no. 5, pp. 271-276; DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-020-00687-3> .
6. Capelli E. Thermodynamic investigation of the LiF-ThF<sub>4</sub> system. *The Journal of Chemical Thermodynamics*. 2013, v. 58, pp. 110-116; DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jct.2012.10.013> .
7. Benesh O., Konings R.J.M. Thermodynamic Properties and Phase Diagrams of Fluoride Salts for Nuclear Applications. *Journal of Fluorine Chemistry*. 2009, v. 130, no. 1, pp. 22-29; DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfluchem.2008.07.014> .
8. Usynin G.B., Karabasov A.S., Chirkov V.A. *Optimization Models of Fast Reactors*.

Moscow. Atomizdat Publ., 1981. 232 p. (in Russian).

9. MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code. Version 5 / X-5 Monte Carlo Team. LA-UR-03-1987, LLC, 2008. Available at: [https://mcnp.lanl.gov/pdf\\_files/la-ur-03-1987.pdf](https://mcnp.lanl.gov/pdf_files/la-ur-03-1987.pdf) (accessed Sep. 19, 2022).

10. Dudnikov A.A. *Program for Modeling Isotope Kinetics in Multicomponent Structure of Nuclear Industry «ISTAR»*. Patent RF, No. 2020619218, 2020. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43889370> (accessed Sep. 19, 2022) (in Russian).

11. Alekseevsky L.D. Search for a possible structure of a stationary system for future nuclear power engineering with a closed nuclear fuel cycle based on the study of nuclide balances. *VANT. Ser. Fizika Yadernykh Reaktorov*. 2008, iss. 2, pp.21-26 (in Russian).

12. Blandinskiy V.Yu., Dudnikov A.A. Calculations of Spent Fuel Isotopic Composition for Fuel Rod from VVER-440 Fuel Assembly Benchmark Using Several Evaluated Nuclear Data Libraries. *Kerntechnik*. 2018, v. 83, no. 4, pp. 325-330; DOI: <https://doi.org/10.3139/124.110917>.

13. Kuzenkova D.S., Blandinskiy V.Yu. *Program for Calculating Isotope Kinetics in Circulating Fuel Systems Based on the ISTAR PS*. Patent RF, No. 2022614236, 2022. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48139601> (accessed Sep. 19, 2022) (in Russian).

#### Authors

Kuzenkova Dariya Sergeevna, PhD Student

E-mail: [Kuzenkova\\_DS@nrcki.ru](mailto:Kuzenkova_DS@nrcki.ru)

Blandinskiy VictorYurievich, Scientific Secretary, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: [Blandinskiy\\_VY@nrcki.ru](mailto:Blandinskiy_VY@nrcki.ru)