

# ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАПАСА РЕАКТИВНОСТИ В ИННОВАЦИОННЫХ РЕАКТОРАХ НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ В ЗЯТЦ

**Н.П. Головин\*, А.В. Егоров\*\*, Е.А. Родина\*\*, Ю.С. Хомяков\*\***

*\* Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
115409, Москва, Каширское шоссе, 31*

*\*\* АО «Прорыв»  
107140, Москва, ул. М. Красносельская, 2/8*



В рамках проектного направления «Прорыв» в Российской Федерации разрабатывается комплекс технологий замыкания топливного цикла с использованием смешанного (U-Pu-MA) нитридного топлива. Одна из ключевых задач новой технологии – обеспечение такого состава топлива и таких характеристик активных зон с новым топливом, при которых реактор имеет минимальный запас реактивности в процессе кампании. Это должно привести к снижению или исключению риска реактивностных аварий с тяжелыми последствиями.

В новой технологии при достижении коэффициента воспроизводства в активной зоне (КВА), близкого к единице, возможна реализация равновесного режима, характеризующегося стабильностью как реактивности, так и изотопного состава топлива. Однако реакторная установка длительного времени (более 10-ти лет) должна работать в переходном режиме, который требует специальных мер по управлению выбегом реактивности по кампании.

Представлены результаты расчетных исследований, показывающие, что использование в топливе стартовых загрузок быстрых реакторов минорных актинидов из отработавшего ядерного топлива тепловых реакторов позволяет улучшить кривую изменения реактивности РУ, приводя к снижению запаса реактивности на выгорание. В работе представлены результаты моделирования полного жизненного цикла быстрого реактора мощностью 1200 МВт, перехода топливной композиции к равновесному составу и изменения нуклидного и изотопного составов ОЯТ в этом процессе.

**Ключевые слова:** быстрые реакторы, нитридное топливо, замкнутый ядерный топливный цикл, запас реактивности, равновесный цикл.

## ВВЕДЕНИЕ

Замыкание ядерного топливного цикла в настоящее время рассматривается как способ решения насущных проблем существующей ядерной энергетики и путь к крупномасштабной ядерной энергетике на базе реакторов на быстрых нейтронах (РБН). Замкнутый ядерный топливный цикл (ЗЯТЦ) позволяет принципиально решить

© Н.П. Головин, А.В. Егоров, Е.А. Родина, Ю.С. Хомяков, 2020

проблему отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) и снизить радиозэкологическую опасность радиоактивных отходов (РАО) до приемлемого уровня радиационной эквивалентности [1, 2]. Ключевую системообразующую роль в ЗЯТЦ играют реакторы на быстрых нейтронах, работающие на плутонии, выделяемом из ОЯТ, с последующим многократным рециклированием, и позволяющие выжигать долгоживущие РАО, так называемые, минорные актиниды. Комплекс технологий РБН и ЗЯТЦ активно разрабатывается в России в рамках проектного направления «Прорыв» [3 – 5].

Помимо проблем, связанных с ОЯТ и РАО, РБН должны продемонстрировать и новый, ранее недостижимый, уровень безопасности, детерминистически исключая потенциальную возможность тяжелых аварий, подобных Чернобыльской. В частности, В.В. Орловым предложено снизить запас реактивности РБН до величины не более  $\beta_{эфф}$ , что позволяет исключить реактивностные аварии на мгновенных нейтронах [6]. Это достигается за счет обеспечения высокого воспроизводства топлива в активной зоне КВА не менее единицы.

Теоретически такая возможность, безусловно, существует при использовании в активной зоне плотного топлива. В рамках проекта «Прорыв» для этого используется смешанное нитридное топливо (СНУП-топливо). Ключевой практической проблемой реализации данной идеи является необходимость обеспечения высокой точности запаса реактивности и учета неопределенностей в прогнозируемом составе топлива и активной зоны. Эти неопределенности связаны как с неоднозначностью изотопного состава исходного плутония, так и еще в большей степени с постоянным изменением состава топлива в процессе многократного рециклирования, зависящего от условий облучения, длительности и схемы реализации топливного цикла, выгорания топлива, учета выжигания МА, а также с технологическими неопределенностями при изготовлении топлива. Характеристики топлива и активной зоны, а следовательно, и запас реактивности РБН изменяются в течение длительного времени, что требует их прогноза на большую глубину (не менее 30-ти лет).

### **МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА АКТИВНОЙ ЗОНЫ РУ**

Для исследования описанных выше проблем разрабатывается специальная методика автоматизированного моделирования полного жизненного цикла активной зоны РБН, работающего в условиях ЗЯТЦ с многократным рециклом топлива. Основные положения этой методики заключаются в следующем.

Считается, что запуск быстрого реактора происходит в рамках двухкомпонентной ядерной энергетике и для формирования стартовой загрузки РБН плутония, выделенного из ОЯТ тепловых реакторов ВВЭР. Плутоний такого же состава используется и для двух первых перегрузок топлива, а начиная с третьей перегрузки топлива РБН переходит на использование собственного регенерированного топлива. Поскольку тепловыделяющие сборки (ТВС) с первоначально одинаковым составом топлива облучаются в несколько различающихся условиях по нейтронному потоку и энерговыделению, то и состав выгружаемого, а затем рециклируемого топлива также может различаться. Поэтому необходима организация моделирования каждой персональной ТВС.

Для формирования критических загрузок разработан специализированный алгоритм подбора массовой доли плутония двух или трех компонентов топлива с обеспечением критичности на начало микрокампании. В наиболее простом варианте происходит итерационное определение массовой доли плутония в СНУП-топливе. В более сложных вариантах возможно моделирование смешения более сложных композиций, например, неразделенных смесей урана и плутония после переработки

с природным или обедненным ураном.

В течение микрокампании управление критичностью осуществляется изменением положения РУ СУЗ. При выгонке реактора в критическое состояние учитывается возможность учета методической погрешности расчетного кода, а также требуемый уровень точности итераций.

Состав активной зоны формируется из регенерируемых ТВС автоматически на основании заданной пользователем схемы частично-равномерной перегрузки топлива и расчетного состава топлива, выгруженного двумя перегрузками ранее с учетом изменения в течение хранения и переработки.

Собственно нейтронно-физический расчет ведется на базе многогруппового диффузионного уравнения переноса с заранее определенной методической поправкой на критичность. Применение диффузионного приближения дает достоверные результаты изменения реактивности при выгорании топлива при разумной скорости расчетов, позволяющих обеспечить моделирование 30-ти – 60-ти лет эксплуатации РБН в ЗЯТЦ.

Реализация указанного подхода осуществляется в рамках программного комплекса РТМ-2 [7], современная опытная версия которого использовалась и в данной работе.

### **АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ АЛГОРИТМОВ ФОРМИРОВАНИЯ КРИТИЧЕСКИХ ЗАГРУЗОК НА ЗАПАС РЕАКТИВНОСТИ**

Различия в изотопном составе плутония требуют корректировки его массовой доли для обеспечения критичности загрузки активной зоны. Ввиду заметных погрешностей расчета критичности  $\sim 0.4 - 0.5\% \Delta k/k$  (более  $\beta_{эфф}$ ) для нахождения массовой доли целесообразно опираться не на расчетную, а экспериментальную величину, определенную на данной стадии эксплуатации. Однако целесообразность изменения массовой доли каждую микрокампанию вызывает сомнения по технологическим причинам. И как показали расчеты, попытка «продлонгации» измеренного запаса реактивности на несколько микрокампаний вперед может приводить к потере стабильности методики корректировки (рис. 1), колебаниям как запаса реактивности, так и массовой доли. Эту проблему можно решить за счет использования расчетной усредненной величины массовой доли на прогнозируемое число микрокампаний. В целом может быть рекомендована корректировка не по микрокампаниям, а по каждому рециклу топлива, что технологически наиболее приемлемо.

### **ИЗМЕНЕНИЯ РЕАКТИВНОСТИ В РЕАКТОРАХ С НАТРИЕВЫМ И СВИНЦОВЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯМИ**

Первые же расчеты показали, что запас реактивности достаточно долго изменяется в связи с модификацией состава топлива при рециклировании до стабилизации на так называемом «равновесном уровне». Можно отметить, что физика КВА и запаса реактивности более благоприятна в реакторах со свинцовым теплоносителем, в которых можно наблюдать даже рост реактивности при выгорании топлива, в то время как в РУ БН изменение реактивности носит более традиционный спадающий характер. Технически при высоком КВА и росте реактивности управлять запасом реактивности проще, так как для снижения этого роста могут быть использованы такие меры, как снижение объемной доли топлива, использование поглотителей. Влияние погрешности для РУ БН компенсировать сложнее, поскольку оно требует увеличения средней плотности топлива по активной зоне, а такие возможности уже практически исчерпаны. Результаты сравнительного расчетного анализа изменения реактивности при выгорании топлива для длительности жизненного цикла, равного 60-ти годам, представлены на рис. 2.

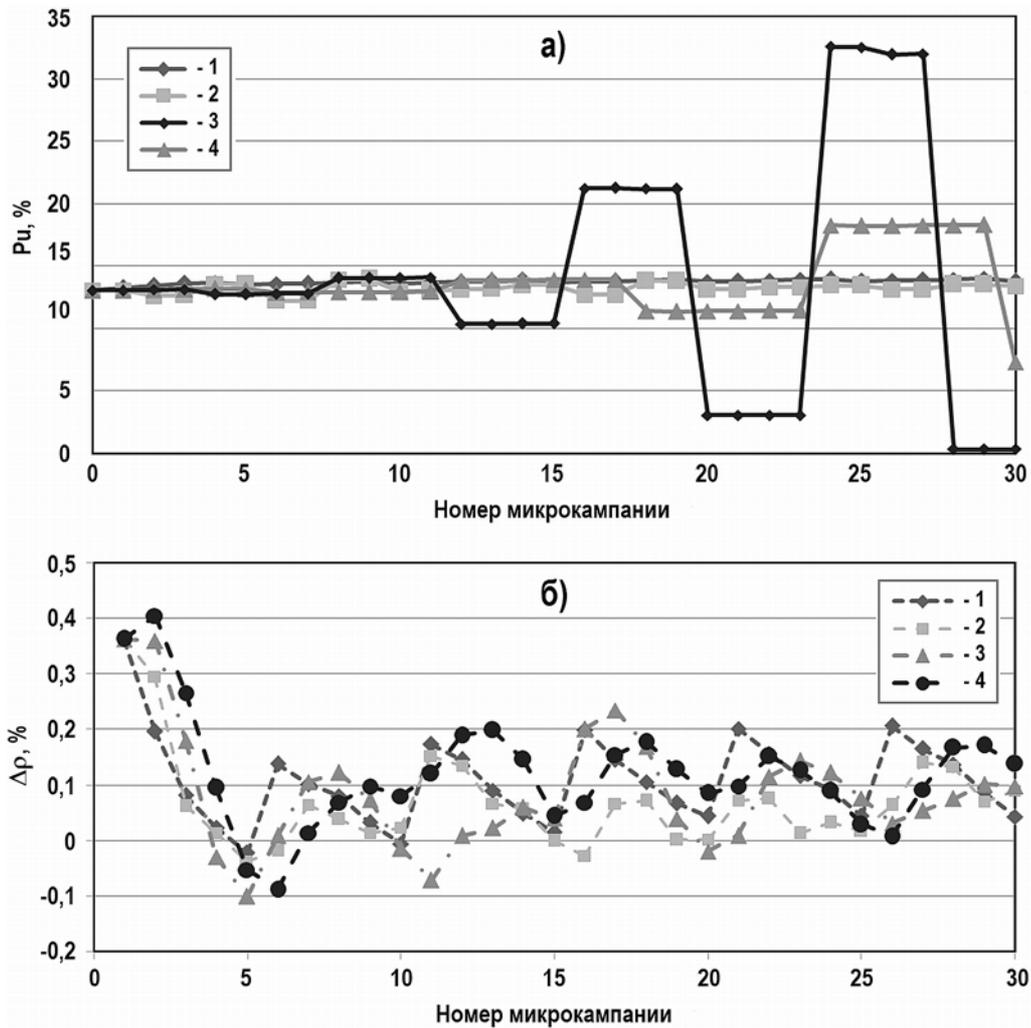


Рис. 1. Изменение запаса реактивности при использовании различных алгоритмов формирования критических загрузок: а) – базовый состав топлива (1 – подбор  $R_{и}$  для каждой микрокампании, 2 – подбор  $R_{и}$  через микрокампанию, 3 – подбор  $R_{и}$  через три микрокампании, 4 – подбор  $R_{и}$  через пять микрокампаний); б) – изменение реактивности для базового состава топлива (1 – первая микрокампания, 2 – вторая микрокампания, 3 – третья микрокампания, 4 – пятая микрокампания)

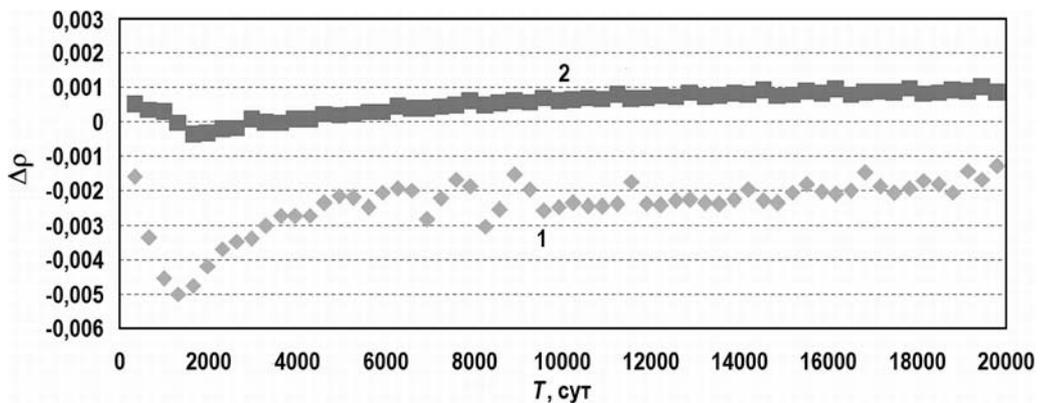


Рис. 2. Изменение реактивности при выгорании топлива в активной зоне: 1 – активная зона с натриевым теплоносителем; 2 – активная зона со свинцовым теплоносителем

### АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ СОСТАВА ТОПЛИВА СТАРТОВОЙ ЗАГРУЗКИ НА ЗАПАС РЕАКТИВНОСТИ

Включение в состав топливной композиции не только Pu, но и минорных актиноидов (Am и Np), позволяет улучшить кривую изменения реактивности РУ, выхаживая ее и приводя к снижению запаса реактивности на выгорание (рис. 3). По-видимому, МА играют роль некоего дополнительного «выгорающего поглотителя», а их доля может быть добавочным параметром для оптимизации запаса реактивности.

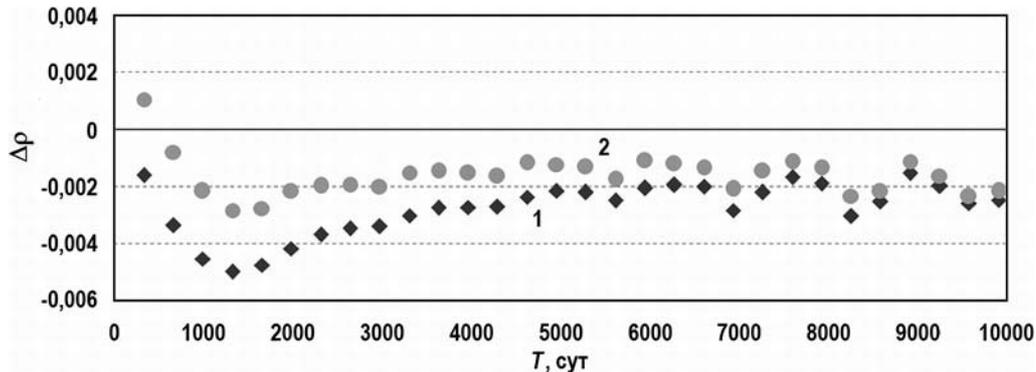


Рис.3. Изменение реактивности при выгорании топлива при использовании Pu с добавлением минорных актиноидов в стартовую загрузку: 1 – активная зона с Pu-загрузкой; 2 – активная зона с Pu+Ma-загрузкой

Начальная концентрация МА в топливе РБН определялась соотношением МА и Pu в ОЯТ ВВЭР, так чтобы все трансурановые элементы были вовлечены в топливный цикл. Доля МА может быть использована и для регулирования запаса реактивности при использовании плутония различного изотопного состава.

### ВЫВОДЫ

Одна из ключевых задач технологии ЗЯТЦ – обеспечение такого состава топлива и таких характеристик активных зон со смешанным уран-плутониевым топливом, при которых реактор имеет минимальный запас реактивности в процессе кампании.

В работе приведены основные положения автоматизированного моделирования полного жизненного цикла активной зоны РБН, работающего в условиях ЗЯТЦ с многократным рециклом топлива. Для формирования критических загрузок разработан специализированный алгоритм подбора массовой доли плутония с обеспечением критичности на начало микрокампании.

Представлены результаты моделирования полного жизненного цикла быстрых реакторов со свинцовым и натриевым теплоносителями в замкнутом ядерном топливном цикле и решения некоторых практических задач по реализации концепции малого запаса реактивности для исключения реактивных аварий на мгновенных нейтронах. Показано, что использование МА благоприятно сказывается на величине максимального запаса реактивности, а массовая доля МА может быть параметром, позволяющим оптимизировать переходной режим в равновесный режим ЗЯТЦ.

### Литература

1. Адамов Е.О., Ганев И.Х., Лопаткин А.В. и др. Степень приближения к радиационной эквивалентности высокоактивных отходов и природного урана в топливном цикле ядерной энергетики России. // Атомная энергия. – 1996. – Т. 81. – № 6. С. 403-409.
2. Лопаткин А.В., Величкин В.И., Никителов Б.В. и др. Радиационная эквивалентность и природоподобие при обращении с радиоактивными отходами. // Атомная энергия. – 2002. – Т. 92. – Вып. 4. – С. 308-317.

3. *Rachkov V.I., Adamov E.O., Lopatkin A.V., Pershukov V.A., Troyanov V.M.* Fast Reactor Development Programm in the Russian Federation (FR 13). // International Atomic Energy Agency, Fast Reactors and related Fuel Cycles: Safe Technologies and Sustainable Scenarios. – Paris, France. – March 4, 2013. – PP. 93-102.

4. *Адамов Е.О., Орлов В.В., Рачков В.И. и др.* Ядерная энергетика с естественной безопасностью: смена устаревшей парадигмы, критерии. // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2015. – № 1. – С. 13-29.

5. *Адамов Е.О., Забудько Л.М., Матвеев В.И. и др.* Сравнительный анализ преимуществ и недостатков использования металлического и нитридного смешанного уран-плутониевого топлива в быстрых реакторах. // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2015. – № 2. С. 3-15.

6. *Орлов В.В., Адамов Е.О., Велихов Е.П., Слесарев И.С., Солонин М.И., Хромов В.В.* Нетрадиционные концепции АЭС с естественной безопасностью. // Атомная энергия. – 1992. – Т. 72. – Вып. 4. – С. 3-17.

7. *Egorov A.V., Khomyakov Yu.S., Rachkov V.I., Rodina E.A., Suslov I.R.* Minor Actinides Transmutation in Equilibrium Cores of Next Generation FRs. // Nuclear Energy and Technology. – 2019. – Vol. 5 (4). – PP. 353-359; DOI: <https://doi.org/10.3897/nucet.5.46517>.

Поступила в редакцию 20.04.2020 г.

Рекомендована к публикации оргкомитетом  
XV Международной молодежной научно-практической конференции  
«Будущее атомной энергетики – AtomFuture 2019»

#### Авторы

Головин Никита Павлович, студент  
E-mail: [stalker95s@mail.ru](mailto:stalker95s@mail.ru)

Егоров Александр Владимирович, зам. начальника отдела  
E-mail: [eav@proryv2020.ru](mailto:eav@proryv2020.ru)

Родина Елена Александровна, ведущий научный сотрудник, канд. техн. наук  
E-mail: [rea@proryv2020.ru](mailto:rea@proryv2020.ru)

Хомяков Юрий Сергеевич, начальник отдела, д-р физ.-мат. наук  
E-mail: [hus@proryv2020.ru](mailto:hus@proryv2020.ru)

UDC 621.039.51

### STUDIES ON EXCESS REACTIVITY IN THE LARGE SIZE INNOVATIVE FAST REACTORS IN A CLOSED NFC

Golovin N.P.\*, Egorov A.V.\*\*, Rodina E.A.\*\*, Khomyakov Yu.S.\*\*

\* National Research Nuclear University MPhI  
31 Kashirskoe Hwy, 115409 Moscow, Russia

\*\* JSC «Proryv»

2/8 M. Krasnosel'skaya Str., 107140 Moscow, Russia

#### ABSTRACT

Closure of the nuclear fuel cycle is now seen as an approach to solving the pressing problems of the existing nuclear power industry and as a way to develop large-scale nuclear power based on fast reactors (FR). Closed nuclear fuel cycle (CNFC) makes it possible to ultimately solve the problem of spent nuclear fuel (SNF) and reduce radwaste

related radioecological hazard down to an acceptable level of radiological equivalence [1, 2]. Fast reactors using plutonium recovered from spent nuclear fuel with its repeated reprocessing are a key, systemically important component of CNFCs, in which long-lived radioactive waste, the so-called minor actinides (MA), can be successfully incinerated. The suite of FR and CNFC technologies is being intensively developed in Russia within the framework of the «Proryv» project stream [3 – 5].

Apart from solving problems related to SNF and radwaste, FRs should demonstrate the new level of safety that has not been reached before. In this safety-grade reactor plants, the possibility of a Chernobyl-type severe accident would be deterministically eliminated. In particular, V.V. Orlov suggested that excess reactivity value in FRs should not exceed  $\beta_{\text{eff}}$ , thus eliminating prompt neutron reactivity accidents [6]. This is achieved by ensuring a high breeding ratio of the core (equal to at least 1).

Certainly, such a possibility theoretically exists if high density fuel is used in the reactor core. In this view mixed nitride uranium-plutonium (MNUP) fuel is in demand within the framework of the «Proryv» project.

Provided that the core breeding ratio is close to 1, the new technology makes it possible to implement equilibrium mode characterized by the stability of both reactivity and isotopic composition of the fuel. However, the reactors should be operated in a transient mode for a long period (more than 10 years), and this operation requires special measures to control the reactivity scram during the core lifetime.

The article presents the main directions of automated modeling of the entire life cycle of the FR core operating in a CNFC with repeated fuel recycling. A designated algorithm of plutonium mass fraction selection assuring reactor criticality in the beginning of the core run was worked out for making critical loadings.

The authors present the results of modeling the entire life cycle of fast reactors with lead and sodium coolants in a closed fuel cycle, as well as the results of solving some practical problems to implement the concept of low excess reactivity in order to eliminate of prompt neutron reactivity accidents. It was demonstrated that the introduction of MAs had beneficial effect on the maximum value of excess reactivity, and the mass fraction of MAs might be the parameter that makes it possible to transform transient mode into CNFC equilibrium mode.

**Key words:** fast reactors, nitride fuel, closed nuclear fuel cycle, excess reactivity, equilibrium cycle.

#### REFERENCES

1. Adamov E.O., Ganey I.Kh., Lopatkin A.V. et al. Degree of Approximation to Radiological Equivalence of High Radwaste and Natural Uranium in the Fuel Cycle of Nuclear Power in Russia. *Atomnaya Energiya*. 1966, v. 81, iss. 6, pp. 403-409 (in Russian).
2. Lopatkin A.V., Velichkin V.I., Nikipelov B.V. et al. Radiological Equivalence and Nature Alikehood in the Course of Radwaste Handling. *Atomnaya Energiya*. 2002, v. 92, iss. 4, pp. 308-317 (in Russian).
3. Rachkov V.I., Adamov E.O., Lopatkin A.V., Pershukov V.A., Troyanov V.M. Fast Reactor Development Programme in the Russian Federation, (FR 13). *International Atomic Energy Agency, Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Safe Technologies and Sustainable Scenarios*. March 4, 2013, Paris, France, pp. 93-102.
4. Adamov E.O., Orlov V.V., Rachkov V.I. et al. Nuclear Power with Inherent Safety: Old-Fashioned Paradigm Shift and Criteria. *Izvestiya Rossiyskoy Akademii Nauk. Energetika*. 2015, no. 1, pp. 13-29 (in Russian).
5. Adamov E.O., Zaboudko L.M., Matveev V.I. et al. Comparative Analysis of Advantages and Drawbacks of Using Metal Fuel and Mixed Nitride Uranium-Plutonium Fuel in Fast Reactors. *Izvestiya Rossiyskoy Akademii Nauk. Energetika*. 2015, no. 2, pp. 3-15 (in Russian).

6. Orlov V.V., Adamov E.O., Velikhov E.P., Slesarev I.S., Solonin M.I., Khromov V.V. Unconventional Concepts of NPP with Inherent Safety. *Atomnaya Energiya*. 1992, v. 72, no. 4, pp. 3-17 (in Russian).

7. Egorov A.V., Khomyakov Yu.S., Rachkov V.I., Rodina Ye.A., Suslov I.R. Minor Actinides Transmutation in Equilibrium Cores of Next Generation FRs. *Nuclear Energy and Technology*. 2019, v. 5 (4), pp. 353-359; DOI: <https://doi.org/10.3897/nucet.5.46517>.

#### Authors

Golovin Nikita Pavlovich, Student

E-mail: [stalker95s@mail.ru](mailto:stalker95s@mail.ru)

Egorov Aleksandr Vladimirovich, Deputy Head of Department

E-mail: [eav@proruv2020.ru](mailto:eav@proruv2020.ru)

Rodina Elena Aleksandrovna, Leading Scientist, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: [rea@proryv2020.ru](mailto:rea@proryv2020.ru)

Khomyakov Yury Sergeevich, Head of Department, Dr. Sci. (Phys.-Math.)

E-mail: [hus@proryv2020.ru](mailto:hus@proryv2020.ru)