

О СУЩЕСТВЕННОМ ЗАМЕДЛЕНИИ КИНЕТИКИ БЫСТРЫХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЯДЕРНОМ РЕАКТОРЕ НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ

Г.Г. Куликов*, А.Н. Шмелев, В.А. Апсэ**, Е.Г. Куликов****

* Госкорпорация «Росатом»

119017, г. Москва, ул. Большая Ордынка, 24

** НИЯУ МИФИ

115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31



Кинетика ядерных реакторов определяется средним временем жизни нейтронов. В случае, когда в реактор вводится реактивность больше эффективной доли запаздывающих нейтронов, кинетика становится быстро протекающей. Для быстрых реакторов замедлить кинетику можно путем увеличения времени жизни нейтронов. Рассмотрена возможность использования свинца-208 в качестве отражателя, характеризующегося уникальными нейтронно-физическими свойствами. Для анализа возникающих эффектов в быстром реакторе выбрана точечная модель кинетики, в которой учитываются нейтроны, возвращающиеся из отражателя в активную зону реактора.

Благодаря большому атомному весу и малому поглощению нейтронов свинцом-208 нейтроны из активной зоны могут глубоко проникать в отражатель, замедляться в нем и (имея заметную вероятность вернуться в активную зону) влиять на цепную реакцию деления. Замедленные нейтроны отражателя будут иметь большую временную задержку – «мертвое» время, представляющее собой сумму времени диффузии от активной зоны к отражателю и обратно, в течение которого они не влияют на развитие цепной реакции деления. По времени задержки нейтроны, возвращающиеся из глубоких слоев отражателя свинца-208, близки к запаздывающим нейтронам. Причем количество таких нейтронов значительно превышает количество запаздывающих нейтронов.

В результате среднее время жизни нейтронов, формирующееся из времени жизни мгновенных нейтронов и нейтронов отражателя, увеличится. Это приведет к более длительному периоду разгона реактора, что ослабит последствия мгновенной надкритичности. Таким образом, использование в качестве отражателя свинца-208 в значительной степени повышает ядерную безопасность быстрого реактора.

Ключевые слова: кинетика, быстрый реактор, отражатели из природного свинца и свинца-208, ВВЭР, CANDU, цепная реакция деления, переходный процесс, асимптотический режим разгона.

ВВЕДЕНИЕ

В [1 – 8] показано, что применение в быстром реакторе физически толстого отражателя толщиной около 4 м из свинца-208 вместо отражателя из природного

© Г.Г. Куликов, А.Н. Шмелев, В.А. Апсэ, Е.Г. Куликов, 2020

свинца толщиной 0.5 м позволяет радикально замедлить развитие цепной реакции деления (ЦРД). Это объясняется долгим возвращением и с большой вероятностью нейтронов в активную зону из отражателя, выполненного из свинца-208, благодаря его тяжелому атомному весу и малому поглощению нейтронов. В результате среднее время жизни нейтронов в таком реакторе примерно на три порядка больше, чем с отражателем из природного свинца. В случае несанкционированного ввода положительной реактивности это приводит к замедлению роста мощности такого быстрого реактора и к уменьшению количества выделившейся энергии при реактивной аварии, что должно улучшить его ядерную безопасность. В работах [9 – 12] рассмотрены физические особенности формирования и развития ЦРД в подобном быстром реакторе.

Проанализированы быстрые реакторы с обоими видами отражателя. Их основные характеристики приведены в табл. 1. Эффективная доля запаздывающих нейтронов принята равной 0.36%, т.е. такой же, как и для плутониевого топлива.

Таблица 1

Характеристики реакторов и их асимптотический период разгона ($T_{ас}$) при различной введенной реактивности

Реактор	Отражатель (толщина, материал)	Эффективная доля запаздывающих нейтронов β , %	Среднее время жизни нейтронов, мс	Реактивность, β	
				+0.5	+1.1
				$T_{ас}$, с	
БРЕСТ	0.5 м, Pb	0.36	0.0005	5.72	0.00128
ВВЭР	–	0.65	0.1	5.80	0.11
CANDU	–	0.65	1.0	6.50	0.61
БРЕСТ	4 м, Pb-208	0.36	0.5	7.61	1.15

Для сопоставления в тех же условиях рассматриваются наиболее распространенные энергетические реакторы на тепловых нейтронах – ВВЭР и CANDU. Для них эффективная доля запаздывающих нейтронов принята равной 0.65%, т.е. такая же, как и для уранового топлива. Среднее время жизни нейтронов в этих реакторах различается примерно на порядок: 0.1 и 1 мс соответственно. Отметим, что в отечественном реакторе на тепловых нейтронах типа РБМК время жизни сопоставимо с CANDU.

Расчет кинетики в переходном процессе и при асимптотическом разгоне тепловых реакторов осуществлялся в рамках точечной модели [13, 14] с учетом шести групп запаздывающих нейтронов, а у быстрого реактора – с помощью многоточечной кинетики. При этом одна точка приходилась на активную зону с запаздывающими нейтронами, а остальные точки – на каждый слой отражателя толщиной 0.5 м [1]. Параметры кинетики (доля и время возвращения нейтронов из отражателя по его слоям) оценивались с помощью одномерной 26-групповой программы для расчета быстрых реакторов TIME26 [15] в рамках сферической геометрии.

ОСОБЕННОСТИ РОСТА МОЩНОСТИ И ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ В ПЕРЕХОДНОМ ПРОЦЕССЕ РАЗГОНА РЕАКТОРА

На рисунках 1, 2 показано изменение мощности быстрого реактора, окруженного отражателем толщиной 0.5 м из природного свинца и толщиной 4 м из свинца-208, а также тепловых реакторов типа ВВЭР и CANDU в зависимости от времени после ввода положительных реактивностей 0.5 и 1.1 β соответственно.

Видно, что при реактивности 0.5 β в быстром реакторе с отражателем из природного свинца происходит практически мгновенный (примерно за 1 мс) двукратный скачок мощности. Он связан с улучшением условий размножения нейтронов и про-

исходит за счет размножения мгновенных нейтронов, время жизни которых мало (около 0.4 мкс).

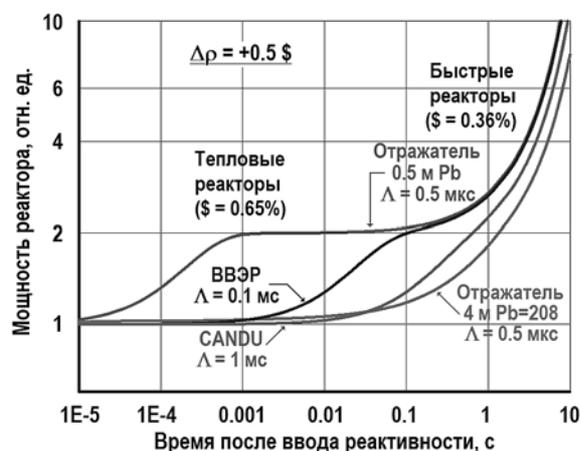


Рис. 1. Изменение мощности различных реакторов от времени после ввода реактивности +0.5 \$

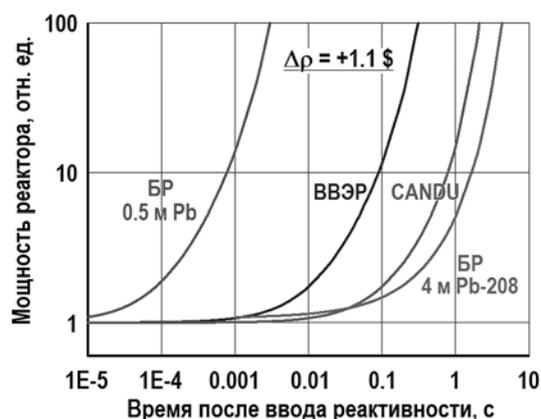


Рис. 2. Изменение мощности различных реакторов от времени после ввода реактивности +1.1 \$

Однако дальнейший рост мощности практически отсутствует до момента времени около 0.1 с. Это связано с тем, что на мгновенных нейтронах реактор остается подкритическим. Поэтому для его разгона требуются еще и запаздывающие нейтроны, вклад которых в ЦРД начинает проявляться после примерно 0.1 с, поскольку это соответствует времени жизни самой короткоживущей группы запаздывающих нейтронов. Дальнейший рост мощности происходит с одновременным участием в развивающейся ЦРД как мгновенных, так и запаздывающих нейтронов с асимптотическим периодом 5.72 с (см. табл. 1). Все это соответствует известной модели кинетики без обратных связей [13, 14].

В реакторе типа ВВЭР происходит аналогичное изменение мощности с той лишь разницей, что среднее время жизни мгновенных нейтронов примерно на два порядка больше, чем в быстром реакторе. Поэтому двукратный скачок мощности наблюдается после ввода реактивности (примерно через 0.1 с). Сразу после этого в ЦРД начинают вносить вклад запаздывающие нейтроны. В связи с этим участок плато в мощности слабо выражен.

В реакторе типа CANDU скачок мощности на мгновенных нейтронах происходит еще позже (спустя примерно 0.8 с), а плоский участок отсутствует, так как среднее

время жизни мгновенных нейтронов еще на порядок ближе ко времени жизни запаздывающих нейтронов.

В быстром реакторе с отражателем из свинца-208 скачок мощности полностью отсутствует, поскольку время жизни нейтронов, возвращающихся из отражателя в активную зону, соответствует широкому диапазону значений от времени жизни мгновенных нейтронов активной зоны (для нейтронов, которые возвращаются из первых слоев отражателя), до времени жизни запаздывающих нейтронов (для нейтронов, которые возвращаются из глубины отражателя), а доля нейтронов отражателя велика (около 35 %). Из таблицы 1 видно, что хотя от реактора к реактору асимптотический период разгона последовательно увеличивается, однако этот рост незначителен.

Картина резко меняется при вводе положительной реактивности +1.1 \$, превышающей эффективную долю запаздывающих нейтронов (рис. 2). Реакторы становятся надкритическими на мгновенных нейтронах, среднее время жизни которых существенно меньше, чем запаздывающих нейтронов, поэтому мощность нарастает значительно быстрее с явно более короткими асимптотическими периодами разгона (см. табл. 1), которые для различных реакторов радикально отличаются по величине. Так асимптотический период разгона у быстрого реактора с отражателем из природного свинца равен примерно 1 мс, а с отражателем из свинца-208 – почти на три порядка больше. Для тепловых реакторов асимптотические периоды разгона составляют промежуточные величины, причем в реакторе типа CANDU он в несколько раз больше, чем в реакторе типа ВВЭР, так как среднее время жизни мгновенных нейтронов в CANDU примерно на порядок больше, чем в ВВЭР (см. табл. 1).

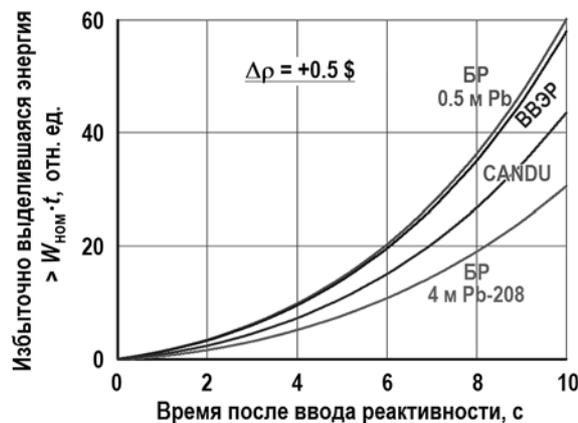


Рис. 3. Количество избыточной (не отведенной от топлива) энергии в различных реакторах от времени после ввода реактивности +0.5 \$

Однако, как известно, при реактивных авариях повреждения элементов активной зоны могут быть обусловлены не только скачком мощности, но и количеством энергии, выделившейся в этом элементе. На рисунках 3, 4 показано количество избыточной энергии, т.е. той энергии, которая не успевает отводиться при условии нормального теплосъема, в различных реакторах от времени после ввода положительной реактивности 0.5 и 1.1 \$ соответственно. Предполагается, что избыточной является энергия, которая выделяется при превышении мощности реактора над его номинальной величиной. Избыточная энергия измеряется в относительных единицах как произведение номинальной мощности на время. Например, избыточная мощность, равная 10-ти относительным единицам, означает, что в топливе выделилась и не была отведена в теплоноситель энергия, которая об-

разуется при работе реактора на 10-кратной номинальной мощности в течение 1 с или пятикратной номинальной мощности в течение 2 с и т.п.

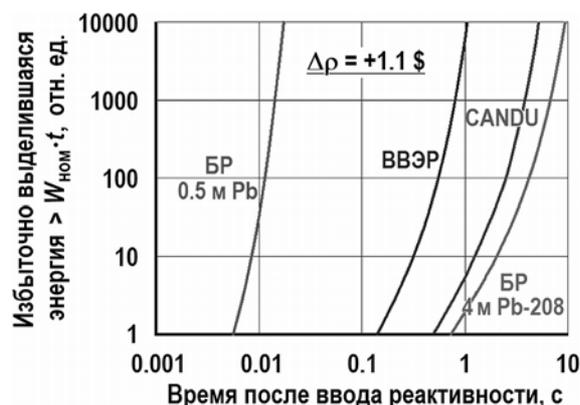


Рис. 4. Количество избыточной (не отведенной от топлива) энергии в различных реакторах от времени после ввода реактивности $+1.1\%$

Из рисунка 3 видно, что при введенной положительной реактивности 0.5% количество энергии, не отведенной от топлива в быстром реакторе с отражателем из свинца-208, примерно в два раза меньше, чем с отражателем из природного свинца в любой момент времени после ввода реактивности. В этом смысле реактор типа ВВЭР близок к быстрому реактору с отражателем из природного свинца, а CANDU занимает промежуточное положение между быстрым реактором с разными отражателями. Очевидно, что причиной тому служат соответствующие асимптотические периоды разгона реакторов (см. табл. 1). Таким образом, скорость образования избыточной энергии не слишком сильно отличается в разных реакторах, так как процесс разгона в них происходит, главным образом, на запаздывающих нейтронах, время жизни которых слабо зависит от вида топлива.

Однако скорость образования избыточной энергии резко различается в реакторах при вводе положительной реактивности, превышающей эффективную долю запаздывающих нейтронов. Как видно из рис. 4, одна и та же величина (например, 100 отн. ед.) избыточной энергии в разных реакторах (быстрый реактор с отражателем из природного свинца, ВВЭР, CANDU, быстрый реактор с отражателем из свинца-208) достигается за существенно разные времена (0.0114, 0.55, 2.5 и 4.2 с соответственно). Это связано с существенно разными асимптотическими периодами разгона реакторов (см. табл. 1). Асимптотические периоды определяются отсутствием долгоживущих нейтронов в отражателе из природного свинца в быстром реакторе, наличием сравнительно более долгоживущих мгновенных нейтронов в ВВЭР, наличием еще более долгоживущих мгновенных нейтронов в CANDU и, наконец, наличием наиболее долгоживущих нейтронов в отражателе из свинца-208 в быстром реакторе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что благодаря долгому возвращению нейтронов из физически толстого отражателя, выполненного из свинца-208, в активную зону быстрого реактора его кинетика замедляется радикальным образом. Это приводит к существенному замедлению роста мощности при вводе положительной реактивности по сравнению с тем же реактором, но с отражателем из природного свинца и даже по сравнению с тепловыми реакторами типа ВВЭР и CANDU, которые характеризуются традиционно более медленной кинетикой по сравнению с быстрыми реакторами. В результате

значительно замедляется генерация не отведенной энергии от топлива к теплоносителю. Все это означает, что подобный реактор более безопасен по отношению к ядерным авариям.

Ричард Фейнман назвал быструю сборку «дремлющим драконом», имея в виду катастрофически быстрое развитие ЦРД даже при приближении величины введенной реактивности к эффективной доли запаздывающих нейтронов. Использование физически толстого отражателя из свинца-208 позволяет отвести этот «дамоклов меч» от быстрых реакторов не только при приближении, но даже и при превышении реактивности величины эффективной доли запаздывающих нейтронов.

Благодарность

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования РФ в рамках проекта № 13.9748.2017/8.9.

Литература

1. *Shmelev A.N., Kulikov G.G., Apse V.A., Kulikov E.G., Artsyuk V.V.* Radiogenic Lead with Dominant Content of ^{208}Pb : New Coolant and Neutron Moderator for Innovative Nuclear Facilities. // Internet journal of Hindawi Publishing Corporation: Science and Technology of Nuclear Installations. – 2011. – Article ID 252903. – 12 p. Электронный ресурс: <http://www.hindawi.com/journals/stni/2011/252903/> (дата доступа 20.12. 2020). DOI: 10.1155/2011/252903.
2. *Shmelev A.N., Kulikov G.G., Kryuchkov E.F., Apse V.A., Kulikov E.G.* Application of Radiogenic Lead with Dominant Content of ^{208}Pb for Long Prompt Neutron Lifetime in Fast Reactor. // Nuclear Technology. – 2013. – Vol. 183. – No. 3. – PP. 409-426.
3. *Kulikov G.G., Shmelev A.N., Apse V.A., Ternovykh M.Yu., Kulikov E.G.* Favorable features in kinetics of fast reactors with physically thick reflector containing ^{208}Pb . / Proc. of the International Conference PHYSOR-2014: The Role of Reactor Physics Toward a Sustainable Future. – Kyoto, Japan, 2014.
4. *Куликов Г.Г., Шмелев А.Н., Куликов Е.Г., Ансэ В.А., Чубко Н.В.* Роль нейтронов отражателя быстрого реактора в повышении сопротивляемости цепной реакции деления быстрому разгону. // Атомная энергия. – 2017. – Т. 123. – Вып. 6. – С. 351-352.
5. *Kulikov E.G.* Radiogenic lead as coolant, reflector and moderator in advanced fast reactors. // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – Vol. 781. – No. 1. – Article 012002. DOI: 10.1088/1742-6596/781/1/012002.
6. *Kulikov G.G., Shmelev A.N., Apse V.A., Kulikov E.G.* On fundamental quality of fission chain reaction to oppose rapid runaways of nuclear reactors. // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – Vol. 781. – No. 1. – Article 012006. DOI: 10.1088/1742-6596/781/1/012006.
7. *Kulikov G.G., Apse V.A., Shmelev A.N., Kulikov E.G.* Improved Safety Fast Reactor with «Reservoir» for Delayed Neutrons Generating. // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – Vol. 781. – No. 1. – Article 012009. DOI: 10.1088/1742-6596/781/1/012009.
8. *Kulikov G.G., Apse V.A., Kulikov E.G., Kozhahmet B.K., Shkodin A.O., Shmelev A.N.* Radiogenic lead from poly-metallic thorium ores as a valuable material for advanced nuclear facilities. // Kerntechnik. – 2017. – Vol. 82. – No. 1. – PP. 87-91. DOI: 10.3139/124.110665.
9. *Куликов Г.Г., Шмелев А.Н., Ансэ В.А., Куликов Е.Г.* Безопасность быстрого реактора с отражателем, содержащим замедлитель с большим атомным весом и малым поглощением нейтронов. / Тезисы V Международной научно-технической конференции (V МНТК НИКИЭТ) «Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики». – М.: НИКИЭТ, 2018.
10. *Kulikov G.G., Shmelev A.N., Apse V.A., Kulikov E.G.* Models of the in-hour equation for fast reactors surrounded by a physically thick neutron reflector for upgrading the reactor safety. // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1133. – No. 1. – Article 012036. DOI: 10.1088/1742-6596/1133/1/012036.
11. *Kulikov G.G., Shmelev A.N., Kulikov E.G., Apse V.A.* Nuclear safety of the fast reactor with

²⁰⁸Pb-reflector at neutron flash above effective fraction of delayed neutrons. // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1133. – No. 1. – Article 012037. DOI: 10.1088/1742-6596/1133/1/012037.

12. *Kulikov G.G., Shmelev A.N., Kulikov E.G., Apse V.A.* Peculiarities of the fast reactor with reflector from lead-208 // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1133. – No. 1. – Article 012038. DOI: 10.1088/1742-6596/1133/1/012038.

13. *Белл Д., Глестон С.* Теория ядерных реакторов. – М.: Атомиздат, 1974. – 494 с.

14. *Бекуриц К., Виртц К.* Нейтронная физика. / Пер. с англ. – М.: Атомиздат, 1968. – 456 с.

15. *Апсэ В.А., Шмелев А.Н.* Использование программы TИМЕ26 в курсовом проектировании быстрых реакторов и электроядерных установок. Учебно-методическое пособие. – М.: НИЯУ МИФИ, 2008. – 63 с.

Поступила в редакцию 24.12.2019 г.

Авторы

Куликов Геннадий Генрихович, главный эксперт
E-mail: gegkulikov@rosatom.ru

Шмелев Анатолий Николаевич, профессор
E-mail: shmelan@mail.ru

Апсэ Владимир Александрович, заведующий НИС
E-mail: apseva@mail.ru

Куликов Евгений Геннадьевич, доцент
E-mail: egkulikov@mephi.ru

UDC 621.039.537

ON A SIGNIFICANT DECELERATION OF THE KINETICS OF FAST TRANSIENT PROCESSES IN A FAST REACTOR

Kulikov G.G. *, Shmelev A.N. **, Apse V.A. **, Kulikov E.G. **

* State Atomic Energy Corporation ROSATOM
24 Bolshaya Ordynka Str., 119017 Moscow, Russia

** National Research Nuclear University «MEPhI»
31 Kashirskoe Hwy, 115409 Moscow, Russia

ABSTRACT

The kinetics of nuclear reactors is determined by the average neutron lifetime. When the inserted reactivity is more than the effective fraction of delayed neutrons, the reactor kinetics becomes very rapid. The fast reactor kinetics can be slowed down by increasing the neutron lifetime. The authors consider the possibility of using a lead isotope, ²⁰⁸Pb, as a neutron reflector with specific properties in the lead-cooled fast reactor. To analyze the emerging effects in a fast reactor, a point kinetics model was selected, which takes into account neutrons returning from the ²⁰⁸Pb reflector to the reactor core.

Such specific properties of ²⁰⁸Pb as the high atomic weight and weak neutron absorption allow neutrons from the reactor core to penetrate deeply into ²⁰⁸Pb reflector, slow down in it, and have a noticeable probability to return to the reactor core and affect the chain fission reaction. The neutrons coming back from the ²⁰⁸Pb reflector have a long «dead-time» i.e., the sum of times when neutrons leave the reactor

core entering the ^{208}Pb reflector and then diffuse back into the reactor core. During the 'dead-time', these neutrons cannot affect the chain fission reaction. In terms of the delay time, the neutrons returning from the deep layers of the ^{208}Pb reflector are close to the delayed neutrons. Moreover, the number of the neutrons coming back from the ^{208}Pb reflector considerably exceeds the number of the delayed neutrons.

As a result, the neutron lifetime formed by the prompt neutron lifetime and the «dead-time» of the neutrons from the ^{208}Pb reflector can be substantially increased. This will lead to a longer reactor runaway period, which will mitigate the effects of prompt supercriticality. Thus, the use of ^{208}Pb as a neutron reflector can significantly improve the safe fast reactor operation.

Key words: kinetics, fast reactor, reflectors based on natural lead and lead-208, VVER and CANDU thermal reactors, nuclear chain reaction, transient process, asymptotic runaway.

REFERENCES

1. Shmelev A.N., Kulikov G.G., Apse V.A., Kulikov E.G., Artisyuk V.V. Radiogenic Lead with Dominant Content of ^{208}Pb : New Coolant and Neutron Moderator for Innovative Nuclear Facilities. *Internet Journal of Hindawi Publishing Corporation: Science and Technology of Nuclear Installations*. 2011, article ID 252903, 12 p. Available at: <http://www.hindawi.com/journals/stni/2011/252903/> (accessed Dec. 20, 2019). DOI: 10.1155/2011/252903 .
2. Shmelev A.N., Kulikov G.G., Kryuchkov E.F., Apse V.A., Kulikov E.G. Application of Radiogenic Lead with Dominant Content of ^{208}Pb for Long Prompt Neutron Lifetime in Fast Reactor. *Nuclear Technology*. 2013, v. 183, no. 3, pp. 409-426.
3. Kulikov G.G., Shmelev A.N., Apse V.A., Ternovykh M.Yu., Kulikov E.G. Favorable features in kinetics of fast reactors with physically thick reflector containing ^{208}Pb . *Proc. of the International conference PHYSOR-2014. «The Role of Reactor Physics Toward a Sustainable Future»*. Kyoto, Japan, 2014.
4. Kulikov G.G., Shmelev A.N., Kulikov E.G., Apse V.A., Chubko N.V. The Role of Neutrons from the Reflector of a Fast Reactor in Increasing the Resistance of the Fission Chain Reaction to Rapid Runaway. *Atomnaya Energiya*. 2017, v. 123, iss. 6, pp. 351-352 (in Russian).
5. Kulikov E.G. Radiogenic Lead as Coolant, Reflector and Moderator in Advanced Fast Reactors. *Journal of Physics: Conference Series*. 2017, v. 781, no. 1, article 012002. DOI: 10.1088/1742-6596/781/1/012002.
6. Kulikov G.G., Shmelev A.N., Apse V.A., Kulikov E.G. On fundamental Quality of Fission Chain Reaction to Oppose Rapid Runaways of Nuclear Reactors. *Journal of Physics: Conference Series*. 2017, v. 781, no. 1, article 012006. DOI: 10.1088/1742-6596/781/1/012006.
7. Kulikov G.G., Apse V.A., Shmelev A.N., Kulikov E.G. Improved Safety Fast Reactor with «Reservoir» for Delayed Neutrons Generating. *Journal of Physics: Conference Series*. 2017, v. 781, no. 1, article 012009. DOI: 10.1088/1742-6596/781/1/012009.
8. Kulikov G.G., Apse V.A., Kulikov E.G., Kozhahmet B.K., Shkodin A.O., Shmelev A.N. Radiogenic lead from poly-metallic thorium ores as a valuable material for advanced nuclear facilities. *Kerntechnik*. 2017, v. 82, no. 1, pp. 87-91. DOI: 10.3139/124.110665.
9. Kulikov G.G., Shmelev A.N., Apse V.A., Kulikov E.G. Safety of a fast reactor with a reflector containing a moderator with a high atomic weight and low neutron absorption. *Proc. of the V-th International Scientific and Technical Conference «Innovative Projects and Technologies of Nuclear power»*. Moscow. NIKIET Publ., 2018 (in Russian).
10. Kulikov G.G., Shmelev A.N., Apse V.A., Kulikov E.G. Models of the In-Hour Equation for Fast Reactors Surrounded by a Physically Thick Neutron Reflector for Upgrading the Reactor Safety. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018, v. 1133, no. 1, article 012036. DOI: 10.1088/1742-6596/1133/1/012036.

11. Kulikov G.G., Shmelev A.N., Kulikov E.G., Apse V.A. Nuclear safety of the fast reactor with ^{208}Pb -reflector at neutron flash above effective fraction of delayed neutrons. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018, v. 1133, no. 1, article 012037. DOI: 10.1088/1742-6596/1133/1/012037.

12. Kulikov G.G., Shmelev A.N., Kulikov E.G., Apse V.A. Peculiarities of the Fast Reactor with Reflector from Lead-208. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018, v. 1133, no. 1, article 012038. DOI: 10.1088/1742-6596/1133/1/012038.

13. Bell G.J., Glasstone S. *Nuclear Reactor Theory*. Van Nostrand Reinhold Company, 1970. 494 p.

14. Bekurtz K., Wirtz K. *Neutron Physics*. Moscow. Atomizdat Publ., 1968, 456 p. (in Russian).

15. Apse V.A., Shmelev A.N. *Use of the Computer Code TIME26 in the Training Design of Fast Reactors and Accelerator Driven Systems*. Moscow. NRNU MEPhI Publ., 2008, 63 p. (in Russian).

Authors

Kulikov Gennady Genrikhovich, Chief Expert

E-mail: gegkulikov@rosatom.ru

Shmelev Anatoly Nikolaevich, Professor

E-mail: shmelan@mail.ru

Apse Vladimir Aleksandrovich, Head of Scientific and Research Sector

E-mail: apseva@mail.ru

Kulikov Evgeny Gennad'evich, Assistant Professor

E-mail: egkulikov@mephi.ru