

## **О ВОЗМОЖНОСТИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ БОЛЬШОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РЕАКТОРА ТИПА БРЕСТ-3000**

**Окунев В.С.**

*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,  
Москва, Россия*

**Ключевые слова:** быстрый реактор, свинцовый теплоноситель, металлокерамическое топливо, безопасность, аварийные режимы.

**Аннотация.** Представлены результаты анализа безопасности концепции большого энергетического реактора типа БРЕСТ-3000. В отличие от строящегося реактора БРЕСТ, рассматривается инновационный быстрый энергетический реактор электрической мощности до 3 ГэВ. В активной зоне предлагается использовать новые материалы: металлокерамическое топливо на основе микрозерен монокристалла UN-PuN и нанопорошка металлического урана (до 20% по объему), оболочки твэлов в виде вольфрамовых цилиндрических капсул, теплоноситель на основе свинца ториевых руд. Математическое моделирование реактора и аварийных режимов проводилось с помощью разработанных автором программ Dragon-M, FRISS-2D и известных кодов WIMS и MCU.

## **ON THE POSSIBILITY OF ENSURING THE SAFETY OF A LARGE POWER REACTOR OF THE BREST-3000 TYPE**

**Okunev V.S.**

*Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia*

**Keywords:** fast reactor, lead coolant, metal-ceramic fuel, safety, emergency modes.

**Abstract.** The results of a safety analysis of the concept of a large power reactor of the BREST-3000 type are presented. In contrast to the BREST reactor under construction, an innovative fast energy reactor with electrical power of up to 3 GeV is being considered. It is proposed to use new materials in the core: metal-ceramic fuel based on UN-PuN mononitride micro grains and uranium metal nanopowder (up to 20% by volume), fuel element cladding in the form of tungsten cylindrical capsules, coolant based on lead thorium ores. Mathematical modeling of the reactor and emergency modes was carried out using the Dragon-M, FRISS-2D programs developed by the author and the well-known WIMS and MCU codes.

### **Введение**

Проекты быстрых реакторов со свинцовым теплоносителем разрабатываются в России, странах Евросоюза, США, Китае [1].

Автором ведется разработка концепции экологически приемлемого ядерного безопасного реактора для производства электрической энергии [2]. Рассматривается инновационный быстрый энергетический реактор типа БРЕСТ электрической мощности до 3 ГэВ. В активной зоне предлагается использовать новые материалы: керметное топливо на основе микрозерен монокристалла UN-PuN и нанопорошка металлического урана (до 20% по объему), оболочки твэлов в виде вольфрамовых цилиндрических капсул, теплоноситель на основе свинца ториевых руд.

Для предложенной концепции реактора пустотный эффект реактивности (ПЭР) отрицателен при любом сценарии его реализации [2]. Наиболее опасно вовлечение пузырей в активную зону при разгерметизации трубок паронагревателя. Уменьшение плотности теплоносителя в активной зоне до  $5 \dots 7 \text{ г/см}^3$  соответствует максимальной введенной реактивности (наиболее опасному сценарию реализации пустотного эффекта реактивности). При этом цепная реакция деления быстро затухает и реактор переходит в безопасное подкритическое состояние. Максимальная температура топлива не превышает  $1463 \text{ К}$ , а максимальная температура теплоносителя не превышает  $950 \text{ К}$ . Это допустимые значения для аварийных режимов.

### **Материалы и методы**

Одной из наиболее предпочтительных концепций энергетических ядерных реакторов является концепция быстрого реактора со свинцовым теплоносителем. С 2021 г. в России в г. Северске Томской области на площадке Сибирского химического комбината сооружается опытно-демонстрационный реактор БРЕСТ-ОД-300 электрической мощности  $300 \text{ МВт}$ . В реакторе предполагается использовать смешанное мононитридное уран-плутониевое топливо [1]. Оно оптимально для быстрых реакторов. В составе топлива используется отвалный уран (80%) и плутоний, извлеченный из отработавшего топлива реакторов ВВЭР. При использовании такого топлива можно минимизировать запас реактивности на выгорание, а также обеспечить самозащитенность от аварий типа ATWS (anticipated transient without scram). В качестве теплоносителя авторами концепции БРЕСТ предлагается использовать свинец природного изотопного состава ( $1,4\% \text{ }^{204}\text{Pb} - 23,6\% \text{ }^{206}\text{Pb} - 22,6\% \text{ }^{207}\text{Pb} - 52,4\% \text{ }^{208}\text{Pb}$ ).

Топливо БРЕСТ-ОД-300 содержит до 5% (вес.) младших актинидов ( $^{237}\text{Np}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{243}\text{Am}$ ). Это долгоживущие отходы ядерной энергетики трансмутируются, главным образом, за счет деления в быстром реакторе.

Эксперименты по крупномасштабному моделированию аварийных режимов типа ATWS (включая LOCA WS) и их комбинаций в ядерном реакторе трудновыполнимые и дорогостоящие. По этой причине автор использовал методы математического моделирования, реализованные в кодах [3-5].

### **Результаты и обсуждение**

При повышении мощности реактора БРЕСТ увеличивается ПЭР. Максимальное значение ПЭР реализуется не при полном осушении центральной части активной зоны, а при уменьшении плотности теплоносителя до  $5 \dots 6 \text{ г/см}^3$  (рис. 1). Плотностной эффект реактивности  $\Delta\rho$  тождественно равен ПЭР при нулевой плотности теплоносителя.

В расчетах предполагалось, что плотность теплоносителя изменяется в активной зоне и нижнем отражателе. При этом пузыри вовлекаются в активную зону снизу вверх.

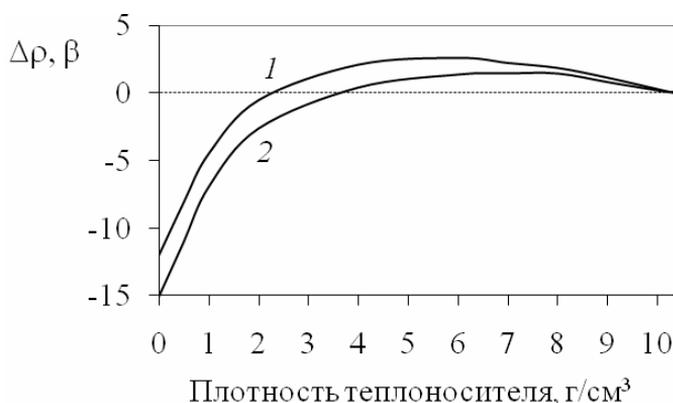


Рис. 1. Изменение эффекта реактивности в зависимости от плотности теплоносителя в активной зоне и нижнем отражателе при осушении реактора БРЕСТ большой мощности: 1 – природный свинец; 2 –  $^{208}\text{Pb}$  (расчеты по МСУ);  $\beta$  – эффективная доля запаздывающих нейтронов

При наиболее опасном сценарии реализации ПЭР (или  $\Delta\rho$ ) в 2,5 раза превышает  $\beta$  (рис. 1), что неприемлемо для безопасности. Обеспечить безопасность реактора традиционными способами не удастся.

Использование в качестве теплоносителя свинца, извлеченного из ториевых руд, отчасти способствует решению проблемы ПЭР. Изотопный состав одной из проб месторождения монацита: 0,024%  $^{204}\text{Pb}$  – 16,19%  $^{206}\text{Pb}$  – 2,21%  $^{207}\text{Pb}$  – 81,58%  $^{208}\text{Pb}$  [6]. Содержание изотопа  $^{208}\text{Pb}$  в свинце монацитов достигает 68 ... 98% [6].

Дважды магические ядра свинца-208 характеризуются малым сечением неупругих процессов (поглощения нейтронов, неупругого рассеяния нейтронов). Такие ядра плохо замедляют и поглощают нейтроны В результате ПЭР минимален. При уменьшении плотности теплоносителя до 6...8 г/см<sup>3</sup> значение ПЭР в 1,7 раза превышает  $\beta$ . Этого вполне достаточно для инициации тяжелой аварии. Таким образом, переход на ториевый свинец (даже с 100% концентрацией изотопа  $^{208}\text{Pb}$ ) не решает проблему.

Дальнейшему снижению ПЭР (или  $\Delta\rho$ ) способствует размещение дополнительного поглотителя в активной зоне. Например, вольфрамовые покрытия твэлов позволяют снизить плотностной эффект реактивности  $\Delta\rho$  до нулевого значения (при самом опасном сценарии его реализации). Кроме того, вольфрамовые покрытия служат дополнительной эффективной защитой от коррозии и эрозии [3]. Они предотвращают химическую реакцию хрома (в составе стальной оболочки) и водяного пара при разгерметизации трубок теплообменника «свинец – пар»

Самой опасной комбинации аварийных режимов для ректоров такого типа является (LOF + LOHS + TOP) WS, т. е. «loss-of-flow + transient over power + loss-of-heat sink + without scram». В расчетах по FRISS предполагалось, то время выбега главных циркуляционных насосов равно 20 с. Вводится полный запас реактивности (0,9  $\beta$ ) за 10 с. Эти два процесса начинаются одновременно и сопровождаются отказом быстродействующей

аварийной защиты. При loss-of-heat sink without scram на вход в активную зону поступает горячий теплоноситель с запаздыванием на 30 с.

При использовании инновационных материалов в активной зоне (топлива, теплоносителя, оболочек ТВЭЛОВ) полностью обеспечивается безопасность реактора типа БРЕСТ-3000.

### **Заключение**

Расчетный анализ сложных комбинаций аварийных режимов показывает, что при использовании предложенных автором инновационных материалов активной зоны в реакторе большой электрической мощности (до 3 ГВт и выше) исключить все совокупность аварий, которые могли бы привести к недопустимым выбросам радиоактивных веществ за пределы АЭС. Максимальные температуры материалов активной зоны (топлива, теплоносителя, оболочек ТВЭЛОВ) в рассмотренных аварийных режимах не превышают допустимых значений. Имеется большой температурный запас до допустимых значений. Единственной нерешенной задачей является проблема устойчивости реактора аномально большой мощности.

### **Список литературы**

1. 2017 GIF Annual Report. Printed by the OECD Nuclear Energy Agency for the Generation IV International Forum Nuclear Energy Agency. – Paris, 2017. – P. 50-72.
2. Okunev V.S. On the Possibility of Ensuring the Safe Termination of Loss-of-Coolant Accident without Scram in a High-Power Fast Reactor // AIP Conference Proceedings. 2023, vol. 2999, pp. 020020. doi.org/10.1063/5.0158831.
3. Okunev V.S. ATWS Analysis for Innovative Lead-Cooled High-Power Fast Reactor with Accident Tolerant Materials of Core // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021, vol. 808, pp. 012002. doi: 10.1088/1755-1315/808/1/012002.
4. Гомин Е.А. Статус MCU-4 // ВАНТ, сер.: Физика ядерных реакторов. – 2006. – Вып. 1. – С. 6-32.
5. WIMS-D/4. Energy Science and Technology Software Center. NEA Data Bank. United Kingdom Atomic Energy Authority. Reactor Group / General Reactor Physics Division. Atomic Energy Establishment. Winfrith. Dorchester. Dorset, 1967.
6. Каталог изотопных дат пород Украинского щита / Ред. Щербак Н.П., –Институт геохимии и физики минералов Мингеологии УССР. – Киев: Наукова думка, 1978. – С. 90, 136.

### **References**

1. 2017 GIF Annual Report. Printed by the OECD Nuclear Energy Agency for the Generation IV International Forum Nuclear Energy Agency. – Paris, 2017. – P. 50-72.
2. Okunev V.S. On the Possibility of Ensuring the Safe Termination of Loss-of-Coolant Accident without Scram in a High-Power Fast Reactor // AIP Conference Proceedings. 2023, vol. 2999, pp. 020020. doi.org/10.1063/5.0158831.
3. Okunev V.S. ATWS Analysis for Innovative Lead-Cooled High-Power Fast Reactor with Accident Tolerant Materials of Core // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021, vol. 808, pp. 012002. doi: 10.1088/1755-1315/808/1/012002.

4. Gomin E.A. MCU-4 status // VANT, ser.: Physics of Nuclear Reactors. 2006, vol. 1, pp. 6-32.
5. WIMS-D/4. Energy Science and Technology Software Center. NEA Data Bank. United Kingdom Atomic Energy Authority. Reactor Group / General Reactor Physics Division. Atomic Energy Establishment. Winfrith. Dorchester. Dorset, 1967.
6. Catalog of Isotopic Dates of Rocks of the Ukrainian Shield, Academy of Sciences of the Ukrainian SSR / Edited by Scherbak N.P. – Institute of Geochemistry and Physics of Minerals, Ministry of Geology of the Ukrainian SSR. – Kiev: Naukova Dumka, 1978. – Pp. 90, 136.

|  |  |
|--|--|
| <b>Окунев Вячеслав Сергеевич</b> – кандидат технических наук, доцент | <b>Okunev Viacheslav Sergeevich</b> – candidate of technical sciences, associate professor |
| okunevvs@bmstu.ru  |  |

*Received 14.12.2023*