

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТА РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ-БРИДЕРА БРИГ-300

Д.С. Самохин, И.М. Знак, А.М. Терехова

*Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ МИФИ
249040, Калужская обл., г. Обнинск, Студгородок, 1*



Дано описание некоторых характеристик быстрого реактора проекта БРИГ-300. Оценки нейтронно-физических характеристик реактора-бридера выполнены с использованием программного комплекса TRIGEX. Приводятся результаты расчета эффективного коэффициента размножения и баланса нейтронов в активной зоне реакторной установки.

Ключевые слова: БРИГ-300, TRIGEX, реактор, бридер, диссоциирующий теплоноситель, картограмма.

Еще на заре развития ядерной энергетики был выдвинут тезис о необходимости создания быстрых реакторов – наработчиков горючего для полноценного развития атомной промышленности и экономии природного урана. Поэтому проектирование и создание экономически целесообразных реакторов на быстрых нейтронах является актуальной задачей и по сей день.

Несмотря на большой прорыв в создании и эксплуатации быстрых реакторов с натриевым теплоносителем ядерное сообщество продолжает исследования новых перспективных экономичных и более безопасных реакторов на быстрых нейтронах.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ПУТИ РЕШЕНИЯ

Целью создания опытно-промышленной АЭС БРИГ-300 с газоохлаждаемым быстрым реактором на диссоциирующем теплоносителе [1, 4] как альтернативного варианта натриевых бридеров является разработка АЭС с простой одноконтурной схемой при малых металлоемкости и трудоемкости изготовления оборудования. АЭС с быстрыми реакторами на диссоциирующих газах позволяют прогнозировать лучшие технико-экономические характеристики, а также физические показатели [5], которые находятся на уровне показателей АЭС с натриевыми бридерами.

Целью работы является изучение нейтронно-физических процессов, протекающих в быстром реакторе проекта БРИГ-300. В работе были использованы результаты оценки модели активной зоны реактора-бридера, построенной с использованием программного комплекса TRIGEX.05 [2].

TRIGEX создан для моделирования активной зоны быстрых реакторов с натриевым теплоносителем, однако его функциональные возможности позволяют рассчитывать модели и иных быстрых реакторов. Именно программный комплекс TRIGEX

© Д.С. Самохин, И.М. Знак, А.М. Терехова, 2015

дает возможность провести оценки таких важных характеристик, как коэффициент воспроизводства, эффективный коэффициент размножения нейтронов, спектр нейтронов, изотопный состав, коэффициенты реактивности и т.д., что позволяет создавать достаточно точные модели для обоснования поведения быстрых реакторов.

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ

На рисунке 1 представлена картограмма загрузки активной зоны РУ БРИГ-300, использованная в расчетной модели.

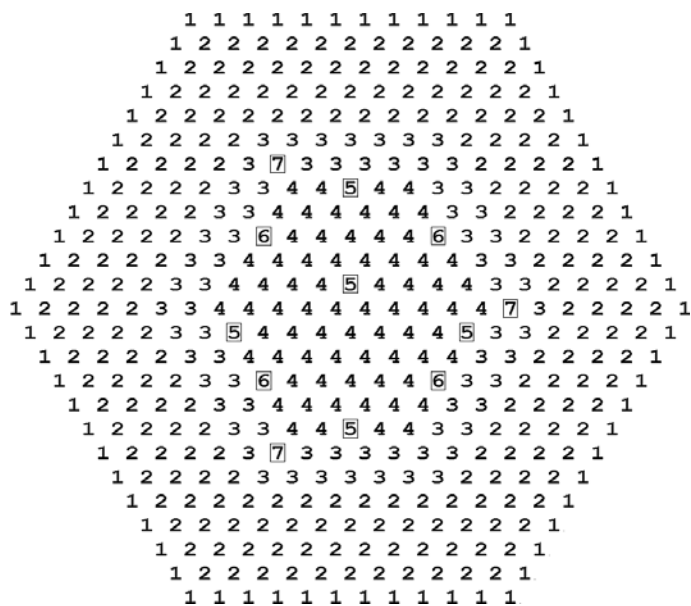


Рис.1. Картограмма загрузки топлива БРИГ-300 (бридер): 1 – зона выдержки; 2 – зона воспроизводства; 3 – зона большого обогащения; 4 – зона малого обогащения; 5 – компенсирующий орган; 6 – стержень автоматического регулирования; 7 – стержень аварийной защиты

В качестве основного варианта БРИГ-300 рассматривался реактор с матричным топливом в активной зоне ($\text{UO}_2 + \text{PuO}_2 + 30\%\text{Cr}$) и уранатом магния в воспроизводящих экранах (MgU_2O_6). Основные нейтронно-физические характеристики, использованные для построения модели этого реактора, указаны в табл. 1. В бридерах БРИГ-300 обогащение топлива по Pu^{239} достигается механической смесью UO_2 и PuO_2 . Это дает возможность получить меньшую загрузку топлива (3,595 вместо 3,893 т в варианте первой загрузки) вследствие меньшего объема активной зоны, лучше спрофилировать поле энерговыделения [1, 5].

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

В основном варианте бридера полный коэффициент воспроизводства составляет 1,33 и незначительно уменьшается при выходе реактора на установившийся режим работы, что объясняется увеличением размеров активной зоны за счет «вовлечения» в работу периферийной зоны воспроизводства и изменением изотопного состава топлива. В таблице 2 указаны основные характеристики, полученные в результате расчета модели реактора-бридера БРИГ-300. Погрешность эффективного коэффициента размножения нейтронов определяется как погрешность численной аппроксимации.

В таблице 3 приведены балансы нейтронов в начальном состоянии и в установившемся режиме. Около 4% нейтронов утекает за пределы реактора. Существенная доля нейтронов (~ 32%) утекает из активной зоны в экраны реактора. Изменение баланса при

переходе в установившийся режим определяется «изменением размеров» активной зоны, изотопного состава топлива и передвижением органов системы управления и защиты.

Таблица 1

Характеристики основного варианта реактора-бридера БРИГ-300

Тепловая мощность, МВт	1110
Электрическая мощность, МВт	330
Активная зона	
Плотность топлива ($\text{UO}_2 + \text{PuO}_2$), г/см ³	9,8
Высота активной зоны, м	0,74
Эквивалентный диаметр активной зоны, м	1,42
Объемный состав эквивалентной ячейки штатной топливной кассеты, %:	
– топлива ($\text{UO}_2 + \text{PuO}_2$)	35,04
– оболочек твэлов и конструкционных материалов	21,56
– материала матрицы	15,01
– теплоносителя	28,39
Количество топлива в твэле, г	125
Среднее обогащение топлива Pu^{239} , Pu^{241} в начальном состоянии (ЗБО/ЗМО), %	15,795 / 21,75
Торцевые экраны	
Топливная композиция	MgU_2O_6
Плотность топливной композиции, г/см ³	7,4
Объемный состав эквивалентной ячейки штатной топливной кассеты, %:	
– топливной композиции	48,28
– оболочек твэлов и конструкционных материалов	21,56
– теплоносителя	28,39
– пустоты	1,77
Толщина экранов, нижний / верхний, м	0,35 / 0,5
Расчетное количество топливной композиции в штатной топливной кассете нижнего / верхнего экрана, кг	8,3 / 11,67
Боковой экран	
Топливная композиция	MgU_2O_6
Плотность топливной композиции, г/см ³	7,4
Диаметр твэла × толщина оболочки, мм	10,6 × 0,5

Таблица 2

Характеристики активной зоны реактора

Средняя энергонапряженность, кВт/л	815
Коэффициенты неравномерности энерговыделения в начальном состоянии	
– по радиусу	1,343
– по высоте	1,208
Максимальный поток нейтронов, 1/(см ² ·с)	$1,42 \cdot 10^{16}$
Эффективный коэффициент размножения нейтронов	$1,230 \pm 0,249 \cdot 10^{-5}$

Таблица 3

Баланс нейтронов в основном реакторе-бридере БРИГ-300

Составляющие баланса	Начальное состояние	Среднестационарное состояние
Среднее число вторичных нейтронов на один акт деления		
По реактору	2,94	2,94
По активной зоне	2,95	2,95
По экрану	2,66	2,72
Утечка нейтронов из реактора	0,036	0,041
Утечка нейтронов из активной зоны в экраны	0,319	0,312
(n, γ)-захват в материале матрицы, конструкционных материалах, поглотителе, осколках		
В активной зоне	0,0944	0,0830
В экране	0,0475	0,0563
В реакторе	0,1419	0,1399
(n, γ)-захват делящимися элементами		
В активной зоне	0,0494	0,0493
В экране	0,0023	0,0033
В реакторе	0,0518	0,0527
(n, γ)-захват в U^{238} и Pu^{240} (воспроизводство)		
В активной зоне	0,1850	0,1935
В экране	0,2466	0,2322
В реакторе	0,4316	0,4258
Деление на U^{235} , Pu^{239} , Pu^{240}		
В активной зоне	0,2750	0,2732
В экране	0,0069	0,0087
В реакторе	0,2820	0,2820
Деление на U^{238} и Pu^{240}		
В активной зоне	0,0500	0,0496
В экране	0,0081	0,0081
В реакторе	0,0581	0,0580

Доля быстрых нейтронов составляет 67%, а нейтронов, определяющих эффект Доплера ($1\text{эВ} \leq E \leq 30\text{ кэВ}$), – 30%. При переходе в установившийся режим наблюдается смягчение спектра нейтронов в реакторе, что объясняется изменением изотопного состава топлива.

ВЫВОД

На основании анализа проекта быстрого реактора с диссоциирующим теплоносителем БРИГ-300 и построения модели реактора-бридера, можно заключить, что его нейтронно-физические характеристики сопоставимы, а в некоторых случаях превосходят быстрый реактор с натриевым теплоносителем, аналогичной мощности [3]. С учетом развития технологий герметизации и способов повышения безопасности реакторных установок с агрессивным и токсичным теплоносителем можно сделать вывод о конкурентоспособности быстрых реакторов типа БРИГ-300 и, соответственно, целесообразности исследования данной проблематики.

Литература

1. Нестеренко В.Б., Михалевич А.А., Тверковкин Б.Е. Быстрые реакторы и теплообменные аппараты АЭС с диссоциирующим теплоносителем. – Минск: Наука и техника, 1978.
2. Комплекс программ TRIGEX.05. Инструкция пользователя. – Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ, 2008.
3. Кузнецов И.А., Поплавский В.М. Безопасность АЭС с реакторами на быстрых нейтронах. / Под общ. ред. чл.-корр. РАН В.И. Рачкова. – М.: Издат, 2012. – 632 с.
4. Дубина Ю.В., Слесарев И.С. Нейтронно-физический анализ гетерогенных композиций активных зон быстрых реакторов с диссоциирующим теплоносителем. Препринт №4, – Минск:

Институт ядерных исследований АН БССР, 1984.

5. *Кухаев А.И., Попов Б.И.* Нейтронно-физические характеристики БРИГ-300 – Минск: Институт ядерных исследований АН БССР, 1978, 134 с.

Поступила в редакцию 26.01.2015 г.

Авторы

Самохин Дмитрий Сергеевич, зав. кафедрой, доцент, канд. техн. наук

E-mail: samohin@iate.obninsk.ru

Знак Иван Михайлович, аспирант

E-mail: vano_da@bk.ru

Терехова Анна Михайловна, ст. преподаватель

E-mail: anna_terehova@inbox.ru

UDC 621.039.586.001.57

NEUTRONICS OF BRIG-300 BREEDER REACTOR

Samohin D.S., Znak I.M., Terehova A.M.

Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering, National Nuclear Research University «MEPhI».

1 Studgorodok, Obninsk, Kaluga reg., 249040 Russia

ABSTRACT

The article deals with description of some of the characteristics of the BRIG-300 reactor design. Evaluation of neutronics characteristics of a breeder reactor BRIG-300 are made in the software package TRIGEX. The results of the calculation of the effective multiplication factor, the balance of neutrons in the core of the reactor plant.

At the very beginning of the nuclear age, many of physicists was expressed the idea that the full development of nuclear energy is possible only on the basis of a closed fuel cycle with fast reactors. Despite a major breakthrough in the development and operation of fast reactors with sodium coolant, the nuclear community is still interested in the development of advanced, fuel-efficient and safer fast reactors.

The purpose of the pilot commercial nuclear power plant BRIG-300 gas-cooled fast reactor coolant dissociating [1, 4], as an alternative, sodium breeders is to create plants with a simple single-circuit at low metal content and time consuming manufacturing equipment. NPP with fast reactors on dissociating gases allow to predict the best technical and economic characteristics, as well as physical performance [5], which are at the level of performance of NPP with sodium breeders.

The aim of the present work is the study of neutron-physical processes fast reactor project BRIG-300. To achieve the objective results of the evaluation were used core model breeder reactor built in the software package TRIGEX.05 [2].

Software package TRIGEX created to simulate the core of fast reactors with sodium coolant, but its functionality allows count models and other fast reactors. It is a program complex TRIGEX allows an assessment of important characteristics such as reproduction rate, the effective neutron multiplication factor, neutron spectrum, isotopic composition, reactivity coefficients, etc., which allows you to create a sufficiently accurate models to study the behavior of fast reactors.

BRIG-300 reactor is comparable to the fast reactor with sodium coolant, similar capacity, in terms of neutron physics [3]. Taking into account the development of sealing technology and ways to improve the safety of reactor facilities with

hazardous and toxic coolant, it can be concluded about the competitiveness of fast reactors BRIG-300 and, accordingly, the feasibility of the study of this problem.

Key words: BRIG-300, TRIGEX, reactor, breeder, dissociating coolant, nitrin, cartogram.

REFERENCES

1. Nesterenko V.B., Mihalevich A.A., Tverkovkin B.E. Bystrye reaktory i teploobmennye apparaty AES s dissociirujuschim teplonositelem. Minsk. Nayka i Texnika Publ., 1978 (in Russian).
2. Kompleks programm TRIGEX.05. Instrukciya pol'zovatelya. Obninsk: GNC RF-FEI Publ., 2008. Inv. №11961 (in Russian).
3. Kuznecov I.A., Poplavskij V.M. Bezopasnost' AES s reaktorami na bystryh nejtronah. Pod obsch. red. chlena-korrespondenta AN RF V.I. Rachkova. Moscow. Izdat Publ., 2012 (in Russian).
4. Dubina Ju.V., Slesarev I.S. Nejtronno-fizicheskij analiz geterogennyh kompozicij aktivnyh zon bystryh reaktorov s dissociirujuschim teplonositelem. Preprint №4. Minsk. Institut yadernyh issledovaniy AN BSSR Publ., 1984 (in Russian).
5. Kuhaev A.I., Popov B.I. Nejtronno-fizicheskie harakteristiki BRIG-300 p.134. Minsk. Institut yadernyh issledovaniy AN BSSR Publ., 1978 (in Russian).

Authors

Samohin Dmitrij Sergeevich, Head of Chair, Assistant Professor, Cand. Sci. (Engineering)
E-mail: samohin@iate.obninsk.ru

Znak Ivan Mihajlovich, PhD Student
E-mail: vano_da@bk.ru

Terehova Anna Mihajlovna, Senior Lecturer
E-mail: anna_terehova@inbox.ru