

**ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ**
OPERATION OF FACILITIES
NUCLEAR INDUSTRY

<https://doi.org/10.26583/gns-2025-02-06>

EDN IQZVFW

Оригинальная статья / Original paper



Об учете влияния гетерогенного эффекта в парообразовании на нейтронно-физические характеристики ТВС реактора BWR

Р.А. Внуков  , В.В. Колесов 

Обнинский институт атомной энергетики – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Обнинск, Калужская обл., Российская Федерация

 vnukovra@oiate.ru

Аннотация. Традиционно при проведении нейтронно-физических расчетов в случае, когда замедлитель представляет собой систему пар + вода, эффект парообразования, например, в кипящих реакторах типа BWR учитывается гомогенно уменьшением плотности воды в соответствии с долей пара. В работе сделана попытка исследовать влияние гетерогенной структуры вода + пузырьки пара на нейтронно-физические характеристики ТВС реактора BWR. Для создания модели использовались данные бенчмарка OECD/NEA Burnup Credit Criticality Benchmark Phase IIIВ. Исследования проводились с использованием программного комплекса SERPENT-2, позволяющего случайным образом разбрасывать сферы различного радиуса, заполненные различным материалом в различных областях активной зоны реактора. Расчеты проводились с использованием библиотеки JEFF-3.1.1. Исследовалась зависимость наблюдаемого эффекта от радиусов пузырьков пара и от доли пара в теплоносителе. Обнаружено, что различия для гомогенной и гетерогенной моделей ТВС могут составлять до 0.3% в величине K_{inf} , что значительно больше точности, с которой проводились расчеты (~0.01%). Показано, что α уменьшается с ростом размера пузырьков пара при сравнении с гомогенной моделью. Таким образом, обосновывается изменение спектра нейтронов, которое влияет на изменение коэффициента размножения. При расчетном исследовании пустотного эффекта выявлено, что расхождения достигают 8% при рассмотрении моделей с различным паросодержанием и идентичных размерах пузырьков пара. Данная величина важна для корректной интерпретации мощностного эффекта реактивности в задачах оптимизации топливоиспользования. В частности, актуально для обоснования внедрения новых видов топлива.

Ключевые слова: кипящий реактор, двухфазная среда, теплоноситель, пузырьки пара, BWR, гетерогенная модель, гомогенная модель.

Для цитирования: Внуков Р.А., Колесов В.В. Об учете влияния гетерогенного эффекта в парообразовании на нейтронно-физические характеристики ТВС реактора BWR. *Глобальная ядерная безопасность*. 2025;15(2):56–63. <https://doi.org/10.26583/gns-2025-02-06>

For citation: Vnukov R.A., Kolesov V.V. The influence of the heterogeneous effect in vaporization on the neutron-physical characteristics of BWR fuel assembly. *Nuclear Safety*. 2025;15(2):56–63. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/gns-2025-02-06>

The influence of the heterogeneous effect in vaporization on the neutron-physical characteristics of BWR fuel assembly

Ruslan A. Vnukov  , Valery V. Kolesov 

Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering, Obninsk, Kaluga region, Russian Federation

 vnukovra@oiate.ru

Abstract. Traditionally, when conducting neutron physics calculations in cases where the moderator is a steam + water system, the effect of vaporization, for example, in boiling reactors of the BWR type, is taken into account homogeneously by reducing the density of water in accordance with the proportion of steam. The paper attempts to investigate the effect of the heterogenic structure of water + vapor bubbles on the neutron-physical characteristics of the fuel assemblies of the BWR reactor. To create the model, data from the OECD/NEA Burnup Credit Criticality

Benchmark Phase IIIB are used. The research is carried out using the SERPENT-2 software package which allows randomly scattering spheres of various radii filled with various materials in different areas of the reactor core. The calculations are performed using the JEFF-3.1.1 library. The dependence of the observed effect on the radii of steam bubbles and on the proportion of steam in the coolant is investigated. It is found that the differences for homogeneous and heterogeneous fuel assembly models can be up to 0.3% in the value of K_{inf} , which is significantly higher than the accuracy with which calculations are performed (~0.01%). It is shown that α decreases with increasing vapor bubble size when compared with the homogeneous model. Thus, a change in the neutron spectrum is justified, which affects the change in the multiplication coefficient. A calculating study of the void effect revealed that discrepancies reach 8% when considering models with different vapor contents and identical vapor bubble sizes. This value is important for the correct interpretation of the reactivity power effect in fuel optimization problems. In particular, it is relevant to justify the introduction of new fuels.

Keywords: boiling reactor, two-phase flow, coolant, vapor bubbles, BWR, heterogeneous model, homogeneous model.

Введение

Так как плотности воды и пара сильно различаются, традиционно при расчетах принимается случай гомогенного теплоносителя с уменьшенной в соответствии с долей пара плотностью. Помимо вычислительной погрешности, у таких моделей существует погрешность, связанная с гомогенизацией зоны теплоносителя. Для оценки этой погрешности была создана гетерогенная модель теплоносителя, используемая в настоящей работе.

Данной теме уделено мало внимания. На текущий момент известны работы по отслеживанию характеристик реакторов типа BWR и РБМК [1-5]. Данные типы относятся к тепловым реакторам и имеют богатый опыт эксплуатации. Другими словами, расчеты по данным типам реакторов имеют с учетом имеющихся данных достаточную точность для их применения. При этом вопрос конкретизации модели, учета погрешности от гомогенизации модели в принципе не поднимался.

Для гетерогенизации зоны теплоносителя необходимо понимать, каким образом устроены пузыри, как они размещены по зоне, их доли в аксиальном профиле. Исчерпывающую информацию для этого предоставляет работа [6]. В ней рост и разрушение пузырьков пара во время конвективного переохлажденного зародышевого кипения воды в кольцевой испытательной секции с внутренним подогревом визуализировали с использованием метода высокоскоростной съемки. Результаты высокоскоростной фотосъемки показали, что пузырьки увеличивались до максимального радиуса при сколь-

жении по нагретой поверхности; медленно конденсировались, все еще прикрепляясь к нагретой поверхности; и выбрасывались в поток с дальнейшей конденсацией. Объем пузырька, смещение центра тяжести пузырька параллельно и перпендикулярно поверхности нагрева, а также изменение максимального и минимального диаметров пузырька оценивались в течение срока жизни пузырька. Было исследовано влияние теплового потока, переохлаждения объема жидкости и средней скорости потока на максимальный радиус пузырька, время роста и время конденсации. При низких переохлаждениях увеличение теплового потока приводило к уменьшению максимального радиуса пузырька и времени роста. При сильном переохлаждении максимальный радиус пузырька и время роста не зависели от теплового потока. Влияние средней скорости потока на параметры пузырьков было незначительным в пределах этого исследования. Предложены корреляции для максимального радиуса пузырька, времени роста, времени конденсации, а также скоростей роста и схлопывания. Все аспекты последовательно по мере усложнения модели могут быть приняты во внимание в исследовании.

Интересной также является работа [7], которая уточняет влияние наличия плутониевых агломератов в МОКС-топливе на основные нейтронно-физические характеристики ячейки. Из результатов отмечено, что регуляризирующая решетка либо случайный разброс агломератов с повышенной долей плутония (вплоть до агломератов из чистого плутония) не дают существенных отклонений при рассмотрении задач нормальной эксплуатации.

Данная тема актуальна с позиции постановки задачи, хотя и не отражает существенную для данной работы информацию.

Расчетная модель

Рассматривается модель кипящего реактора BWR, описанная в бенчмарке OECD/NEA Burnup Credit Criticality Benchmark Phase IIIВ [8]. Используемый для проведения расчетов программный комплекс SERPENT-2 [9] позволяет моделировать па-

рообразование набором паровых сфер, различного радиуса случайно разбросанных в теплоносителе (вода) в соответствии с объемной долей пара в нем. На рисунке 2 приводится поперечное сечение ТВС реактора BWR в такой модели. Расчеты проводились с использованием библиотеки JEFF-3.1.1 [10]. Ядерные данные данной библиотеки позволяют моделировать тепловые реакторы и актуальны при рассмотрении кипящих легководных реакторов.

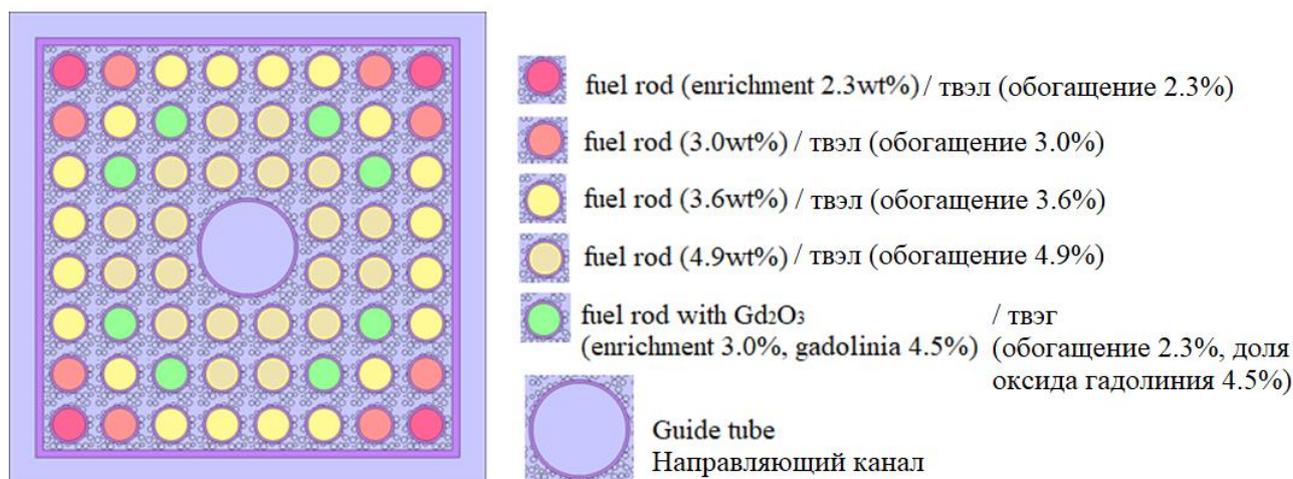


Рисунок 1. Поперечный срез модели ТВС реактора BWR
Figure 1. Cross section of the fuel assembly of BWR reactor model

Процедура задания пузырьков пара различного размера приводится в [11] и изначально рассматривалась для возможного задания микротвэлов для реакторов типа ВТГР. Размеры и размещение пузырьков пара в настоящей работе варьировались произвольно. Диапазон радиуса от 0 до 0.2 см, объемная доля пара от 0 до 55%. Возможность задать большее количество пузырей одного радиуса со случайным разбросом вызывает по большей части вычислительные сложности, упорядоченная структура позволяет плотно распределить порядка 70% объемной доли, однако в настоящем исследовании данный формат не рассмотрен, так как в более реалистичном сценарии следует образование пузырей различного размера. Стоит отметить, что данные результаты получе-

ны для различных случайных выборок размещения пузырей пара в области теплоносителя. Для результатов были созданы 10 моделей с различным случайным разбросом пузырьков пара для всех варьируемых вариантов (по радиусу пузырьков пара, по объемной доле пара).

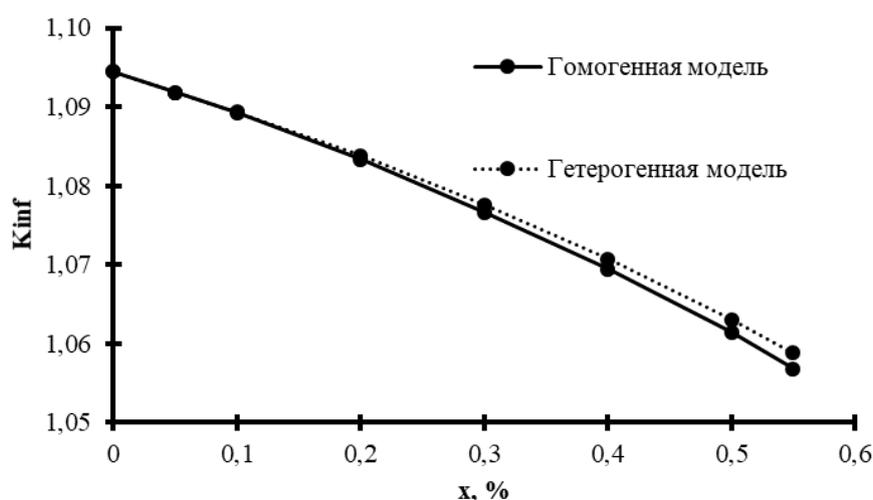
Результаты расчетов

Зависимость K_{inf} от доли пара и размеров пузырьков пара

Было проведено расчетное исследование зависимости K_{inf} от доли пара и размера пузырьков пара. В таблице 1 и на рисунке 2 приводится зависимость величины K_{inf} от доли пара в теплоносителе при радиусе пузырька 0.1 см для гомогенной и гетерогенной модели.

Таблица 1. Зависимость величины K_{inf} от доли пара в теплоносителе при радиусе пузырька 0.1 см**Table 1.** Dependence of the K_{inf} value on the proportion of steam in the coolant at a bubble radius of 0.1 cm

Доля пара, %	0	5	10	20	30	40	50	55
K_{inf} , гетерогенный случай	1.09442 +/- 0.00011	1.09178 +/-0.00011	1.08924 +/- 0.00011	1.08386 +/- 0.00011	1.07761 +/- 0.00012	1.07070 +/- 0.00011	1.06303 +/- 0.00011	1.05883 +/- 0.00011
K_{inf} , гомогенный случай		1.09184 +/-0.00011	1.08932 +/- 0.00011	1.08334 +/- 0.00011	1.07665 +/- 0.00012	1.06948 +/- 0.00011	1.06147 +/- 0.00011	1.05686 +/- 0.00012

**Рисунок 2.** Зависимость величины K_{inf} от доли пара в теплоносителе при радиусе пузырька 0.1 см**Figure 2.** Dependence of the K_{inf} value on the proportion of steam in the coolant at a bubble radius of 0.1 cm

В таблице 2 приводится зависимость K_{inf} от радиуса пузырьков пара при доле пара в теплоносителе – 40% для гетерогенного случая (в гомогенном случае $K_{inf} = 1.06949 \pm 0.00010$), а на рисунке 3 – отличие (в %) K_{inf} гетерогенного случая от гомогенного. Как видно из результатов, в области доли пара до 10% значения отличаются между гомогенной и гетерогенной моделями в пределах статистической погрешности, дальнейшее увеличение доли пара (20% и выше) приводит к росту отклонений между

моделями. Увеличение размеров пузырьков пара также ведет к росту K_{inf} в гетерогенной модели при неизменной доле пара.

Для обоснования полученных результатов для твэла с обогащением 4.9% были рассчитаны сечения деления (σ_f), радиационного захвата (σ_c) и $\alpha = \sigma_c / \sigma_f$ для случая с долей пара 40% и различных размеров пузырьков. Результаты приводятся в таблице 3 и на рисунке 4. Отсюда видно, что значение α падает с ростом радиуса пузырька (меняется спектр), что и приводит к росту K_{inf} .

Таблица 2. Зависимость K_{inf} от радиуса пузырьков пара при доле пара в теплоносителе – 40%**Table 2.** The dependence of K_{inf} on the radius of steam bubbles at a fraction of steam in the coolant is 40%

Радиус пузырька, см	0.00	0.02	0.05	0.10	0.15	0.20
K_{inf} , гетерогенный случай	1.06943 +/- 0.00010	1.06954 +/- 0.00010	1.06992 +/- 0.00009	1.07070 +/- 0.00009	1.07147 +/- 0.00009	1.07264 +/- 0.00010

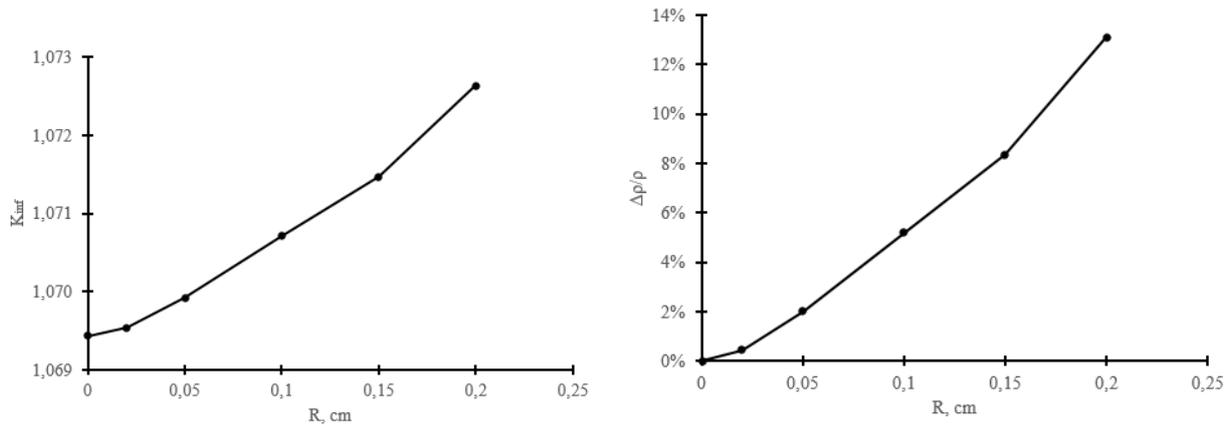


Рисунок 3. Зависимость K_{inf} от радиуса пузырьков при доле пара в теплоносителе 40% для гетерогенного случая (А) и отличие гетерогенного случая от гомогенного в % (Б)

Figure 3. K_{inf} dependence on the bubble radius with a vapor content of 40% in the coolant for the heterogeneous case (A) and the difference between the heterogeneous case and the homogeneous case in % (B)

Таблица 3. Зависимость величины α от радиуса пузырьков пара при доле пара в теплоносителе 40%

Table 3. The dependence of α on the radius of steam bubbles at a fraction of steam in the coolant is 40%

Радиус, см	Гомогенный случай			Гетерогенный случай		
	$\bar{\sigma}_f, \bar{b}$	$\bar{\sigma}_c, \bar{b}$	α	$\bar{\sigma}_f, \bar{b}$	$\bar{\sigma}_c, \bar{b}$	α
0	32.42180 +/- 0.00015	7.63250 +/- 0.00014	0.2354 +/- 0.000005	-	-	-
0.05	-	-	-	32.66590 +/- 0.00015	7.67789 +/- 0.00014	0.2350 +/- 0.000005
0.1	-	-	-	32.9654 +/- 0.00016	7.72913 +/- 0.00015	0.2345 +/- 0.000005
0.2	-	-	-	33.6063 +/- 0.00016	7.84476 +/- 0.00015	0.2334 +/- 0.000005

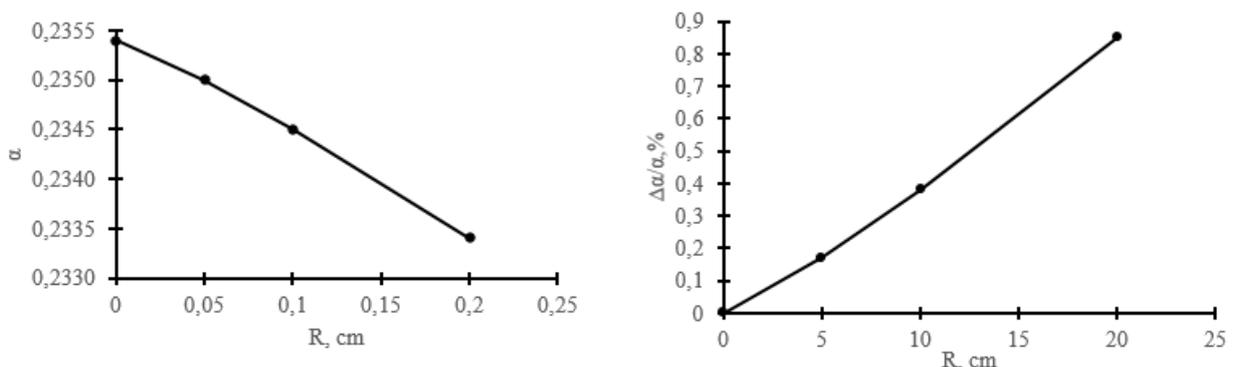


Рисунок 4. Зависимость величины α от радиуса пузырьков при доле пара в теплоносителе 40% для гетерогенного случая (А) и отличие от гомогенного случая (Б)

Figure 4. The dependence of α on the bubble radius at a vapor content in the coolant of 40% for the homogeneous case (A) and the difference from the homogeneous case (B)

Пустотный эффект

Исследован также пустотный эффект реактивности для гетерогенной и гомогенной модели. На рисунке 5 приводится отличие (в %) пустотного эффекта реактивности

для гетерогенной и гомогенной моделей (δR) для пузырьков радиусом 0.1 см. На графике приводится также экстраполяция пустотного эффекта реактивности ($\delta \rho$), рассчитанная для долей пара от 20 до 55%.

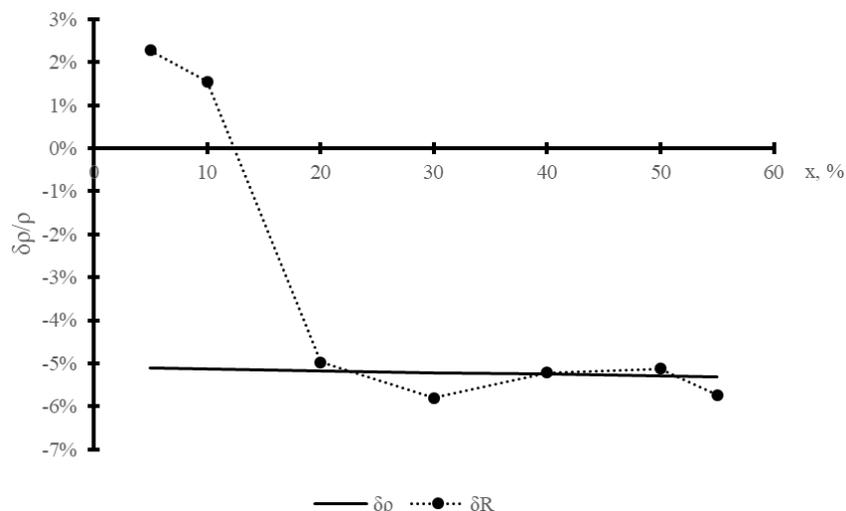


Рисунок 5. Отличие пустотного эффекта реактивности для гетерогенной и гомогенной моделей для пузырьков радиусом 0.1 см и различных долей пара

Figure 5. The difference between the void reactivity effect for heterogeneous and homogeneous models for bubbles with a radius of 0.1 cm and different vapor fractions

Величина парового коэффициента реактивности рассчитывается как $C_x = \frac{1}{K_x} - \frac{1}{K_0} / x - x_0$, где x , K_x , x_0 , K_0 , и C_x

означают паросодержание, соответствующий ему коэффициент размножения, паросодержание до кипения (обычно $x_0 = 0$), соответствующий коэффициент размножения и коэффициент реактивности.

Как видно из рисунка 5, в области малых значений паросодержания расчеты коэффициент реактивности не заслуживают доверия из-за накопления вычислительной ошибки. При этом в уточненной модели со случайным распределением паровых пузырьков пустотный коэффициент реактивности смещается на величину более чем 10% в зависимости от величины пузырьков. Очевидно, надо понимать, что в реальности размеры пузырьков различны, тогда как в модели они одинаковы.

Расхождение парового коэффициента реактивности около восьми процентов значительно превосходит допустимую расчетную ошибку. Нужно отметить, что относительная погрешность парового эффекта, как такового, никак не повлияет на потенциал безопасности, по крайней мере, если она ниже 0.1.

Однако, эта величина используется для интерпретации и декомпозиции мощностно-

го эффекта для оптимизации управления и топливоиспользования. И здесь уточнение может оказать существенное влияние на экономику текущей эксплуатации и, особенно, на обоснованность внедрения топлива улучшенного дизайна (например, толерантного к авариям).

Заключение

Проведенные расчеты показали необходимость учета гетерогенной структуры системы вода + пар в теплоносителе реактора BWR. Обнаружено, что различия для гомогенной и гетерогенной моделей ТВС могут составлять до 0.3% в величине K_{inf} , что значительно больше точности, с которой проводились расчеты (~0.01%). Несмотря на то, что в работе представлен первый этап исследований с упрощенным представлением спектра размеров паровых пузырьков в смеси, легко видеть, что эффект от уточненного моделирования топологии кипящей жидкости становится заметным с точки зрения управления ядерным реактором.

Существенная зависимость K_{inf} от размера пузырьков пара позволяет сделать вывод о необходимости проведения дополнительных исследований в области теплофизики для оценки наиболее вероятных размеров таких пузырьков. Объяснение эффекта может быть найдено если представить, что в отличие от гомогенного моделирования,

в нашем случае траектории нейтронов включают такие, где встречаются области с малой концентрацией замедлителя, и области с более высоким содержанием водорода. Нейтрон, наоборот, взаимодействует с плотным замедлителем, не попадая в пустоты. В первом случае мы имеем поток более высоких энергий, который приводит к повышенному радиационному захвату на тяжелых ядрах. Во втором – к избыточному замедлению с захватом на водороде. Более того, результирующий спектр выравнивается по энергии, что влияет на величину α и соответствующую реактивность.

Очевидно, что это только гипотеза, которую следует изучить на следующих этапах исследования модернизировав для этой цели существующий математический аппарат и системы расчетных кодов. Дальнейшее

уточнение моделирования должно включать распределение пузырьков в пространстве, изучение не только водо-паровой, но и парокapельной смесей, а также зависимость калибров и пространственных распределений паровых пузырьков от характеристик их рождения и отрыва от нагретой поверхности. Важно отметить, что полный учет влияния паровых пузырьков не будет полным если игнорировать вибрацию оболочек ТВЭЛ и вызывающие их флуктуации потока жидкости – как глобальных, так и локальных.

Разумеется, эти и подобные эффекты должны быть тщательно исследованы. При этом уже на данном этапе видно, что такие эффекты существенно влияют на поведение ядерного реактора и, следовательно, результаты подобных исследований будут иметь и ясный практический смысл.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Santamarina A. Advanced neutronics tools for BWR design calculations. Nuclear Engineering and Design. 2008. <https://doi.org/10.1016/J.NUCENGDDES.2007.12.012>
2. BWRVIP-06-A: BWR Vessel and Internals Project, Safety Assessment of BWR Reactor Internals. EPRI Technical Report 1006598. March 2002. Available at: <https://www.epri.com/research/products/00000000001006598> (accessed: 14.01.2025).
3. Assessment and management of ageing of major nuclear power plant components important to safety: BWR pressure vessel internals IAEA, VIENNA, 2005. 117 p. Available at: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_1471_web.pdf (accessed: 16.01.2025).
4. Алимов Ю.В., Баловнев А.В., Давыдов В.К., Жирнов А.П. [и др.]. Нейтронно-физические характеристики и ядерная безопасность РБМК. *Атомная энергия*. 2017;123:266–270. Режим доступа: <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/615/594> (дата обращения: 16.01.2025).
Alimov, Y.V., Balovnev, A.V., Davydov, V.K. [et al.]. RBMK neutron-physical characteristics and nuclear safety. *Atomic energy*. 2028;123:321–325. <https://doi.org/10.1007/s10512-018-0346-0>
5. Петров А.А. Канальный ядерный энергетический реактор РБМК. Москва: НИКИЭТ, 2013. 631 с. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01006634605?ysclid=mbgl9l8xbm782786369> (дата обращения: 16.01.2025).
Petrov A.A. RBMK channel-type nuclear power reactor. Moscow: NIKIET, 2013. (In Russ.). Available at: <https://search.rsl.ru/ru/record/01006634605?ysclid=mbgl9l8xbm782786369> (accessed: 16.01.2025).
6. Farajisarir D. Growth and collapse of vapour bubbles in convective subcooled boiling of water. A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of master of applied science. The university of british Columbia. 1993. 133 p. <https://doi.org/10.14288/1.0080907>
7. Yamamoto T., Sakai, T., Iwahashi D. Effect of Pu-rich agglomerates in MOX fuel on reactivity analysis of light water reactor MOX core physics experiments. *Journal of nuclear science and technology*. 2017;55(4):438–449. <https://doi.org/10.1080/00223131.2017.14033>
8. Santamarina A., Bernard D., Blaise P., Coste M. [et al.]. The JEFF-3.1.1 Nuclear Data Library JEFF Report 22 Validation Results from JEF-2.2 to JEFF-3.1.1. 61 p. Available at: https://oecd-nea.org/jcms/pl_36824/the-jeff-3-1-1-nuclear-data-library?details=true (accessed: 20.01.2025).
9. Okuno H., Naito Y., Suyama K. OECD/NEA Burnup Credit Criticality Benchmarks Phase IIIB: Burnup Calculations of BWR Fuel Assemblies for Storage and Transport. NEA/NSC/DOC(2002)2. Available at: https://oecd-nea.org/science/wpncs/buc/specifications/PhaseIIIB_report.pdf (accessed: 20.01.2025).
10. Leppänen J. PSG2 / Serpent – a Continuous-energy Monte Carlo Reactor Physics Burnup Calculation Code March 5, 2012 User’s Manual. 163 p. Available at: https://serpent.vtt.fi/serpent/download/Serpent_manual.pdf (accessed: 20.01.2025).

11. Rintala V., Suikkanen H., Leppänen J., Kyrki-Rajamäki R. Modeling of realistic pebble bed reactor geometries using the Serpent Monte Carlo code. *Annals of nuclear energy*. 2015;77:223–230. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2014.11.018>

ВКЛАД АВТОРОВ:

Внуков Р.А. – постановка задачи, проведение численных расчетов, подготовка текста статьи;

Колесов В.В. – постановка задачи, подготовка текста статьи.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Работа выполнена без дополнительных источников финансирования.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликта интересов нет.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Руслан Адхамович Внуков, аспирант, старший преподаватель, ИАТЭ НИЯУ МИФИ, г. Обнинск, Калужская обл., Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0002-2048-0828>

e-mail: vnukovra@oiate.ru

Валерий Васильевич Колесов, кандидат физико-математических наук, доцент, ИАТЭ НИЯУ МИФИ, г. Обнинск, Калужская обл., Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0001-8905-1995>

e-mail: valeri-kolesov@yandex.ru

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Vnukov R.A. – problem statement, numerical calculations, preparation of the text of the article;

Kolesov V.V. – problem statement, preparation of the text of the article.

FUNDING:

No additional funding.

CONFLICT OF INTEREST:

No conflict of interest

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Ruslan A. Vnukov, Postgraduate, Senior lecturer, IATE NRNU MEPHI, Obninsk, Kaluga region, Russian Federation.

<https://orcid.org/0000-0002-2048-0828>

e-mail: vnukovra@oiate.ru

Valery V. Kolesov, Cand. Sci (Phys. Math.), Associate Professor, IATE NRNU MEPHI, Obninsk, Kaluga region, Russian Federation.

<https://orcid.org/0000-0001-8905-1995>

e-mail: valeri-kolesov@yandex.ru

Поступила в редакцию / Received 25.02.2025

После доработки / Revision 28.04.2025

Принята к публикации / Accepted 30.04.2025