

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2023-1-83-87>

УДК 621.039.5

## РАСЧЕТНЫЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ О ПРОФИЛЕ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ В ТВС РЕАКТОРА ИВГ.1М ПОСЛЕ СНИЖЕНИЯ ОБОГАЩЕНИЯ ТОПЛИВА

Р.Р. Сабитова<sup>1,2)</sup>, Ю.А. Попов<sup>1)</sup>, Р.А. Иркимбеков<sup>1)</sup>, И.В. Прозорова<sup>1,2)</sup>, С.В. Беденко<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

<sup>2)</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия

E-mail для контактов: [sabitovar@nnc.kz](mailto:sabitovar@nnc.kz)

До ввода в эксплуатацию реактора ИВГ.1М с низкообогащенным урановым топливом на физическом и энергетическом пусках были проведены экспериментальные исследования характеристик реактора, которые должны подтвердить результаты предварительных расчетных исследований и работоспособность реактора. Данная статья посвящена исследованию аксиального и радиального профиля энерговыделения в топливных сборках реактора ИВГ.1М с помощью методов внутриреакторной дозиметрии. Результаты экспериментальных исследований приведены в сравнении с результатами нейтронно-физического моделирования. Полученные коэффициенты неравномерности энерговыделения могут быть использованы в дальнейших теплотехнических расчетах.

**Ключевые слова:** ИВГ.1М реактор, энерговыделение, распределение энерговыделения, активационный метод.

### ВВЕДЕНИЕ

В рамках программы по нераспространению ядерного оружия исследовательский реактор ИВГ.1М (г. Курчатов, Казахстан) был переведен с высокообогащенного уранового топлива (90% по урану-235) на низкообогащенное (19,75% по урану-235). В результате конверсии топлива изменениям подверглись тепловыделяющие элементы реактора, сердечник которых в настоящее время представляет собой циркониевую матрицу с размещенными в ней нитями металлического урана [1].

После загрузки активной зоны реактора новым топливом осуществлялась экспериментальная оценка нейтронно-физических характеристик реактора. Необходимость данной оценки обусловлена возможностью отличия действительных параметров технологических каналов (геометрические размеры, химический и нуклидный составы) от проектных, а также от результатов нейтронно-физического моделирования.

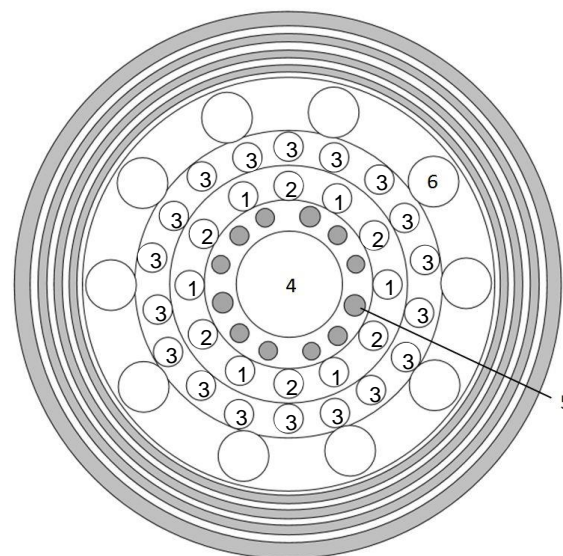
В рамках настоящей работы в ходе физического пуска реактора ИВГ.1М методами внутриреакторной дозиметрии были исследованы поля энерговыделения в ТВС. Проведен сравнительный анализ экспериментальных данных с результатами моделирования [2–3].

Исследование полей энерговыделения в топливе реактора позволяет определить наиболее энергонапряженные участки ТВС и допустимую тепловую мощность реактора, что является важным критерием с точки зрения безопасной эксплуатации реактора.

### РЕАКТОР ИВГ.1М

Исследовательский реактор ИВГ.1М представляет собой водо-водяной тепловой реактор канального типа. На реакторе ИВГ.1М проводятся испытания различных типов ТВС и отдельных конструкционных материалов.

Активная зона реактора (рисунок 1) загружена тридцатью водоохлаждаемыми технологическими каналами (ВОТК), в составе которых находятся ТВС. ВОТК распределены по трем кольцевым рядам. Высота ТВС для первого и второго рядов ВОТК составляет 800 мм, для ТВС третьего ряда ВОТК – 600 мм. Органами управления реактором служат регулирующие барабаны. Отражателем является бериллий.



1, 2, 3 – ряды ВОТК; 4 – петлевой канал; 5 – стержни компенсации реактивности; 6 – регулирующие барабаны

Рисунок 1. Активная зона реактора ИВГ.1М

### МЕТОДИКА И ПРОВЕДЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ

На физическом пуске реактора, во время которого реактор работает на минимальных уровнях мощности, соответствующее малое энерговыделение можно измерить только методами, обладающими высокой чувствительностью. В связи с соответствием распределений плотности потока тепловых нейтронов и

энерговыведения, наиболее подходящим методом исследования является активационный метод. Метод базируется на определении активности, наведенной нейтронами, в веществе топливного или активационного детектора. Преимуществами такого метода являются высокая эффективность регистрации нейтронов и возможность измерений во всем энергетическом интервале в диапазоне плотности потока нейтронов от  $10^3$  до  $10^{15}$  нейтр/(см<sup>2</sup>·с) [4–5].

Для исследования энергораспределения в ТВС реактора ИВГ.1М с низкообогащенным урановым топливом были использованы физические макеты топливных сборок для каждого ряда активной зоны. Для исследования полей энерговыведения по высоте ТВС вдоль физических макетов устанавливались медные проволочные активационные индикаторы. Для исследования радиального распределения энерговыведения в ТВС использовались топливные детекторы (фрагменты твэлов), размещенные в измерительной секции физического макета в виде решетки. Расположение топливных детекторов (выделены белой и красной краской) в измерительной секции представлено на рисунке 2.

Топливные детекторы предварительно были откалиброваны на относительное содержание урана-235. Калибровка осуществлялась относительным методом путем измерения гамма-излучения, обусловленного естественной радиоактивностью фрагментов твэлов. Измерения были проведены с помощью гамма-спектрометра с датчиком типа NaI(Tl).

Исследования полей энерговыведения проводились после облучения физических макетов в составе активной зоны реактора на пусках мощностью 400 Вт и длительностью 1000 секунд. Параметры об-

лучения выбирались из условия достаточности для измерений набора активности продуктов деления и минимизации поправок на время выхода реактора на мощность и на время его останова.

Измерения активности (интенсивности регистрации гамма-излучения) облученных активационных и топливных детекторов проводились с помощью двух сцинтилляционных гамма-датчиков с размером кристалла 5×5 см. Использование второго датчика позволило исключить поправки на спад активности со временем.

При измерении активности активационных индикаторов регистрировался пик полного поглощения <sup>64</sup>Cu с энергией 511 кэВ. При измерении активности топливных детекторов спектрометры работали в режиме одноканальных радиометров. Рабочий диапазон регистрируемых энергий гамма-излучения составлял от 0,2 до 2 МэВ. В течение всех измерений периодически проводились измерения фона.

Распределение энерговыведения определялось относительным методом – отношением активности *i*-го образца к средней активности или к активности образца-репера. В качестве реперных образцов выбирались те, которые ближе всего расположены к центру ТВС.

В случае определения распределения энерговыведения по радиусу ТВС дополнительно использовалась расчетная программа ENREDI [3], позволявшая определить величину энерговыведения в твэлах, где не проводились измерения.

Процедура выполнения измерений и алгоритм вычислений обеспечивают получение значений энерговыведения с относительной погрешностью, не превышающей 5% при доверительной вероятности 0,95.



Рисунок 2. Измерительная секция физического макета

Нейтронно-физические расчеты полей энерговыделения в реакторе ИВГ.1М были проведены с помощью программы MCNP5, относящейся к числу универсальных программ для решения задач переноса излучения в произвольной трехмерной геометрии с библиотеками констант ENDF/B-5,6.

Расчетная модель реактора ИВГ.1М [6] для программы MCNP5 максимально приближена к существующей конструкции реактора: задана реальная трехмерная геометрия расположения конструктивных материалов и твэлов.

Нейтронно-физический расчет был проведен при следующей конфигурации реактора:

- активная зона реактора состояла из 29 ВОТК и 1 физического макета;
- температура элементов конструкции активной зоны реактора принималась равной 300 К.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке 3 представлено высотное распределение энерговыделения в ТВС реактора ИВГ.1М, полученное экспериментально, в сравнении с результатами нейтронно-физического расчета. Расчетные данные были получены с помощью кода MCNP5 и модели реактора ИВГ.1М с топливом низкого обогащения.

Как видно из рисунка, кривые энергораспределения по высоте ТВС, полученные экспериментальным путем для каждого из трех рядов ВОТК, практически совпадают в пределах погрешности с результатами моделирования в диапазоне высот от 0 до 600 мм.

Для первого и второго рядов ВОТК наблюдается расхождение данных в диапазоне от 600 до 800 мм, что, скорее всего, связано с различием расчетной конфигурации реактора (температура реактора, уровень воды в канале физического макета).

Аксиальный коэффициент неравномерности энерговыделения для ТВС первого и второго рядов ВОТК, полученный экспериментально, составил 1,59, для ТВС третьего ряда – 1,28.

На рисунке 4 представлено сравнение экспериментальных и расчетных данных по распределению энерговыделения по радиусу ТВС. Кривые энергораспределения представлены для сечения, проходящего через оси реактора и ТВС (или физического макета) в направлении от центра активной зоны к периферии. Максимальное расхождение экспериментальных и расчетных значений энерговыделения в 7% отмечается в ТВС третьего ряда ВОТК. В целом, экспериментальные кривые в пределах погрешности согласуются с расчетными данными, что говорит о достоверности расчетной модели реактора.

По результатам экспериментальных исследований радиальный коэффициент неравномерности энерговыделения для ТВС первого, второго и третьего рядов ВОТК составил 1,52, 1,55 и 1,37 соответственно. Данные коэффициенты были определены для самых энергонапряженных твэлов на основании картограмм полей энерговыделения, полученных с помощью ENREDI.

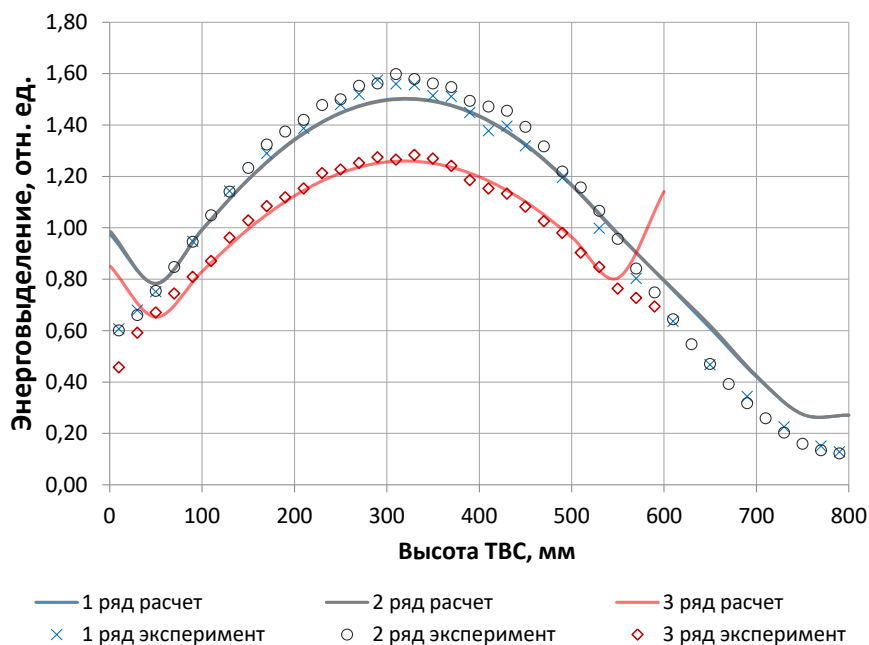


Рисунок 3. Распределение энерговыделения по высоте ТВС

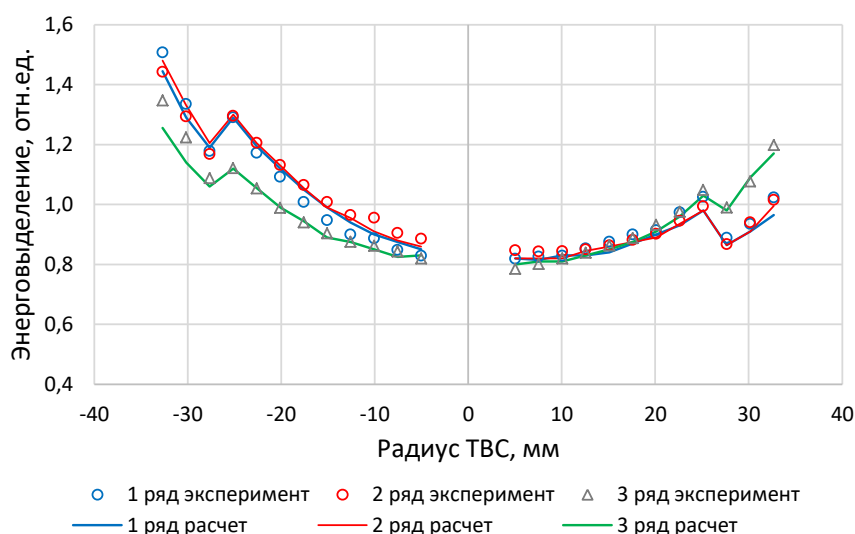


Рисунок 4. Распределение энерговыделения по радиусу ТВС

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью физических макетов ТВС ВОРК и активационного метода на этапе физического пуска были проведены исследования полей энерговыделения в топливе с низким урановым обогащением реактора ИВГ.1М. Полученные экспериментальные данные в целом согласуются с результатами предварительного нейтронно-физического моделирования, что говорит о достоверности используемой модели реактора.

Для аксиального распределения в диапазоне 600–800 мм имеются расхождения расчетных и экспериментальных данных, связанных с отличием некоторых параметров реактора, заданных в модели реактора. Данное расхождение следует проверить проведением дополнительных нейтронно-физических расчетов с уточненной конфигурацией реактора.

Полученные в результате исследований коэффициенты неравномерности энерговыделения для каждого ряда технологических каналов могут быть использованы при расчетах тепловой нагрузки реактора ИВГ.1М, а также при планировании облучательных экспериментов.

### Благодарности

Работа поддержана Министерством образования и Науки Республики Казахстан (грантовый проект № AP09259736).

### ЛИТЕРАТУРА

1. Zaytsev D.A., Repnikov V.M., Soldatkin D.M., Solntsev V.A. Studies of behavior of the fuel compound based on the U-Zr micro-heterogeneous quasialloy during cyclic thermal tests // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – Vol. 891(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/891/1/012181>
2. Жигипарова Л.К., Вурим А.Д., Котов В.М., Пахниц А.В., Иркимбеков Р.А., Байгожина А.А., Мурзагалиева

А.А., Витюк Г.А. Моделирование реактора ИВГ.1М // Вестник НЯЦ РК. – 2017. – Вып. 3. – С. 59–64.

3. R.R. Sabitova, I.V. Prozorova, R.A. Irkimbekov, Yu.A. Popov, S.V. Bedenko, A.A. Prozorov, A.K. Mukhamediyev Methods to study power density distribution in the IVG.1M research reactor after conversion // Applied Radiation and Isotopes. – 2022. – Vol. 185, 110259.
4. Казанский Ю.А., Матусевич Е.С. Экспериментальные методы физики реакторов: Учеб. пособие для вузов – М.: Энергоатомиздат. – 1984. – 272 с.
5. Ломакин С.С. Ядерно-физические методы диагностики и контроля активных зон реакторов АЭС: Учеб. пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат. – 1986. – 120 с.
6. Иркимбеков Р.А., Жигипарова Л.К., Котов В.М., Вурим А.Д., Гныря В.С. Нейтронно-физическая модель реактора ИВГ.1М: разработка и верификация по критическому состоянию // Атомная энергия. – 2019. – Том 127, №2. – С. 63–69.

### REFERENCES

1. Zaytsev D.A., Repnikov V.M., Soldatkin D.M., Solntsev V.A. Studies of behavior of the fuel compound based on the U-Zr micro-heterogeneous quasialloy during cyclic thermal tests // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – Vol. 891(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/891/1/012181>
2. Zhagiparova L.K., Vurim A.D., Kotov V.M., Pakhnits A.V., Irkimbekov R.A., Baygozhina A.A., Murzagalieva A.A., Vityuk G.A. Modelirovanie reaktora IVG.1M // Vestnik NYaTs RK. – 2017. – Issue 3. – P.59-64.
3. R.R. Sabitova, I.V. Prozorova, R.A. Irkimbekov, Yu.A. Popov, S.V. Bedenko, A.A. Prozorov, A.K. Mukhamediyev Methods to study power density distribution in the IVG.1M research reactor after conversion // Applied Radiation and Isotopes. – 2022. – Vol. 185, 110259.
4. Kazanskiy Yu.A., Matusevich E.S. Eksperimental'nye metody fiziki reaktorov: Ucheb. posobie dlya vuzov – Moscow: Energoatomizdat. – 1984. – 272 p.

5. Lomakin S.S. Yaderno-fizicheskie metody diagnostiki i kontrolya aktivnykh zon reaktorov AES: Ucheb. posobie dlya vuzov. – Moscow: Energoatomizdat. – 1986. – 120 p. reaktora IVG.1M: razrabotka i verifikatsiya po kriticheskomu sostoyaniyu // Atomnaya energiya. – 2019. – Tom 127, No. 2. – P. 63–69.
6. Irkimbekov R.A., Zhagiparova L.K., Kotov V.M., Vurim A.D., Gnyrya V.S. Neytronno-fizicheskaya model'

## ОТЫНДЫ БАЙЫТУ ТӨМЕНДЕТІЛГЕННЕН КЕЙІН ИВГ.1М РЕАКТОРЫНЫҢ ЖБҚ-да ЭНЕРГИЯ БӨЛУ ПРОФИЛІ ТУРАЛЫ ЕСЕПТІК ЖӘНЕ ЭКСПЕРИМЕНТТІК ДЕРЕКТЕР

**Р.Р. Сабитова<sup>1,2)</sup>, Ю.А. Попов<sup>1)</sup>, Р.А. Иркимбеков<sup>1)</sup>, И.В. Прозорова<sup>1,2)</sup>, С.В. Беденко<sup>2)</sup>**

<sup>1)</sup> ҚР ҰЯО РМК «Атом энергиясы институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан

<sup>2)</sup> Ұлттық зерттеу Томск политехникалық университеті, Томск, Ресей

Төмен байытылған уран отынды ИВГ.1М реакторын пайдалануға бергенге дейін физикалық және энергетикалық іске қосуларда реактордың сипаттамаларына эксперименттік зерттеулер жүргізілді, олар алдын ала есептік зерттеулердің нәтижелері мен реактордың жұмысқа жарамдылығын растауы тиіс. Бұл мақала реакторішілік дозиметрия әдісінің көмегімен алынған, ИВГ.1М реакторының отын құрамаларындағы энергия бөлудің аксиалды және радиалды профилін зерттеуге арналған. Эксперименттік зерттеулердің нәтижелері нейтрондық-физикалық модельдеу нәтижелерімен салыстырылды. Алынған энергия бөлудің бірқалыпсыздық коэффициенттері одан әрі жылу-техникалық есептеулерде пайдаланылуы мүмкін.

**Түйін сөздер:** ИВГ.1М реакторы, энергия бөлу, энергия бөлуді тарату, белсендіргіш әдіс.

## CALCULATED AND EXPERIMENTAL DATA ON ENERGY RELEASE PROFILE IN THE FUEL ASSEMBLY OF THE IVG.1M REACTOR AFTER FUEL ENRICHMENT REDUCTION

**R.R. Sabitova<sup>1,2)</sup>, Yu.A. Popov<sup>1)</sup>, R.A. Irkimbekov<sup>1)</sup>, I.V. Prozorova<sup>1,2)</sup>, S.V. Bedenko<sup>2)</sup>**

<sup>1)</sup> RSE NNC RK Branch “Institute of Atomic Energy”, Kurchatov, Kazakhstan

<sup>2)</sup> National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

Prior to the commissioning of the IVG.1M reactor with low-enriched uranium fuel, experimental studies of reactor characteristics were carried out on physical and energy start-ups, which should confirm the results of preliminary computational studies and the operability of the reactor. This article is devoted to the study of the axial and radial energy release profile in the IVG.M reactor fuel assemblies using in-reactor dosimetry techniques. The experimental results are compared with the results of neutron-physical simulations. The obtained energy release irregularity coefficients can be used in further thermo-technical calculations.

**Keywords:** IVG.1M reactor, energy release, energy release distribution, activation method.