

20. **Антропов С.Ю., Ермилов А.П., Ермилов С.А.** Методика измерения активности радионуклидов с использованием сцинтилляционного гамма-спектрометра с программным обеспечением «Прогресс». М: ООО «НТЦ "Амплитуда"», 2016, 38 с.
21. **Нормы радиационной безопасности (НРБ 99/2009): Санитарные правила и нормативы.** СанПиН 2.6.1.2523-09. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009, 100 с.
22. **Радиационный контроль и гигиеническая оценка источников питьевого водоснабжения и питьевой воды по показателям радиационной безопасности. Оптимизация защитных мероприятий источников питьевого водоснабжения с повышенным содержанием радионуклидов.** МУ 2.6.1.1981-05. М.: Роспотребнадзор, 2005, 32 с.
23. **About the Risk assessment information system** [Electronic resource]. Risk assessment information system website. Access mode: in free access. URL: <https://rais.ornl.gov> (date of the application 04.11.2023).
24. **Шандала Н.К., Титов А.В., Исаев Д.В. и др.** Оценка влияния последствий ливневых дождей на радиационную обстановку в районе расположения штольни № 16 бывшего предприятия ЛПО «Алмаз». — Медицина экстремальных ситуаций, 2017, т. 60, № 2, с. 202—207.
25. **Карпенко Е.И., Санжарова Н.И., Спиридонов С.И., Серебряков И.С.** Радиоэкологическая обстановка в районе размещения бывшего уранодобывающего предприятия ЛПО «Алмаз». — Радиация и риск, 2009, т. 18, № 4, с. 73—81.
26. **Карпенко Е.И., Спиридонов С.И.** Оценка доз облучения населения в районе расположения предприятия по добыче и переработке урановых руд. — Сб. тезисов докладов Международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы радиационной гигиены», г. Санкт-Петербург, 1—3 октября 2012 г. СПб.: ФГУН «НИИРГ им. П.В. Рамзаева», 2012, с. 72—75. — Сайт научной электронной библиотеки Elibrary. Режим доступа: по подписке. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=39233155>; на сам доклад URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=39233262&pff=1> (дата обращения 04.11.2023).
27. **Valentin J.** The 2007 recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. — Ann. ICRP, 2007, v. 37, № 2—4, 442 p.
28. **Панов А.В., Санжарова Н.И., Переволоцкий А.Н. и др.** Анализ национальной системы нормативного и правового обеспечения радиационной безопасности населения и охраны окружающей среды вблизи объектов и территорий, загрязненных техногенными и природными радионуклидами в результате прошлой деятельности. — Радиация и риск, 2017, т. 26, № 2, с. 107—121.
29. **Оценка радиационного риска при ингаляционном и пероральном поступлении радионуклидов в организм.** МР 2.6.1.0295-22. М.: Роспотребнадзор, 2022, 31 с.

Поступила в Редакцию 30.11.23

УДК 621.039.548

МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ ТРЕБОВАНИЙ К ПАРАМЕТРАМ ТВЭЛОВ РЕАКТОРА ВВЭР ПРИ ПРОВЕДЕНИИ РЕАКТОРНЫХ ИСПЫТАНИЙ С ЦИКЛИЧЕСКИМ ИЗМЕНЕНИЕМ МОЩНОСТИ

Кузнецов В.И., Еременко А.С., Авдонина Е.А. (АО «ВНИИНМ», г. Москва),

Куракин К.Ю., Филимонов П.Е. (НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва)

e-mail: EAAvdonina@bochvar.ru

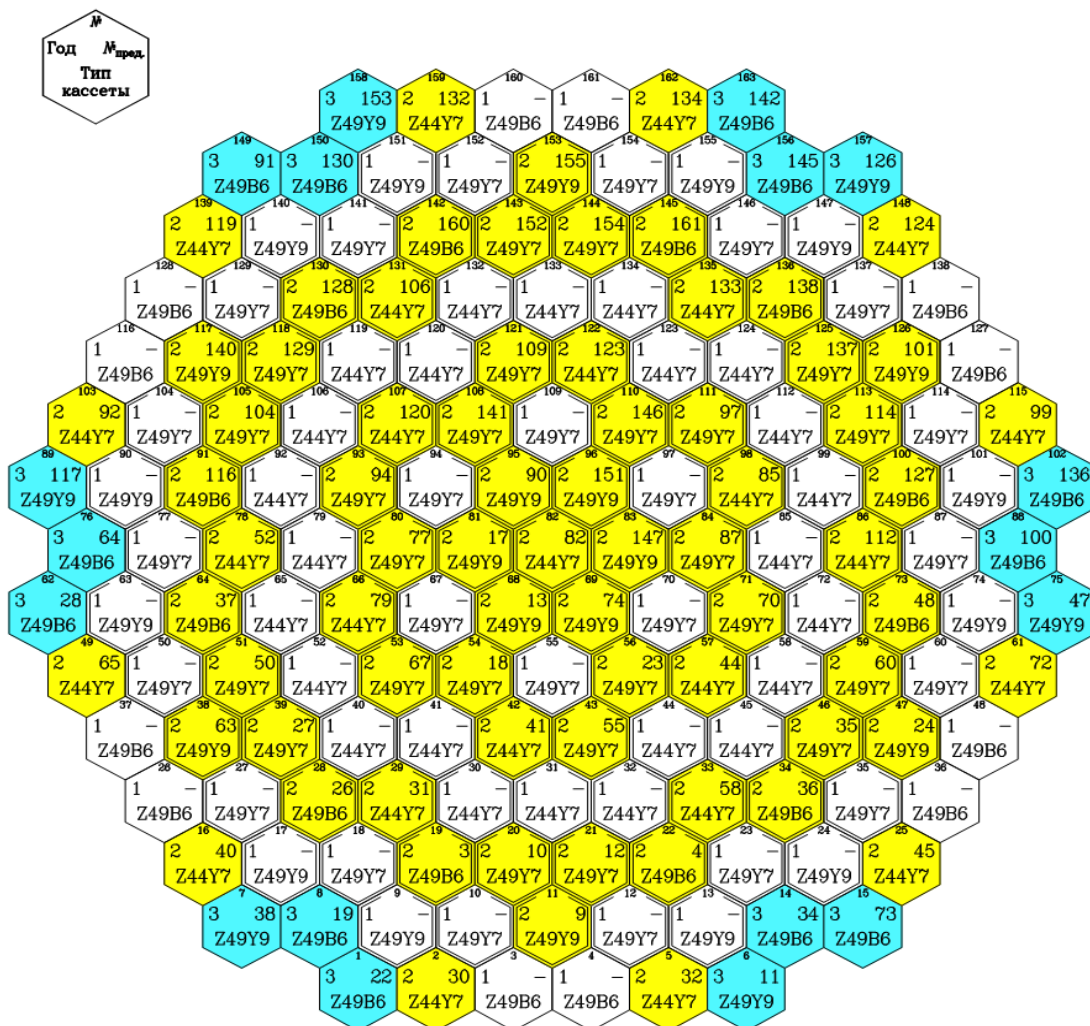
Актуальность экспериментального обоснования работоспособности ТВЭЛОВ и ТВЭГОВ отечественного производства в режимах с циклическим изменением мощности обусловлена современными требованиями, предъявляемыми к маневренным характеристикам энергоблоков АЭС с реакторами ВВЭР. Эти требования как в Российской Федерации [1], так и в странах

Европейского Союза [2] связаны с необходимостью реализации гибкого графика электрической нагрузки, а также с возможностью ее оперативного изменения. Для выполнения требований разработчик конструкции тепловыделяющих элементов должен обосновать работоспособность их конструкции во всем диапазоне проектных значений выгорания топлива.

В соответствии с федеральными нормами и правилами в области использования атомной энергии [3] обоснование работоспособности твэлов предполагает выполнение расчетов по аттестованным кодам и проведение реакторных испытаний. Последние необходимы, во-первых, для подтверждения работоспособности определенной конструкции или референтной с ней, во-вторых, для валидации проектных расчетных кодов.

В статье описана методика определения параметров твэлов реакторов ВВЭР в процессе реакторных испытаний в заданном режиме маневрирования номинальной мощностью реактора АЭС. Методика проиллюстрирована на примере одного из разработанных специалистами НИЦ «Курчатовский институт» режимов маневрирования реактора ВВЭР-1200.

Режим маневрирования реактора ВВЭР-1200. Специалисты НИЦ «Курчатовский институт» и ОКБ «Гидропресс» в рамках проведения работ по вводу в эксплуатацию и строительству блоков поколения III+ (ВВЭР АЭС-2006 и ВВЭР-ТОИ) как в России, так и за рубежом разработали ряд топливных циклов и режимов маневрирования мощностью, которые учитывают специфику компаний по выработке электроэнергии и требования национальных электрических сетей. Методика определения локальных параметров изменения мощности твэлов в условиях маневрирования проиллюстрирована на одном из вариантов стационарной топливной загрузки — целевом блоке с реактором ВВЭР-1200 (рис. 1).



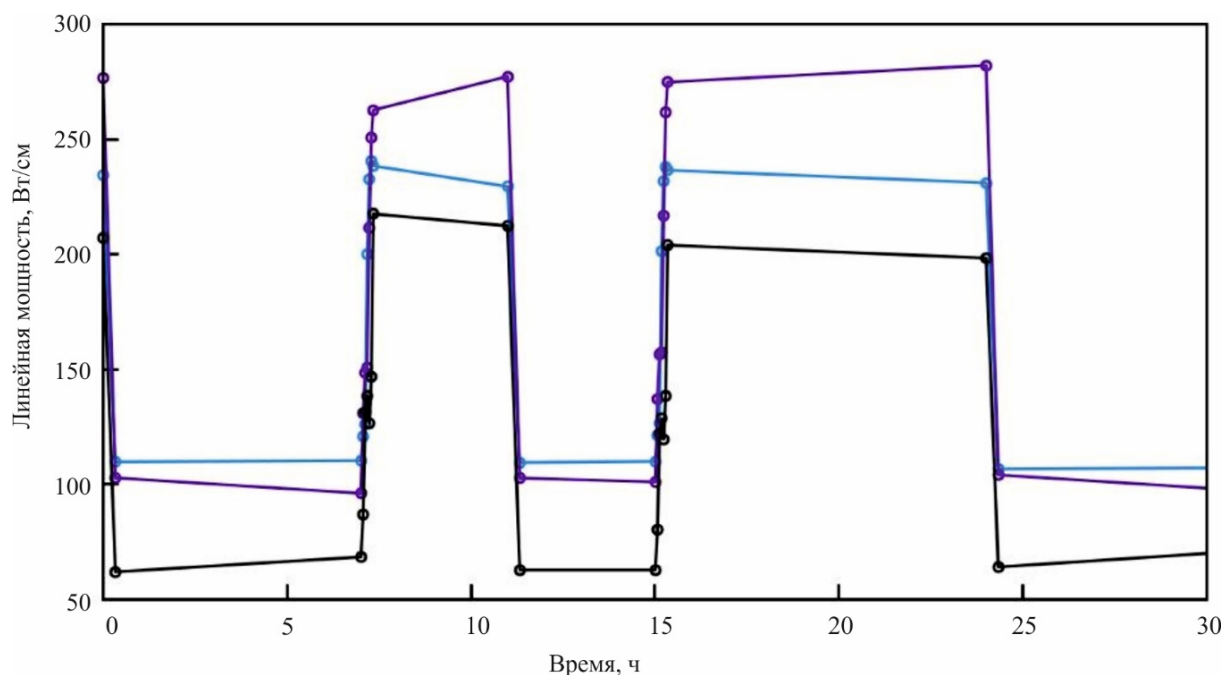
Р и с. 1. Картограмма загрузки целевого блока в стационарном режиме перегрузок с указанием ТВС первого (⬡), второго (⬢), третьего года (⬣)

Топливный цикл реактора представляет собой три кампании длительностью 18 месяцев. Продление кампании на 60 эф. сут обеспечивается за счет температурного и мощностного коэффициентов реактивности. Для рассматриваемой стационарной топливной загрузки подгрузка составляет 72 тепловыделяющие сборки, среднее расчетное по активной зоне выгорание топлива по высоте твэга и твэла в осевом слое (по радиусу топливной таблетки) — 58,5 и 72,2 МВт·сут/кг урана, максимальное — 64,3 и 78,9 МВт·сут/кг урана соответственно.

Для целевого блока с реактором ВВЭР-1200 разработали режим маневрирования с двукратным суточным циклом изменения мощности. Алгоритм ее изменения представлял собой снижение в ночное и дневное время и подъем в утреннее и вечернее. При этом значение

мощности в периоды (ч: мин) 00:00—06:40 и 11:00—14:40 составляло 40% от номинальной, а в 07:00—10:40 и 15:00—23:40 — 100% от номинальной. Скорость изменения мощности — 3% от номинальной в минуту, время изменения мощности — около 20 мин.

Определение алгоритма циклического изменения линейной мощности в процессе испытаний в реакторе МИР. Разное выгорание топлива характеризуется существенным различием в диапазоне изменения линейной мощности в процессе маневрирования, из чего следует, что для каждого твэла скорость изменения линейной мощности не будет совпадать со скоростью изменения номинальной мощности реактора. Из-за неравномерности профиля выгорания скорость будет разной в различных сечениях по высоте одного и того же твэла (рис. 2).



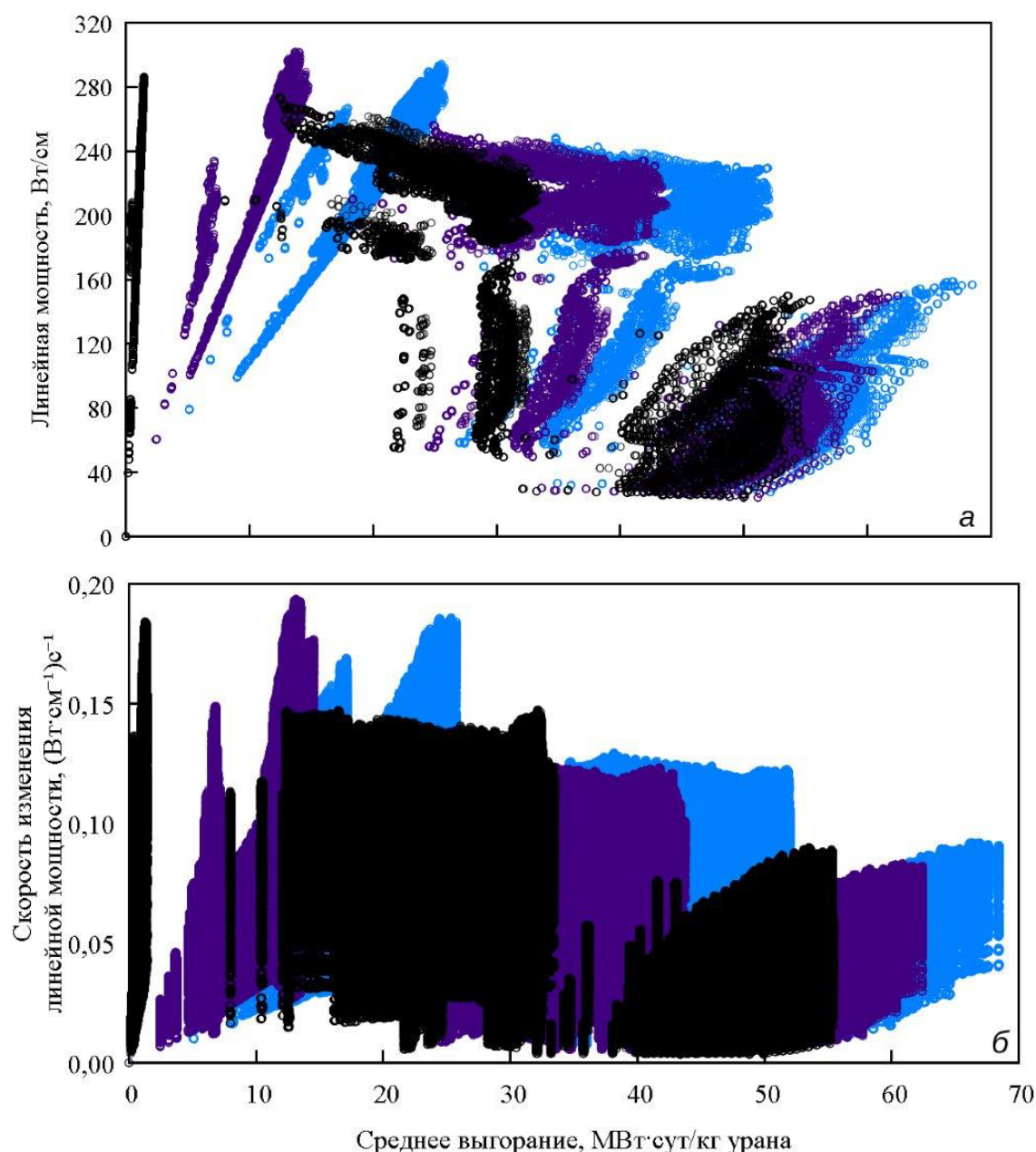
Р и с. 2. Изменение линейной мощности в переходном режиме в нижнем (—), среднем (—) и верхнем сечении (—) по высоте наиболее энергонапряженного твэла

Определение скорости изменения линейной мощности твэлов в процессе реакторных испытаний, моделирующих условия маневрирования, является основной задачей при разработке сценария эксперимента, другими словами, скорость изменения номинальной мощности реактора необходимо конвертировать в локальные параметры

твэла в процессе испытаний. На основании нейтронно-физических характеристик, подготовленных специалистами НИЦ «Курчатовский институт», с помощью программного кода СТАРТ-3А [4] проведены потвэльные расчеты линейной мощности твэлов для целевого блока с реактором ВВЭР и скорости ее изменения

в заданных условиях маневрирования в зависимости от выгорания топлива (рис. 3). Локальную

скорость изменения линейной мощности определяли для 37 сечений по высоте каждого ТВЭла.



Р и с. 3. Изменение максимальной линейной мощности (а) и скорости изменения линейной мощности (б) ТВЭлов в переходном режиме в зависимости от их среднего выгорания на 20 (■), 240 (■) и 430 сут (■)

Результаты послереакторных исследований [5] показали, что при выгорании топлива около 30 МВт·сут/кг урана наступает механическое взаимодействие топлива и оболочки ТВЭлов, при этом вероятность их разгерметизации возрастает с увеличением глубины выгорания, поскольку условия контакта становятся более жесткими, а релаксационные возможности

ТВЭлов снижаются [6]. Поэтому в качестве объектов исследований в условиях исследовательского реактора в режиме циклического изменения мощности следует выбирать ТВЭлы с выгоранием 30—70 МВт·сут/кг урана. Для ТВЭлов с выгоранием 30—52 МВт·сут/кг урана скорость изменения линейной мощности не превышает $0,15 \text{ (Вт} \cdot \text{см}^{-1}) \text{ с}^{-1}$, для ТВЭлов с

более высоким выгоранием — $0,09 \text{ (Вт} \cdot \text{см}^{-1}) \text{ с}^{-1}$ (см. рис. 3, б). Опираясь на полученные предельные значения, а также учитывая выбор объектов исследований и консерватизм расчетов, принимаемый конструктором твэлов, разрабатывают сценарий реакторного эксперимента и определяют его параметры. Аналогичный подход может быть использован не только для определения характеристик твэлов реактора ВВЭР в условиях нормальной эксплуатации, но и при планировании экспериментов, моделирующих режим нарушения условий нормальной эксплуатации.

Заключение. С целью лицензирования топлива отечественного производства в российских и зарубежных надзорных органах разработана методика формирования требований к скорости изменения линейной мощности твэлов реакторов ВВЭР при проведении испытаний в исследовательском реакторе, позволяющая конвертировать номинальные эксплуатационные характеристики в локальные параметры твэлов в ходе реакторного эксперимента. Методика дает возможность в рамках испытаний твэлов и твэгов в исследовательском реакторе воссоздавать условия эксплуатации ядерного топлива, наиболее приближенные к проектным требованиям, что, в свою очередь, позволяет получить экспериментальные значения характеристик исследуемых тепловыделяющих элементов для обеспечения расчетно-экспериментального обоснования работоспособности твэлов и твэгов реакторов ВВЭР. Полученные экспериментальные данные будут использованы для валидации и верификации расчетных кодов.

Разработанная методика может быть использована для определения локальных параметров твэлов в ходе реакторного эксперимента, моделирующего условия нарушения нормальной эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Энергетическая** стратегия Российской Федерации на период до 2035 года, утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 9 июня 2020 г., № 1523-Р, 92 с. [Электронный ресурс]. Официальный сайт Правительства Российской Федерации. Режим доступа: в открытом доступе. URL: <http://static.government.ru/media/files/w4sigFOiDjGVDYT4IgsApssm6mZRb7wx.pdf> (дата обращения 06.12.2023).
2. **Non-baseload** operation in nuclear power plants: load following and frequency control modes of flexible operation. NP-T-3.23. Vienna, Austria: IAEA, 2018, 176 p.
3. **Основные** требования к обоснованию прочности и термомеханического поведения тепловыделяющих сборок и тепловыделяющих элементов в активной зоне водородных энергетических реакторов. НП-094-15. М: ФБУ «НТЦ ЯРБ», 2015, 36 с.
4. **Аттестационный** паспорт программного средства 238 от 18.04.2013, Российская Федерация [Электронный ресурс]. СТАРТ-3А: программное средство для расчетов характеристик твэлов ядерных энергетических реакторов на тепловых нейтронах: программа для электронных вычислительных машин. Официальный сайт ФБУ «НТЦ ЯРБ». Режим доступа: в открытом доступе. URL: https://www.secnrs.ru/expertise/software-review/8_C_2021.pdf (дата обращения 06.12.2024).
5. **Боков А.А., Павлов С.В., Теплов В.Г.** Особенности изменения свободного объема твэлов ВВЭР-1000 в зависимости от выгорания топлива. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерно-реакторные константы, 2023, № 1, с. 159—169.
6. **Андреев В.И., Колядин В.И., Яковлев В.В.** Методологические аспекты изучения поведения твэлов в нестационарных режимах. — Атомная техника за рубежом, 1985, № 3, с. 3—7.

Поступила в Редакцию 05.12.23