

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА РЕГУЛЯРНОГО ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЯ В КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ ОТРАЖАТЕЛЯ РЕАКТОРА ИР-8

С.Е. Арефинкина, А.Н. Абрамов, А.В. Бабенко, Д.Ю. Ерак,  
П.К. Ефремов, О.В. Михин, В.В. Яковлев

*НИЦ «Курчатовский институт»,  
123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1*



Рассмотрен подход к определению величины тепловыделения в образцах конструкционных материалов нестационарным методом регулярного теплового режима. Представлен вывод рабочего уравнения, которое может использоваться для оперативного нахождения средней величины тепловыделения при расположении термопары в «критическом» радиусе цилиндрического образца.

Приведены полученные с использованием предложенного метода результаты определения тепловыделения в образцах из нержавеющей стали и титана, облучавшихся в третьем ряду отражателя реактора ИР-8 НИЦ «Курчатовский институт». Используемое экспериментальное устройство и цилиндрические образцы были инструментированы термопарами. Показано хорошее согласование результатов с данными, полученными при использовании других расчетных подходов к определению тепловыделения в образцах.

Предложенный метод оперативного экспериментального определения тепловыделения может применяться при проведении различных реакторных экспериментов. В качестве одного из вариантов рассмотрена возможность использования метода для контроля параметров образцов опытных твэлов или имитаторов твэлов при их облучении в ампульном устройстве. В случае для имитатора твэла с сердечником из вольфрама выбор места установки термопар нужно проводить, учитывая положение «критической» точки цилиндра, нестационарный тепловой процесс в которой проходит только в регулярной форме. Данные таких исследований могут использоваться как для экспресс-контроля параметров облучения в процессе эксперимента, так и для верификации расчетных моделей, описывающих поведение образцов при их испытаниях в ампульных устройствах.

**Ключевые слова:** регулярный тепловой режим, определение тепловыделения, инструментация термопарами, конструкционные материалы, опытные твэлы, ампульное устройство, исследовательский реактор.

**Для цитирования:** *Арефинкина С.Е., Абрамов А.Н., Бабенко А.В., Ерак Д.Ю., Ефремов П.К., Михин О.В., Яковлев В.В.* Использование метода регулярного теплового режима для определения тепловыделения в конструкционных материалах отражателя реактора ИР-8. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2023. – № 4. – С. 73-85. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2023.4.06>

## **ВВЕДЕНИЕ**

В статье представлен подход к определению величины тепловыделения в образцах конструкционных материалов нестационарным методом регулярного теплового режима.

Методы теплофизического исследования при переходных нестационарных процессах в реакторе (например, периоды запуска, изменение мощности и другие) применяются, в частности, для получения информации о состоянии твэлов. Данные подходы могут использоваться и при испытаниях конструкционных материалов. Достоинством нестационарных методов является слабая чувствительность результатов измерения к точности градуировки датчиков температуры. Одним из направлений в данном случае является использование метода регулярного теплового режима [1].

Закономерности регулярного режима теплообмена при нагреве и охлаждении широко используются для определения теплофизических свойств материалов [2–4]. Такие исследования проводились в различных областях науки и техники, в том числе и в реакторных экспериментах [1, 5, 6].

В данной работе для верификации метода регулярного теплового режима и обоснования возможности его применения для оценки величины тепловыделения в образцах использовались экспериментальные данные, полученные при облучении конструкционных материалов в исследовательском реакторе ИР-8 НИЦ «Курчатовский институт».

## **КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ МЕТОДА РЕГУЛЯРНОГО РЕЖИМА**

Исследования и теоретическая разработка нестационарного метода регулярного теплового режима проводились Г.М. Кондратьевым [2–4]. При наступлении регулярного режима закон изменения температуры имеет простую экспоненциальную форму. Сущность метода заключается в построении в полулогарифмическом масштабе избыточной температуры, которая представляет собой разность измеряемой температуры тела после ступенчатого возмущения внешней температуры (или тепловой нагрузки) и температурой среды. Важным при анализе данных с использованием метода является определение так называемого темпа регулярного режима. Это величина, которая позволяет дать общую характеристику оценки быстроты реакции тела или системы на воздействие окружающей среды. Обратной к темпу регулярного режима величиной, имеющей размерность времени, является показатель инерции образца [3].

## **ПОЛУЧЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ**

Для оценки величины тепловыделения в конструкционных материалах с применением метода регулярного теплового режима использовались экспериментальные значения изменения при нестационарных процессах температуры соответствующих образцов, облучавшихся в ячейках отражателя реактора ИР-8.

ИР-8 – это исследовательский реактор бассейнового типа максимальной тепловой мощностью 8 МВт. На реакторе ИР-8 создана исследовательская облучательная база с использованием вертикальных каналов в активной зоне и в отражателе реактора, которая позволяет проводить облучение конструкционных материалов и опытных твэлов [7, 8]. Для получения данных о температуре исследуемых образцов в режиме реального времени при проведении реакторных экспериментов образцы могут быть оснащены (инструментированы) термопарами (ТП).

В данной работе значения температуры используются в качестве входных параметров при проведении дальнейших расчетов величины тепловыделения в образцах. Оценки тепловыделения являются основной целью текущего исследования. При этом корректность получения данных о температуре образцов в процессе реакторных экспериментов чрезвычайно важна (погрешности таких измерений могут влиять на рассчитанную в дальнейшем величину тепловыделения), и этому вопросу необходимо уделять должное внимание.

В ядерных реакторах применяются разнообразные методы контроля температуры, которые описаны в технической литературе [9–11]. При этом измерения температуры при помощи термопар получили наибольшее распространение [10, 12]. Термопары используются в разнообразных реакторных экспериментах, в частности, они применяются для контроля температуры как теплоносителя, так и твэлов [10, 13].

Наиболее распространенными для среднего диапазона температур являются термопары с электродами хромель-алюмель (ХА), для высоких температур (до 2200°C) – с вольфрам-рениевыми термоэлектродами [9, 10].

Погрешности измерения температуры термопарами включают в себя как обычные, так и специфические, которые свойственны только реакторным условиям [9]. Погрешности измерения температуры складываются из погрешности термокомплекта (которая характеризует отличие температуры чувствительного элемента от показаний прибора) и методической погрешности. Методическая погрешность определяется отличием неискаженной температуры в точке контроля от температуры чувствительного элемента, а также от искажения температурного поля объекта, вносимого термометрическим устройством [11]. Также при использовании термопар в ядерном реакторе возникают специфические погрешности, вызванные реакторным излучением. Эффекты, возникающие в термопарах под воздействием излучения, и их влияние на точность показаний ТП начали изучать достаточно давно [14]. Проводившиеся исследования показывают, что реакторное облучение приводит к появлению мгновенного и интегрального эффектов в термопарах [10]. Также на результаты измерений температуры влияет инерция термопары и объекта контроля.

Все вышеперечисленные факторы нужно учитывать при использовании результатов измерения температуры, полученных в реакторных экспериментах при помощи термопар, а также принимать во внимание при итоговых оценках тепловыделения в образцах. Нужно отметить, что для уточнения погрешности измерения температуры термопарами при испытаниях, проводимых на каждой конкретной реакторной установке, необходима реализация дополнительных экспериментов.

При проведении работ по изучению тепловыделения в конструкционных материалах отражателя реактора ИР-8 были использованы специальные экспериментальные устройства (ЭУ). ЭУ состояли из опытного образца в форме цилиндра с внешним диаметром 39 мм, оснащенного тремя термопарами, экспериментального канала, заполненного воздухом и бериллиевым блоком, служащим внешним вытеснителем воды, поступающей из бассейна реактора. Для контроля температуры воды использовались две термопары, находящиеся на входе и выходе потока воды экспериментального устройства. В эксперименте применялись термопары типа ХА.

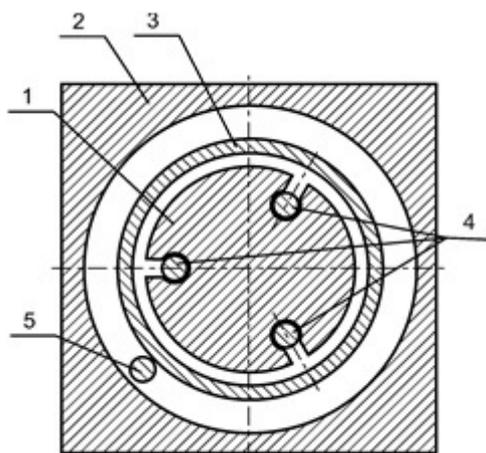


Рис.1. Схема сечения ЭУ с опытными образцами: 1 – исследуемый (опытный) образец; 2 – бериллиевый блок отражателя (вытеснитель); 3 – «сухой» канал, заполненный воздухом; 4 – термопары, измеряющие температуру внутри образца; 5 – термопара, контролирующая температуру воды

В третьем ряду отражателя реактора было исследовано два типа экспериментальных образцов, изготовленных из нержавеющей стали (облучался в ячейке 8-5) и титана (облучался в ячейке 8-3). Образцы и отверстия под термопары в них были изготовлены с большой (микронной) точностью методом электроэрозии. Подробное описание устройства приводится в работе [15]. Схема сечения ЭУ приводится на рис. 1.

Для расчетов с помощью метода регулярного теплового режима использовались результаты измерений температуры образцов, проводившихся в течение нескольких часов при нестационарных процессах, вызванных ступенчатым изменением мощности реактора.

В термопарах могут возникать погрешности, вызванные воздействием реакторного излучения. Согласно данным работы [14], мгновенные эффекты в термопарах

становятся значимыми при плотности потока тепловых нейтронов, превышающей  $\sim 2 \cdot 10^{13}$  нейтрон/(см<sup>2</sup>·с). В проводившемся эксперименте влияние мгновенных эффектов является незначительным, так как плотность потока тепловых нейтронов в третьем ряду отражателя реактора с размещенным в нем экспериментальным устройством не превышала указанной выше величины. Интегральные эффекты в термопарах появляются после набора достаточно большой дозы облучения [14], поэтому их влияние не учитывалось вследствие краткосрочности испытаний.

Возможное изменение калибровки термопар за счет мгновенных эффектов, возникающих в ТП под облучением, в данном случае не играет существенной роли, так как при расчете величины тепловыделения учитывается разница показаний одной и той же термопары в разные моменты времени в рамках текущего шага изменения мощности (подробнее рассмотрено далее).

### **ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ОБРАЗЦА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕСТАЦИОНАРНОГО ПРОЦЕССА, ВЫЗВАННОГО ИЗМЕНЕНИЕМ МОЩНОСТИ РЕАКТОРА**

В ходе эксперимента мощность реактора ИР-8 повышалась ступенями 0,5–1 МВт. В работе подробно рассмотрены данные для последней ступени подъема мощности реактора в интервале 3,9–4,8 МВт, имевшей достаточное время для перехода в стационарное тепловое состояние (менее 100 с). Время выдержки на данной ступени составляло более 6000 с.

На рисунках 2 и 3 приводятся хронограммы записи показаний термопар в образцах, исследовавшихся в ячейках 8-3 и 8-5.

При анализе данные температуры цилиндрического образца, полученные во время нагрева, были формально заменены на изменение температуры при остывании в соответствии с рекомендацией работ [2, 3, 16, 17]. При этом на каждой ступени подъема мощности определялась максимальная величина зафиксированной температуры  $T_{\max}$  для каждой термопары и в полулогарифмическом масштабе наносилась

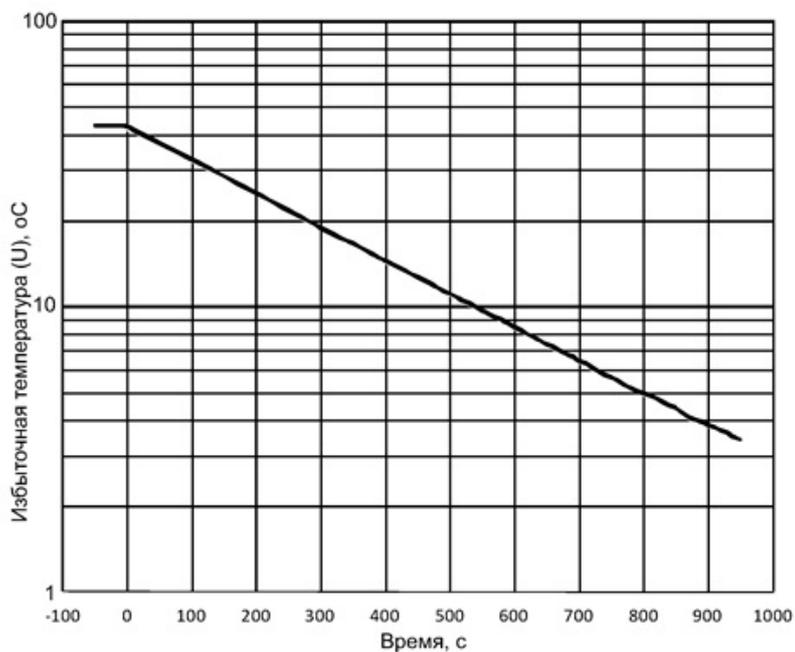


Рис. 2. Показания терморпары, преобразованные в соответствии с уравнением (1) для образца, проходившего облучение в ячейке 8-3, после подъема тепловой мощности реактора в диапазоне 3,9–4,8 МВт

величина избыточной температуры, которая определялась по зависимости

$$U = T_{\max} - T(t), \quad (1)$$

где  $T(t)$  – зафиксированные значения температур по показаниям терморпар.

Графическое отображение экспериментальных данных температуры в полулогарифмическом варианте может быть описано линейной зависимостью от времени, что

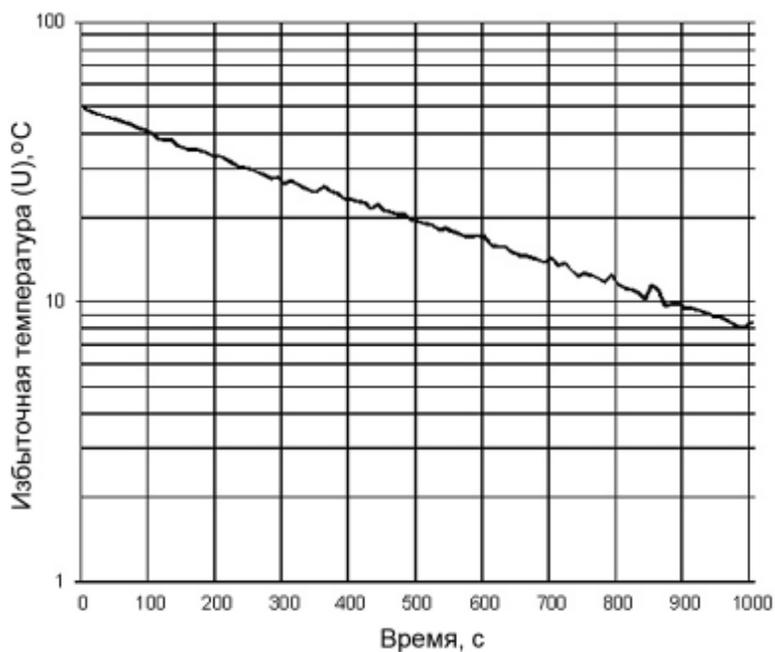


Рис. 3. Показания терморпары, преобразованные в соответствии с уравнением (1) для образца, проходившего облучение в ячейке 8-5, после подъема тепловой мощности реактора в диапазоне 3,9–4,8 МВт

свидетельствует о наступлении регулярного режима. На рисунках 2, 3 регулярность теплового процесса проиллюстрирована для временного интервала длительностью около 1000 с. В том случае, когда термопара располагается в «критической» точке (радиусе) цилиндра (по терминологии работы [3]), после повышения мощности реактора регулярный режим начинается с самого начала процесса (при  $t=0$ ). Именно такое расположение термопар в образцах имело место при их облучении в отражателе реактора ИР-8.

Упрощенное выражение для определения «критического» радиуса цилиндра (при малой величине критерия  $Bi \rightarrow 0$ ) может быть записано в виде [3]

$$R_{кр} = 1 / \sqrt{2} R_0, \quad (2)$$

где  $R_0$  – радиус цилиндра.

### МЕТОД ОПЕРАТИВНОГО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОТЫДЕЛЕНИЯ В МАТЕРИАЛЕ ОБРАЗЦОВ

Математически зависимость для избыточной температуры представлена в следующем виде [2, 3] для  $t \geq 0$ :

$$U(t) = T_{\max}(r) - T(r, t) = U_0 \exp(-m \cdot t), \quad (3)$$

где  $U_0 = T_{\max}(r) - T(r, 0)$  – максимальная избыточная температура;  $T(r, t)$  – текущее значение температуры цилиндра (по показаниям термопар);  $T_{\max}(r, \infty)$ ,  $T(r, 0)$  – соответственно конечное (максимальное для данной ступени) значение температуры (при нагреве) и начальное значение;  $t$  – текущее время;  $m$  – темп регулярного режима [2].

Факт расположения термопары в «критическом» радиусе цилиндра позволяет провести следующие преобразования. Для времени  $t = 0$  определяем производную по времени, дифференцируя уравнение (3):

$$\frac{dT(0)}{dt} = m \cdot U_0. \quad (4)$$

Для цилиндра связь температуры с тепловыделением можно найти в работах [2, 16–18], где решение для нагрева находилось методом собственных функций:

$$\theta(r, t) = T(r, t) - T(r, 0) = q_v \cdot \frac{R_0^2}{\lambda} \sum_{n=1}^{n=\infty} A_n J_0(\mu_n \cdot r) \frac{1}{\mu_n^2} (1 - e^{-t/\tau_n}), \quad (5)$$

где  $q_v$  – тепловыделение;  $T(r, 0)$  – начальная температура;  $R_0$  – радиус цилиндра;

$$A_n = \frac{2 \cdot J_1(\mu_n)}{\mu_n \cdot [J_0^2(\mu_n) + J_1^2(\mu_n)]} \text{ при } \tau_0 > \tau_1 > \tau_2 \dots \tau_n; \mu_n - \text{корни уравнения } J_0(\mu)/J_1(\mu) =$$

$= \mu/Vi$ , где  $Vi$  – число Био;  $J_0$ ,  $J_1$  – функции Бесселя первого рода соответственно нулевого и первого порядка;  $r = R/R_0$  – переменный радиус;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $t$  – текущее время;  $\tau_n = 1/m_n$  – период релаксации (величина инерции).

Уравнение (5) удобнее и нагляднее использовать для экспериментального определения темпа регулярного режима в форме охлаждения. В этом случае выражение будет иметь вид

$$\theta(r, t) = T_{\max}(r) - T(r, t) = q_v \cdot \frac{R_0^2}{\lambda} \sum_{n=1}^{n=\infty} A_n J_0(\mu_n \cdot r) \frac{1}{\mu_n^2} (1 - e^{-t/\tau_n}), \quad (6)$$

где  $T_{\max}(r)$  – конечная максимальная температура для данной ступени.

При возможности определения производной по экспериментальной зависимости для времени  $t = 0$ :

$$\frac{d\theta(r,0)}{dt} = \frac{dT(r,0)}{dt} = q_v \cdot \frac{1}{C_p \cdot \rho} \sum_{n=1}^{n=\infty} A_n J_0(\mu_n \cdot r). \quad (7)$$

С учетом аналитических решений тепловых задач [3, 18], содержащих тепловыделение для цилиндра, для времени  $t = 0$  выражение суммирования в уравнении (7)

имеет вид  $\sum_{n=1}^{n=\infty} A_n J_0(\mu_n \cdot r) = 1$ . Тогда последнее уравнение преобразуется в следующее:

$$\frac{dT(r,0)}{dt} = q_v \cdot \frac{1}{C_p \cdot \rho}. \quad (8)$$

Подставляя из выражения (4) зависимость для производной по времени в уравнение (8), окончательно получим рабочее уравнение, которое может использоваться для оперативного нахождения средней величины тепловыделения, при расположении термопары в «критическом» радиусе цилиндрического образца:

$$q_v = \frac{dT(0)}{dt} \cdot (C_p \cdot \rho) = m \cdot U_0 \cdot (C_p \cdot \rho), \quad (9)$$

где  $\rho$  – плотность материала;  $C_p$  – удельная теплоемкость материала.

Представленный метод разработан в приближении постоянной по объему образца плотности тепловыделения. Так как на практике чаще всего встречаются случаи неравномерного распределения плотности внутренних источников тепла в исследуемых образцах, то обозначенное выше допущение необходимо учитывать при интерпретации рассчитанных по уравнению (9) значений  $q_v$  с использованием предложенного метода регулярного теплового режима в случае расположения термопары в «критическом» радиусе цилиндрического образца.

### **ВЕРИФИКАЦИЯ МЕТОДА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ**

Возможность применения уравнения (9) для определения тепловыделения в образцах  $q_v$  была продемонстрирована с использованием соответствующих экспериментальных данных. Необходимые физические свойства материалов образцов [19] были взяты для середины диапазона изменения температуры, соответствующего последней ступени подъема мощности реактора (3,9–4,8 МВт). Данные для этой ступени приведены в табл. 1. Для каждой из предыдущих ступеней подъема мощности значения температуры образцов, соответствующие стационарному состоянию, определялись расчетным путем (с использованием экстраполяции экспериментальных данных).

На рисунке 4 приведены результаты определения с использованием уравнения (9) тепловыделения в образцах для всех ступеней при подъеме мощности реактора в процессе пуска 22.06.22. Для финальной ступени мощности приведено сравнение рассчитанных значений тепловыделения с данными работы [15], где  $q_v$  определяли с использованием других расчетных подходов. Из представленных графиков видно, что полученные результаты достаточно хорошо согласуются между собой.

В результате применения описанной выше методики были найдены величины тепловыделения в конструкционных материалах в ячейках 8-3 и 8-5 третьего ряда отражателя. Значения, нормированные на единицу плотности образца и максимальной мощности реактора (эффективность ячейки), составили

- для ячейки 8-5 отражателя  $0,071 \pm 0,007$ , Вт/гр МВт;
- для ячейки 8-3 отражателя  $0,081 \pm 0,008$ , Вт/гр МВт.

Погрешность определения величины тепловыделения в образцах в данном случае составляет ~ 10–15 %.

**Физические данные для материалов образцов, облучавшихся в ячейках 8-5 и 8-3**

Параметр	Значение для ячейки 8-5, материал образца – нержавеющая сталь	Значение для ячейки 8-3, материал образца – титан
Диапазон изменения температуры образцов по показаниям термопар, °С	408 – 457,	327 – 370,
Средняя температура, °С	433	348
Диапазон изменения тепловой мощности реактора для рассматриваемой ступени подъема, МВт	3,9 – 4,8	3,9 – 4,8
Время выхода на ступень / выдержки на данной ступени мощности реактора, с	менее 100 / более 6000	менее 100 / более 6000
Плотность материала $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	7800	4500
Удельная теплоемкость материала $C_p$ , Дж/(кг °С)	550	578
Параметр инерции (темп регулярного режима, рис. 2 и 3), 1/с	$1,82 \cdot 10^{-3}$	$2,7 \cdot 10^{-3}$

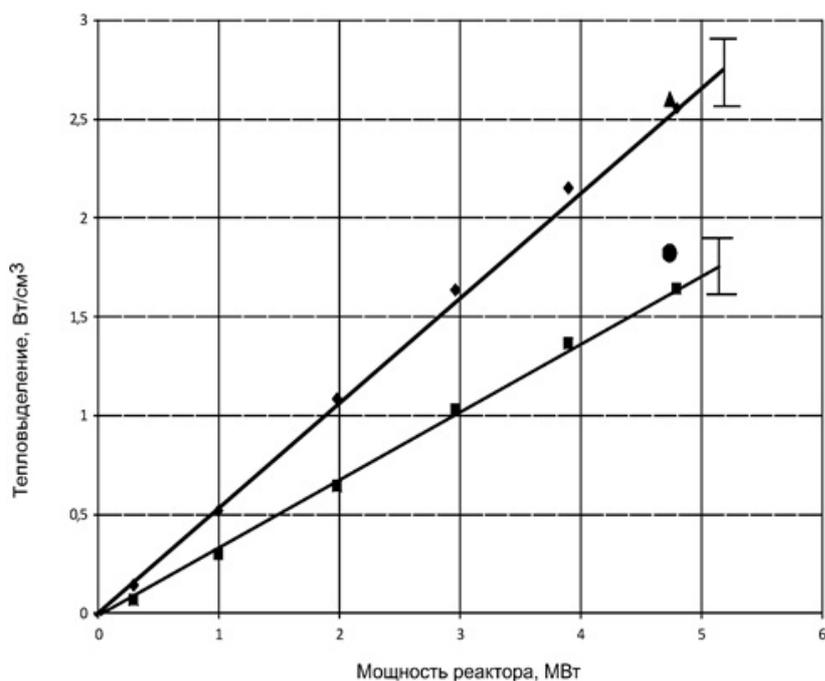


Рис. 4. Результаты определения тепловыделения в образцах по показаниям термопар в ячейках 8-5 (нержавеющая сталь) и 8-3 (титан) для различных ступеней мощности реактора:  $\blacklozenge$  – Нестационар, 8-5, сталь, 22.06.22;  $\blacktriangle$  – [15], 8-5, сталь, 27.06.22;  $\blacksquare$  – Нестационар, 8-3, титан, 22.06.22;  $\bullet$  – [15], 8-3, титан, 27.06.22

Как показывают результаты экспериментов и расчетов, нормированное на единицу плотности материала и мощности реактора тепловыделение в конструкционных материалах в ячейке 8-3 несколько больше, чем в ячейке 8-5, что вызвано более близким ее расположением к центру активной зоны.

## **ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ДАЛЬНЕЙШЕМУ ПРАКТИЧЕСКОМУ ИСПОЛЬЗОВАНИЮ МЕТОДА ОПЕРАТИВНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛО ВЫДЕЛЕНИЯ**

Рассмотренный в данной работе метод определения тепловыделения в материалах может практически применяться, например, для контроля параметров образцов опытных твэлов или имитаторов твэлов при их облучении в ампульном устройстве (АУ). В настоящее время прорабатывается возможность проведения на реакторе ИР-8 испытаний АУ с цилиндрическими имитаторами твэлов с сердечником из вольфрама. Целью эксперимента является получение данных о работоспособности оболочек твэлов проектируемых установок ВВЭР-СКД (водо-водяной энергетический реактор со сверхкритическими параметрами теплоносителя). Рассматриваются имитаторы твэлов с сердечником из вольфрама и оболочками из кандидатных материалов для твэлов ВВЭР-СКД.

При установке термопар в сердечнике из вольфрама можно получить в процессе реакторного эксперимента чрезвычайно важные данные для экспресс-оценки уровня тепловыделения в имитаторе твэла. Знание величины тепловыделения в образцах в данном случае важно для корректности проведения теплогидравлических расчетов.

Выбор места установки термопар в вольфраме стоит проводить, учитывая положение «критической» точки цилиндра (см. выражение (4)), нестационарный тепловой процесс в которой проходит только в регулярной форме. Для имитатора твэла особенно представительными полученные данные могут быть в случае одновременной инструментации при помощи термопар как сердечника, так и оболочки испытываемого образца. Способы инструментации имитатора твэла должны быть отдельно проработаны в процессе конструирования АУ с учетом результатов тепловых расчетов [20].

Помимо возможности проведения экспресс-контроля параметров облучения в процессе эксперимента данные таких исследований могут использоваться для верификации расчетных моделей, описывающих поведение образцов при их испытаниях в ампульных устройствах.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В статье приведены описание и верификация подхода к оперативному контролю величины тепловыделения в цилиндрических образцах нестационарным методом регулярного теплового режима.

Для облучавшихся в третьем ряду отражателя реактора ИР-8 образцов из нержавеющей стали и титана нестационарным методом была определена величина тепловыделения, которая составила для стали  $0,45 \text{ Вт}/(\text{см}^3 \text{ МВт})$  и для титана  $0,35 \text{ Вт}/(\text{см}^3 \text{ МВт})$ .

В качестве преимуществ описанного в данной работе метода можно отметить относительную простоту и быстроту определения величины тепловыделения в образцах по полученным экспериментальным данным. Предложенный метод может быть использован как самостоятельно для оперативных оценок экспериментальных параметров образцов, так и служить дополнением к другим расчетным подходам определения тепловыделения в конструкционных материалах.

Авторы благодарят В.Н. Мурашова за огромную помощь при подготовке и обсуждении материалов статьи.

**Литература**

1. Кокорев Л.С., Харитонов В.В. Теплогидравлические расчеты и оптимизация ядерных энергетических установок: Учеб. пособие для вузов / Под ред. В.И. Субботина. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 248 с.
2. Кондратьев Г.М. Регулярный тепловой режим. – М: ГИТТЛ, 1954. – 408 с.
3. Ярышев Н.А. Теоретические основы измерения нестационарной температуры. – Ленинград: Энергоатомиздат, 1990. – 255 с.
4. Кондратьев Г.М., Дульнев Г.Н., Платунов Е.С., Ярышев Н.А. Прикладная физика: Теплообмен в приборостроении. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2003. – 560 с.
5. Ерак Д.Ю., Яковлев В.В., Мурашов В.Н., Насонов В.А., Буслаев В.С., Можаяев А.А., Михин О.В., Ничипоренко Ю.Б. Развитие техники ускоренных радиационных испытаний конструкционных материалов с использованием уникальной установки – реактора ИР-8. Препринт ИАЭ-6648/4. – М.: НИЦ «КИ», 2010. – 29 с.
6. Мурашов В.Н., Кокорев Л.С., Яковлев В.В. Расчетно-экспериментальное исследование температур в центре твэлов с топливом из двуокиси урана. Препринт ИАЭ-2936. – М., 1978. – 23 с.
7. Яковлев В.В., Ерак Д.Ю., Абрамов А.Н., Буслаев В.С., Кочкин В.Н., Михин О.В., Можаяев А.А., Мурашов В.Н., Насонов В.А., Ничипоренко Ю.Б., Песня Ю.Е., Хмызов Н.В., Яшин А.Ф. Техника и методы испытаний конструкционных материалов на исследовательском реакторе ИР-8. // ВАНТ. Физика ядерных реакторов. – 2017. – Вып. 3. – С. 58-64.
8. Яковлев В.В., Ерак Д.Ю., Гончаров Л.А., Киселев Алексей С., Кругликов А.Е., Михин О.В., Насонов В.А., Песня Ю.Е., Седов А.А., Хмызов Н.В., Чабак А.Ф., Яшин А.Ф. Техника и методика исследований в реакторе ИР-8 опытных твэлов с разными топливными композициями. // ВАНТ. Физика ядерных реакторов. – 2017. – Вып. 3. – С. 49-57.
9. Лысинов Б.В., Прозоров В.К. Термометрия и расходомерия ядерных реакторов. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 120 с.
10. Самойлов А.Г., Волков В.С., Солонин М.И. Тепловыделяющие элементы ядерных реакторов: Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1996. – 400 с.
11. Емельянов И.Я., Михан В.И., Солонин В.И. Конструирование ядерных реакторов: Учеб. пособие для вузов / Под общ. ред. акад. Н.А. Доллежалея. – М.: Энергоиздат, 1982. – 400 с.
12. Сулаберидзе В.Ш. Средства контроля условий испытаний материалов и изделий атомной техники в исследовательских реакторах. – Дисс. д-ра техн. наук. – Димитровград: ГНЦ НИИАР, 1999.
13. Усачев В.Б., Зайцев П.А., Мельников Г.Н., Приймак С.В. Влияние эксплуатационных факторов на показатель тепловой инерции термодар в каналах термоконтроля теплоносителя на выходе из кассет энергоблока АЭС с ВВЭР / Сб. трудов VIII международной научно-технической конференции «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР». – Подольск: ОКБ «ГИДРОПРЕСС», 2013.
14. Маркина Н.В., Цыканов В.А. Особенности измерения температур с помощью термодар в высокопоточных реакторах. // Атомная энергия. – 1974. – Т. 36. – Вып. 1. – С. 72—73.
15. Трофимчук В.В. и др. Определение энерговыделения от гамма излучения в экспериментальных каналах реактора ИР-8. // ВАНТ. Физика ядерных реакторов. – 2022. – Вып. 5. – С. 20-29.
16. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967. – 599 с.
17. Галин Н.М., Кириллов П.Л. Тепломассообмен в ядерной энергетике. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 375 с.
18. Петухов Б.С., Генин Л.Г., Ковалев С.А. Теплообмен в ядерных энергетических установках. М.: Атомиздат, 1974. – 408 с.
19. Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники. – М.: Атомиздат, 1986 – 484 с.
20. Абрамов А.Н., Арефинкина С.Е., Герстле А.Д., Ефремов П.К., Михин О.В., Мурашов В.Н. Моделирование параметров ПИД-регулятора нагревателя в ампульном реакторном эксперименте / Сб. аннотаций XVII Курчатовской молодежной научной школы. – М.: НИЦ «КИ», 2023. – 269 с.

Поступила в редакцию 17.06.2023

**Авторы:**

Арефинкина Светлана Евгеньевна, научный сотрудник,

E-mail: Arefinkina\_SE@nrcki.ru

Абрамов Александр Николаевич, начальник группы,

E-mail: Abramov\_AN@nrcki.ru

Бабенко Алексей Викторович, начальник бюро,

E-mail: Babenko\_AV@nrcki.ru

Ерак Дмитрий Юрьевич, начальник отдела, д.т.н.,

E-mail: Erak\_DY@nrcki.ru

Ефремов Павел Константинович, инженер,

E-mail: Efremov\_PK@nrcki.ru

Михин Олег Викторович, начальник лаборатории,

E-mail: Mikhin\_OV@nrcki.ru

Яковлев Владимир Васильевич, заместитель начальника отдела, к.т.н.,

E-mail: Yakovlev\_VV@nrcki.ru

UDC 621.039.553.3

## **Regular Thermal Mode Method to Determine the Heat Release in the Structural Materials of the IR-8 Reactor Reflector**

Arefinkina S.E., Abramov A.N., Babenko A.V., Erak D.Yu., Efremov P.K., Mikhin O.V., Yakovlev V.V.

NRC «Kurchatov Institute»,

1 Akademika Kurchatova sq., Moscow, 123182, Russia

### ABSTRACT

The non-stationary method of regular thermal regime is considered as an approach to determine the value of heat release in structural materials samples. We present the derivation of a working equation that can be used to promptly find the average heat release when thermocouple is located at the «critical» radius of cylindrical sample.

The data received by the proposed method of determining the heat release in stainless steel and titanium samples that were irradiated in the third reflector row of the IR-8 reactor of NRC «Kurchatov Institute» are presented. The experimental device and cylindrical samples were instrumented by thermocouples. A good agreement of the results with the data from other computational approaches for determining the heat release in the samples is shown.

The proposed method of on-line experimental determination of heat release can be applied when conducting various reactor experiments. The possibility of using this method to monitor the parameters of experimental fuel rod samples or fuel rod simulators while they are irradiated in the ampoule device has been considered. In case of a tungsten-core fuel rod simulator, the choice of thermocouple location should be made with regard to the position of its «critical» point in the cylinder, where the unsteady thermal process takes place only in a regular form. These data can be used both for express control of irradiation parameters during experiment as well as for verification of calculation models which describe the specimens behavior during their testing in ampoule devices.

**Key words:** regular thermal mode, energy release determination, instrumentation by thermocouples, structural materials, fuel rods samples, ampoule device, research reactor

**For citation:** Arefinkina S.E., Abramov A.N., Babenko A.V., Erak D.Yu., Efremov P.K., Mikhin O.V., Yakovlev V.V. Regular Thermal Mode Method to Determine the Heat Release in the Structural Materials of the IR-8 Reactor Reflector. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2023, no. 4, pp. 73-85; DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2023.4.006> (in Russian).

## REFERENCES

1. Kokorev L.S., Haritonov V.V. *Thermohydraulic calculations and optimization of nuclear installations: Textbook. A manual for universities* (ed. V.I. Subbotin). Moscow. Energoatomizdat Publ., 1986, 248 p. (in Russian).
2. Kondrat'ev G.M. *Regular thermal mode*. Moscow, GITTL Publ., 1954, 408 p. (in Russian).
3. Yaryshev N.A. *Theoretical foundations for measuring non-stationary temperature*. Leningrad, USSR. Energoatomizdat Publ., 1990, 255 p. (in Russian).
4. Kondrat'ev G.M., Dul'nev G.N., Platunov E.S., Yaryshev N.A. *Applied physics: Heat transfer in instrument making*. SPb. SPbGU ITMO Publ., 2003, 560 p. (in Russian).
5. Erak D.Yu., Yakovlev V.V., Murashov V.N., Nasonov V.A., Buslaev V.S., Mozhaev A.A., Mikhin O.V., Nichiporenko Yu.B. *Development of technology for accelerated radiation testing of structural materials using a unique installation – the IR-8 reactor*. Preprint IAJe-6648/4. Moscow, NITs «KI» Publ., 2010, 29 p. (in Russian).
6. Murashov V.N., Kokorev L.S., Yakovlev V.V. *Experimental-computational study of temperature in the center of fuel rods with fuel from uranium dioxide*. Preprint IAJe-2936, Moscow. NITs «KI» Publ., 1978, 23 p. (in Russian).
7. Yakovlev V.V., Erak D.Yu., Abramov A.N., Buslaev V.S., Kochkin V.N., Mikhin O.V., Mozhaev A.A., Murashov V.N., Nasonov V.A., Nichiporenko Yu.B., Pesnya Yu.E., Khmyzov N.V., Yashin A.F. Techniques and methods for testing structural materials at the IR-8 research reactor. *VANT. Fizika yadernykh reaktorov*. 2017, iss. 3, pp. 58-64 (in Russian).
8. Yakovlev V.V., Erak D.Yu., Goncharov L.A., Kiselev Aleksei S., Kruglikov A.E., Mikhin O.V., Nasonov V.A., Pesnya Yu.E., Sedov A.A., Khmyzov N.V., Chabak A.F., Yashin A.F. Techniques and methods of research in the IR-8 reactor of experimental fuel rods with different fuel compositions. *VANT. Fizika yadernykh reaktorov*. 2017, iss. 3, pp. 49-57 (in Russian).
9. Lysikov B.V., Prozorov V.K. *Thermometry and flow metering of nuclear reactors*. Moscow. Energoatomizdat Publ., 1985. 120 p. (in Russian).
10. Samoilov A.G., Volkov V.S., Solonin M.I. *Fuel elements of nuclear reactors: Textbook for universities*. Moscow. Energoatomizdat Publ., 1996. 400 p. (in Russian).
11. Emel'yanov I.Ya., Mikhin V.I., Solonin V.I. *Design of nuclear reactors: Textbook. manual for universities under general. ed. acad. N.A. Dollezhall*. Moscow, Energoizdat Publ., 1982. 400 p. (in Russian).
12. Sulaberidze V.Sh. *Means for monitoring testing conditions for materials and nuclear equipment products in research reactors*. Dr. Eng. Diss. Dimitrovgrad. GNTs NIIAR Publ., 1999 (in Russian).
13. Usachev V.B., Zajcev P.A., Mel'nikov G.N., Prijmak S.V. Influence of operational factors on thermal inertia of thermocouples in coolant thermal control channels at the outlet from power generating units of atomic power plants with PWR reactors. *Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Scientific and Technical Conference «Safety assurance of NPP with VVER»*. Podol'sk, Russia. OKB «GIDROPRESS», 2013 (in Russian).
14. Markina N.V., Tsykanov V.A. Temperature measurement in high-flux reactors using thermocouples. *Atomic energy*. 1974, vol. 36, iss. 1, pp. 84-86. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01123116>
15. Trofimchuk V.V., Nasonov V.A., Erak D.Yu., Pesnja Yu.E., Kruglikov A.E., Mikhin O.V. Determination of the gamma release from gamma radiation in the experimental channels of the IR-8 reactor. *VANT. Fizika yadernykh reaktorov*. 2022, iss. 5, pp. 20-29 (in Russian).
16. Lykov A.V., Cherkosov G.N., Vol'f Je., Breus S.N., Golovashkin A.A., Shubin A.A., Motulevich G.P., Dzenkins T., Dzhouns P., Kingsli-H'juz Je., Kingsli-H'juz K., Makkuin K., Mor S. *Theory of thermal conductivity*. Moscow. High School Publ., 1967, 599 p. (in Russian).
17. Galin N.M. Kirillov P.L. *Heat and mass transfer in nuclear power*. Moscow. Energoatomizdat Publ., 1987, 375 p. (in Russian).

18. Petuhov B.S., Genin L.G., Kovalev S.A. *Heat transfer in nuclear power plants*. Moscow. USSR. Atomizdat Publ., 1974, 408 p. (in Russian).

19. Chirkin V.S. *Thermophysical properties of nuclear engineering materials*. Moscow. Atomizdat Publ., 1986, 484 p. (in Russian).

20. Abramov A.N., Arefinkina S.E., Gerstle A.D., Efremov P.K., Mihin O.V., Murashov V.N. Simulation of PID-Controller Parameters of a Heater in an Ampoule Reactor Experiment. *Abstracts proceedings of the XVII Kurchatov youth scientific school*. Moscow. 2023, 269 p. (in Russian).

#### Authors

Svetlana E. Arefinkina, Researcher,

E-mail: Arefinkina\_SE@nrcki.ru

Aleksandr N. Abramov, Head of Group,

E-mail: Abramov\_AN@nrcki.ru

Aleksey V. Babenko, Head of Bureau,

E-mail: Babenko\_AV@nrcki.ru

Dmitriy Yu. Erak, Head of Department, Dr. Sci. (Engineering),

E-mail: Erak\_DY@nrcki.ru

Pavel K. Efremov, Engineer,

E-mail: Efremov\_PK@nrcki.ru

Oleg V. Mikhin, Head of Laboratory,

E-mail: Mikhin\_OV@nrcki.ru

Vladimir V. Yakovlev, Deputy Head of Department, Cand. Sci. (Engineering),

E-mail: Yakovlev\_VV@nrcki.ru