

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ФИЗИКА  
ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ

УДК 621.039.553

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ  
ИНЕРЦИИ ТЕРМОПАР В РАМКАХ ДОРЕАКТОРНЫХ ИСПЫТАНИЙ  
ОБРАЗЦОВ ОПЫТНЫХ ТВЭЛОВ

© 2024 г. С. Е. Арефинкина<sup>а, \*</sup>, А. Н. Абрамов<sup>а</sup>, А. В. Бабенко<sup>а</sup>, А. Д. Герстле<sup>а</sup>, Н. А. Дмитриева<sup>а</sup>,  
Д. Ю. Ерак<sup>а</sup>, П. К. Ефремов<sup>а</sup>, О. В. Михин<sup>а</sup>, Ю. Б. Ничипоренко<sup>а</sup>, В. В. Яковлев<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва, 123182 Россия

\*E-mail: Arefinkina\_SE@nrcki.ru

Поступила в редакцию 26.10.2023 г.

После доработки 28.10.2023 г.

Принята к публикации 31.10.2023 г.

При исследовании свойств кандидатных материалов твэлов проектируемых ядерных энергетических установок важнейшую роль играет проведение реакторных экспериментов. Для получения информации об изменении температуры образцов опытных твэлов в режиме реального времени их инструментуют термопарами. Корректность проводимых измерений зависит от различных факторов, существенным среди которых является качество заделки термопары на поверхности испытываемого образца. В рамках подготовки проведения топливных экспериментов на реакторе ИР-8 НИЦ “Курчатовский институт” необходимо проведение дореакторных испытаний опытных твэлов и их макетов. В статье рассмотрен расчетно-экспериментальный метод, применение которого позволяет получить значения инерции термопар, закрепленных на объекте контроля различными способами. Требования к инерционности термопар, используемых при испытаниях, определяются, исходя из параметров изучаемых нестационарных процессов. Сравнение значений суммарной инерции закрепленных термопар и экспериментального макета также можно использовать для выводов о качестве заделки. Для отработки предлагаемого метода определения инерции был создан специальный лабораторный стенд, на котором были получены экспериментальные значения для термопар, закрепленных на поверхности образца двумя способами. Приведено описание и результаты апробации аналитической модели для определения погрешности измерений температуры образца при помощи термопар. Рассмотрены возможности использования разработанного расчетно-экспериментального метода при подготовке реакторных исследований опытных твэлов.

*Ключевые слова:* дореакторные испытания, опытные твэлы, термопары, инерция, инструментация твэлов, аналитическая модель, погрешность измерений температуры

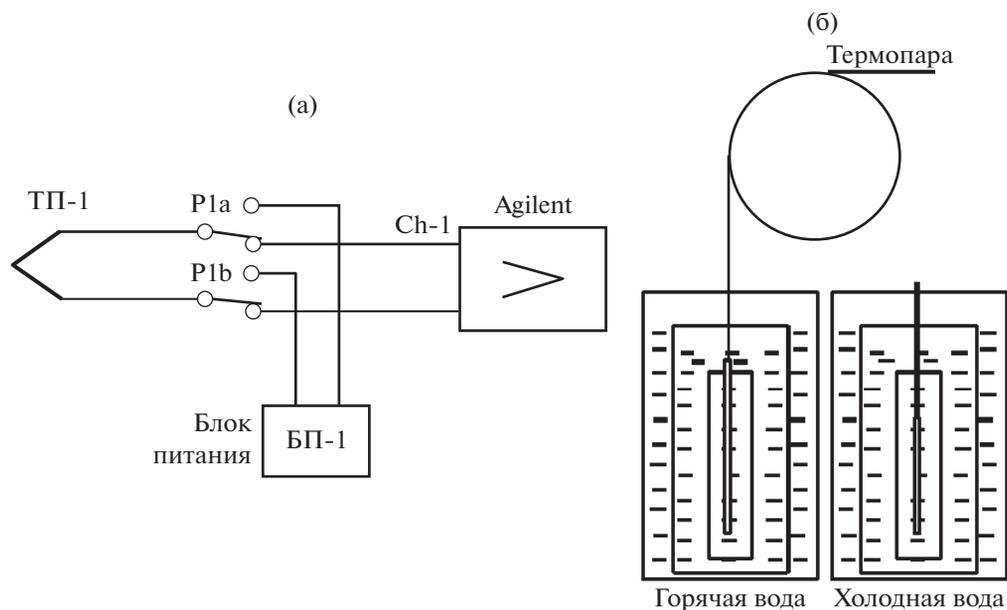
DOI: 10.56304/S2079562924050026

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в России и в других странах ведутся работы по улучшению характеристик ядерного топлива для легководных атомных энергетических установок. Важнейшую роль при исследовании свойств материалов новых топливных композиций и кандидатных оболочек твэлов играют реакторные испытания. В процессе реакторного эксперимента важно получать корректную информацию об изменении температуры образцов опытных твэлов в режиме реального времени. Для достижения данной цели опытные твэлы, в частности, инструментуются термопарами (ТП).

В рамках подготовки экспериментов с перспективными топливными материалами на реакторе ИР-8 НИЦ “Курчатовский институт” [1, 2] пла-

нируется реализация комплекса дореакторных исследований опытных твэлов и их макетов. Среди проводимых работ – проверка качества заделки термопар на оболочке опытного твэла. В данной работе представлено описание расчетно-экспериментального метода, применение которого позволило получить значения инерции термопар, закрепленных на объекте контроля различными способами. В рамках разработки метода были получены экспериментальные данные, а также опробована расчетная модель, позволяющая оценивать значение отклонения показаний термопар с использованием аналитического решения. Полученные результаты предлагается использовать, в частности, для сравнения качества заделки ТП на поверхности испытываемых образцов.



**Рис. 1.** Схема стенда: (а) иллюстрация режима электронагрева; (б) схема с переносом термопары из одних условий в другие.

### АКТУАЛЬНОСТЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Термопары (термоэлектрические преобразователи) получили широкое применение в реакторной технике для контроля температуры теплоносителя, температуры твэлов (как оболочки, так и топлива) и используются в разнообразных реакторных экспериментах. Наиболее распространенными для среднего диапазона температур являются термоэлектрические преобразователи с электродами хромель-алюмель (ХА). Заделка термопары должна гарантировать плотное прижатие к контактирующей поверхности и прочное крепление ТП к объекту контроля [3, 4]. Предполагается, что наличие даже малого зазора (заполненного, например, воздухом или в состоянии вакуума) между чувствительным элементом термопары и поверхностью может привести к искажению сигнала в процессе измерения температуры.

В литературе описаны многочисленные и разнообразные способы заделки термоэлектрических преобразователей, предназначенных для измерения температуры поверхности твэла. Их можно разделить на три основные группы: заделка ТП в дистанционирующее ребро; крепление ТП без углубления в оболочку; заделка ТП с углублением в оболочку [3, 4].

Реализация способа заделки для обеспечения точности и надежности измерений температуры опытных твэлов при помощи термопар в специфических условиях конкретного реакторного эксперимента представляет собой задачу, требующую отдельно проработанных решений. Требования к инерционности используемых термопар опреде-

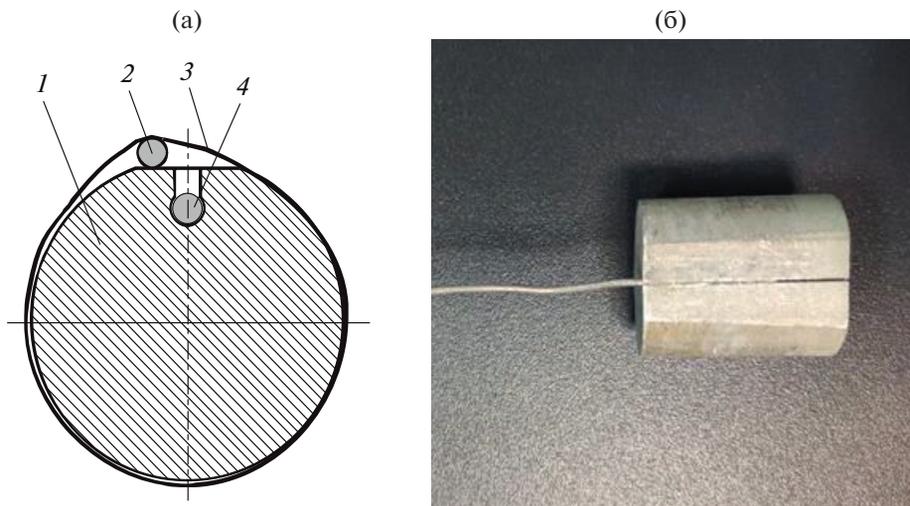
ляются исходя из параметров изучаемых нестационарных процессов. Это особенно важно при необходимости определения во время реакторного эксперимента начала кризиса теплообмена, а также режима пониженного теплообмена, когда исследования проводятся в замкнутом объеме специального ампульного устройства. Обеспечение качества и выбор способа заделки термопар становится в данном случае отдельной задачей, учитывая соотношения толщин оболочек твэлов и возможных диаметров ТП. Также надлежащее качество заделки необходимо для обеспечения надежности и необходимой точности измерений в процессе эксперимента при воздействии внешних факторов, таких, как реакторное излучение, температура, давление, взаимодействие со средой теплоносителя.

### ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ И ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЙ

Для отработки предлагаемого метода определения инерции термопар был создан лабораторный стенд. На стенде проведены тепловые исследования экспериментального образца с установленными в него термопарами.

Схема стенда приводится на рис. 1. Регистрация показаний термопар производилась при помощи мультиметра Agilent и записывались в файл.

Для проведения нестационарных исследований термопар в рамках лабораторных испытаний (рис. 1) переходные процессы вызывались следующими способами:



**Рис. 2.** Экспериментальный образец: (а) схема сечения образца: 1 – корпус образца; 2 – термопара, контролирующая температуру поверхности; 3 – хомут, прижимающий термопару к поверхности образца; 4 – термопара, измеряющая температуру поверхности, в пазу; (б) общий вид образца с установленной в паз термопарой.

- перенос термопар из горячей (до 50°C) воды в воздух (с комнатной температурой);
- перенос из воздуха в горячую воду;
- перенос из воды с одной температурой в воду с другой температурой;
- ступенчатый (импульсный) электронагрев одной из термопар при нахождении в воздухе или воде.

Экспериментальный образец представлял собой цилиндр из алюминия диаметром 23 мм и длиной 32 мм. С его поверхности была снята часть металла, что создало лыску вдоль всей поверхности образца. В теле образца, в точке, близкой к его поверхности, было вырезано круглое отверстие диаметром 1.05 мм с технологическим прорезом шириной 0.4 мм по всей длине образца (далее – паз). После обработки поверхность паза имела значительную шероховатости Ra не более 3.2 мкм. В данном случае это существенно, потому что, как уже отмечалось, при креплении ТП необходимо добиваться максимального контакта чувствительного элемента термопары с поверхностью.

Крепление термопар к образцу производилось двумя способами: при помощи хомута и заделкой в паз. Хомут был изготовлен из нержавеющей про-

волоки толщиной 0.1 мм. Схема вариантов крепления термопар и внешний вид образца с ТП, заделанной в паз, приводятся на рис. 2.

Для исследований использовались термопары ХА с внешним диаметром 1.0 и 0.35 мм (в пазу могли исследоваться только термопары с диаметром 1.0 мм). Основные параметры термопар приводятся в табл. 1.

На рис. 3 показаны экспериментально полученные значения собственной инерции термопар в зависимости от их внешнего диаметра, варианта исполнения, условий измерений (табл. 1).

Из данных, представленных на рис. 3, видно, что изолированная термопара (№ 4) имеет большую инерцию (период релаксации), чем другие неизолированные термопары.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ СОСТАВЛЯЮЩАЯ МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИНЕРЦИИ ТЕРМОПАР

Для определения собственной инерции термопар вначале проводилось исследование свободных ТП. После крепления термопары для определения ее инерции относительно образца использо-

**Таблица 1.** Параметры термопар

№ ТП и наличие изоляции относительно оболочки	Для термопары в оболочке: – длина, м\– диаметр, мм	Сопротивление ТП, общее/хромель/алюмель, Ом
1, неизолирована	25\1	929/674/259
3, неизолирована	25\1	935/678/258
4, изолирована	25\1	918/–
9, неизолирована	0.94\0.35	250/178/83

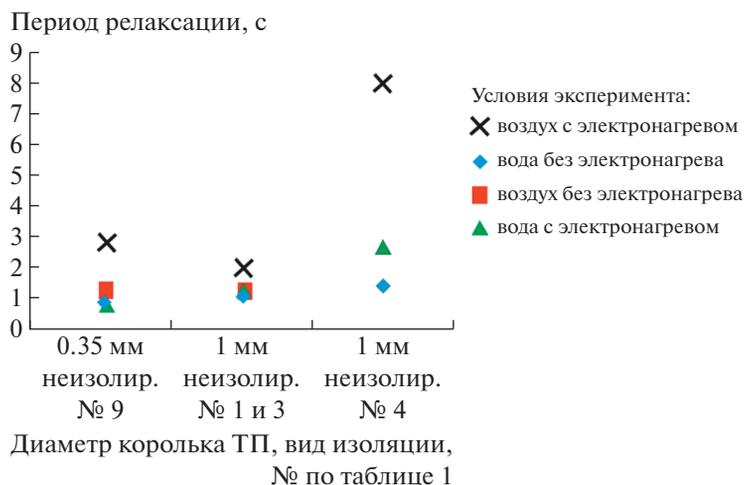


Рис. 3. Инерция термопар в зависимости от их внешнего диаметра, варианта исполнения, условий измерений.

вался метод электронагрева. При выборе величины подаваемой мощности учитывались значения сопротивления и размеров термопар, качество заделки на образце. Для термопары № 1 уровень мощности, задававшейся на источнике питания, приводится на рис. 4. Чтобы избежать повреждения термопар в процессе проверки каждое исследование начиналось с малой величины подаваемого напряжения.

Нужно отметить, что данные, приведенные на рис. 4, соответствуют характеристикам и размерам термопары № 1 (табл. 1). Для термопар с другими характеристиками значения подаваемой мощности могут отличаться. Это нужно учитывать при определении величины сигнала, подаваемого на термопару, для каждого конкретного эксперимента.

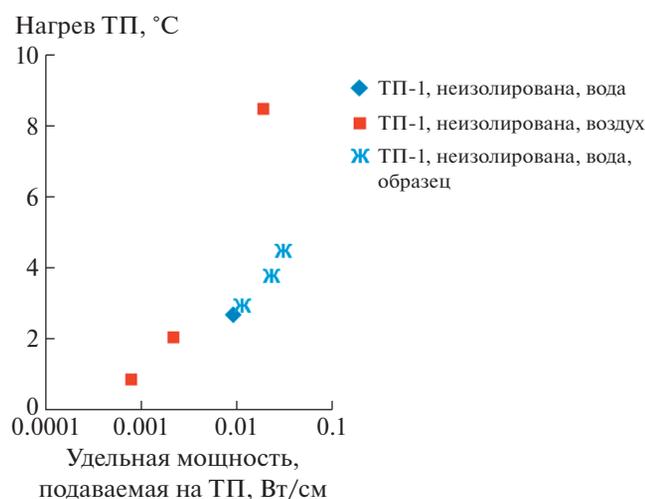


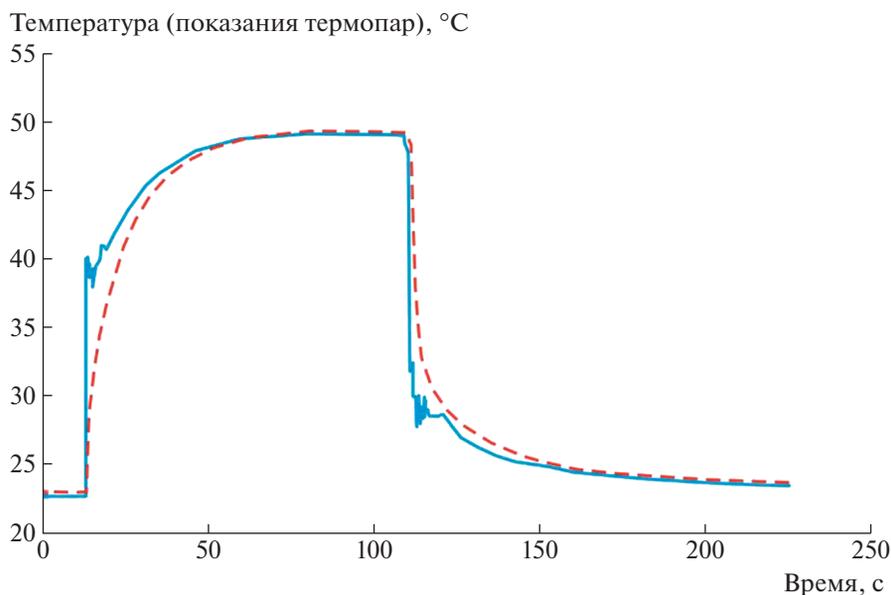
Рис. 4. Зависимость электронагрева термопары № 1 от удельной мощности и внешних условий.

После определения инерции заделанной термопары, экспериментально находили инерцию системы “ТП-Объект контроля”. Для этого макет (образец с заделанной ТП) исследовался при резком изменении температуры среды (рис. 1б).

#### ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

На рис. 5 в качестве примера приводятся результаты измерения температуры в пазу образца и под хомутом при изменении температуры окружающей среды, вызванного переносом из холодного воздуха ( $\sim 23^\circ\text{C}$ ) в теплую воду (до  $\sim 49^\circ\text{C}$ ), с выдержкой в ней до установления стационарного состояния и последующего переноса в холодную воду.

Из рис. 5 видно, что график показаний термопары № 4, расположенной в пазу образца, более четкий и сглаженный по сравнению с показанием ТП № 3, закрепленной при помощи хомута. Термопара, прижимаемая хомутом к поверхности макета имеет хороший тепловой контакт (сильная тепловая связь) с водой и слабую тепловую связь с образцом (по классификации работы [5]). Это определяет очень быстрый подогрев термопары до уровня  $\sim 40^\circ\text{C}$ , затем, после некоторых колебаний, термопара под хомутом начинает показывать тепловой контакт и с образцом. Таким образом, можно сделать вывод, что особую роль качество заделки термопары на поверхности образца играет при переходных процессах. На конечном этапе измерений (рис. 5) обе термопары имеют практически одинаковый период релаксации, характерный для образца в воде, составляющий в данном случае 13.4 с для термопары в пазу (рис. 6) и 13.6 с для термопары под хомутом. При выходе температуры на стационар показания термопар №№ 1 и 4, согласно графику, практически



**Рис. 5.** Результаты измерения температуры в пазу образца и под хомутом при изменении температуры окружающей среды, где — показания термопары № 1 под хомутом; - - - показания термопары № 4 в пазу.

совпадают. При анализе результатов измерений, представленных на рис. 5, нужно обязательно учитывать, что в данном случае отсутствует тепловыделение в самом образце, и его температура главным образом определяется условиями среды.

Суммарная инерция образца с заделанной термопарой определялась с использованием метода регулярного режима, исследования и теоретическая разработка которого проводились Г.М. Кондратьевым [6]. Данный метод широко используется для определения теплофизических свойств материалов [5], в том числе, и при проведении реакторных исследований [7–9]. В регулярном тепловом режиме закон изменения температурного поля со временем приобретает простую экспоненциальную форму. Сущность метода заключается в построении в полулогарифмическом масштабе избыточной температуры  $u(\tau) = T(\tau) - T_0$ , где:  $T(\tau)$  — измеряемая температура тела после ступенчатого возмущения внешней температуры или тепловой нагрузки, и  $T_0 = T(\infty)$  — температура среды. Определенные при помощи метода регулярного теплового режима значения суммарной инерции образца с термопарой, заделанной в паз, а также значения собственной инерции ТП показаны на рис. 6.

На рис. 6 приводятся результаты экспериментального измерения периода релаксации термопар для трех основных вариантов исследований:

1) термопары в пазу образца (общее тепловое возмущение задавалось переносом макета из воды с одной температурой в другую воду или на воздух);

2) термопары в пазу образца предварительно выдерживались в воздухе или в воде до наступления стационарного состояния (тепловое возмущение задавалось только электронагревом термопар);

3) отдельные свободные термопары в среде вода или воздух (тепловое возмущение задавалось электронагревом или изменением температуры среды).

Для второго варианта исследований, когда тепловое возмущение задавалось только электронагревом термопар, определяющий вклад в их инерцию вносил тепловой контакт ТП с образцом. В данном случае термопары не имели надежного теплового контакта с алюминиевым образцом, что приводило к низкой воспроизводимости результатов. Таким образом, при хорошем контакте с поверхностью термопара показывала инерцию образца, при плохом контакте стремилась к собственной инерции. Нахождение термопар в пазу образца на воздухе приводило к ухудшению (по сравнению с нахождением в воде) тепловой связи, хотя сам характер процесса не изменялся.

Описанный выше порядок измерений и контроля тепловой связи термопары с поверхностью образца был опробован на лабораторном стенде (рис. 1) и может использоваться при проведении других, аналогичных исследований. Работы в данном направлении планируется продолжать на образцах реальной геометрии, с использованием макетов твэлов, при реализации различных способов заделки термопар и проверке ТП разных диаметров.

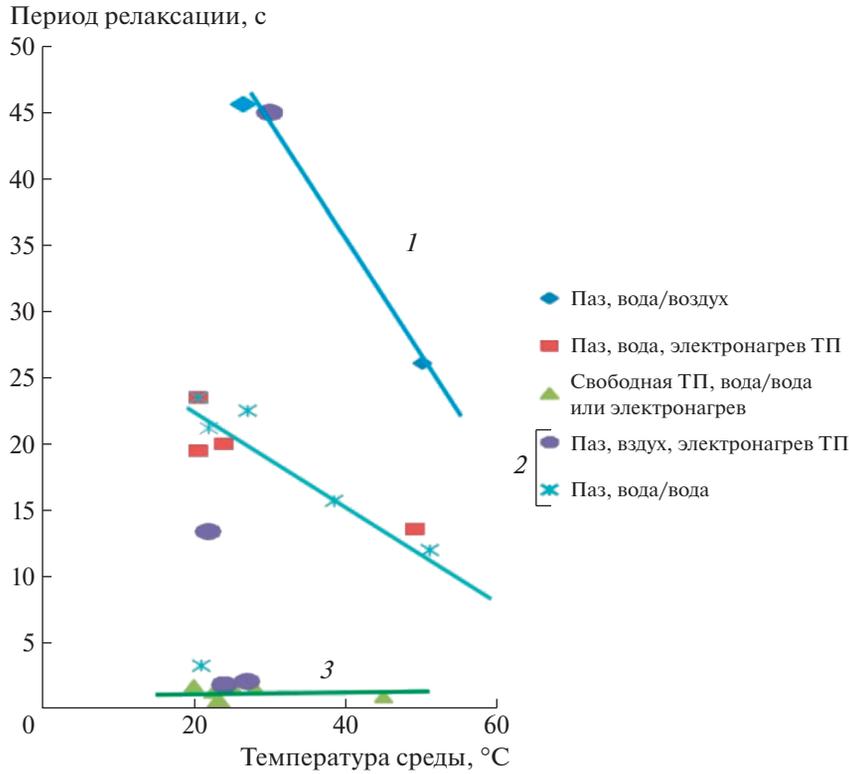


Рис. 6. Зависимость суммарной инерции образца с термопарой, заделанной в паз, и собственной инерции ТП от условий испытаний: 1 – ТП в образце, среда – вода/воздух; 2 – ТП в образце, среда – вода; 3 – свободная ТП.

### АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОГРЕШНОСТИ ПРИ ИЗМЕРЕНИЯХ ТЕМПЕРАТУРЫ ОБРАЗЦА

Была разработана и опробована расчетная модель, позволяющая оценивать значения температурного поля термопары и инерции системы “ТП–Объект контроля” с использованием аналитического решения и при варьировании входных параметров. Применение предлагаемой модели позволяет давать предварительную оценку процессов, происходящих в термопаре, а также проводить моделирование для возможных вариантов сочетаний характеристик ТП и образцов при планировании экспериментов. Краткое описание расчетной модели и иллюстрация проведенной ее апробации показаны далее.

Термопара рассматривалась в виде бесконечно длинного цилиндра с внешним радиусом  $R_0$ . В качестве окружающей среды в данном случае рассматривается образец (макет твэла), внутрь которого (или на оболочке) заделана термопара. Мощность внутренних источников тепла в ТП не меняется. До момента  $t < 0$  рассматривается постоянная температура во всей системе. Начиная с момента  $t = 0$ , температура образца (температура среды) изменяется в соответствии со следующим

уравнением (уравнение имеет данный вид в случае, установления регулярного режима):

$$\vartheta(t) = \vartheta_0 \left( 1 - e^{-\frac{t}{t_0}} \right), \tag{1}$$

где  $t_0$  – инерция макета, определенная экспериментально.

Для нахождения расчетной величины погрешности измерения температуры образца за счет тепловой инерции термопары и заделки было использовано приводимое в работах [5, 10] решение для цилиндра с изменяющейся температурой внешней среды при граничных условиях третьего рода. В явном виде решение приводится ниже:

$$T(r, t) = \vartheta_0 \left( 1 - e^{-\frac{t}{t_0}} \right) - \vartheta_0 \sum_{n=1}^{n=\infty} A_n J_0(\mu_n \cdot \rho) \frac{\tau_n}{t_0 - \tau_n} \left( e^{-\frac{t}{t_0}} - e^{-\frac{t}{\tau_n}} \right), \tag{2}$$

где  $\mu_{n=1}^2 = \frac{R_0^2 m/n}{a \tau_{n=1}}$ ;  $\rho = r/R_0$ ;  $A_n = \frac{2J_1(\mu_n)}{\mu_n [J_0^2(\mu_n) + J_1^2(\mu_n)]}$  при  $\tau_0 > \tau_1 > \tau_2 \dots \tau_n$ ;  $J_0$  и  $J_1$  – функции Бесселя первого рода соответственно нулевого и первого порядка;  $\mu_n$  – корни уравнения  $J_0(\mu)/J_1(\mu) = \mu/Bi$ ,

где  $Bi$  – число Био;  $\tau_n$  – экспериментально определенная инерция термопары, закрепленной на образце;  $a$  – коэффициент температуропроводности ТП;  $\rho$  – относительный радиус.

Для первого числа ( $n = 1$ ) характеристическое уравнение  $J_0(\mu_n)/J_1(\mu_n) = \mu_n/Bi$ ; аппроксимируется следующей зависимостью  $\frac{\mu^2}{1 - \frac{\mu^2}{8}} = 2Bi$  при

$$Bi < 5, \text{ и } \frac{\mu^2}{1 - \frac{\mu^2}{5.783}} = 2Bi \text{ при } Bi > 5.$$

Затем по известным таблицам [10, 11] определяются прочие  $\mu_n$  (для  $n \geq 2$ ).

Отставание термопары от температуры оболочки в относительном виде будет иметь вид:

$$T(r, t)/\vartheta_0 = \sum_{n=1}^{\infty} A_n J_0(\mu_n r) \frac{\tau_n}{t_0 - \tau_n} \left( e^{-\frac{t}{t_0}} - e^{-\frac{t}{\tau_n}} \right). \quad (3)$$

Для апробации предложенной расчетной модели в качестве примера были рассмотрены теоретически возможные варианты комбинаций значений инерции термопары и исследуемого образца, представленные в табл. 2. Предполагается, что в реальных экспериментах значения  $\tau_{n=1}$  будут изменяться.

**Таблица 2.** Варианты параметров для расчета

Параметры	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
$\tau_{n=1}, c$	0.5	0.5	0.5
$t_0, c$	0.8	10	20

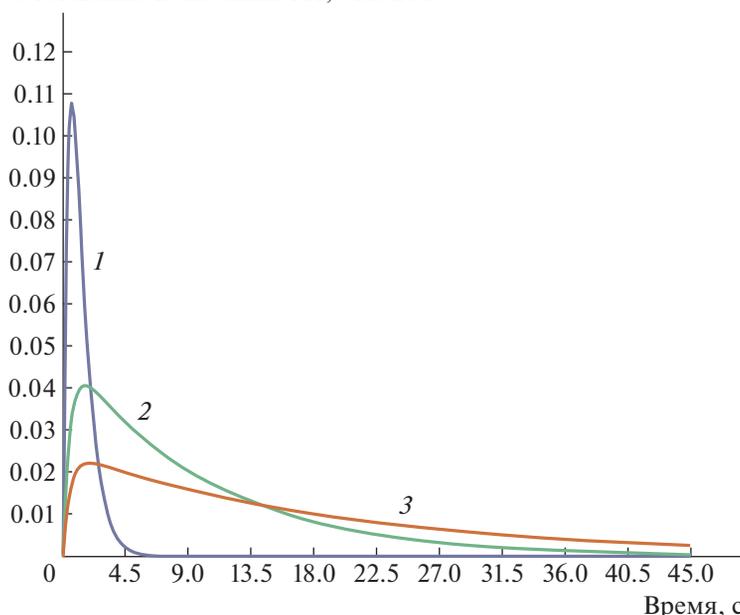
Результаты расчета вариантов отставания показаний термопары от температуры образца приведены на рис. 7 в относительном виде.

Из графика видно, что для варианта 1 (который является аналогом крепления термопары на образце при помощи хомута) на начальном этапе отставание температуры будет наибольшим из-за плохой тепловой связи ТП с объектом контроля. При этом инерция будет наименьшей. Для варианта 3, где макет имеет наибольшую инерцию, отставание температуры будет значительно меньше, а инерция системы будет наибольшей.

При проведении расчетов инерции системы “ТП-Объект контроля” в дальнейшем для каждого конкретного эксперимента необходимо будет использовать данные собственной инерции термопары, закрепленной на образце, и инерции макета, основанные на предварительно проведенных лабораторных испытаниях. Проведение таких расчетов является предметом дальнейших исследований.

Применение предложенного в данной работе комплексного подхода к выбору способа инструментации опытных твэлов, позволит в рамках до-

Отставание показаний ТП, отн. вел.



**Рис. 7.** Результаты расчета отставания показаний термопары от реальной температуры образца в относительном виде (номера соответствуют приведенным в табл. 2 вариантам).

реакторных исследований более гибко и точно выбирать способ инструментации опытных твэлов, наиболее подходящий для параметров конкретного реакторного эксперимента.

В условиях, когда в итерационном процессе проектирования опытных твэлов и ампульного устройства на определенном этапе необходимо выбрать оптимальный способ инструментации образцов, моделирование, основанное на верифицированных расчетах, даст возможность рассмотреть варианты входных параметров и дать оценки для выбора, в частности, способа крепления термопар на оболочке твэлов, который позволит обеспечить необходимую в отдельном эксперименте точность и качество измерений температуры.

## ВЫВОДЫ

Было показано, что способ заделки термопары на поверхности образца, а также характеристики выбранной ТП и объекта контроля могут заметно влиять на результаты измерений температуры, особенно при нестационарных процессах. Поэтому определение параметров измерений, сравнение различных способов заделки ТП необходимы для корректной оценки данных о температуре исследуемых образцов.

В статье описаны основные положения разработанного расчетно-экспериментального метода определения инерции термопар, результаты применения которого, в частности, могут использоваться с целью выбора оптимального способа заделки термопар на оболочке опытного твэла. В рамках проведения дореакторных исследований был изготовлен тепловой стенд, включающий систему электронного нагрева и регистрации показаний термопар, изготовлен образец, на поверхности которого разными способами устанавливались термопары. Получены экспериментальные значения инерции макета и термопар, сравнение которых позволяет сделать предварительные выводы о влиянии способа и качества заделки ТП на поверхности образца на корректность измерения температуры. Проведены расчеты системы “ТП-Объект контроля” с использованием аналитической модели при варьировании входных параметров.

Рассмотрены возможности по применению разработанного метода при подготовке топливных экспериментов на исследовательском реакторе ИР-8 НИЦ “Курчатовский институт”. Предложенные подходы по определению инерции термопар и системы “ТП-Объект контроля” могут найти применение и при решении других задач, связанных с повышением точности измерений температуры во время проведения реакторных экспериментов.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают огромную благодарность В.Н. Мурашову за помощь при подготовке и обсуждение статьи.

Работа проведена в рамках выполнения государственного задания НИЦ “Курчатовский институт”.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. *Абрамов А.Н., Арефинкина С.Е., Бабенко А.В., Герстле А.Д., Ерак Д.Ю., Ефремов П.К., Михин О.В., Мурашов В.Н., Насонов В.А., Седов А.А., Яковлев В.В.* Особенности проведения на реакторе ИР-8 ампульных испытаний опытных твэлов в условиях естественной конвекции. Тез. докл. Межотраслевой научно-технической конференции “Реакторные материалы атомной энергетики”. 11–15 сентября 2023 г. Екатеринбург. 2023. Москва: “Перо”.
2. *Erak D. Yu., Arefinkina S. E., Nasonov V. A., Yakovlev V. V., Mikhin O. V., Sedov A. A., Pesnya Yu. E., Trofimchuk V. V., Abramov A. N., Babenko A. V.* // Proc. 13th Int. Conf. WWER Fuel Performance, Modelling and Experimental Support. Sept. 15–21, 2019. Nessebar, Bulgaria. P. 332–335.
3. *Лысков Б.В., Прозоров В.К.* Термометрия и расходомерия ядерных реакторов. Техника ядерных реакторов. Вып. 17. 1985. Москва: Энергоатомиздат.
4. *Самойлов А.Г., Волков В.С., Солонин М.И.* Теплоделяющие элементы ядерных реакторов: учеб. для вузов. 1996. Москва: Энергоатомиздат.
5. *Ярышев Н.А.* Теоретические основы измерения нестационарной температуры. 2-е изд., перераб. 1990. Ленинград: Энергоатомиздат. Ленингр. отд.
6. *Кондратьев Г.М., Дульнев Г.Н., Платунов Е.С., Ярышев Н.А.* Прикладная физика: Теплообмен в приборостроении. 2003. СПб: СПбГУ ИТМО.
7. *Ерак Д.Ю., Яковлев В.В., Мурашов В.Н., Насонов В.А., Буслаев В.С., Можяев 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. 2010. Москва.
8. *Мурашов В.Н., Яковлев В.В. и др.* Расчетно-экспериментальное исследование температур в центре твэлов с топливом из двуокиси урана. Препринт ИАЭ-2936. 1978. Москва.
9. *Кокорев Л.С., Харитонов В.В.* Теплогидравлические расчеты и оптимизация ядерных энергетических установок: учеб. пособие для вузов. Под ред. Субботина В.И. 1986. Москва: Энергоатомиздат.
10. *Петухов В.С., Генин Л.Г., Ковалев С.А.* Теплообмен в ядерных энергетических установках. 1986. Москва: Атомиздат.
11. *Лыков А.В.* Теория теплопроводности. 1967. Москва: “Высшая школа”.

## Design-Experimental Method for Determination of Thermocouple Inertia within the Pre-Reactor Tests of Fuel Rods Samples

S. E. Arefinkina<sup>1, \*</sup>, A. N. Abramov<sup>1</sup>, A. V. Babenko<sup>1</sup>, A. D. Gerstle<sup>1</sup>, N. A. Dmitrieva<sup>1</sup>, D. Yu. Erak<sup>1</sup>, P. K. Efremov<sup>1</sup>, O. V. Mikhin<sup>1</sup>, Yu. B. Nichiporenko<sup>1</sup>, and V. V. Yakovlev<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National Research Centre “Kurchatov Institute”, Moscow, 123182 Russia

\*e-mail: Arefinkina\_SE@nrcki.ru

Received October 26, 2023; revised October 28, 2023; accepted October 31, 2023

**Abstract**—Reactor experiments play a crucial role in studying the properties of candidate fuel rod materials for designed nuclear power facilities. To obtain information on real-time temperature changes of experimental fuel rod samples, they are instrumented with thermocouples. Correctness of the measurements performed depends on various factors, among which the quality of thermocouple mounting on the surface of the tested sample is important. In preparation for fuel experiments in the IR-8 reactor National Research Centre “Kurchatov Institute” pre-reactor tests of experimental fuel rods and their models should be performed. The paper considers the calculation-experimental method, its application allows to obtain the inertia values of thermocouples fixed on the control object in different ways. Requirements to the inertia of thermocouples used in tests are determined with the reference to parameters of nonstationary processes under study. Comparison between obtained values of the total inertia of fixed thermocouples and the experimental model can also be used to draw conclusions about the mounting quality. To work out the method of inertia determination, a special laboratory stand was developed, through which experimental values were obtained for thermocouples fixed in two different ways on the sample surface. The description and results of approbation of analytical model to determine the error of sample temperature measurements by thermocouples are described. The possibilities of using the developed calculation-experimental method when preparing reactor investigations of prototype fuel rods are considered.

**Keywords:** pre-reactor tests, experimental fuel rods, thermocouples, inertia, instrumentation of fuel rods, analytical model, error of temperature measurements