

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2025-4-159-167>

УДК 621.039.53

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАДИАЦИОННОГО РАЗОГРЕВА МАТЕРИАЛОВ ПРИ ИХ ОБЛУЧЕНИИ В РЕАКТОРЕ ИГР

Н. Е. Мухамедов¹, Г. А. Витюк¹, Р. А. Иркимбеков¹,
С. А. Должиков^{1*}, А. С. Сураев¹, Р. Е. Келсингазина^{1,2}

¹ РГП «Национальный ядерный центр Республики Казахстан», Курчатов, Казахстан

² НАО «Университет Шакарима», Семей, Казахстан

* E-mail для контактов: dolzhikov@nncc.kz

В статье представлены результаты экспериментов по измерению температуры образцов конструкционных материалов, подвергнутых радиационному разогреву в условиях импульсного облучения на исследовательском реакторе ИГР. Для регистрации температуры разработано внутриреакторное экспериментальное устройство, состоящее из защитной ампулы с максимально разреженной средой, внутри которой размещались исследуемые образцы. Термопары интегрированы непосредственно в структуру образцов, с целью измерения температуры внутри материала. Исследованы температурные отклики 12 материалов, включая тугоплавкие металлы, высоколегированные стали и алюминиевые сплавы. Установлены характерные закономерности нагрева, отражающие влияние физических и радиационных свойств материалов. Полученные данные актуальны для верификации теплотехнических моделей и повышения точности расчетов при проектировании оборудования для ядерных установок.

Ключевые слова: ИГР, радиационный разогрев, конструкционные материалы, энерговыделение.

ВВЕДЕНИЕ

При проведении испытаний в исследовательских ядерных реакторах особое значение приобретает знание температурного состояния экспериментальных устройств и средств измерений, размещаемых в активной зоне. Под действием нейтронного и гамма-излучения конструкционные элементы таких устройств могут существенно разогреваться, что оказывает влияние как на достоверность измерений, так и на интерпретацию результатов эксперимента. Для расчетного обоснования термических режимов при проектировании таких установок необходимо надежно оценивать величину радиационного энерговыделения и температурный отклик применяемых материалов.

Понимание процессов радиационного разогрева и накопление экспериментальных данных в этой области являются важным направлением ядерных исследований. В мировой практике накоплен определенный опыт по экспериментальному определению температуры при облучении материалов различного назначения. Такие исследования активно проводились на исследовательских реакторах, включая ATR (США) [1], BR2 (Бельгия) [2], HFETR (Китай) [3], BOR-60 (Россия) [4], OSIRIS (Франция) [5], HANARO (Корея) [6] и других установках, где изучались тепловые эффекты в нержавеющих сталях, алюминиевых, циркониевых сплавах, графите и др. Измерения проводились как с использованием встроенных термопар и пирометров, так и методами постоблучательного анализа [7–9].

Однако большинство таких экспериментов проводились в условиях, существенно отличающихся от режимов исследовательского реактора ИГР [10] – как по спектру и плотности нейтронного потока, так и по характеру энерговыделения (транзистентные или им-

пульсные режимы). Более того, каждый исследовательский реактор имеет свою специфику: энерговыделение, флюенс, спектр и тип нейтронов, тепловые условия, геометрию активной зоны, а также различную конструкцию экспериментальных устройств, размещаемых в ней. Существенное влияние оказывает и тип измерительных средств, применяемых в зонах облучения – будь то термопары, корпусные элементы датчиков или спаи чувствительных элементов – поскольку каждый такой элемент имеет свой теплоФизический и радиационно-физический отклик.

В связи с этим на реакторе ИГР в начале 2000-х годов были проведены первые эксперименты по изучению радиационного нагрева конструкционных материалов [11]. Эти исследования положили основу для накопления экспериментальных данных, необходимых для последующего анализа тепловых процессов в условиях облучения конструкционных элементов, помещаемых в активную зону реактора. В проведенных экспериментах температура измерялась с использованием термопар, закрепленных на поверхности образцов методом «кернения», а облучение проводилось в газовой среде. Были получены температурные отклики радиационного разогрева для ряда образцов.

С тех пор существенно возросли требования не только к точности интерпретации, но и к прогнозированию процессов, протекающих в облучательных устройствах на реакторе ИГР. Это связано с развитием вычислительных методов моделирования, которые применяются специалистами НЯЦ РК при проектировании и анализе реакторных устройств [12–15]. Современные подходы основаны на комплексном учете тепловых и нейтронно-физических характеристик облучаемых объектов, что требует наличия дос-

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАДИАЦИОННОГО РАЗОГРЕВА МАТЕРИАЛОВ ПРИ ИХ ОБЛУЧЕНИИ В РЕАКТОРЕ ИГР

товорной и воспроизводимой экспериментальной базы. В этих условиях возникла необходимость в проведении уточняющих измерений, обеспечивающих более высокий уровень соответствия между расчетными и реальными параметрами облучения.

В рамках новых экспериментальных исследований, выполненных на реакторе ИГР, расширен перечень исследуемых материалов, проведено облучение в условиях высоко разряженной среды, горячий спай термопары размещен непосредственно внутри образца, что обеспечило более точное определение температурного отклика материала.

В результате получена экспериментальная зависимость температуры материалов от энерговыделения в реакторе, зафиксированы характерные температурные уровни для различных типов конструкционных сплавов, а также выполнен анализ влияния теплофизических и радиационных свойств на интенсивность нагрева.

КОНСТРУКЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО УСТРОЙСТВА

Экспериментальное устройство для измерения температуры радиационного разогрева конструкционных материалов разработано с учетом особенностей исследовательского реактора ИГР. Конструкция экспериментального устройства предусматривает его размещение в центральном экспериментальном канале активной зоны и позволяет проводить температурные измерения непосредственно в условиях воздействия нейтронного и гамма-излучения.

Основным элементом экспериментального устройства является герметичная ампула из циркониевого сплава с крышкой (рисунок 1). Ампула обеспечивает защиту и механическую фиксацию внутренней испытательной секции, а также герметичное подключение измерительных средств.

Внутри ампулы размещена испытательная секция, представляющая собой дисковую конструкцию, закрепленную на центральном стержне (рисунки 1, 2). Такое исполнение обеспечивает симметричное расположение образцов относительно центра активной зоны и позволяет точно позиционировать их в зоне максимального нейтронного потока. Каждый образец устанавливается в отверстие алюминиевого диска-держателя без использования ложементов. Первоначально предполагалось применение кварцевых вставок-ложементов (рисунок 1), однако после проведения расчетного анализа от них отказались, поскольку материал ложементов мог сам подвергаться радиационному нагреву и влиять на точность регистрации температурного отклика исследуемого образца. Всего в одном экспериментальном цикле может размещаться до 12 образцов – по шесть на каждом из двух алюминиевых дисков. Для обеспечения термической изолированности и однородности условий облучения между дисками поддерживается фиксированное расстояние 100 мм, при этом они располагаются симметрично относительно центра активной зоны

реактора. Положение испытательной секции может регулироваться штангой по высоте относительно центра активной зоны реактора ИГР в пределах ± 50 мм. Высотное положение подбирается таким образом, чтобы обеспечить равное облучение образцов, расположенных на верхнем и нижнем диске.

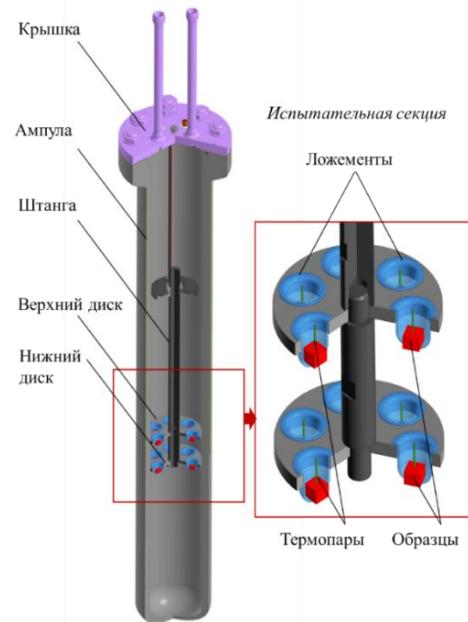


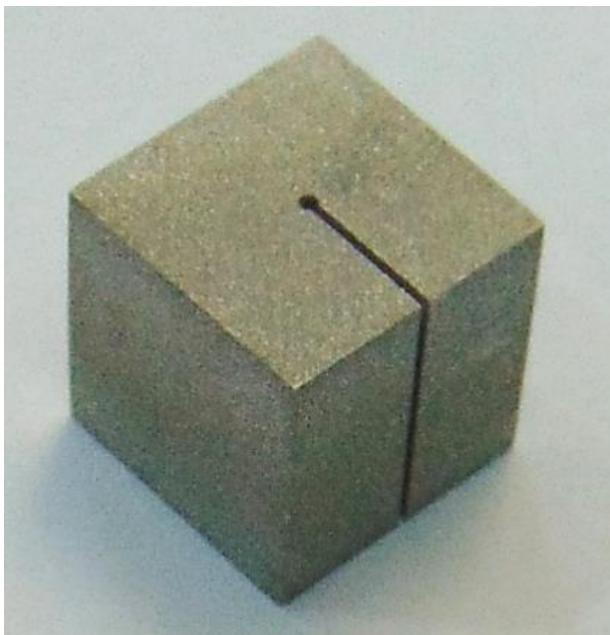
Рисунок 1. Эскиз экспериментального устройства



Испытательная секция



Рисунок 2. Внешний вид испытательной секции экспериментального устройства



а) типичный вид образца



б) термометрированный образец

Рисунок 3. Способ термометрирования образцов

В перечень исследуемых материалов вошли представители большинства основных групп конструкционных металлов, сплавов и тугоплавких соединений, потенциально используемых при изготовлении элементов экспериментальных устройств, измерительных модулей и термопар, применяемых в ядерных установках. Всего было исследовано 12 материалов, включая технически чистые металлы (медь, tantal, титан, никель и др.), алюминиевые (АМг-6 и АД) и

жаропрочные и высоколегированные стали (12Х18Н10Т, 12Х1МФ, 12ХН35В). Образцы изготовлены в форме кубов со стороной 10 мм (рисунок 3а). Выбор одинакового характерного размера позволил обеспечить сопоставимые условия облучения и теплопереноса для различных материалов, а также минимизировать температурные градиенты внутри образца. В каждый образец оборудован термопарой типа ХА с открытым спаем, расположенным в центральной части, что позволило регистрировать температурный отклик непосредственно внутри материала (рисунок 3б). Термопара типа ХА имеет преимущество за счет минимального поглощения гамма-излучения и нейтронов. Таким образом термопара вносит минимальное возмущение. Дополнительно в экспериментальную секцию установлена одна свободно подвешенная термопара, не связанная с каким-либо образцом. Ее показания необходимы для регистрации температуры, обусловленной собственным радиационным нагревом термопары в условиях отсутствия теплопередачи от твердого тела.

Использование максимально разряженной среды внутри ампулы, встроенных термопар (с размещением спаев внутри образцов), а также возможность точного позиционирования обеспечивают стабильное и воспроизводимое измерение температурных параметров в процессе облучения.

УСЛОВИЯ ОБЛУЧЕНИЯ

В рамках проведенных исследований выполнены два внутриреакторных эксперимента с разным набором исследуемых образцов (рисунок 4б, г). Каждый эксперимент включал установку экспериментального устройства в центральный экспериментальный канал (ЦЭК) реактора ИГР. После подключения всех необходимых инженерных и измерительных систем осуществлялась герметизация ампулы и создание разряженной среды внутри, что исключало влияние газового теплообмена на температурный отклик образцов.

Облучение проводилось в режиме самогасящейся вспышки с резким кратковременным нарастанием мощности (рисунок 4а, в). После завершения вспышки и останова реактора осуществлялось расхолаживание как самого реактора, так и экспериментального устройства. Регистрация температуры выполнена в период от начала пуска до полного охлаждения системы.

Для первого пуска отобраны образцы с минимальным потенциалом к радиационному разогреву. Это позволило выполнить исследования на максимально возможном уровне мощности реактора. Во втором пуске облучены образцы, которые имеют высокий потенциал к радиационному разогреву. Для гарантированного сохранения целостности установки и образцов во втором пуске реализована диаграмма с меньшим выделением энергии.

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАДИАЦИОННОГО РАЗОГРЕВА МАТЕРИАЛОВ
ПРИ ИХ ОБЛУЧЕНИИ В РЕАКТОРЕ ИГР**

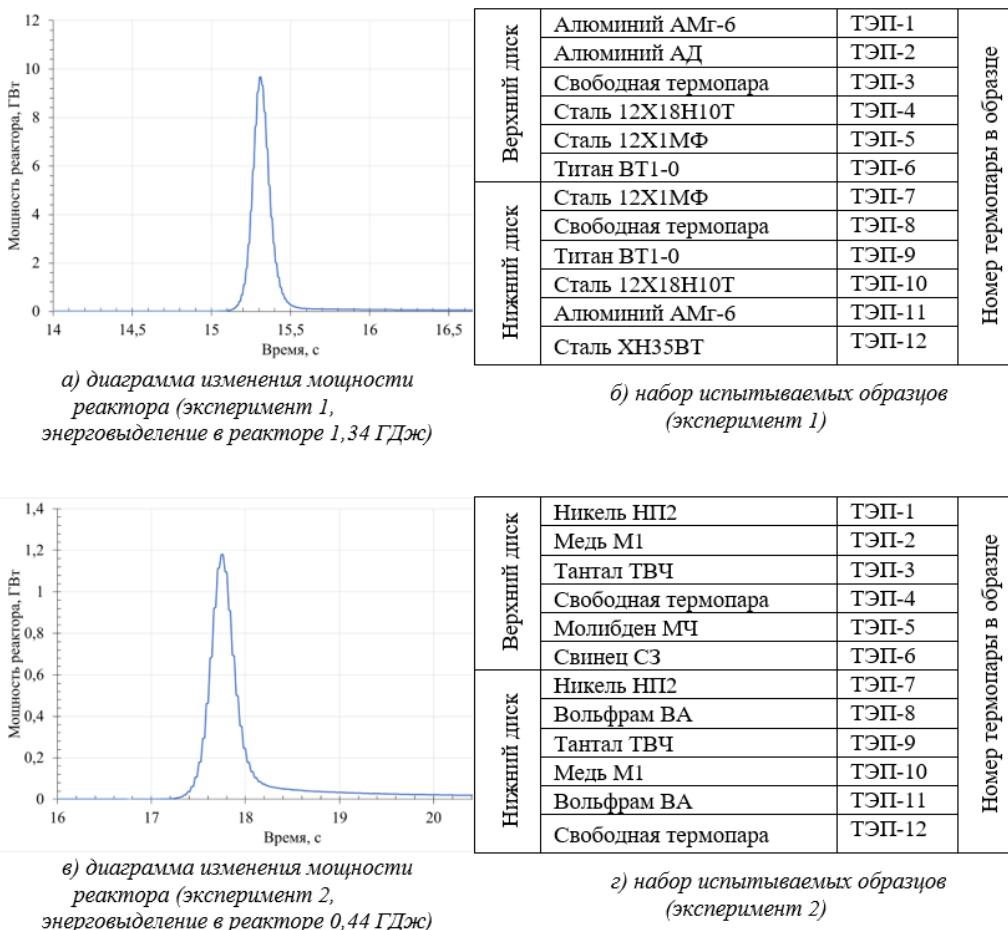


Рисунок 4. Диаграммы изменения мощности реактора ИГР и экспериментальные наборы материалов

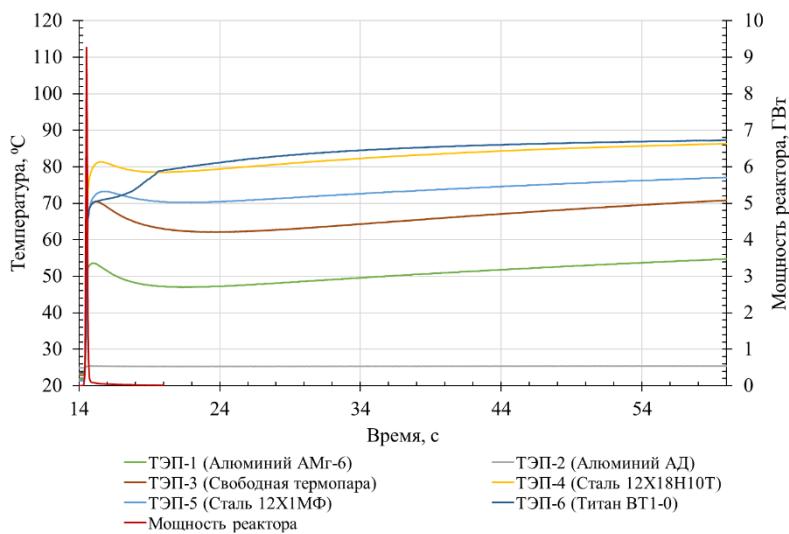


Рисунок 5. Изменение температуры термопар, установленных в образцах (верхний диск, первый эксперимент)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Температурные отклики образцов, полученные в первом эксперименте, представлены на рисунках 5 и 6. Рисунок 5 соответствует термопарам, установлен-

ным в образцах на верхнем диске, рисунок 6 – на нижнем. На оба графика также нанесена диаграмма изменения мощности реактора в режиме самогасящейся вспышки.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАДИАЦИОННОГО РАЗОГРЕВА МАТЕРИАЛОВ ПРИ ИХ ОБЛУЧЕНИИ В РЕАКТОРЕ ИГР

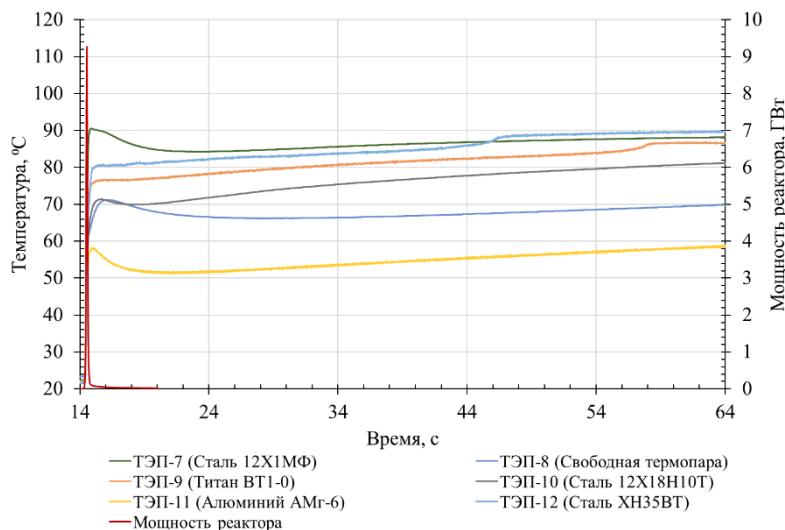


Рисунок 6. Изменение температуры термопар, установленных в образцах (нижний диск, первый эксперимент)

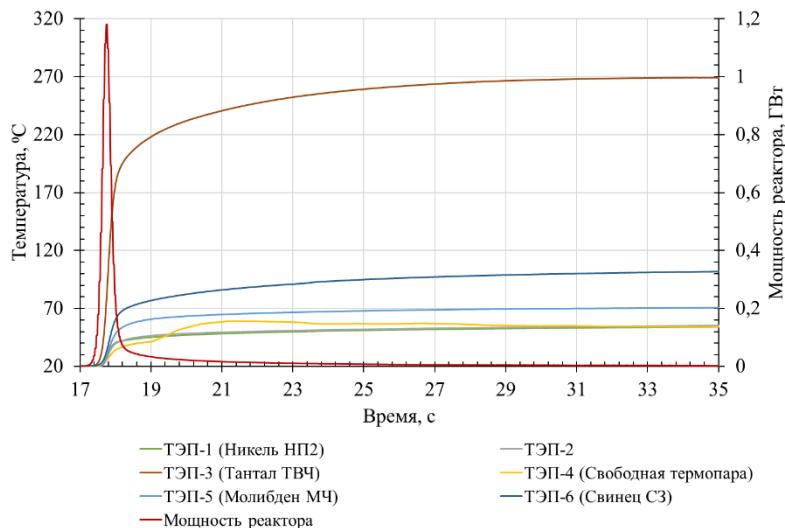


Рисунок 7. Изменение температуры термопар, установленных в образцах (верхний диск, второй эксперимент)

Различия в динамике нагрева отражают теплофизические свойства материалов: более высокие температуры достигнуты у образцов из сталей и титана BT1-0. Алюминиевый сплав AMg-6 показал минимальные значения температуры.

Для анализа условий без теплопроводного контакта использовалась свободная термопара (ТЭП-3 на верхнем диске, ТЭП-8 на нижнем), регистрировавшая собственный радиационный нагрев в вакууме.

Результаты второго эксперимента представлены на рисунках 7 и 8. Они соответствуют температурным откликам образцов, размещенных на верхнем и нижнем дисках соответственно. На графиках также показана диаграмма мощности реактора, отражающая характер облучения в режиме самогасящейся вспышки.

Зарегистрированные температурные кривые демонстрируют выраженные различия между исследуемыми материалами. Наиболее интенсивный нагрев отнесен для tantalа (ТЭП-3, ТЭП-9) и вольфрама (ТЭП-8, ТЭП-11). Наименьшие значения температуры зафиксированы у образцов из меди (ТЭП-10), никеля (ТЭП-1, ТЭП-7) и свинца (ТЭП-6). Незначительные расхождения между термопарами, установленными в образцы из одного и того же материала (например, вольфрам), могут быть обусловлены особенностями теплового контакта или расположением спая.

Свободно размещенные термопары (ТЭП-4 и ТЭП-12) позволили зафиксировать температурную реакцию чувствительных элементов, облучаемых без контакта с твердым телом.

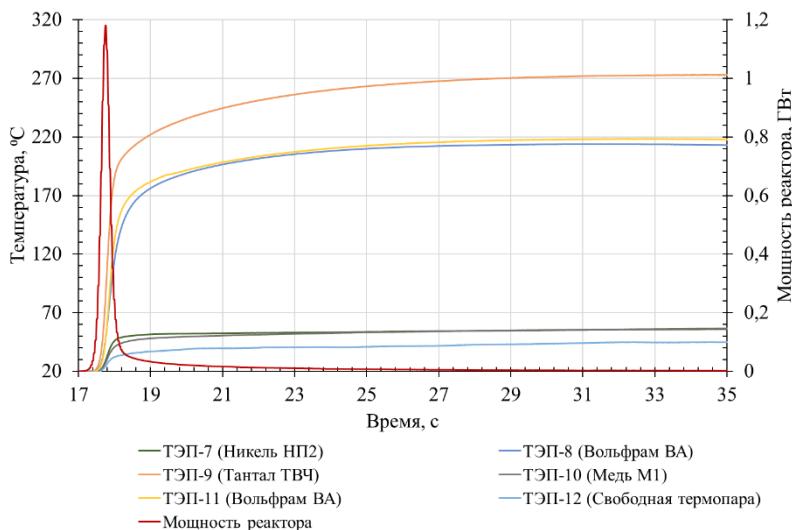


Рисунок 8. Изменение температуры термопар, установленных в образцах (нижний диск, второй эксперимент)

Свободно размещенные термопары (ТЭП-4 и ТЭП-12) позволили зафиксировать температурную реакцию чувствительных элементов, облучаемых без контакта с твердым телом.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Во всех экспериментах наблюдается задержка достижения температурного максимума относительно пика мощности реактора. Инерционность температурного отклика образцов обусловлена их теплоемкостью и низкой эффективностью теплоотвода в разряженной среде, что приводит к накоплению энергии даже после окончания импульса.

Температурные кривые в пределах одного уровня (верхнего или нижнего диска) демонстрируют близкую форму и синхронность, что подтверждает однородность условий облучения. Незначительные расхождения между термопарами, установленными в образцы из одного и того же материала (например, ТЭП-8 и ТЭП-11 – вольфрам, ТЭП-1 и ТЭП-7 – никель) могут быть обусловлены различиями в глубине установки термоспая, микроскопическими зазорами в точке контакта или незначительным смещением относительно максимума плотности потока. При этом форма кривых остается схожей, что подтверждает повторяемость условий и стабильность методики.

Температурные отклики, зафиксированные в ходе двух проведенных экспериментов, демонстрируют различия в амплитуде и в характере изменения температуры во времени. Это связано с особенностями режимов облучения и составом исследуемых материалов.

Так, например, во втором эксперименте, при пиковой мощности реактора порядка 1,2 ГВт, максимальные температуры в образцах достигли 240–270 °C (тантал, вольфрам). Температурные кривые отличались устойчивым подъемом с характерной двухфазной структурой: вначале наблюдался резкий температурный скачок, за которым следовал более

плавный прирост температуры, приводящий к выходу на плато. Такой профиль обусловлен суперпозицией нескольких физических процессов. На начальном этапе основную роль играет поглощение γ -излучения, вызывающее быстрый локальный нагрев. Далее, по мере развития вспышки, в температурный отклик вносит вклад остаточное γ -излучение от продуктов деления и активации, γ -излучение от активации образца, а также внутреннее перераспределение тепла в образце. Вторая фаза характеризуется постепенным «догревом» материала вплоть до завершения облучения. Подобное поведение объясняется как длительностью вспышки (~1 с), так и тепловой инерцией тел.

В первом эксперименте, несмотря на существенно более высокую мощность вспышки (около 9,7 ГВт), температурный отклик всех образцов находился в диапазоне 60–90 °C. Температурный отклик образцов характеризуется тремя фазами. В первой фазе наблюдается резкий рост температуры, вызванный интенсивным поглощением энергии γ - и нейтронного излучения при вспышке реактора. Вторая фаза – кратковременное снижение температуры – связана с перераспределением энергии от горячих зон к холодным участкам внутри образца за счет теплопроводности. В третьей фазе начинается медленное продолжение разогрева, обусловленное внутренним тепловым выравниванием и отсутствием внешнего охлаждения в условиях разряженной среды.

Анализ температурных откликов свободных термопар показал, что зарегистрированные значения были существенно ниже по сравнению с термопарами, встроенными в объем образцов, где спай находился непосредственно внутри материала. Это подтверждает, что основной вклад в температурный подъем вносит не прямое воздействие γ - и нейтронного излучения на спай термопары, а радиационный нагрев самого материала образца, который затем передает тепло

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАДИАЦИОННОГО РАЗОГРЕВА МАТЕРИАЛОВ ПРИ ИХ ОБЛУЧЕНИИ В РЕАКТОРЕ ИГР

к спаю за счёт теплопроводности. Таким образом, свободная термопара играла роль контрольного измерителя, позволяющего отделить температурный отклик материала от возможного радиационного нагрева самой измерительной системы.

Для анализа температурного отклика различных материалов при радиационном облучении в таблице 1 приведены основные физико-химические характеристики исследуемых образцов: атомный номер A , плотность ρ , удельная теплоемкость C_p и сечение поглощения тепловых нейтронов σ . Эти параметры определяют способность материала к поглощению энергии γ - и нейтронного излучения и её последующему преобразованию в тепловую энергию. Представленные данные позволяют объяснить наблюдаемые различия в характере температурных кривых и ранжировать материалы по эффективности радиационного нагрева.

Представленные в таблице характеристики позволяют установить взаимосвязь между радиационным температурным откликом материалов и их физико-химическими свойствами. Полученные данные позволили классифицировать материалы по уровню радиационного нагрева и использовать это для последующего выбора конструкционных и измерительных

элементов, предназначенных для работы в активной зоне реактора. Таким образом, таблица обосновывает наблюдаемые температурные эффекты и служит основой для прогнозирования радиационного поведения материалов в условиях облучения на реакторе ИГР.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведённых на реакторе ИГР экспериментов установлено, что интенсивность радиационного разогрева конструкционных материалов напрямую зависит от их физических и радиационных свойств (таких как атомный номер, плотность, теплоёмкость, сечение поглощения нейтронов). Зафиксированы характерные температурные отклики для различных групп сплавов: тяжёлые высокоплотные материалы с большим атомным номером демонстрируют значительно более сильный радиационный нагрев (преимущественно за счёт γ -излучения), тогда как лёгкие металлы и сплавы с низкой плотностью и высокой теплоёмкостью нагреваются существенно меньше. На основе экспериментальных данных проведена классификация материалов по степени радиационного нагрева.

Таблица 1. Физико-химические свойства исследуемых материалов и их температурный отклик при облучении в реакторе ИГР [16–20]

Материал	A	$\rho, \text{ г/см}^3$	$C_p, \text{ Дж/(г·К)}$	$\sigma (\text{барн})$	Температурный отклик
Тантал	73	16,60	140	20,6	Высокий. Большой атомный номер, высокая плотность, значительное сечение поглощения γ - и нейтронного излучения, низкая теплоемкость – эффективный радиационный нагрев.
Вольфрам	74	19,30	134	18,3	Высокий. Большой атомный номер, высокая плотность, значительное сечение поглощения γ - и нейтронного излучения, низкая теплоемкость – эффективный радиационный нагрев.
Титан	22	4,50	520	6,1	Средний. Относительно низкий атомный номер и плотность, малое сечение поглощения излучения, высокая теплоемкость – ограниченный радиационный нагрев.
Никель	28	8,90	440	4,5	Средний. Средний атомный номер и плотность, невысокое сечение поглощения, умеренная теплоемкость – умеренный радиационный нагрев.
Медь	29	8,96	385	3,8	Средний. Средний атомный номер и плотность, невысокое сечение поглощения, умеренная теплоемкость – умеренный радиационный нагрев.
Молибден	42	10,20	251	2,7	Средний. Средний атомный номер и плотность, низкое сечение поглощения, умеренная теплоемкость – приводит к выраженному, но не максимальному нагреву.
12X18H10T	26 (Fe)	7,90–8,00	~500	~2,5–3,0 (вклад Fe, Cr, Ni)	Средний. Умеренное сечение, высокая теплоемкость, высокая плотность благодаря содержанию никеля и хрома – обеспечивается стабильный, но не максимальный нагрев.
12X1MФ	26 (Fe)	7,70–7,80	~460	~2,0–2,5 (вклад Fe)	Средний. Средняя плотность, умеренное сечение поглощения, теплоемкость выше средней – нагрев выражен умеренно.
12XH35B	26 (Fe)	8,00–8,20	~470	~2,5–3,5 (вклад Fe, Cr, Ni)	Средний. Повышенная плотность и атомный номер за счёт никеля и хрома, среднее сечение, высокая теплоемкость – даёт стабильный, средний температурный отклик.
AMг-6	13 (Al)	2,65–2,70	~880	~0,23 (вклад Al)	Низкий. Низкий атомный номер, малая плотность, крайне низкое сечение поглощения – несмотря на высокую теплоемкость, радиационный нагрев выражен слабо.
АД	13 (Al)	2,65–2,75	~890	~0,23 (вклад Al)	Низкий. Низкий атомный номер и плотность, низкое сечение, высокая теплоемкость – слабый температурный отклик под облучением.
Свинец	82	11,34	130	0,17	Средний. Очень высокий атомный номер, высокая плотность, низкая теплоемкость, малое сечение поглощения нейтронов – умеренный радиационный нагрев преимущественно за счет γ -излучения.

Полученные результаты имеют важное прикладное значение. Они могут быть использованы для верификации теплотехнических моделей и тем самым повышения точности расчетов при проектировании оборудования ядерных установок. Выявленная градация материалов по уровню радиационного нагрева позволяет сделать научно обоснованный выбор конструкционных материалов и элементов измерительных систем, предназначенных для работы в условиях облучения. Перспективы дальнейших исследований заключаются в расширении номенклатуры исследуемых материалов и режимов облучения, а также в интеграции полученных данных в вычислительные модели для развития методик моделирования теплового поведения материалов под воздействием радиационного нагрева.

Финансирование

Данные исследования финансировались Агентством Республики Казахстан по атомной энергии в рамках научно-технической программы BR24792713 «Развитие атомной энергетики в Республике Казахстан».

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. J.L. Rempe, D.L. Knudson, J.E. Daw, K.G. Condie, S. Curtis Wilkins, New Sensors for In-Pile Temperature Measurement at the Advanced Test Reactor National Scientific User Facility // Nuclear Technology. – 2011. – Vol. 175(3). – P. 681–691. <https://doi.org/10.13182/NT11-A12515>
2. B. Rossaert, T. Toyama, M. Yamazaki, K. Suzuki, M. Narui, T. Shikama, E. Sikik, P. Jacquet, S. Van Dyck, Development of a multipurpose rig for material irradiation tests in BR2 // Journal of Nuclear Materials. – 2022. – Vol. 565. – Art. 153742. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2022.153742>
3. Liu Chang, Xia Yi, Peng Xingjie, Zhao Wenbin, Song Jiyang, Jin Shuai, Liu Runqi, He Yuhao. Thermal Performance Analysis of Low Temperature Differential Flow Heat Transfer Process in HFETR Irradiation Device // J. Nuclear Power Engineering. – 2023. – Vol. 44(S2). – P. 184–187. <https://doi.org/10.13832/j.npce.2023.S2.0184>
4. A.V. Varivtsev, I.Yu. Zhemkov, A.V. Boev, O.V. Ishunina, Yu.V. Naboyshchikov, N.S. Poglyad, M.G. Sharonova, Computational and experimental study of an irradiation rig with a fuel heater for the BOR-60 reactor // Nuclear Energy and Technology. – 2016. – Vol. 2, Issue 2. – P. 126–131. <https://doi.org/10.1016/j.nucet.2016.05.010>
5. C. Reynard-Carette, G. Kohse, J. Brun, M. Carette, A. Volte and A. Lyoussi, Review of Nuclear Heating Measurement by Calorimetry in France and USA // EPJ Web Conf. – 2018. – Vol. 170. – Art. 04019. <https://doi.org/10.1051/epjconf/201817004019>
6. Kee Nam Choo, Man Soon Cho, Sung Woo Yang, Byung Hyuk Jun, Myong Seop Kim, Development of a Low-Temperature Irradiation Capsule for Research Reactor Materials at HANARO // Nuclear Technology. – 2016. – Vo. 195(2). – P. 213–221. <https://doi.org/10.13182/NT15-154>
7. A. Gusalov, K.L. Davis, J. Vande Pitte, B.J. Heidrich, I. Uytdenhouwen, S. Van Dyck, Monitoring the temperature of reactor experiments using radiation-induced swelling in SiC // Journal of Nuclear Materials. – 2020. Vol. 542. – Art. 152535. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2020.152535>
8. Hyun Ju Jin, Tae Kyu Kim, Neutron irradiation performance of Zircaloy-4 under research reactor operating conditions // Annals of Nuclear Energy. – 2015. – Vol. 75. – P. 309–315. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2014.08.042>
9. M. Kiritani, The need for improved temperature control during reactor irradiation // Journal of Nuclear Materials. – 1988. – Vol. 160, Issues 2–3. – P. 135–141. [https://doi.org/10.1016/0022-3115\(88\)90040-2](https://doi.org/10.1016/0022-3115(88)90040-2)
10. Erlan Batyrbekov, Vladimir Vityuk, Alexander Vurim, Galina Vityuk, Experimental opportunities and main results of the impulse graphite reactor use for research in safety area // Annals of Nuclear Energy. – 2023. –Vol. 182. – Art. 109582. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2022.109582>
11. Gorin, N. V., Kandiev, Ya. Z., Ul'yanov, A. I., Shmakov, D. V., Shcherbina, A. N., Gaidaichuk, V. A., Kaz'min, Yu. M., Skivka, A. S., Vasil'ev, A. P., & Pavshuk, V. A. Measurement of the temperature of structural materials heated by radiation from a pulsed uranium-graphite reactor // Atomic Energy. – 2001. – Vol. 90(1). – P. 17–21. <https://doi.org/10.1023/A:1011327604237>
12. Vladimir Vityuk, Galina Vityuk, Alexander Vurim, Ruslan Irkimbekov, Ivan Kukushkin, Artur Surayev, Nurzhan Mukhamedov. Testing of a heterogeneous fuel rod in the research Impulse graphite reactor // Progress in Nuclear Energy. – 2023. – Vol. 164. – Art. 104889. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2023.104889>
13. Kelsingazina R., Vityuk V., Vurim A., Vityuk G., Mukhamedov N., Tikhomirov G. Computational approaches for determining the nuclear heating value of structural materials during the irradiation at the IGR reactor // Annals of Nuclear Energy. – 2024. – Vol. 204. – Art. 110532. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2024.110532>
14. Р.Е. Келсингазина, В.А. Витюк, Г.А. Витюк, Н.Е. Мухамедов, С.А. Должиков. Исследование нейтронно-физических процессов, определяющих характер радиационного разогрева материалов в импульсном графитовом реакторе // Вестник НЯЦ РК. – 2024. – Вып. 3 (99). – С. 56–64. [Kelsingazina R.E., Vityuk V.A., Vityuk G.A., Mukhamedov N.E., Dolzhikov S.A. Study of neutronic processes determining the nature of nuclear heating of materials in the impulse graphite reactor // NNC RK Bulletin. – 2024. – No. 3 (99). – P. 56–64. (In Russ.)] <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2024-3-56-64>
15. Н.Е. Мухамедов, В.А. Витюк, Г.А. Витюк, А.Д. Вурим, Р.Е. Келсингазина, С.А. Должиков, Д.Т. Женис, А.С. Сураев. Расчетные исследования в обоснование возможности проведения внутриреакторного эксперимента с топливом энергетического реактора при реализации длительного режима работы реактора ИГР // Вестник НЯЦ РК. – 2024. – Вып. 4 (100). – С. 88–95. [Mukhamedov N.Ye., Vityuk V.A., Vityuk G.A., Vurim A.D., Kelsingazina R.Ye., Dolzhikov S.A., Zhengis D.T., Suraev A.S. Computational studies in support of possibility of conducting an in-pile experiment with power reactor fuel during the implementation of the long-term operation mode of the IGR reactor // NNC RK Bulletin. –

2024. – No. 4 (100). – P. 88–95. (In Russ.)
<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2024-4-88-95>
16. Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники. М.: Атомиздат, 1968. – 395 с. [Chirkin V.S. Teplofizicheskie svoystva materialov yadernoy tekhniki. Moscow: Atomizdat, 1968. – 395 p. (In Russ.)]
17. Bobkov V.P., Fokin L.R., Petrov E.E., Popov V.V., Rumiantsev V.N., Savvatimsky A.I. Thermophysical Properties of Materials for Nuclear Engineering: a Tutorial and Collection of Data. IAEA, VIENNA, 2008.
18. Неймарк Б.Е. Физические свойства сталей и сплавов, применяемых в энергетике, справочник. М.: Энергия, 1967. – 240 с. [Neymark B.E. Fizicheskie svoystva staley i splavov, primenyaemykh v energetike, spravochnik. Moscow: Energiya, 1967. – 240 p. (In Russ.)]
19. Mughabghab S.F. Atlas of Neutron Resonances: Resonance Parameters and Thermal Cross Sections. Z = 1–100. 6th ed. Amsterdam: Elsevier, 2018. 1400 p.
20. Mughabghab S.F. Atlas of Neutron Resonances: Resonance Properties and Thermal Cross Sections, Z = 61–102. 6th ed. Amsterdam: Elsevier, 2018. 696 p.

ИГР РЕАКТОРЫНДА МАТЕРИАЛДАРДЫ СӘҮЛЕЛЕНДІРУ КЕЗІНДЕ ОЛАРДЫ РАДИАЦИЯЛЫҚ ҚЫЗДЫРУДЫ ЭКСПЕРИМЕНТТИК ЗЕРТТЕУЛЕР

Н. Е. Мухамедов¹, Г. А. Витюк¹, Р. А. Иркимбеков¹,
С. А. Должиков^{1*}, А. С. Сураев¹, Р. Е. Келсингазина^{1,2}

¹ «Казақстан Республикасының Ұлттық ядролық орталығы» РМК, Курчатов, Қазақстан
² «Шәкәрім Университеті» КЕАК, Семей, Қазақстан

* Байланыс үшін E-mail: dolzhikov@nnc.kz

Мақалада ИГР зерттеу reactorында импульстік сәулелену жағдайында радиациялық қыздыруға ұшыраған конструкциялық материалдардың үлгілерінің температурасын өлшеу жөніндегі эксперименттердің нәтижелері ұсынылған. Температуралы тіркеу үшін ішіне зерттелетін үлгілер орналастырылған барынша сиретілген ортасы бар қорғаныш ампуладан тұратын reactorішілік эксперименттік құрылғы өзірленді. Термопарлар материал ішпіндегі температуралы өлшеу мақсатында үлгілердің құрылымына тікелей біріктірілген. Баяу балқытын металдарды, жоғары қоспаланған болат пен алюминий қорытпаларын қоса алғанда, 12 материалдың температуралық реакциялары зерттелді. Материалдардың физикалық және радиациялық қасиеттерінің әсерін көрсететін қызудың тән занылыштары белгіленген. Алынған деректер жылу техникалық үлгілерді верификациялау және ядролық қондырығыларга арналған жабдықтарды жобалау кезінде есептеулердің дәлдігін арттыру үшін өзекті.

Түйін сөздер: ИГР, радиациялық қызу, конструкциялық материалдар, энергия бөлу.

EXPERIMENTAL STUDIES OF RADIATION HEATING OF MATERIALS DURING THEIR IRRADIATION IN THE IGR REACTOR

N. Ye. Mukhamedov¹, G. A. Vityuk¹, R. A. Irkimbekov¹,
S. A. Dolzhikov^{1*}, A. S. Surayev¹, R. Ye. Kelsingazina^{1,2}

¹ RSE “National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan”, Kurchatov, Kazakhstan
² Shakarim University, Semey, Kazakhstan

* E-mail for contacts: dolzhikov@nnc.kz

The paper presents experimental findings on the temperature measurement of structural material samples exposed to radiation heating during pulsed irradiation at the IGR research reactor. To record the temperature, an in-pile experimental device was specifically designed, consisting of a protective ampoule with an ultra-low-pressure environment to house the test samples. Thermocouples were embedded directly into the sample structures to enable precise temperature measurements within the materials. Temperature responses in 12 materials have been examined, including refractory metals, high-alloy steels, and aluminum alloys. Distinct heating patterns were identified that influenced by their physical and radiation properties of the materials. These results provide valuable data for refining thermal engineering models and enhancing the accuracy of calculations in the design of equipment for nuclear installations.

Keywords: IGR, nuclear heating, structural materials, energy release.