

РАЗРАБОТКА МЕТОДА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ГЕЛИЯ В ТЕПЛО ВЫДЕЛЯЮЩИХ ЭЛЕМЕНТАХ ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

П.А. Дворников*, С.Н. Ковтун*, А.А. Кудряев*, С.С. Шутов*,
П.С. Шутов*, А.А. Бударин*, Д.А. Лукьянов*, Ю.В. Красников**,
А.М. Степанов**, А.В. Стародубцев**, М.К. Горбачев***,
М.И. Ильяшик***, А.С. Никулин***, В.И. Дунаев****

* АО «НТЦ «Диатром»

249031, Калужская обл., г. Обнинск, ул. Королева, д. 6, пом. 22-23

** ООО «Инженерное бюро ВАСО»

394014, г. Воронеж, ул. Менделеева, д. 3-Б

*** АО «Прорыв»

107140, г. Москва, ул. Малая Красносельская, 2/8, корп. 7, офис 307

**** АО «Диаконт»

195274, г. Санкт-Петербург, ул. Учительская, д. 2

Р

Проанализированы работы последних лет по вопросам применения теплового метода неразрушающего контроля концентрации гелия в тепло выделяющих элементах (ТВЭлах) перспективных реакторов, в которых используются ТВЭлы, под оболочкой которых находится гелий при атмосферном давлении. Представлены результаты исследований по определению оптимального положения точки контроля концентрации гелия в газовой полости разных типов ТВЭлов – для ТВЭлов со свободными газовыми полостями и для ТВЭлов с газовыми полостями с поддержкой. В качестве информативного признака в измерениях концентрации гелия в ТВэле используется значение максимального подогрева оболочки ТВэла. Экспериментально установлено, что функциональная связь между концентрацией гелия в ТВэле и величиной максимального подогрева оболочки макета ТВэла имеет линейный вид. Применение теплового метода контроля концентрации гелия в ТВэлах позволяет снизить финансовые издержки при изготовлении ТВЭлов, а также способствует повышению безопасной эксплуатации перспективных ядерных энергетических установок.

Ключевые слова: контроль концентрации гелия, ТВЭл, тепловой метод, температура, газовая полость, максимальный подогрев оболочки ТВэла, случайная составляющая погрешности измерения, ядерные энергетические установки.

© П.А. Дворников, С.Н. Ковтун, А.А. Кудряев, С.С. Шутов, П.С. Шутов, А.А. Бударин, Д.А. Лукьянов, Ю.В. Красников, А.М. Степанов, А.В. Стародубцев, М.К. Горбачев, М.И. Ильяшик, А.С. Никулин, В.И. Дунаев, 2023

Дворников П.А., Ковтун С.Н., Кудряев А.А., Шутов С.С., Шутов П.С., Бударин А.А., Лукьянов Д.А., Красников Ю.В., Степанов А.М., Стародубцев А.В., Горбачев М.К., Ильяшик М.И., Никулин А.С., Дунаев В.И. Разработка метода неразрушающего контроля концентрации гелия в тепловыделяющих элементах для перспективных ядерных энергетических установок. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2023. – № 2. – С. 69-80. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2023.2.06> .

ВВЕДЕНИЕ

Наличие гелия под оболочкой твэла необходимо для выполнения контроля его герметичности как при изготовлении, так и при эксплуатации. Концентрация гелия под оболочкой в диапазоне 94 – 100% обеспечивает оптимальный теплоотвод от топлива к оболочке. Таким образом, наличие гелия в определенной концентрации способствует обеспечению безопасности эксплуатации реакторной установки.

Распространенным способом обеспечения содержания гелия в твэле является технологический контроль параметров газовой среды, подаваемой в твэл перед его окончательной герметизацией. Однако возможные утечки гелия из негерметичных твэлов или сбои при заполнении твэлов гелием требуют проведения контроля гелия в окончательно собранном твэле.

Известен разрушающий метод контроля, при котором из определенной партии твэлов отбирают твэл и измеряют параметры газовой среды в нем через прокол в оболочке. Такой способ разрушающего контроля концентрации гелия не гарантирует, что вся партия твэлов соответствует (не соответствует) результатам контроля одного из партии твэлов [1]. Обычно принимается партия в 100 штук. Проколотый твэл должен быть изначально изготовлен, а затем переработан, что влечет финансовые затраты, связанные с извлечением и повторным использованием ядерного делящегося материала из состава твэла, переработкой комплектующих твэла, выполненных из нержавеющей материалов высокого качества, и обращением со вторичными РАО. При этом важно отметить, что при отрицательном результате единичного контроля отбраковывается вся партия (100 штук) твэлов, что влечет дополнительные серьезные финансовые издержки.

Издержки, связанные с методом выборочного контроля, стимулировали поиск неразрушающих методов контроля параметров газовых сред под оболочкой твэла.

Признано, что наиболее перспективными методами контроля давления в твэле являются ультразвуковой и тепловой методы [1]. Однако для перспективных реакторов, в которых под оболочкой твэлов находится гелий при атмосферном давлении, наиболее приемлемым к практической реализации (с точки зрения информативности) является тепловой метод [2].

ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ПРИМЕНЕНИЮ ТЕПЛООВОГО МЕТОДА ДЛЯ КОНТРОЛЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ГЕЛИЯ В ТВЭЛЕ

Физической основой теплового метода является разница коэффициентов теплопроводностей гелия и его загрязняющих газов, таких как воздух, азот, которые могут попасть под оболочку твэла при проведении технологических операций. В диапазоне температур от 0 до 200°C коэффициент теплопроводности гелия выше примерно в 5,5 раз теплопроводностей загрязняющих газов [3, 4].

Метод теплового неразрушающего контроля концентрации гелия в твэле заключается в проведении операций импульсного нагрева участка оболочки твэла в области газосборника и регистрации температуры участка оболочки твэла до начала нагрева и в процессе нагрева.

Были проведены исследования по определению оптимального местоположения зоны контроля в газовой полости разных типов твэлов, выбор рабочей точки для твэлов со свободными газовыми полостями и для твэлов с газовыми полостями с поддержкой.

Выбор местоположения участка нагрева оболочки твэла определяется следующими обстоятельствами:

– для твэлов, имеющих поддержку в газовой полости, местом нагрева оболочки может быть любой участок оболочки, расположенный в зоне газовой полости, так как сечения твэла по всей полости имеют одинаковые геометрические размеры; следовательно, точность результатов измерений содержания гелия не зависит от места измерения по длине в газовой полости;

– для определения оптимального местоположения участка нагрева твэлов без поддержки в экспериментах использовались макеты твэлов со свободными газовыми полостями как без дистанционирующей проволоки, так и с навивкой из неё. Измерения проведены с концентрацией гелия 0 и 100%.

Анализ полученных данных показал, что средние значения температуры подогрева оболочки макета твэла со свободной газовой полостью с 0 и 100% концентрацией гелия имеют практически одинаковые значения. Таким образом, тепловой метод для измерения значения концентрации гелия в макете твэла со свободной газовой полостью неприменим.

Для решения проблемы определения концентрации гелия в твэлах со свободной газовой полостью предложено техническое решение, на которое получен патент на изобретение под названием «Тепловыделяющий элемент ядерного реактора» [5]. Сущность решения заключается в изменении конструкции заглушки со стороны газовой полости, а именно, заглушку твэла следует выполнить с выступом в сторону газовой полости с образованием зазора между внутренней поверхностью оболочки твэла и внешней цилиндрической поверхностью выступа. Такая конструкция заглушки создаст при тепловом воздействии на оболочку градиент температуры между оболочкой твэла и цилиндрическим телом, который является необходимым условием работоспособности теплового метода определения содержания гелия в твэле.

Эффективность предложенного решения подтверждена экспериментами, выполненными на макете твэла для перспективных реакторов.

Для твэлов, не имеющих упорной трубки, местом нагрева может быть участок газовой полости в непосредственной близости к заглушке.

С учётом унификации установки для измерения содержания гелия в твэле и технологичности проведения измерений на ней выбран один участок измерений для твэлов двух конструктивных исполнений (со свободной газовой полостью и газовой полостью с поддержкой), а именно, участок длиной ~ 10 см, расположенный в зоне размещения газовой полости в непосредственной близости к заглушке со стороны полости.

Во время импульсного нагрева при повышении температуры участка оболочки твэла в области газосборника часть тепловой энергии оболочки рассеивается в окружающее (воздушное) пространство. Другая ее часть идет внутрь твэла к менее нагретому телу – фиксатору топливной композиции (упорной трубке, пружине и т.п. или к выступу заглушки твэла, не имеющего упорной трубки) [5] и проходит через слой газовой смеси гелия и загрязняющего его газа. При этом скорость охлаждения оболочки твэла зависит от величины теплового сопротивления газовой прослойки между оболочкой и фиксатором тепловыделяющей конструкции, что приводит к зависимости изменения значения температуры оболочки твэла от концентрации в нем гелия. В тепловом методе в качестве информативного признака величины концентрации гелия в твэле используется величина максимального подогрева оболочки твэла, определяемого как разность максимально достигнутой температуры при нагреве оболочки и температуры до начала нагрева оболочки твэла. Для установления зависимости информативного признака и концентрации гелия в твэле используются результаты калибровочных измерений с имитаторами твэлов, каждый из которых представляет собой фрагмент газосборника твэ-

ла, заполненного образцовой газовой смесью с известной концентрацией гелия. Результатами калибровочных измерений являются зависимости концентрации гелия в твэле от значения максимального подогрева оболочки твэла.

Использование в измерениях концентрации гелия в твэле в качестве информативного признака значения максимального подогрева оболочки твэла, определяемого как разность значений максимальной температуры нагрева оболочки твэла и температуры до начала нагрева оболочки твэла, измеряемых одним и тем же образцовым средством измерения (например, пирометром) при аналогичных внешних температурных условиях и при нагреве одним и тем же нагревательным элементом при одинаковой подводимой мощности и времени нагрева (ток и длительность импульса), позволяет значительно снизить влияние систематической погрешности измерения концентрации гелия. В соответствии с требованиями к твэлам для перспективных реакторов концентрация гелия в твэлах при атмосферном давлении должна быть более 94%. Для установления более точной зависимости концентрации гелия в твэле от информативного признака диапазон калибровочных измерений используется от 90 до 100%, что также способствует снижению влияния систематической погрешности [6]. Таким образом, определяющей составляющей погрешности измерения концентрации гелия в твэле при атмосферном давлении является неисключенная случайная составляющая погрешности.

ОЦЕНКА ТОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗМЕРЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ГЕЛИЯ В ТВЭЛЕ

Исследования по оценке неисключенной случайной составляющей погрешности измерения концентрации гелия в твэлах проводились в следующей последовательности.

На первом этапе исследований определялись точностные характеристики величин максимальных подогревов твэла.

В экспериментах использовался макет твэла с газовой полостью с поддержкой, заполненный воздухом (концентрация гелия 0%).

Температура оболочки макета твэла измерялась двумя пирометрами П1 и П2. Одна точка измерения температуры размещалась в межвитковом зазоре в центре катушки индуктора, другая точка измерения температуры находилась в непосредственной близости к краю катушки индукционного нагревателя.

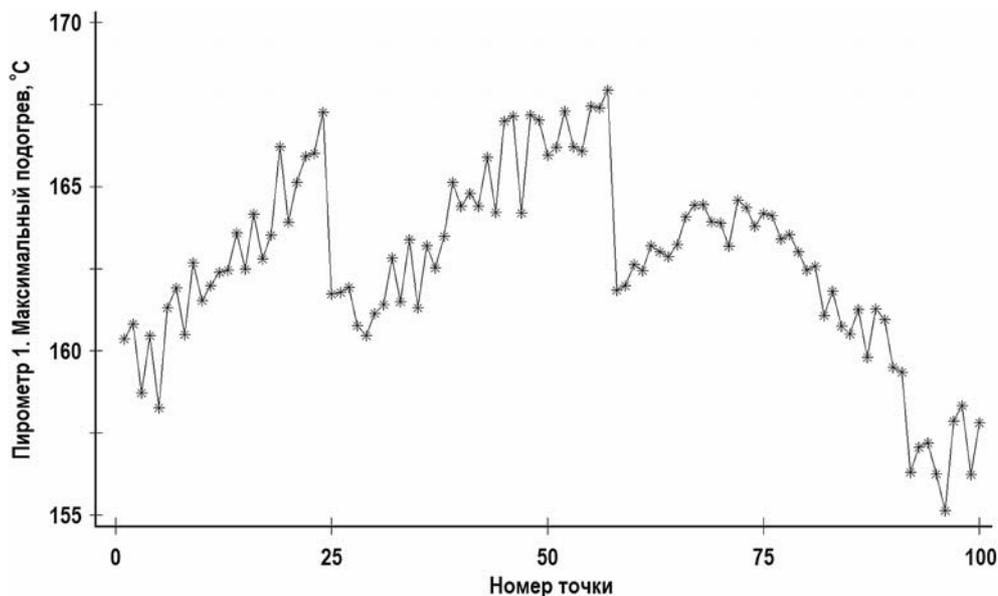


Рис. 1. Показания пирометра П1

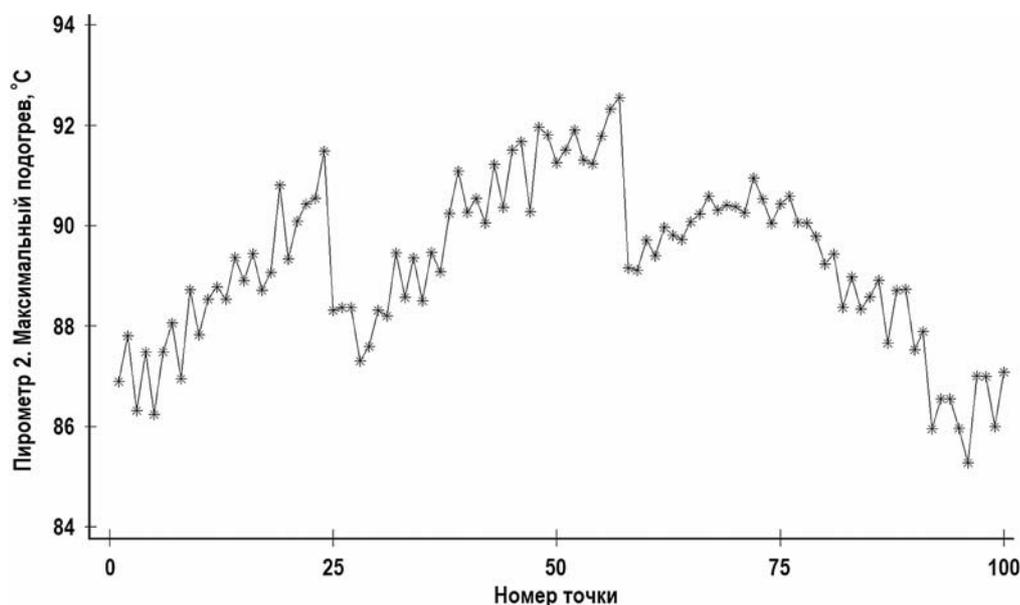


Рис. 2. Показания пирометра П2

Продолжительность измерения величин максимального подогрева оболочки макета твэла составила 16 часов 40 минут, в течение которых было получено 100 значений величин максимальных подогревов. Такие многократные измерения проведены с целью наибольшего охвата источников случайных погрешностей, проявляющихся в различных временных диапазонах.

Обработка полученных в измерениях данных проведена в соответствии с требованиями ГОСТ Р 8.736-2011 [7].

На рисунках 1, 2 представлены зависимости величины максимального подогрева оболочки макета твэла от времени по показаниям пирометров П1 и П2. Так как поведение временной зависимости графика не носит стационарного характера, то оценка случайной составляющей погрешности измерения величины максимального подогрева (как основного источника случайной составляющей погрешности измерения концентрации гелия в макете твэла) проводилась на качественном уровне.

Статистические оценки параметров максимальных подогревов оболочки твэла, полученные с использованием пирометров П1 и П2, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Статистические оценки параметров максимальных подогревов оболочки твэла, полученные с использованием пирометров П1 и П2

Параметры	Значения	
	П1	П2
Среднее арифметическое значение $\langle t \rangle$ максимального подогрева оболочки макета твэла, °C	162,7	89,25
Среднеквадратическое отклонение S среднего арифметического значения измерения максимального подогрева оболочки макета твэла, °C	2,8	1,6
Среднеквадратическое отклонение $S_{\langle t \rangle}$ результата измерения максимального подогрева оболочки твэла, °C	0,28	0,16
Доверительные границы ($P = 0,95$, $n = 50$) случайной составляющей погрешности результата измерения максимального подогрева оболочки твэла $\varepsilon_{\langle t \rangle}$, °C	0,56	0,32

Анализ результатов измерений максимальных подогревов оболочки макета твэла и

полученные значения доверительных границ случайной составляющей погрешности результатов указывают на наличие факторов, существенно влияющих на величину случайной составляющей погрешности измерения максимального подогрева оболочки макета твэла.

Определяющим фактором значительной величины доверительной границы случайной составляющей погрешности измерения максимального подогрева оболочки макета твэла является нестабильность сети питания измерительной установки, в частности, ее индукционного нагревателя. Для подтверждения данного фактора была измерена зависимость величины максимального подогрева оболочки макета твэла от величины напряжения сети питания индукционного нагревателя.

Полученные результаты подтвердили гипотезу о том, что нестабильность сети питания индукционного нагревателя является определяющим фактором формирования случайной составляющей погрешности результатов измерений.

Для устранения влияющего фактора (нестабильности сети питания) принято техническое решение о замене в устройстве измерения подогревов оболочки макетов твэлов электромеханического стабилизатора напряжения питания установки на источник бесперебойного питания типа ИБП Eaton 9130.

После модернизации измерительной установки проведены контрольные измерения величины максимальных подогревов поверхности оболочки макета твэла. Измерения проведены с макетом твэла с поддержкой, заполненного воздухом (концентрация гелия 0%) и гелием с концентрацией 100%.

Температура оболочки измерялась двумя пирометрами в точках, расположенных на противоположных сторонах оболочки в непосредственной близости к краю катушки индуктора. С каждой концентрацией гелия (0 и 100%) в твэле было проведено по 50 измерений.

Обработка полученных в измерениях данных проводилась по ГОСТ Р 8.736-2011 [7] для числа измерений $n = 50$.

Таблица 2

Статистические параметры распределений максимальных подогревов оболочки макета твэла, полученные для нулевой и 100%-й концентраций гелия в твэле

Параметры	Концентрация He, %	
	0	100*
Среднее арифметическое значение (\bar{t}) максимального подогрева оболочки макета твэла, °С	91,71	82,75
Среднеквадратическое отклонение S среднего арифметического значения измерения максимального подогрева оболочки макета твэла, °С	0,18	0,13
Среднеквадратическое отклонение $S_{(t)}$ результата измерения максимального подогрева оболочки твэла, °С	0,025	0,018
Доверительные границы ($P=0,95, n=50$) случайной составляющей погрешности результата измерения максимального подогрева оболочки твэла $\varepsilon_{(t)}$, °С	0,05	0,036
* – Результаты измерения после герметизации макета твэла		

Результаты измерений с использованием пирометра П1 приведены в табл. 2 и проиллюстрированы графиком на рис. 3.

Анализ представленных в таблице показателей точности величины максимальных подогревов макета оболочки твэла и значений максимального подогрева позволяет сделать следующие выводы:

– во-первых, замена в измерительной установке электромеханического стабилизатора на источник бесперебойного питания позволила существенно (на порядок) повы-

сильные точностные показатели результатов измерений максимальных подогревов оболочки макета твэла;

– во-вторых, обнаружен новый источник погрешности измерения максимальных подогревов оболочки макета твэла, заполненного гелием, что показывает наличие в результатах измерений растущего температурного тренда.

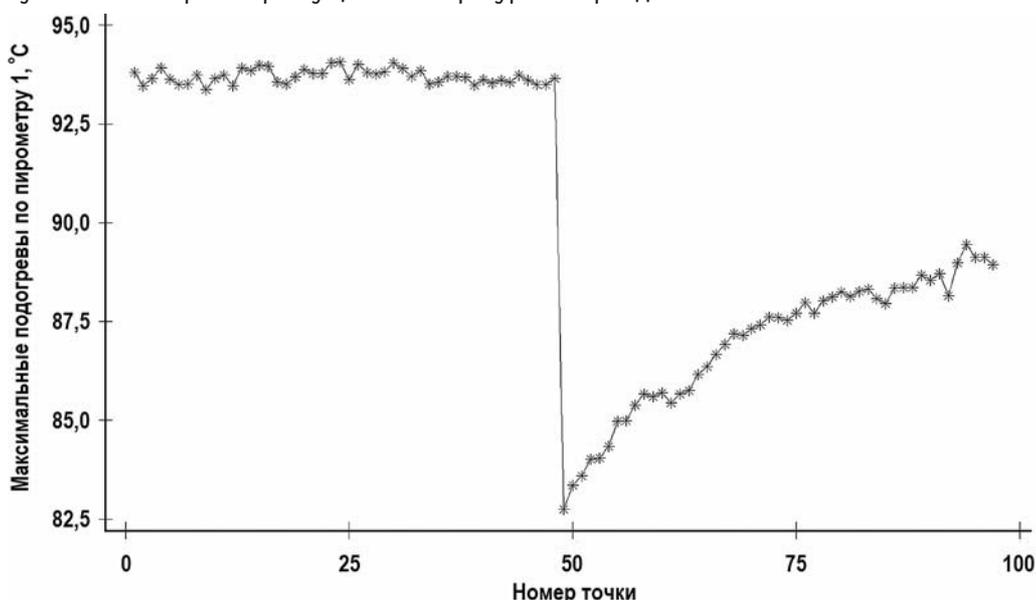


Рис. 3. Распределение величин максимальных подогревов оболочки макета твэла, заполненного воздухом

На рисунке 3 показаны распределения величин максимальных подогревов оболочки макета твэла, заполненного воздухом (0% гелия, левая часть графика) и гелием (100% гелия, правая часть графика). Яркий выраженный положительный тренд поведения максимального подогрева макета твэла с гелием позволяет предположить, что макет твэла негерметичен.

Объяснение данного факта следующее. При тепловом воздействии на оболочку макета твэла температура и давление гелия в макете твэла повышаются, что приводит к выходу гелия из объема макета твэла через неплотность.

После окончания теплового воздействия на твэл в процессе его остывания давление в твэле восстанавливается за счет поступления в него воздуха. При каждом последующем тепловом воздействии количество выходящего из твэла гелия будет уменьшаться, и этим объясняется рост максимального подогрева оболочки макета твэла. Таким образом, определен новый диагностический признак контроля герметичности макета твэла.

Для устранения установленного дефекта проведена герметизация макетов твэлов путем нанесения на поверхность мест сочленений концевых элементов твэла слоя кремнийорганического клея-герметика производства АО «ГНИИХТЭОС».

Испытания на герметичность проведены с твэлом с поддержкой. Были выполнены две серии из 50-ти измерений максимальных подогревов с перерывом между сериями двое суток.

Результаты испытаний показали отсутствие явного положительного тренда максимальных подогревов, что говорит о герметичности макета твэла во время теплового воздействия на него, а также о сохранности гелия в макете твэла. Результаты представлены в табл. 2.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ДОВЕРИТЕЛЬНЫХ ГРАНИЦ СЛУЧАЙНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ГЕЛИЯ В ТВЭЛЕ

Экспериментально установлено, что функциональная связь между концентрацией гелия в твэле (C_x , %) и величиной максимального подогрева оболочки макета твэла (t , °C) имеет вид

$$C_x = a \cdot t + b, \quad (1)$$

где a и b – коэффициенты, получаемые методом наименьших квадратов. Например, для максимального подогрева от 70 до 75 °C значения этих коэффициентов $a = -2,7784$; $b = 293,14$.

При учёте отклонений изменения величины аргумента t в выражении (1) на величину его неисключённой случайной составляющей погрешности при доверительной вероятности $P = 0,95$, равную $\pm 0,036$ °C, получаем неисключённую случайную составляющую погрешности определения концентрации гелия в макете твэла, не превышающую $\pm 2\%$.

Поскольку требуемое значение концентрации гелия в твэле должно быть более 94%, для повышения точности оценки неисключённой случайной составляющей погрешности определения концентрации гелия в твэле проведены измерения в диапазоне концентрации гелия в твэле от 90 до 100%.

Результаты измерений приведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты измерений

Параметр	Концентрация He в макете твэла			
	90%	95%	97%	100%
Среднеквадратическое отклонение результата измерения максимального подогрева оболочки макета твэла, °C	0,15	0,14	0,14	0,13
Величина концентрации гелия, вычисленная по формуле (1)	92,4	96,8	98,5	99,1
Среднеквадратическое отклонение среднего арифметического результата измерения концентрации гелия, %	0,43	0,40	0,40	0,38
Доверительные границы ($P=0,95$, $n=16$) случайной составляющей погрешности результата измерения концентрации гелия ε , %	0,92	0,86	0,86	0,80

Результаты расчетных и экспериментальных исследований доверительных границ случайной составляющей погрешности измерения концентрации гелия в макете твэла показали хорошую сходимость, а величина доверительных границ случайной составляющей погрешности измерения концентрации гелия в твэле удовлетворяет требованиям, представляемым для твэлов перспективных реакторов.

Расчетно-аналитическим методом проведена оценка влияния изменения атмосферного давления на параметры переходного процесса теплопереноса при подогреве оболочки макета твэла. Поставленная задача сводится к определению влияния атмосферного давления на величину коэффициента теплопроводности гелия при температуре максимального подогрева оболочки макета твэла.

Изменение атмосферного давления при заполнении газовой полости твэла в соответствии с ГОСТ 15150-69 [8] рассматривается в диапазоне от 84,0 до 106,7 кПа.

В соответствии со справочными данными [4, 9, 10] теплопроводность гелия имеет слабую тенденцию к росту при увеличении давления. При изменении давления от 100 до 5000 кПа и температуре максимального подогрева оболочки макета твэла 300 К изменение коэффициента теплопроводности составляет $2,0 \cdot 10^{-3}$ Вт/(м·К). При изменении атмосферного давления от 84,0 до 106,7 кПа и температуре максимального подогрева оболочки макета твэла до 500 К изменение коэффициента теплопроводности составит $9,26 \cdot 10^{-6}$ Вт/(м·К).

Соответственно, относительная погрешность изменения коэффициента теплопроводности гелия при изменении давления от 84,0 до 106,7 кПа при температуре максимального подогрева оболочки макета твэла до 500 К определяется выражением

$$\delta_{\lambda} = [9,26 \cdot 10^{-6} \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К}) / 218 \cdot 10^{-3} \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})] \cdot 100\% = 4,25 \cdot 10^{-3} \%,$$

где $218 \cdot 10^{-3} \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ – коэффициент теплопроводности гелия при атмосферном давлении 100 кПа и температуре максимального подогрева оболочки макета твэла 500 К.

Таким образом, величина относительной погрешности коэффициента теплопроводности гелия при изменении атмосферного давления на этапе заполнения газовой полости макета твэла имеет значение второго порядка малости, и можно сделать вывод, что изменение атмосферного давления практически не оказывает влияния на параметры переходного процесса теплопереноса при подогреве оболочки твэла.

ВЫВОДЫ

Проведенные расчеты и экспериментальные исследования показали возможность применения теплового метода для неразрушающего контроля концентрации гелия в твэлах перспективных ядерных энергетических установок с требуемой точностью.

Применение теплового метода контроля концентрации гелия в твэлах позволяет

- обеспечить возможность сплошного контроля твэлов в процессе изготовления;
- снизить финансовые издержки при изготовлении твэлов;
- повысить безопасность эксплуатации перспективных ядерных энергетических установок.

Литература

1. Разработка, производство и эксплуатация тепловыделяющих элементов. Книга 2 под ред. Д.Г. Решетникова. – М.: Энергоатомиздат, 1995 г., стр. 286-288.
2. Красников Ю.В., Дворников П.А., Ковтун С.Н., Полионов В.П., Шутов П.С., Стародубцев А.В., Степанов А.М. Патент RU № 2634309 «Способ измерения концентрации гелия в тепловыделяющем элементе». Опубликовано 25.10.2017. Электронный ресурс: https://yandex.ru/patents/doc/RU2634309C1_20171025 (дата доступа 25.12.2022).
3. Дворников П.А., Ковтун С.Н., Кудряев А.А., Бударин А.А., Лукьянов Д.А., Шутов П.С., Шутов С.С., Гормаков А.Г., Мильшин В.И., Ознобишина М.Д. Патент RU № 2760561 «Устройство для измерения концентрации гелия в тепловыделяющем элементе (твэле)». Опубликовано 29.11.2021. Электронный ресурс: <https://patents.google.com/patent/RU2760561C1/ru> (дата доступа 25.12.2022).
4. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. – М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1997. – 720 с.
5. Дворников П.А., Ковтун С.Н., Кудряев А.А., Бударин А.А., Лукьянов Д.А., Шутов П.С., Шутов С.С., Гормаков А.Г., Мильшин В.И., Ознобишина М.Д. Патент RU № 2760492 «Тепловыделяющий элемент ядерного реактора». Опубликовано 25.11.2021. Электронный ресурс: https://patents.s3.yandex.net/RU2760492C1_20211125.pdf (дата доступа 25.12.2022).
6. Красников Ю.В., Степанов А.М., Стародубцев А.В. Патент RU № 2772652 «Способ измерения концентрации гелия в тепловыделяющем элементе». Опубликовано 23.05.2022. Электронный ресурс: https://patents.s3.yandex.net/RU2772652C1_20220523.pdf (дата доступа 25.12.2022).
7. ГОСТ Р 8.736-2011. Измерения прямые многократные. Метод обработки результатов измерений. Основные положения. Электронный ресурс: <https://docs.cntd.ru/document/1200089016/> (дата доступа 25.12.2022).
8. ГОСТ 15150-69. Машины, приборы и другие технические изделия. Электронный ресурс: <https://docs.cntd.ru/document/1200003320/> (дата доступа 25.12.2022).
9. Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники. Справочник. – М.: Атомиздат, 2016. – 484 с.
10. Бабичев А.П., Бабушкина Н.А., Братковский А.М. Физические величины. Справочник. Под ред. И.С. Григорьевой, Е.З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.

Поступила в редакцию 27.12.2022 г.

Авторы

Дворников Павел Александрович, научный руководитель, д.т.н.

E-mail: dvornikov@diaprom.ru.

Ковтун Сергей Николаевич, руководитель службы разработки, к.т.н.

E-mail: skov@diaprom.ru.

Кудряев Андрей Алексеевич, первый заместитель генерального директора

E-mail: kudryaev@diaprom.ru.

Шутов Сергей Семенович, начальник отдела

E-mail: shutovss@diaprom.ru.

Шутов Павел Семенович, заместитель начальника отдела

E-mail: shutovps@diaprom.ru.

Бударин Алексей Александрович, начальник отдела

E-mail: budaa@diaprom.ru.

Лукьянов Дмитрий Александрович, начальник отдела, к.т.н.

E-mail: dluk@diaprom.ru.

Красников Юрий Викторович, директор-главный конструктор, д.т.н., чл.-корр. метрологической академии России

E-mail: secretar@metrol.ru.

Степанов Александр Михайлович, начальник НИР

E-mail: root@metrol.ru.

Стародубцев Алексей Валериевич, начальник КТО

E-mail: kto@metrol.ru.

Горбачев Максим Константинович, заместитель генерального директора

E-mail: gmk@proryv2020.ru

Ильяшик Михаил Иванович, главный технолог

E-mail: imi@proryv2020.ru.

Никулин Андрей Сергеевич, главный технолог

E-mail: nas@proryv2020.ru

Дунаев Вадим Игоревич, главный конструктор дивизиона

E-mail: dunaev@diakont.com.

UDC 621.039.546

Development of a Method for Nondestructive Control of the Helium Concentration in Fuel Elements for Advanced Nuclear Power Plants

Dvornikov P.A. *, Kovtun S.N. *, Kudryaev A.A. *, Shutov S.S. *, Shutov P.S. *, Budarin A.A. *, Lukyanov D.A. *, Krasnikov Yu.V. **, Stepanov A.M. **, Starodubtsev A.V., **Gorbachev M.K. ***, Ilyashik M.I. ***, Nikulin A.S. ***, Dunaev V.I. ****

* Scientific-Technical Center DIAPROM JSC

6 Koroleva Str., 249031 Obninsk, Kaluga Reg., Russia

** Engineering Bureau of Voronezh Aircraft JSC, Ltd

3b Mendeleeva Str., 394014 Voronezh, Russia

*** Proryv JSC

2/8 bld 4 office 307 Malaya Krasnoselskaya Str., 107140 Moscow, Russia

**** Diakont JSC

2 Uchitelskaya Str., 195274 St.-Petersburg, Russia

ABSTRACT

The paper analyzes recent studies on the application of a nondestructive thermal method for monitoring the helium concentration in fuel elements of advanced reactors, which use fuel elements beneath the cladding of which there is helium under atmospheric pressure. The results are presented from the studies for determining the optimal position of the helium concentration control point in the gas cavity of different fuel element types: for fuel elements with free gas cavities and for fuel elements with gas cavities with support. The fuel cladding maximum heating value is used as the informative feature in measuring the fuel element helium concentration. It has been found experimentally that the functional relationship between the helium concentration in the fuel element and the maximum heating value of the fuel element mockup cladding has a linear form. Using a thermal method to control the fuel element helium concentration allows reducing the element fabrication costs, and also contributes to improving the operating safety of advanced nuclear power plants.

Key words: helium concentration control, fuel element, thermal method, temperature, gas cavity, maximum heating of fuel cladding, random component of measurement error, nuclear power plants.

Dvornikov P.A., Kovtun S.N., Kudryaev A.A., Shutov S.S., Shutov P.S., Budarin A.A., Lukyanov D.A., Krasnikov Yu.V., Stepanov A.M., Starodubtsev A.V., Gorbachev M.K., Ilyashik M.I., Nikulin A.S., Dunaev V.I. Development of a Method for Nondestructive Control of the Helium Concentration in Fuel Elements for Advanced Nuclear Power Plants *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2023, no. 2, pp. 69-80; DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2023.2.06> (in Russian).

REFERENCES

1. *Development, Production and Operation of Fuel Elements*. Book 2. Ed. by D.G. Reshetnikov. Moscow. Energoatomizdat Publ., 1995, pp. 286-288 (in Russian).
2. Krasnikov Yu.V., Dvornikov P.A., Kovtun S.N., Polionov V.P., Shutov P.S., Starodubtsev A.V., Stepanov A.M. Patent RU No. 2634309 *Method of Measuring Helium Concentration in Fuel Element*. Published on Oct. 25, 2017. Available at: https://yandex.ru/patents/doc/RU2634309C1_20171025 (accessed Dec. 25, 2022) (in Russian).
3. Dvornikov P.A., Kovtun S.N., Kudryaev A.A., Budarin A.A., Lukyanov D.A., Shutov P.S., Shutov S.S., Gormakov A.G., Milshin V.I., Oznobishina M.D. Patent RU No. 2760561 *Apparatus for Measuring the Concentration of Helium in a Fuel Element (FE)*. Published on Nov. 29, 2021. Available at: <https://patents.google.com/patent/RU2760561C1/ru> (accessed Dec. 25, 2022) (in Russian).
4. Vargaftik N.B. *Handbook of Thermophysical Properties of Gases and Liquids*. Moscow. Nauka Publ., 1997, 720 p. (in Russian).
5. Dvornikov P.A., Kovtun S.N., Kudryaev A.A., Budarin A.A., Lukyanov D.A., Shutov P.S., Shutov S.S., Gormakov A.G., Milshin V.I., Oznobishina M.D. Patent RU No. 2760492 *Fuel Element of Nuclear Reactor*. Published on Nov. 25, 2021. Available at: https://patents.s3.yandex.net/RU2760492C1_20211125.pdf (accessed Dec. 25, 2022) (in Russian).
6. Krasnikov Yu.V., Stepanov A.M., Starodubtsev A.V. Patent RU No. 2772652 *Method for Measuring Helium Concentration in a Fuel Element*. Published on May 23, 2022. Available at: https://patents.s3.yandex.net/RU2772652C1_20220523.pdf (accessed Dec. 25, 2022) (in Russian).
7. GOST R 8.736-2011. *Multiple Direct Measurements. Methods of Measurement Results Processing. Main Principles*. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200089016/> (accessed Dec. 25, 2022) (in Russian).

8. GOST 15150-69. *Machines, Instruments and other Industrial Products*. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200003320/> (accessed Dec. 25, 2022) (in Russian).

9. Chirkin V.S. *Thermophysical Properties of Nuclear Engineering Materials*. Handbook. Moscow. Atomizdat Publ., 2016, 484 p. (in Russian)

10. Babichev A.P., Babushkina N.A., Bratkovsky A.M., *Physical Quantities*. Handbook. Eds. I.S. Grigoriev, E.Z. Meilikhova. Moscow. Energoatomizdat Publ., 1991, 1232 p. (in Russian).

Authors

Pavel A. Dvornikov, Research Supervisor, Dr. Sci. (Engineering)

E-mail: dvornikov@diaprom.ru

Sergey N. Kovtun, Head of the Development Service, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: skov@diaprom.ru

Andrey A. Kudryaev, First Deputy Director General

E-mail: kudryaev@diaprom.ru

Sergey S. Shutov, Head of Department

E-mail: shutovss@diaprom.ru

Pavel S. Shutov, Deputy Head of Department

E-mail: shutovps@diaprom.ru

Aleksey A. Budarin, Head of Department

E-mail: budaa@diaprom.ru

Dmitry A. Lukyanov, Head of Department, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: dluk@diaprom.ru

Yury V. Krasnikov, Director / Chief Designer, Dr. Sci. (Engineering), Corr. Member of Russian Metrological Academy

E-mail: secretar@metrol.ru

Aleksandr M. Stepanov, Head of Research

E-mail: root@metrol.ru

Aleksey V. Starodubtsev, Head of Department

E-mail: kto@metrol.ru

Maksim K. Gorbachyov, Deputy Director General

E-mail: gmk@proryv2020.ru

Mikhail I. Ilyashik, Chief Process Engineer

E-mail: imi@proryv2020.ru

Andrey S. Nikulin, Chief Process Engineer

E-mail: nas@proryv2020.ru

Vadim I. Dunaev, Chief Designer of the Division

E-mail: dunaev@diakont.com