

ИЗМЕРЕНИЕ ДЕФОРМАЦИИ КОРПУСА АМПУЛЫ ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ НА РЕАКТОРЕ БИГР

*Щеглов Андрей Алексеевич (otd4@expd.vniief.ru), Сажнов Владимир Васильевич,
Бардыгин Дмитрий Юрьевич, Богомолова Людмила Сергеевна*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

В докладе представлено краткое описание и избранные результаты экспериментов, проведенных с целью отработки применения тензометрического метода для измерения деформации облучаемых объектов и элементов конструкции на исследовательских ядерных реакторах. В двух облучательных экспериментах в статическом режиме работы реактора БИГР при помощи полупроводниковых тензорезисторов зарегистрирована зависимость относительной радиальной деформации корпуса ампулы, размещенной в центральном канале реактора, от времени.

Ключевые слова: деформация, тензорезистор, коэффициент тензочувствительности, тензобалка, измерительный мост, БИГР, борная кислота, измерение температуры.

MEASUREMENT OF AMPOULE VESSEL DEFORMATION USING A TENSOMETRIC METHOD IN EXPERIMENTS AT BIGR REACTOR

*Scheglov Andrej Alexeevich (otd4@expd.vniief.ru), Sazhnov Vladimir Vasilievich,
Bardygin Dmitriy Yurievich, Bogomolova Lyudmila Sergeevna*

FSUE «RFNC-VNIIEF», Sarov Nizhny Novgorod region

In the technical paper there are presented a brief description and selected results of experiments performed to elaborate application of tensometric method to measure deformation of irradiated objects and structural components on research nuclear reactors. In two irradiation experiments under static mode of reactor BIGR operation there was registered with the aid of semiconductor resistance strain gauges the dependence of relative radial deformation of the ampoule vessel arranged in the reactor central channel on time.

Keywords: deformation, resistance strain gauge, strain gauge factor, strain bar, measuring bridge, BIGR, boric acid, temperature measurement.

Введение

В настоящее время в РФЯЦ-ВНИИЭФ эксплуатируется импульсный ядерный реактор с растворным топливом ВИР-2М [1]. Установка интенсивно используется в качестве импульсного и статического источника нейтронного излучения и гамма-излучения для исследований и испытаний по широкому кругу тематических направлений.

Одним из существенных вопросов, связанных с обоснованием безопасности при проектировании, эксплуатации и модернизации установок серии ВИР, является обеспечение прочности корпуса при воздействии динамических нагрузок, создаваемых в результате радиолитического вскипания топливного раствора при генерировании импульса делений в активной зоне [2].

Отсутствие достоверных экспериментальных данных по параметрам, характеризующим напряженно-деформированное состояние корпуса реактора, затрудняет валидацию расчетных моделей, разрабатываемых для описания протекающих газодинамических процессов.

Помимо обозначенной конкретной задачи проведения измерений на корпусе действующего реактора ВИР-2М интерес также может представлять тензометрирование поверхностей объектов, исследуемых в облучательных экспериментах на реакторах, как при статическом, так и при импульсном воздействии.

В качестве метода для измерения деформации элементов корпуса реактора ВИР-2М был рассмотрен метод тензометрии [3]. Проведение таких измерений сопряжено с необходимостью решения ком-

плекса технических задач, обусловленных особенностями реакторного эксперимента.

Настоящая работа проводилась в целях первичной апробации применения тензометрического метода измерения деформации в условиях, характерных для облучательных реакторных экспериментов.

При конечной ориентации на применение метода к исследованию динамических нагрузок в импульсном режиме работы реактора отработку метода целесообразно было начать с экспериментов в статическом режиме работы.

Работа состояла из подготовительного этапа (пробные и методические лабораторные эксперименты) и основного этапа (реакторные эксперименты).

На подготовительном этапе обрабатывалась технология установки тензорезисторов, проводился выбор схемы включения тензорезисторов в измерительный мост, а также оценивалось влияние температуры на разбалансировку мостовой схемы.

Для проведения реакторных экспериментов была выбрана еще одна ядерно-физическая установка РФЯЦ-ВНИИЭФ – импульсный реактор БИГР [1]. С использованием наработок подготовительного этапа были подготовлены и проведены эксперименты на реакторе БИГР при его работе в статическом режиме.

Метод тензометрии. Эксперименты подготовительного этапа

Измерение деформаций были выполнены методом тензометрии [3] с применением тензорезисторов, принцип действия которых основан на тензорезистивном эффекте, т. е. изменении электрического сопротивления проводника при его деформировании.

От типа чувствительного элемента тензорезистора зависит его коэффициент тензочувствительности K . Для измерений предпочтительно использовать тензорезисторы с наибольшим значением коэффициента тензочувствительности, что характерно для полупроводниковых тензорезисторов. При этом данный тип тензорезисторов наиболее подвержен радиационному воздействию, а значит, возможность его применения в условиях облучения требует экспериментального подтверждения.

Для экспериментов были выбраны одноэлементные тензорезисторы ФКПА-10-100 и НУ-101С-350 с фольгированными полупроводниковыми чувствительными элементами.

Тензорезисторы ФКПА имеют фольговую константановую тензорешетку и коэффициент тензочувствительности $K = 2,3$.

Тензорезисторы НУ имеют кремниевый чувствительный элемент и коэффициент тензочувствительности $K = 130$.

При правильной установке тензорезистора коэффициент тензочувствительности должен соответствовать паспортному значению, поэтому на подготовительном этапе работы были экспериментально определены значения коэффициентов тензо-

чувствительности тензорезисторов ФКПА. Для этого проводились эксперименты по измерению деформации на консольной балке равного сопротивления (тензобалке).

Продолжением работ подготовительного этапа стало измерение деформации поверхности стальной ампулы (тонкостенного цилиндрического сосуда) при создании в ней избыточного давления. Конструкция ампулы представлена на рис. 1. На ее поверхность были приклеены два тензорезистора ФКПА согласно схеме, представленной на рис. 2. Один тензорезистор был ориентирован вдоль оси ампулы, а второй перпендикулярно.

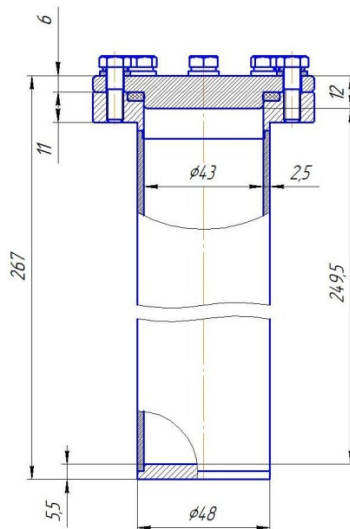


Рис. 1. Конструкция стальной ампулы

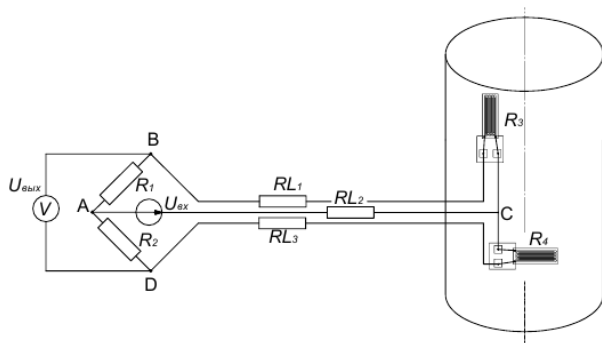


Рис. 2. Схема установки и включения тензорезисторов

Тензорезисторы были соединены в мостовую электрическую схему (два активных тензорезистора были включены в смежные плечи измерительного моста). Сопротивление каждого плеча моста составляло ~ 100 Ом. Такая схема включения была выбрана для сохранения мостовой схемы в сбалансированном состоянии при воздействии температуры (сопротивления тензорезисторов $R3, R4$ (рис. 2) при нагреве ампулы изменяются идентично).

При обработке результатов измерений принимались следующие допущения:

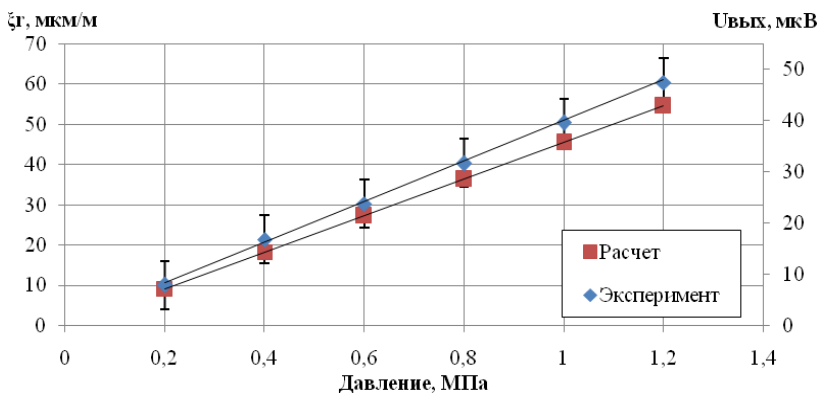


Рис. 3. Расчетная и измеренная в эксперименте радиальная деформация ампулы

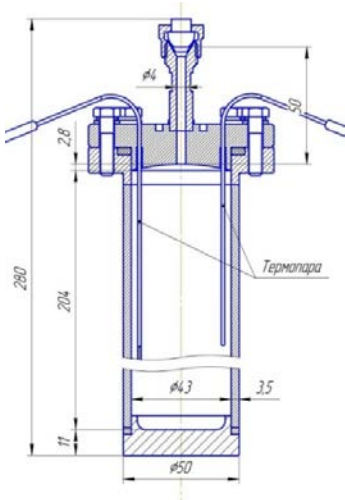


Рис. 4. Конструкция ампулы

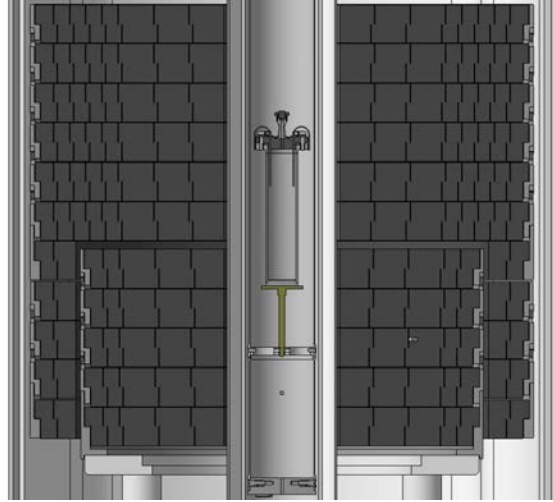


Рис. 5. Схема расположения ампулы в центральном канале реактора БИГР

– в тонкостенном цилиндрическом сосуде, внутри которого действует избыточное давление, радиальные (окружные) напряжения, возникающие в стенках, в два раза больше продольных (осевых) [4];

– в средней части ампулы можно пренебречь влиянием фланцев на ее деформированное состояние.

Таким образом, предполагалось, что тензорезистор *R3* при создании избыточного давления в ампуле будет воспринимать осевые деформации стенок, которые вдвое меньше радиальных, регистрируемых тензорезистором *R4*.

С учетом принятых допущений была измерена деформация корпуса ампулы при создании в ней избыточного давления воздуха. Экспериментальные значения относительной радиальной деформации стенки ампулы рассчитывались по соотношению, полученному для указанных параметров мостовой схемы:

$$\varepsilon_r = \frac{8 \cdot U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}} \cdot K} \quad (1)$$

где: ε_r – радиальная деформация стенки ампулы, мкм/м; $U_{\text{ВЫХ}}$ – напряжение рассогласования мосто-

вой схемы, вызванное деформацией, мкВ; $U_{\text{ВХ}}$ – напряжение питания мостовой схемы (в эксперименте составляло 2,8 В); K – коэффициент тензочувствительности (для тензорезисторов ФКПА $K = 2,3$).

Значения деформации стенки ампулы для сравнения были также рассчитаны по величине избыточного давления:

$$\varepsilon_r = \frac{P}{E} \cdot \frac{R_{\text{ср}}}{\nu} \quad (2)$$

где: P – давление в объеме ампулы, МПа; $R_{\text{ср}}$ – средний радиус стенки ампулы, мм; E – модуль упругости, МПа, $E = 200$ ГПа для материала 12Х18Н10Т; ν – толщина стенки ампулы, мм.

Полученный на выходе тензомоста сигнал, а также рассчитанные по соотношениям (1) и (2) радиальные деформации корпуса ампулы представлены на рис. 3.

Заключительной частью подготовительного этапа стал эксперимент с нагревом корпуса ампулы без создания внутреннего давления. Было установлено, что равномерный нагрев корпуса ампулы на 20 °С не приводил к рассогласованию мостовой схемы (дрейф нуля для указанных параметров мостовой схемы составлял ± 10 мкВ).

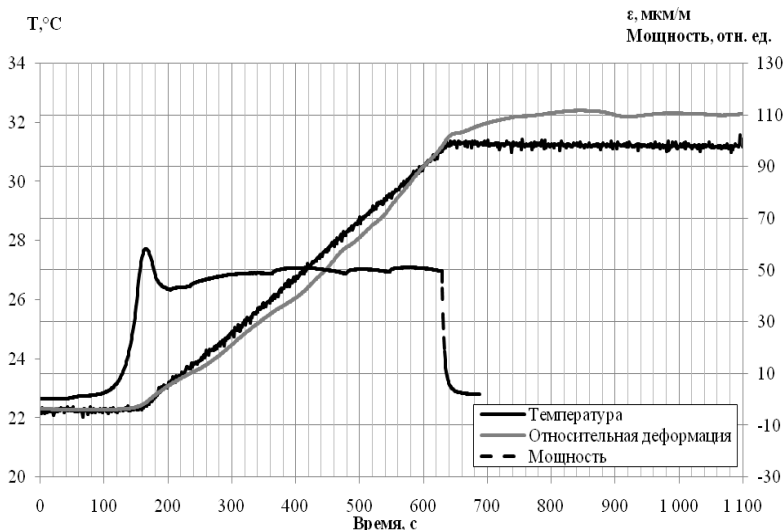


Рис. 6. Зависимость температуры и радиальной деформации корпуса ампулы в первом пуске реактора

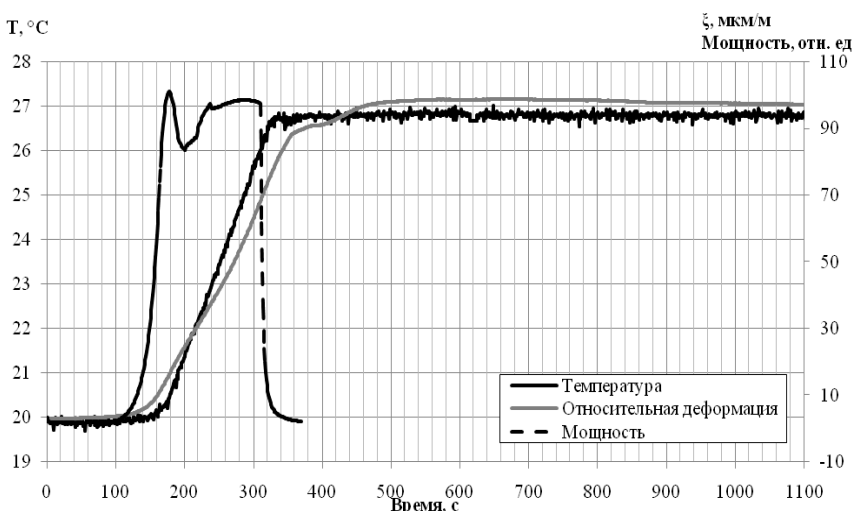


Рис. 7. Зависимость температуры и радиальной деформации корпуса ампулы во втором пуске реактора

Параметры состояния ампулы в реакторных экспериментах, полученные в результате расчета и измерений

Параметр	Эксперимент		Расчет	
	Облучение № 1	Облучение № 2	С деформацией	Изохорный
Подогрев раствора ΔT , °C	9	7	8	
Значение давления, МПа	3,5*	2,9*	3,9	5,0
Максимальный уровень сигнала на выходе измерительного моста, мВ	3,03	2,60	–	–
Максимальная радиальная деформация ампулы, мкм/м	117	98	138	182

* Величина давления рассчитана по значению максимальной радиальной деформации корпуса ампулы, полученной в эксперименте по соотношению (2).

Эксперименты на реакторе БИГР

Для реакторных экспериментов применялась ампула, конструкция которой представлена на рис. 4. Через штуцер в крышке ампула полностью заполнялась раствором борной кислоты, таким образом, что внутри не оставалось свободного объема.

Для измерения температуры раствора во внутреннем объеме ампулы применялись термопары.

На стенку ампулы были приклеены два тензорезистора типа НУ и два тензорезистора типа ФКПА. Схема установки и включения тензорезисторов была аналогична схеме, применявшейся в экспериментах подготовительного этапа.

Ампула размещалась в центральном канале реактора БИГР (рис. 5). Тензометры и термометры проводной линией длиной ~50 м соединялись с измерительной аппаратурой, находящейся за биологической защитой.

Облучение ампулы проводилось в двух статических пусках реактора, входе которых происходил нагрев раствора борной кислоты за счет замедления нейтронов и протекания реакции $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$. Из-за разных коэффициентов линейного расширения стали и водного раствора борной кислоты в ампуле возникало избыточное давление, в результате которого стенки ампулы деформировались.

В ходе обоснования безопасности эксперимента расчетными методами было установлено, что нагрев раствора внутри ампулы на $\Delta T = 12$ С позволяет не превысить значение предела текучести материала стенок ампулы (12X18Н10Т) с запасом не менее 70 %. Это значение подогрева воды было принято в качестве максимально допустимого в эксперименте.

В двух пусках реактора были реализованы равные значения энерговыделения в АЗ (в пределах точности измерений), при этом длительность второго пуска была в 2,5 раза короче.

В каждом пуске использовалась одна и та же ампула с одними и теми же тензорезисторами. В процессе облучений проводилась регистрация температуры раствора в объеме ампулы и деформации стенок.

Результаты измерения деформаций, полученные полупроводниковыми тензорезисторами, представлены на рис. 6, 7.

Устойчивого сигнала от тензорезисторов ФКПА в эксперименте получить не удалось. Регистрируемый сигнал имел значение напряжения равно дрейфу нуля ± 10 мкВ, в то время как ожидаемое значение должно было составлять ~200 мкВ, при этом отсутствовала корреляция сигнала с температурой раствора. Отсутствие сигнала, вероятно, было вызвано нарушением контакта тензорезисторов с поверхностью или механическими повреждениями тензорезисторов в процессе подготовительных и загрузочных операций с ампулой.

Обсуждение результатов экспериментов

Подготовка реакторного эксперимента сопровождалась расчетным моделированием процесса расширения жидкости и напряженно-деформированного состояния ампулы.

Давление в объеме ампулы рассчитывалось для двух случаев. В первом случае предполагалось, что процесс изохорный, ампула имеет абсолютно жест-

кие стенки (консервативное приближение). Во втором случае учитывалось температурное расширение стенок, а также их деформации в результате давления на них раствора. Результаты расчета и измерений, проведенных в ходе эксперимента, представлены в таблице.

По результатам экспериментов деформации корпуса ампулы, измеренные полупроводниковыми тензорезисторами, оказались ниже расчетных на ~30 %. Причина, по которой значения относительной радиальной деформации корпуса ампулы оказались ниже расчетных требует отдельного рассмотрения.

В ходе экспериментов был получен устойчивый сигнал от полупроводниковых тензорезисторов, значение напряжения рассогласования мостовой схемы в эксперименте составляло единицы милливольт, что позволило провести измерения с использованием протяженной линии, соединяющей датчики и измерительную аппаратуру. Влияния помех от исполнительных механизмов реактора на канал измерения не отмечалось.

Сигнал от полупроводниковых тензорезисторов, полученный в экспериментах, согласовывался с изменением температуры раствора по времени в процессе облучения.

По результатам двух пусков полупроводниковые тензорезисторы сохранили работоспособность, что свидетельствует о возможности их применения в дальнейших экспериментах.

Особенностью проведенных экспериментов, которую стоит отметить, являлся примененный способ создания напряжений в стенках ампулы. Исходной причиной возникновения напряжений являлось протекание ядерно-физических процессов взаимодействия нейтронов реактора со средой в объеме ампулы.

Список литературы

1. Колесов В. Ф. Аперiodические импульсные реакторы: Монография в 2 т. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2007. Т. 1. С. 60–63, С. 135–140.
2. Воинов А. М., Глухов Л. Ю., Котков С. П. и др. Растворные реакторы серии ВИР, Импульсные реакторы: история создания и перспективы использования. Труды межотраслевой научной конференции «Импульсные реакторы: история создания и перспективы использования» // Сборник докладов. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2015. Т. 1. С. 29–39.
3. ГОСТ Р 52728-2007 Метод натурной тензотермометрии. Общие требования.
4. Бригер И. А., Мавлютов Р. Р. Сопротивление материалов: Учебное пособие. М.: Наука, 1986. С. 27–30.