

П.А. Блынский¹ , С.К. Аскербеков^{1*} , А.А. Шаймерденов^{1,2} 

¹НИИЭТФ, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Казахстан, г. Алматы

²Институт ядерной физики Министерства Энергетики РК, Казахстан, г. Алматы,

*e-mail: saulet@list.ru

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ КОРРОЗИИ ПРОТОТИПОВ ТОПЛИВА ВТГР

Работа посвящена проблеме, связанной с выбором и отработкой методики высокотемпературных исследований коррозии топливных материалов ВТГР. В работе приводится описание созданной установки для исследования взаимодействия химически активных газов с реакторными материалами. Основным преимуществом созданной установки является возможность проведения полного анализа состава газовой фазы в камере с образцами во время проведения экспериментов. В работе приводятся результаты методических коррозионных испытаний SiC покрытия на графите. Также в работе представлены результаты численных расчетов: распределения скоростей рабочей смеси газов и температуры в трубчатой печи. Расчеты были выполнены для высокотемпературных коррозионных экспериментов прототипов топлива ВТГР в среде паров воды. По результатам расчетов были выбраны оптимальные режимы проведения коррозионных экспериментов. Проведена отработка методики высокотемпературных испытаний и проведены исследования коррозии SiC покрытий в парах воды при температуре 1400°C при давлении водяного пара 1 и 10 Па. Результаты экспериментов и расчетной модели полностью подтвердили возможность проведения исследований прототипов топлива ВТГР на разработанной и созданной установке, а также позволили получить экспериментальные данные о параметрах установки.

Ключевые слова: высокотемпературная коррозия, ВТГР, графит, карбид кремния, реакторные материалы.

P.A. Blynskiy¹, S.K. Askerbekov^{1*}, A.A. Shaimerdenov^{1,2}

¹IETP, Al-Farabi Kazakh national university, Kazakhstan, Almaty

²Institute of Nuclear Physics of the Ministry
of Energy of the Republic of Kazakhstan, Kazakhstan, Almaty,

*e-mail: saulet@list.ru

Calculation and experimental justification of research methods for high-temperature corrosion of HTGR fuel prototypes

The work is devoted to the problem associated with the selection and development of the methodology for high-temperature corrosion studies of HTGR fuel materials. The paper describes the set-up for studying the interaction of reactive gases with reactor materials. The main advantage of the set-up created is the possibility of a complete analysis of the composition of the gas phase in the sample chamber during the experiments. The paper presents the results of methodical corrosion tests of SiC coatings on graphite. The paper also presents the results of numerical calculations: the distribution of speeds of the working gas mixture and temperature in a tubular furnace. The calculations were performed for high-temperature corrosion experiments of HTGR fuel prototypes in a water vapor environment. Based on the calculation results, the optimal modes of corrosion experiments were selected. The methodology for high-temperature testing was tested and corrosion studies of SiC coatings in water vapor at a temperature of 1400°C at a water vapor pressure of 1 and 10 Pa were studied. The results of the experiments and the computational model fully confirmed the possibility of carrying out studies of prototypes of HTGR fuel on the developed and created set-up, and also made it possible to obtain experimental data on the installation parameters.

Key words: high temperature corrosion, HTGR, graphite, silicon carbide, reactor materials.

П.А. Блынский¹, С.К. Аскербеков^{1*}, А.А. Шаймерденов^{1,2}

¹әл-Фараби ат. Қазақ ұлттық университеті ЭТФФЗИ, Қазақстан, Алматы қ.

²Ядролық физика институты Энергетика министрлігі ҚР, Қазақстан, Алматы қ.

*e-mail: saulet@list.ru

ВТГР отын прототиптерінің жоғары температуралы коррозиясын зерттеу әдістемесінің есептік-эксперименттік негіздемесі

Бұл жұмыста ВТГР отын материалдарының тотығуын жоғары температуралы зерттеу әдістемесін таңдау және өңдеу мәселесіне арналған. Жұмыста химиялық белсенді газдардың реакторлық материалдармен өзара әрекеттесуін зерттеу үшін құрылған қондырғының сипаттамасы келтіріледі. Сонымен қатар, құрылған қондырғының негізгі артықшылығы эксперимент жүргізу кезінде үлгілері бар камерадағы газ фазасының құрамына толық талдау жүргізу мүмкіндігі болып табылады. Жұмыста графиттегі SiC жабынның әдістемелік коррозиялық сынақтарының нәтижелері келтіріледі. Сонымен қатар жұмыста сандық есептеулер нәтижелері ұсынылған: осы жұмысқа керекті газдардың қоспасының жылдамдықтарын және құбырлы пештің температурасын үлестіруі көрсетілген. Есептеу су буының ортасында ВТГР отын прототипінің жоғары температуралы коррозиялық эксперименттері үшін орындалды. Сондай-ақ, есептеу нәтижелері бойынша коррозиялық эксперименттерді жүргізудің оңтайлы режимдері таңдалды. Жоғары температуралы сынау әдістемесі пысықталды және 1 және 10 Па су буының қысымы кезінде 1400°C температурада су буында SiC жабындарының коррозиясына зерттеу жүргізілді. Эксперименттер мен есептеу моделінің нәтижелері әзірленген және жасалған қондырғыда ВТГР отын прототиптеріне зерттеу жүргізу мүмкіндігін толық растады, сондай-ақ қондырғы параметрлері туралы тәжірибелік деректерді алуға мүмкіндік берді.

Түйін сөздер: жоғары температуралы коррозия, ВТГР, графит, кремний карбиді, реакторлық материалдар.

Введение

Мировое сообщество активно развивает технологии высокотемпературных газоохладяемых реакторов (ВТГР) [1-6]. Основными преимуществами ВТГР, по сравнению с другими типами реакторов, являются производство водорода и высокоэнтальпийного тепла. Для реакторов типа ВТГР было разработано трехструктурное изотропное (Tristructural-isotropic или TRISO) топливо, в котором графит является основным составляющим материалом [7-9]. Топливный элемент имеет вид сферы (диаметром ~1 мм) с многослойной структурой из пироуглерода (углеродная пленка) и карбид кремниевых (SiC) оболочек, в центре которого находится ядро из диоксида или карбида урана [10-11].

Необходимость разработки и создания трехструктурной оболочки топлива связана с тем, что рабочая температура ВТГР составляет 900-1200°C, а при таких температурах активно протекает реакции коррозии и окисления графита. Данные реакции могут происходить при взаимодействии графита с парами воды и кислородом, содержащимися как примесь в гелиевом теплоносителе, а также при возникновении аварийной ситуации, связанной с разгерметизацией бака реактора.

Поэтому покрытия, стойкие к коррозии и окислению, являются логическим выбором для защиты графитовых материалов при высоких температурах. Для защиты материалов от таких разрушений хорошо зарекомендовал себя карбид кремния (SiC) [12-13]. Пироуглерод является графитообразным компонентом топлива TRISO и характеризуется такими физико-механическими особенностями как стойкость к эрозии и воздействию агрессивных сред, а также он непроницаемый для жидкостей и газов [14-17]. Необходимо отметить, что SiC и пироуглеродные оболочки в TRISO топливе предназначены также и для создания барьера продуктам деления урана и сдерживания их внутри топливного элемента.

Проведение испытаний материалов с целью их характеристики является важной задачей в области исследований перспективных материалов ядерной техники. Поэтому создание методической и аппаратной базы для обеспечения испытаний конструкционных материалов ядерных реакторов, является актуальной задачей современного материаловедения. Особенно актуальным является исследование устойчивости к окислению карбида кремния и покрытий из карбида кремния [18-22].

Установка для исследования взаимодействия химически активных газов с реакторными

материалами «CorrSiC'a» создана для проведения экспериментов по обоснованию безопасности технических решений газоохладяемого реактора (ВТГР), а именно, для исследования высокотемпературной коррозии конструкционных материалов активной зоны реактора: графита и перспективных карбид кремневых (SiC) покрытий.

Коррозионная камера установки выполнена из промышленной высоковакуумной трубчатой печи GSL-1600, обеспечивающий возможность проведения коррозионных исследований на максимальных температурах 1500-1600°C при атмосферном давлении и 1400-1500°C в вакууме (0,1 Па).

Созданная установка является универсальной и позволяет проводить высокотемпературные испытания конструкционных материала-

лов при различных режимах: термодесорбционный режим, коррозионные испытания образца при заданной температуре, и в присутствии различных химически активных газов.

Экспериментальная установка

Коррозионные исследования материалов проводятся различными методами, среди которых существует метод, основанный на анализе состава газовой фазы в камере с образцом, подвергающимся коррозии. Структурно установка для проведения таких экспериментов состоит из 4 блоков: система подачи газовой смеси в камеру с образцом; камера с образцом; система регистрации парциальных давлений газа; система откачки камеры (см. рисунок 1).

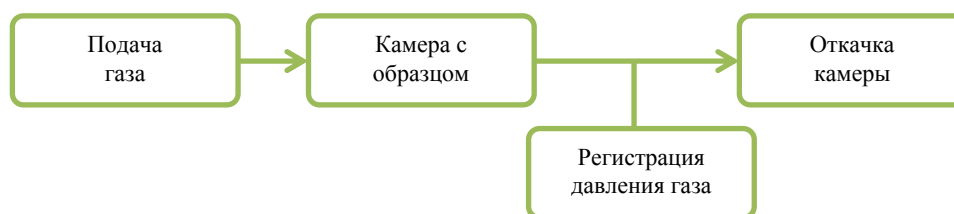


Рисунок 1 – Схема коррозионных экспериментов

Такие эксперименты строятся по следующей схеме: определяется зависимость изменения давления и состава газов в системе при изменении температуры образца. Также здесь может быть проанализирована как кинетика изменения давления газов при изменении температуры образца, так и квазиравновесные уровни давления, установившиеся в системе при разных условиях эксперимента.

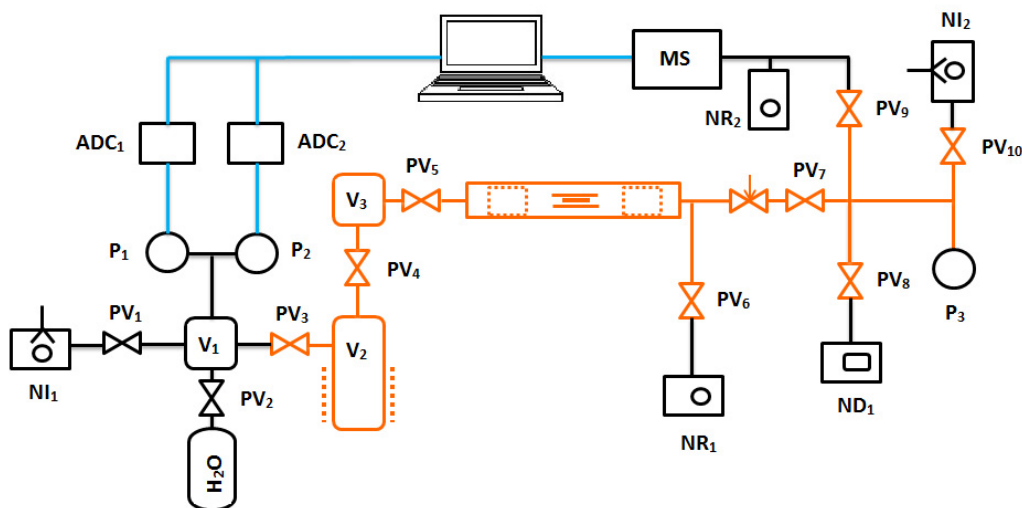
Основное преимущество созданной установки является возможность проведения полного анализ состава газовой фазы в камере с образцами во время проведения экспериментов. На рисунке 2 приведена принципиальная схема установки. Оранжевой линией обозначены участки установки которые должны прогреваться выше 100 °С при экспериментах с парами воды.

Основным узлом установки является рабочая камера собственной разработки на базе промышленной высоковакуумной трубчатой печи GSL-1600, обеспечивающий возможность

проведения коррозионных испытаний на максимальных температурах 1500–1600°C при атмосферном давлении и 1400–1500°C в вакууме (0,1 Па). Нагреваемая камера печи в соответствии с рисунком 3, выполнена из трубы высококачественного оксида алюминия (Al₂O₃ 99,8%) длиной 1000 мм, внешним диаметром 50 мм и внутренним диаметром 40 мм. Камера снабжена вакуумными шлюзами с термостойким силиконовым уплотнением, обеспечивающими уровень натекания лучше 0,1 Па·л/мин. Длина нагреваемой зоны – 300 мм, зона однородного нагрева – 150 мм, точность поддержания температуры ±1 °С. Образец загружается в центр нагреваемой зоны в загрузочном тигле из высококачественного оксида алюминия. Для предотвращения нагрева излучением из горячей области тигля стальных вакуумных фланцев и силиконовых уплотнительных колец в них, в печь устанавливаются тепловые экраны из пористого оксида алюминия (искусственного корунда). Корундовые экраны имеют 3 мм зазор со стенками трубы печи и, при установке их на

оптимальном расстоянии от фланцев 20 см, эффективно предотвращают нагрев фланцев выше 150°C даже при температуре печи 1500 °C, не нарушая при этом движение медленных

газовых потоков. Печь питается от сети однофазного переменного тока 220В, 30А, мощность 4 кВт. Размеры рабочей камеры приведены в таблице 1.



NI – механический форвакуумный насос; PV – клапан вакуумный; P – датчик давления; V – вакуумная камера; NR – турбомолекулярный насос; ND – магниторазрядный насос; MS – масс-спектрометр; ADC – АЦП.

Рисунок 2. – Принципиальная схема установка по исследованию взаимодействия химически активных газов с реакторными материалами «CorrSiC’a»



Рисунок 3 – Схема расположения элементов рабочей камеры установки CorrSiC’a

Таблица 1 – Геометрия рабочей камеры

	H (толщина), см	L (длина), см	D (диаметр), см
Трубка	0,5	100	5
Тигель для образца	0,3	10	2
Тепловые экраны	–	6	3,7

Установка CorrSiC’a снабжена передвижным постом высоковакуумной без масляной откачки TPS–Compact на базе турбомолекулярного насоса TV–301 и сухого спирального насоса IDP–3 (Agilent Technologies), что

позволяет полностью исключить возможность попадания высокомолекулярных органических соединений в вакуумную систему установки. Технические параметры установки приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Основные параметры установки CorrSiC'a

Температурный диапазон, градусов Цельсия	мин.	25
	макс.	1600
Скорость нагрева–охлаждения, градусов/мин	мин.	1
	макс.	10
Диапазон давлений, Па	мин.	10^{-3}
	макс.	10^5
Исследуемая масса, М	мин.	2
	макс.	100

Экспериментальная часть

Для определения оптимальных режимов и методических процедур, были выбраны образцы на основе мелкозернистого реакторного графита, специально разработанные для реактора ВТГР, с коррозионно-стойким покрытием. Эксперименты проводились в парах воды с давлением пара 10 Па и 1 Па.

Для поддержания стабильного потока пара в систему, было предложено использовать калиброванные натекания из испарителя в коррозионную камеру, т.е. коррозию исследовалась в проточном реакторе. В процессе эксперимента образец нагревался в печи, в которой с помощью натекателя пара и ограниченной скорости откачки поддерживалось парциальное давление воды на уровне 1 или 10 Па в течение всего эксперимента. Скорость нагрева была равна: 5 или $10^{\circ}\text{C}/\text{мин}$.

Объект исследования

В представленной работе испытывались образцы мелкозернистого графита (IG-110) с защитным покрытием из карбида кремния. Данная марка графита и технология нанесения защитного покрытия были разработаны специально для графитовых материалов реакторов типа ВТГР, в том числе для топливных сборок и TRISO топлива.

Образец имел форму параллелепипеда размерами $4.0 \times 4.0 \times 45.0$ мм., в соответствии с рисунком 4. Перед экспериментом образцы мыли в спирте в ультразвуковой ванне, и отжигали в течение 5 часов в муфельной печи, при температуре 400°C . Образец размещался в центре зоны нагрева печи.

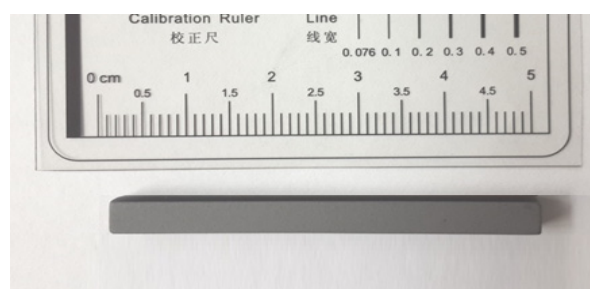


Рисунок 4 – Вид исследуемого образца

Расчет параметров эксперимента по исследованию коррозии

Для оценки термических нагрузок необходимо было определить температурное поле по исследуемому образцу. Но из-за небольшого размера образца, осуществить это экспериментально не представлялось возможным. Поэтому, эти данные были получены путем численного моделирования.

С помощью программы COMSOL Multiphysics были проведены численные расчеты распределения температуры и потока рабочей смеси (пары воды) по объему рабочей камеры трубчатой печи при размещении в ней образца для некоторых типичных входных давлений и температур рабочей смеси.

Определяющими уравнениями в построенной модели неизоэтермического потока для расчета распределения скоростей потока рабочей смеси и температур являлись уравнения тепломассопереноса и уравнения лучистого обмена между поверхностями. Для описания движения газовых потоков в коррозионной камере использовалась модель турбулентного движения на базе уравнения Навье-Стокса (в

Рейнольдсовом усреднении) для стандартной k - ε модели [16] имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho k_E) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k_E u_i) = \\ & = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{k_E}} \right) \frac{\partial k_E}{\partial x_j} \right] + \\ & + P_k + P_b + \rho \varepsilon - Y_M + S. \end{aligned} \quad (1)$$

где u – скорость потока; ρ – плотность среды, кг/м³; Па; k_E – турбулентная кинетическая энергия, м²/с²; ε – турбулентная скорость затухания, м²/с³; μ – динамическая вязкость, Па·с; μ_t – турбулентная динамическая вязкость, Па·с. Для коэффициента затухания ε :

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \\ & = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \\ & + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k_E} (P_k + C_{3\varepsilon} P_b) + C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S. \end{aligned} \quad (2)$$

Турбулентная скорость определяется по формулам:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k_E^2}{\varepsilon}, \quad (3)$$

$$P_k = -\rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i}, \quad (4)$$

$$P_b = \mu_t S, \quad (5)$$

где $S \equiv \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$ – модуль среднего тензора скорости деформации.

Эффект выталкивающей силы определялся как:

$$P_b = \beta g_i \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i}, \quad (6)$$

где Pr_t – турбулентное число Прант для; T – температура, К; g_i – компоненты гравитационного вектора в i -ом направлении. Для стандартной модели значение $Pr_t = 0,85$.

Коэффициент теплового расширения:

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p, \quad (7)$$

Константы модели используемые в расчеты были следующие:

$$\begin{aligned} C_{1\varepsilon} &= 1,44; & C_{2\varepsilon} &= 1,92; \\ C_{3\varepsilon} &= -0,33; & C_\mu &= 0,09; \\ \sigma_{k_E} &= 1,0; & \sigma_\varepsilon &= 1,3. \end{aligned} \quad (8)$$

Уравнение теплопереноса между газом и поверхностями образца и трубчатой печи [17] (9):

$$\rho C_p \vec{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q. \quad (9)$$

где C_p – теплоемкость при постоянном давлении, Дж/(кг·К); Q – общая удельная мощность источника, Вт/м³.

Уравнение для лучистого обмена между поверхностями трубчатой печи и графитового образца):

$$-n \cdot (-k \nabla T) = \gamma (G - \sigma_{SB} T^4), \quad (10)$$

$$G = G_m (J) + F_{amb} \sigma_{SB} T_{amb}^4 + G_{ext}, \quad (11)$$

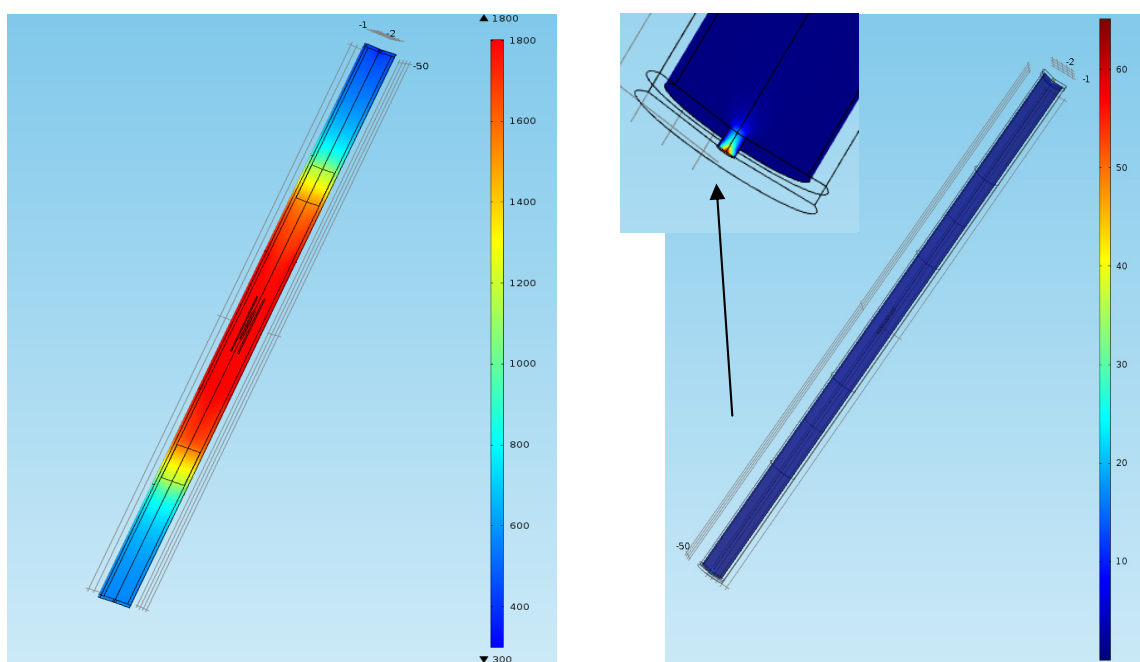
$$(1 - \gamma) G = J - \gamma \sigma_{SB} T^4, \quad (12)$$

где n – преломляющая способность; γ – излучательная способность; G – падающий тепловой поток, Вт/м²; $\sigma_{SB} = 5,67E-8$ Вт/(м²Т⁴) – константа Стефана–Больцмана; J – светимость поверхности, Вт/м²; G_m – полное облучение, Вт/м²; F_{amb} – фактор окружного обзора (доля не перекрытых поверхностей); T_{amb} – предполагаемая температура в направлении F_{amb} , К; G_{ext} – облучение внешними источниками радиации, Вт/м².

В процессе расчета определялось связанное решение этих уравнений. Температурно-зависимые параметры для газов и материалов, соприкасающихся с потоком газа были взяты из встроенной в COMSOL Multiphysics библиотеки.

Результаты расчета распределения температуры по образцу приведены в таблице 3. На рисунке 5 приведены графические распределения тепловых потоков и потоков подаваемого

окислителя в рабочую камеру. Проведенные численные расчеты показали, что разница температур по образцу составляет менее 1 К, с чего можно сделать вывод, что образец в процессе эксперимента по коррозии не будет подвержен дополнительным термическим нагрузкам, а разрушение образцов будет обусловлено только окислительными и коррозионными реакциями, что является крайне важным для чистоты эксперимента.



Распределение температуры (Т, К)

Распределение потока (v, м/с)

Рисунок 5 – Графические распределения тепловых потоков и потоков подаваемого окислителя в рабочую камеру

Таблица 3 – Расчет распределения температуры по образцу

Температура нагрева, К	Положение	Значение температуры, К				T2-T1
		Низ		Верх		
		Центр	Край (Г1)	Центр	Край (Г2)	
1500 К	Поверхность	1496,3	1496,4	1496,5	1497,1	0,7
	Объем	1496,3	1496,3	1496,3	1496,7	0,4
1800 К	Поверхность	1788,9	1788,9	1789,6	1789,8	0,9
	Объем	1789,1	1789,1	1789,8	1789,8	0,8

Методические эксперименты

Процедуры методического эксперимента состояли в следующем:

1) исследуемый образец загружался в центр нагреваемой зоны печи в тигле, устанавливались тепловые экраны, печь герметизировалась торцевыми вакуумными фланцами и включалась вакуумная откачка;

2) после достижения уровня вакуума 10^{-3} Па включалась регистрация масс-спектров в камере и включался нагрев образца с выбранной скоростью нагрева (5 или $10^\circ\text{C}/\text{мин}$);

3) нагрев проводился до максимальной температуры 1400°C в условиях откачки. (Необходимо отметить, что минимальное достигаемое давление 10^{-3} Па определялось парциальным давлением паров воды, десорбирующихся с внутренней поверхности трубы. При этом остаточные парциальные давления азота и кислорода) были на два-три порядка ниже;

4) масс-спектрометр непрерывно регистрировал парциальные давления следующих компонентов (масс): 2 (Водород, H_2), 12 (Углерод), 14 (компонента CO), 16 (метан CH_4 +

компонента воды), 17 (компонента воды), 18 (вода, H_2O), 28 ($\text{CO}+\text{N}_2$), 32 (кислород, O_2), 40 (Аргон), 44 (CO_2).

Полученные результаты экспериментов приведены на рисунках 6, 7.

Первичный анализ коррозионных кривых изменения состава газа в камере позволил сделать следующие выводы:

- видно, что при линейном нагреве, общий уровень давления газов в камере увеличивается, при этом наблюдается снижение давления отдельных газов, таких как кислород (32) и вода (16,17,18);

- наиболее заметные изменения давления в камере при коррозионных испытаниях происходят для массовых чисел: 2 (H_2), 16 (CH_4), 28 (CO), 44 (CO_2);

- наблюдается существенное отличие в скоростях изменения давления в коррозионной камере для различных газов, которые имеют температурную зависимость. Этот факт свидетельствует о существенно отличающихся значениях скоростей реакций и сложном механизме коррозии, зависящем от процессов, имеющих различные константы.

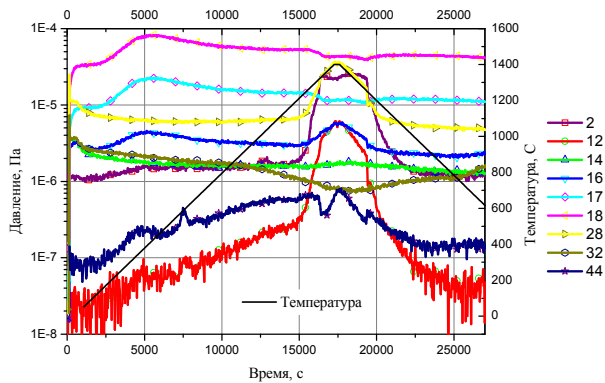


Рисунок 6 – Коррозия образца в 10 Па воды (указаны массовые числа газов)

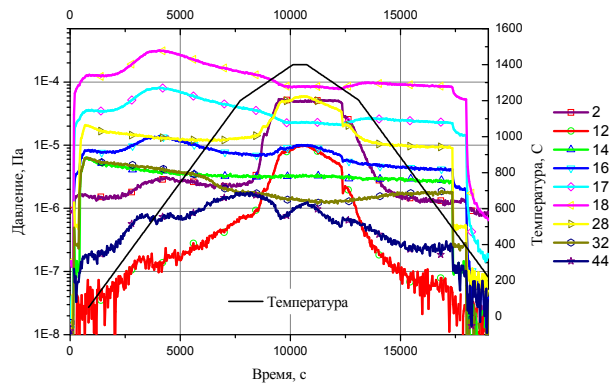
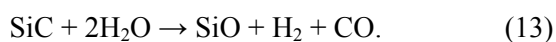


Рисунок 7 – Коррозия образца в 1 Па воды (указаны массовые числа газов)

Результаты подтверждают, что SiC-покрытие графита при нагреве до $1200\text{-}1400^\circ\text{C}$ в атмосфере 10 Па или 1 Па водяного пара подвергается активной коррозии по реакции:



При этом слой SiC расходуется на образование летучего SiO, угарного газа CO и водорода. Поскольку SiO невозможно зарегис-

трировать масс-анализатором, т.к. молекула конденсируется на металлических стенках входной вакуумной камеры (а осуществить прогрев анализатора до температур $200\text{-}250^\circ\text{C}$ недопустимо), то основными контролируемыми компонентами реакции (13) были давление водяного пара, водорода и CO.

Как видно из рисунка 8, реакция начинается при температуре 1320°C бурным ростом выделения водорода и CO и снижением давле-

ния паров воды, далее реакция выходит на равновесие и процесс взаимодействия стабилизируется несмотря на дальнейший рост температуры до 1400°C, последующую остановку нагрева и снижение температуры до 1240°C. Только при дальнейшем снижении температуры ниже 1240-1220°C реакция прекращается, причем точки начала и окончания самоподдерживающейся реакции (13) хорошо видны на диаграммах изменения парциального давления водорода и монооксида углерода CO в виде характерных крутых фронтов или коротких провалов, как показано ниже на увеличенном фрагменте графика рисунка 8). Механизм возникновения реакции хорошо виден на

зависимости изменения парциального давления воды (рисунки 6-8). Необходимо сказать, что снижение скорости нагрева образцов с 10°C/мин до 5°C/мин в диапазоне от 1200°C до 1400°C, которое было предпринято при исследовании коррозии образцов при 1 Па водяного пара в попытке «растянуть» фронты выхода и спада давления водорода при начале и окончании самоподдерживающейся реакции, не показало аналогичного удвоения длительности «фронтов», что свидетельствует о независимости скорости реакции от скорости нагрева образца. Это дополнительно подтверждает вывод, что реакция (13) имеет самоподдерживающийся характер.

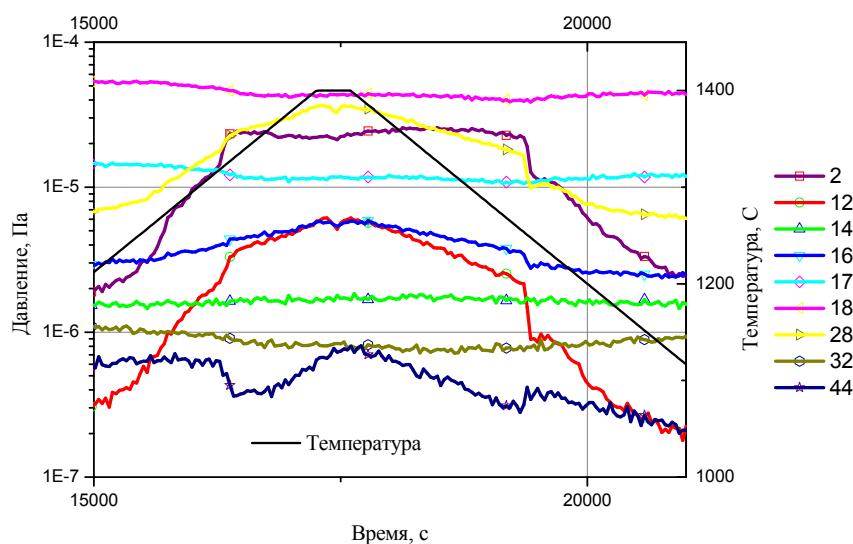


Рисунок 8 – Процесс активной коррозии SiC на примере эксперимента с 10 Па паров воды

Таким образом, по результатам методических экспериментов с образцом графита (IG-110) с защитным покрытием из карбида кремния в парах воды при температурах до 1400°C и давлениях окислителя (пары воды) 10 и 1 Па, были получены комплексные временные, температурные диаграммы экспериментов по коррозии. Так же по полученным диаграммам видно, что при выбранных параметрах проведения экспериментов, отклик системы регистрации данных производится практически мгновенно, о чем свидетельствует синхронность изменения температуры и общего давления газов в рабочей камере.

Заключение

Таким образом, расчетно-экспериментальные работы по отработке методики исследований процессов высокотемпературной коррозии образцов с карбид-кремниевыми покрытиями позволили получить ряд важных результатов для будущих экспериментов с прототипами топлива ВТГР.

В частности, по результатам расчетов в среде COMSOL Multiphysics получены распределения температур и потока коррозионной смеси для зоны нагрева образца в установке CorSiC'a в зависимости от давления и скорости подачи смеси: выбрана оптимальная конфи-

гурация коррозионной зоны: вид и размер держателя образца, расположение отражающих экранов, скорость откачки. Для выбранных конфигураций максимальный градиент температуры по образцу, на момент напуска, составило менее одного градуса. Следовательно, можно заключить, что на разных температурных режимах и на момент напуска газа в камеру, термические нагрузки по образцу отсутствуют. Данная расчетная модель будет применяться для будущих экспериментов с новыми образцами с другой геометрией и структурой.

Проведена отработка методики высокотемпературных испытаний и проведены исследования коррозии SiC покрытий в парах воды

при температуре 1400°C при давлении водяного пара 1 и 10 Па. Результаты экспериментов и расчетной модели полностью подтвердили возможность проведения исследований прототипов топлива ВТГР на разработанной и созданной установке, а также позволили получить экспериментальные данные о параметрах установки.

В дальнейшем предложенная методика будет использована для экспериментов по определению свойств нового типа ядерного топлива TRISO реактора ВТГР в условиях моделирующих реальную работу реактора.

Работа выполнена в рамках проекта AP08052726 при поддержке МОН РК.

Литература

- 1 Andrew C. Kadak The Status of the US High-Temperature Gas Reactors //Engineering. – 2016. – Vol. 2. – P. 119-123.
- 2 Мацуи К. Тенденция разработок реакторов следующего поколения и реакторов нового типа в Японии //Атомная техника за рубежом. – 2004. – №4. – С. 24-27.
- 3 Shohei Ueta, Jun Aihara, Kazuhiro Sawa, Atsushi Yasuda, Masaki Honda, Noboru Furihata Development of high temperature gas-cooled reactor (HTGR) fuel in Japan //Progress in Nuclear Energy. – 2011. – Vol. 53. – P. 788-793.
- 4 Zongxin Wu, Suyuan Yu. HTGR projects in China / Wu Zongxin, Yu Suyuan // Nuclear engineering and technology. – 2007. – Vol. 39. – P. 103-110.
- 5 Taryo T., Husnayani I., Subekti R.M., Sudadiyo S., Saragi E., Rokhmadi The development of HTGR-TRISO coated fuels in the globe: challenging of Indonesia to be an HTGR fuel producer //IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. – 2019. – Vol. 1198. – P. 022062.
- 6 Шаманин И.В., Гаврилов П.М. Высокотемпературные ядерные энергетические технологии //Известия Томского политех. университета. – 2010. – Т. 316. – № 4. – С.5-9.
- 7 Jeffrey J. Powers, Brian D. Wirth A review of TRISO fuel performance models //Journal of Nuclear Materials. – 2010. – Vol. 405. – P. 74-82.
- 8 Воеводин В.Н., Грибанов Ю.А., Гурин В.А., Гурин И.В., Гуйда В.В. Углерод-графитовые материалы в ядерной энергетике (обзор) //ВАНТ. – 2015. – №2(96). – С.52-64.
- 9 Комир А.И., Одейчук Н.П., Николаенко А.А., Ткаченко В.И., Деревянко В.А., Кривченко О.В., Шепелев А.Г. Графит как конструкционный материал ядерных энергетических систем IV поколения //ВАНТ. – 2016. – №1(101). – С.51-55.
- 10 Ohashi H. Sato H., Tachibana Y., Kunitomi K., Ogawa M. Concept of an Inherently-safe High Temperature Gas-cooled Reactor //AIP Conf. Proc. ICANSE2011: Denpasar. – 2012. – Vol. 1448. – № 14-17. – P. 50-58.
- 11 Sawa K., Ueta S. Research and development on HTGR fuel in the HTTR project //Nucl Eng Des. – 2004. – Vol. 233. – P.163-172.
- 12 Katoh Y., Snead L. Silicon carbide and its composites for nuclear applications – Historical overview //Journal of Nuclear Materials. – 2019. – Vol. 526. – P. 151849.
- 13 Roy J., Chandra S., Das S. and Maitra S. Oxidation behaviour of silicon carbide - A review //Rev.Adv.Mater.Sci. – 2014. – Vol. 38. – P.29-39.
- 14 Golubev I.E., Kurbakov S.D., Chernikov A.S. Experimental and computational study of the pyrocarbon and silicon carbide barriers of HTGR fuel particle //Atomic Energy. – 2008. – Vol. 105. – P. 18-31.
- 15 Tennery V.J., Yust C.S., Krautwasser P., Beatty R.L. Structural Characterization of HTGR Pyrocarbon Fuel Particle Coatings //Journal of the American Ceramic Society. – 1977. – Vol. 60(5-6). – P. 268-274.
- 16 Chernikov A. S. HTGR fuel and fuel elements //Energy. – 1991. – Vol. 16(1-2). – P.263-274.
- 17 Kimio Hayashi, Kousaku Fukuda. Release Behavior of Metallic Fission Products from Pyrocarbon-Coated Uranium-Dioxide Particles at Extremely High Temperatures. // Journal of Nuclear Science and Technology. – 1990. – Vol. 27:4. – P.320-332.
- 18 Fu Zhi-qiang, Wang Cheng-biao, Tang Chun-he, Zhao Hong-sheng, Robin Jean-Charles Oxidation behaviors of SiO₂/SiC coated matrix graphite of high temperature gas-cooled reactor fuel element //Nuclear Engineering and Design. – 2013. – Vol. 265. – P. 867-871.
- 19 He-Jun Li, Qian-Gang Fu, Jian-Feng Huang, Xie-Rong Zeng and Ke-Zhi Li Research on the Oxidation-Protective Coatings for Carbon/Carbon Composites //Carbon Science – 2005. – Vol. 6, No. 2. – P. 71-78.
- 20 Yootaek Kima, Changsub Jang and Eung-Seon Kim SiC coating on various nuclear-grade graphite substrates by chemical vapor reaction //Journal of Ceramic Processing Research. – 2014. – Vol. 15, No. 5. – P. 294-297.

21 Alexandra Kovalčíková, Jaroslav Sedláček, Zoltán Lenčécs, Roman Bystrický, Ján Dusza, Pavol Sajgalík Oxidation resistance of SiC ceramics prepared by different processing routes //Journal of the European Ceramic Society. – 2016. – Vol. 36(15). – P.3783-3793.

22 Jie Xiao, Hua-Yue Zhang, Sheng-Kai Gong, Hui-Bin Xu, Hong-Bo Guo High-temperature oxidation resistance of Si-coated C/SiC composites //Rare Met. – 2019. – P.s12598.

References

- 1 Andrew C. Kadak, *Engineering*, 2, 119-123 (2016).
- 2 K. Matsui, *Atomic Engineering Abroad*, 4, 24-27 (2004). (in Russ)
- 3 Shohei Ueta, Jun Aihara, Kazuhiro Sawa, Atsushi Yasuda, and Masaki Honda, *Progress in Nuclear Energy*, 53, 788-793 (2011).
- 4 Zongxin Wu and Suyuan Yu, *Nuclear engineering and technology*, 39, 103-110 (2007).
- 5 T. Taryo, I. Husnayani, R.M. Subekti, S. Sudadiyo, E. Saragi, Rokhmadi, *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series*, 1198, 022062 (2019).
- 6 I.V. Shamanin and P.M. Gavrilov, *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 316(4), 5-9, (2010). (in Russ)
- 7 J. Jeffrey Powers, D. Brian, *Journal of Nuclear Materials*, 405, 74–82, (2010).
- 8 V.N. Voevodin, Yu.A. Gribanov, V.A. Gurin, I.V. Gurin, and V.V. Guida, *VANT*, 2 (96), 52-64 (2015). (in Russ)
- 9 A.I. Komir, N.P. Odeychuk, A.A. Nikolaenko, V.I. Tkachenko, V.A. Derevyanko, O.V. Krivchenko, and A.G. Shepelev, *VANT*, 1 (101), 51-55 (2016). (in Russ)
- 10 H. Ohashi, H. Sato, Y. Tachibana, K. Kunitomi, and M. Ogawa, *AIP Conf. Proc. ICANSE2011: Denpasar*, 1448 (14-17), 50-58 (2012)
- 11 K. Sawa and S. Ueta, *Nucl Eng Des.*, 233, 163-172, (2004).
- 12 Y. Katoh and L. Snead, *Journal of Nuclear Materials*, 526, 151849 (2019).
- 13 J. Roy, S. Chandra, S. Das, S. Maitra, *Rev.Adv.Mater.Sci*, 38, 29-39 (2014).
- 14 I.E. Golubev, S.D. Kurbakov, and A.S. Chernikov, *Atomic Energy*, 105, 18-31 (2008).
- 15 V.J. Tennery, C.S. Yust, P. Krautwasser, and R.L. Beatty, *J. of the American Ceramic Society*, 60(5-6), 268-274 (1977).
- 16 A.S. Chernikov, *Energy*, 16 (1-2), 263-274 (1991).
- 17 Kimio Hayashi, and Kousaku Fukuda, *J. of Nuclear Science and Technology*, 27:4, 320-332 (1990).
- 18 Fu Zhi-qiang, Wang Cheng-biao, Tang Chun-he, Zhao Hong-sheng, and Robin Jean-Charles, *Nuclear Engineering and Design*, 265, 867-871 (2013).
- 19 He-Jun Li, Qian-Gang Fu, Jian-Feng Huang, Xie-Rong Zeng, and Ke-Zhi Li, *Carbon Science*, 6(2), 71-78 (2005).
- 20 Yootaek Kima, Changsub Jang, and Eung-Seon Kim, *Journal of Ceramic Processing Research*, 15(5), 294~297 (2014)
- 21 Alexandra Kovalčíková, Jaroslav Sedláček, Zoltán Lenčécs, Roman Bystrický, Ján Dusza, and Pavol Sajgalík, *J. of the European Ceramic Society*, 36(15), 3783-3793, (2016)
- 22 Jie Xiao, Hua-Yue Zhang, Sheng-Kai Gong, Hui-Bin Xu, and Hong-Bo Guo, *Rare Met.*, P.s12598 (2019).