

УСТРОЙСТВА И ИЗДЕЛИЯ НА ОСНОВЕ НАНОМАТЕРИАЛОВ И НАНОТЕХНОЛОГИЙ

УДК 533.66.063

АНАЛИЗ И ФИЛЬТРАЦИЯ НАНОЧАСТИЦ ПРИ НАГРЕВАНИИ ШАРОВЫХ ИМИТАТОРОВ ТВЭЛ В ГЕЛИИ

© 2021 г. А. В. Загнитько^{1,*}, Г. В. Мамот¹

¹ *Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва, Россия*

**E-mail: zagnitko_av@nrcki.ru*

Поступила в редакцию 22.10.2020 г.

После доработки 09.12.2020 г.

Принята к публикации 14.12.2020 г.

Описана методика и проведен анализ радиоактивных наноаэрозолей, образующихся при нагревании до 1500 К в гелии шаровых имитаторов тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ) для высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов. Установлено, что при высокотемпературной газовой коррозии и утечке радиоактивных продуктов деления из ТВЭЛ могут образовываться наноаэрозоли графита с изотопами йода и теллура. Более 80% их γ -активности приходится на частицы размером от 0.002 до 0.5 мкм. Исследована их фильтрация высокоэффективными стекловолоконистыми и мембранными металлокерамическими фильтрами с многослойной и регенерируемой наноструктурой при повышенной температуре.

DOI: 10.1134/S1992722321040142

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что высокотемпературные газоохлаждаемые реакторы (ВТГР) с гелиевым теплоносителем могут быть использованы в качестве энергоисточника с температурой гелия $T \leq 1500$ К [1, 2]. В газоохлаждаемых реакторах, например ВГР-50 или ВГ-400, активная зона состоит из свободной засыпки шаровых уран-графитовых тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ), в которых топливо содержится в виде микро-ТВЭЛ. Эффективность удержания продуктов деления в таких ТВЭЛ зависит от выбора параметров и технологии изготовления микро-ТВЭЛ с микросферами из диоксида урана или плутония. Шаровые ТВЭЛ содержат топливный сердечник, в котором в графитовой матрице диспергированы микро-ТВЭЛ. Для их изготовления микро-ТВЭЛ смешивают с матричной композицией на основе реакторного графита и пека, после чего прессуют сердечник. На сердечник напрессовывают безтопливную оболочку из того же матричного графитового материала с термообработкой [1–4].

В высокотемпературной части ВТГР могут происходить реакции коррозии графита при взаимодействии с такими примесями в гелии, как O_2 , H_2O , CO_2 , H_2 , что приводит к деградации его прочностных свойств и снижению теплопроводности [1–8]. В результате в процессе эксплуатации ВТГР необходимо не допускать попадания заметных количеств кислорода и влаги в активную зону для исключения газовой коррозии гра-

фита и утечки радиоактивных (РА) продуктов деления, а также обеспечить высокоэффективную фильтрацию гелия от дисперсных примесей при высокой температуре для устранения загрязнения оборудования и воздуха помещений РА-наноаэрозолями [1–8].

Процессы высокотемпературной газовой коррозии различных марок российского и зарубежного графита (ВПГ, МПГ, ГРП-2, ГР-280, ГР-220, IG-110, ГСП и т.п.) исследовались достаточно интенсивно [1–8]. Основное внимание уделялось кинетике окисления графита, изменению его массы и анализу газового состава в коррозионных камерах при $T = 700–1700$ К. Однако образование наноаэрозолей и влияние утечки РА-продуктов деления на “пыление” шаровых уран-графитовых ТВЭЛ для ВТГР с их высокоэффективной фильтрацией при повышенной температуре исследованы недостаточно [1–8].

Цель данной работы — экспериментальное изучение наноаэрозолей, образующихся при высокотемпературной коррозии реакторного графита в гелии с примесью воды, кислорода и паров йода, анализ дисперсного состава РА-наночастиц, образующихся при нагревании до 1300–1500 К уран-графитовых монолитных шаровых имитаторов ТВЭЛ с микро-ТВЭЛ с ураном ^{235}U , а также их высокоэффективной локализации при высокой температуре НЕРА стекловолоконистыми (СВ) и металлокерамическими (МК) фильтра-

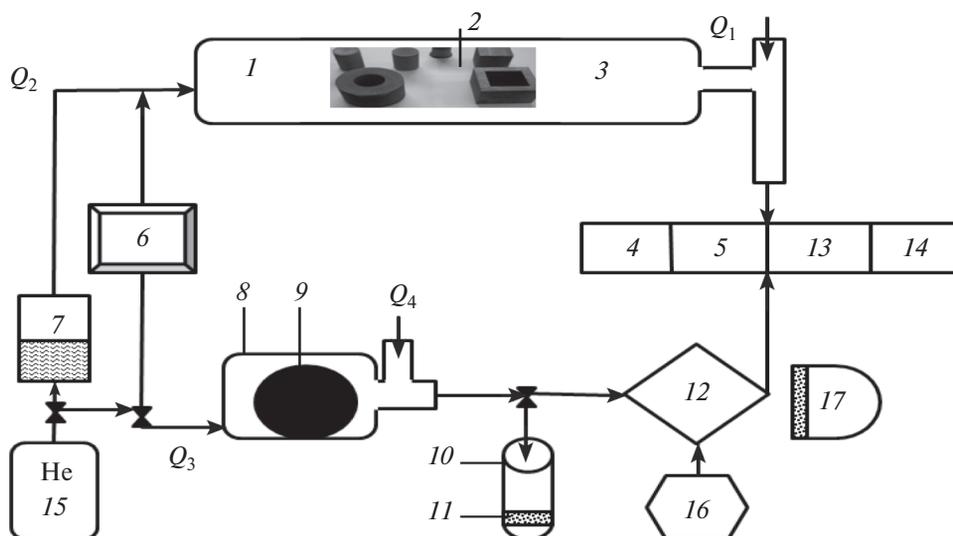


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для исследования дисперсных частиц при нагревании образцов матричного реакторного графита и уран-графитовых шаров для ВТГР: 1 – кварцевая коррозионная камера, 2 – образцы графита, 3 – зона их нагрева до 1500 К, 4 – диффузионная батарея для измерения коэффициента диффузии и размеров наночастиц, 5 – устройство для их униполярной зарядки и определения тока переноса, 6 – вымораживатель молекулярных примесей из гелия с МК-фильтром при $T \approx 77.4$ К, 7 – распылитель для подачи примесей воды с кислородом в гелий, 8 – коррозионная камера из кварца с печью для нагревания шаровых ТВЭЛ 9 в потоке гелия, 10 – шестикаскадный импактор, 11 – СВ-фильтр на выходе из импактора, 12 – фильтрационный блок с СВ- МК-фильтрами для улавливания наночастиц, 13 – ультрамикроскопическая кювета для анализа зарядов частиц, 14 – фотометр дисперсных частиц в гелии, 15 – баллон с гелием, 16 – генератор частиц технического углерода, 17 – γ -детектор.

ми с многослойной и регенерируемой мембранной наноструктурой [9–16].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

На рис. 1 приведена схема экспериментальной установки для анализа дисперсных микрозагрязнений. Их образование при нагревании образцов реакторного графита до 1500 К в потоке гелия исследовали с использованием кварцевой коррозионной камеры 1 смесительного типа [9–13]. Количество образцов прямоугольной или цилиндрической формы 2 в камере 1 варьировали от 8 до 12 штук с геометрической площадью их поверхности ~ 0.01 м². Образцы 2 непрерывно продували фильтрованным гелием с расходом Q_2 , который на выходе из зоны нагрева 3 разбавлялся потоком холодного гелия Q_1 . Соотношение $Q_1/Q_2 \approx 4-5$, а суммарный расход $Q = Q_1 + Q_2 \leq 200$ см³/с.

Известно [1–8], что графит ввиду адсорбционных свойств значительно поглощает различные газы. Поэтому образцы 2 предварительно откачивали в течение 5 ч при $T \approx 1500$ К.

Гелий с содержанием примесей менее 0.0001 об. % перед подачей в коррозионную камеру 1 дополнительно очищали от примесей воды, кислорода и прочих путем их вымораживания в порах МК-фильтра 6 при температуре жидкого азота 77.4 К [13].

В отдельных экспериментах исследовали влияние добавок паров йода в поток гелия на коррозию матричного графита ТВЭЛ. Пары йода получали путем его испарения при температуре от 300 до 350 К. Конструкция генератора паров йода аналогична устройству 1.

Дозированную подачу паров воды с примесями кислорода в поток гелия осуществляли из аэрозольного распылителя 7 с заданной концентрацией субмикронных капель воды [11–13].

Размер наночастиц (НЧ) определяли с помощью диффузионной батареи 4 путем измерения величины их коэффициента диффузии [9, 10]. Для определения счетной концентрации N НЧ заряжали униполярными ионами в устройстве с коронным разрядом 5. По величине тока переноса униполярно заряженного аэрозоля, возникающего при осаждении частиц на волокна электропроводящего фильтра, соединенного с электрометрическим усилителем, рассчитывали величину N [11, 12].

Исследование образования дисперсных загрязнений при нагревании шарового ТВЭЛ 9 с ураном осуществляли в коррозионной камере из кварца 8 (рис. 1). Предварительно шаровые имитаторы ТВЭЛ с ²³⁵U облучали в течение 3 ч на реакторе Ф–1 в НИЦ “Курчатовский институт” при флюенсе тепловых нейтронов $\sim 6 \times 10^{13}$ нейтр./см² и выдерживали перед загрузкой в нагревательную камеру 8 в течение 14 ч для РА-“остывания”. При

этом мощность дозы γ -излучения на расстоянии 0.5 м составляла 10 мр/ч. Массы шара и урана составляли 0.202 и 0.0005 кг соответственно. Матричные графитовые покрытия шаровых ТВЭЛ диаметром 60 мм были изготовлены из плотного среднезернистого графита улучшенной структуры марки ЗОПГ (80 мас. %) с добавкой средне-температурного (10 мас. %) и высокотемпературного (10 мас. %) пеков [1–4]. Зольность ЗОПГ составляет не более 0.02%.

Шар 9 в камере 8 непрерывно обдувался потоком гелия особой чистоты при температуре 1400 К с расходом $Q_3 = 20\text{--}30 \text{ см}^3/\text{с}$ при нормальных условиях. На выходе из нее двухфазный поток охлаждался гелием с расходом $Q_4 = 150\text{--}200 \text{ см}^3/\text{с}$. После разбавления анализируемый поток пропускали через шестикаскадный импактор 10 с круглыми соплами и подложками для инерционного разделения дисперсных частиц по размерам в соответствии с величиной их аэродинамического диаметра [9–14]. В качестве подложки в каскадах использовали дисковый СВ-фильтр. На выходе из импактора двухфазный поток пропускать через НЕРА СВ-фильтр 11 для улавливания НЧ, не осевших на подложки каскадов импактора. Эффективность фильтрации составляла $E > 99.999\%$ по наиболее проникающим частицам с $d \approx 0.1\text{--}0.15 \text{ мкм}$ при скорости их осаждения $\sim 10 \text{ см/с}$. Предварительно импактор рассчитывали и калибровали с помощью монодисперсных частиц дибутылфталата.

Измерение γ -активности РА-нуклидов, отобранных на волокнах СВ-фильтров в импакторе, осуществляли с помощью анализатора Nokia LP-4900 с Ge–Li-детектором. Размер и форму дисперсных частиц анализировали в электронном и оптическом микроскопах. Для определения их массовой концентрации использовали весовой метод [9–14].

Анализ отдельных частиц с $d > 0.5 \text{ мкм}$ в двухфазном потоке гелия осуществляли в ультрамикроскопической кювете 13 путем фотографирования траекторий их движения под действием силы тяжести и горизонтального знакопеременного электрического поля [10].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В процессе испарения и коррозии цилиндрических или прямоугольных образцов дегазированного графита мелкозернистого типа и особо прочного МПГ-6, а также матричного графита для ТВЭЛ ВТГР в потоке гелия с давлением паров воды менее 2–3 Па не наблюдалось в течение $\tau \approx 1.8 \times 10^4 \text{ с}$ образование НЧ диаметром более 0.002 мкм и массовой концентрацией $M > 10^{-12} \text{ кг/м}^3$ при $T \approx 1500 \text{ К}$. Соответственно, максимальный интегральный унос графита в дис-

персном состоянии не превышал 10^{-12} кг . Это составляло менее $10^{-11}\%$ от его массы $\sim 0.1 \text{ кг}$ в камере 1 за временной интервал анализа около пяти часов.

Таким образом, в присутствии воды с давлением паров менее 2–3 Па газовая коррозия матричного графита с образованием НЧ практически отсутствует при $T \leq 1500 \text{ К}$. Кроме того, реакторный графит характеризуется малой скоростью испарения и низким давлением насыщенных паров $P < 10^{-12} \text{ Па}$ при $T \leq 1500 \text{ К}$ [1–8]. В результате спонтанной конденсации их пересыщенных паров с образованием НЧ в камере 1 не наблюдалось. Этот результат согласуется с данными дифференциально-термического и термогравиметрического анализа образцов графита при температуре до 1300 К в потоке гелия. При этом изменения массы образцов за время $\tau \approx 1.8 \times 10^4 \text{ с}$ не наблюдалось в пределах ошибки измерений $< 10^{-8} \text{ кг}$.

При аномальном увеличении давления паров воды в гелии до 100–150 Па фиксировалось в течение временного интервала $\tau \approx 10^4 \text{ с}$ стохастическое образование НЧ при $T \leq 1500 \text{ К}$. Величины их счетной концентрации и размера зависели от температуры и расхода гелия и составляли $d \approx 0.002\text{--}0.05 \text{ мкм}$ и $N < 10^5 \text{ частиц/см}^3$. В результате максимальная концентрация $M < 10^{-8} \text{ кг/м}^3$, а унос массы графита в аэрозольном состоянии составлял $MQ_2\tau < 10^{-9} \text{ кг}$ или менее $10^{-8}\%$ от его массы $\sim 0.1 \text{ кг}$ в камере 1 за время $\tau \approx 10^4 \text{ с}$. Наночастицы были не заряжены, что обусловлено большой работой выхода электронов из графита (4.64 эВ) и существенным потенциалом ионизации газов и паров.

Отметим, что закономерности образования столь мелких частиц не ясны. Возможно, при высокотемпературном взаимодействии молекул воды и атомов углерода происходит образование водорода и метана. В результате могут возникать высокие напряжения и микротрещины в порах поверхности графита в местах внутренних дефектов с образованием наноаэрозолей. Этот процесс известен для материалов с большим модулем упругости. В частности, при высокотемпературной водородной коррозии сталей имеет место взаимодействие паров воды с углеродом с образованием микротрещин и НЧ.

Исследование дисперсных частиц при нагревании монолитных шаровых ТВЭЛ при температуре до 1400 К в гелии с уткой продуктов деления показало, что имеет место образование полидисперсных частиц, включающих в себя графит, изотопы йода (^{131}I , ^{132}I , ^{133}I и ^{135}I) и ^{132}Te . Их аэродинамический диаметр варьировался в широком диапазоне значений от 0.002 до 50 мкм (рис. 2), а усредненная за время анализа $\tau \approx 10^4 \text{ с}$ концентрация составляла $\langle M \rangle \approx 10^{-5} \text{ кг/м}^3$. Поэтому дис-

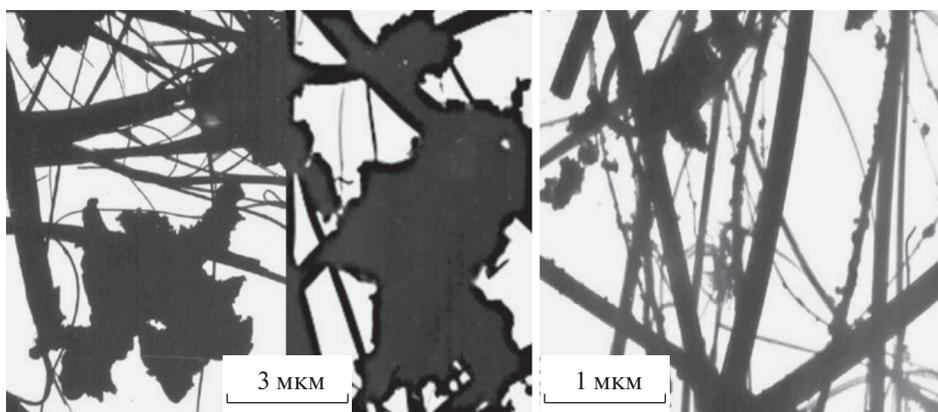


Рис. 2. Фотография частиц графита с радиоактивными нуклидами йода и теллура размером от 0.05 до 8 мкм, отобранных на волокнах СВ-фильтра в импакторе.

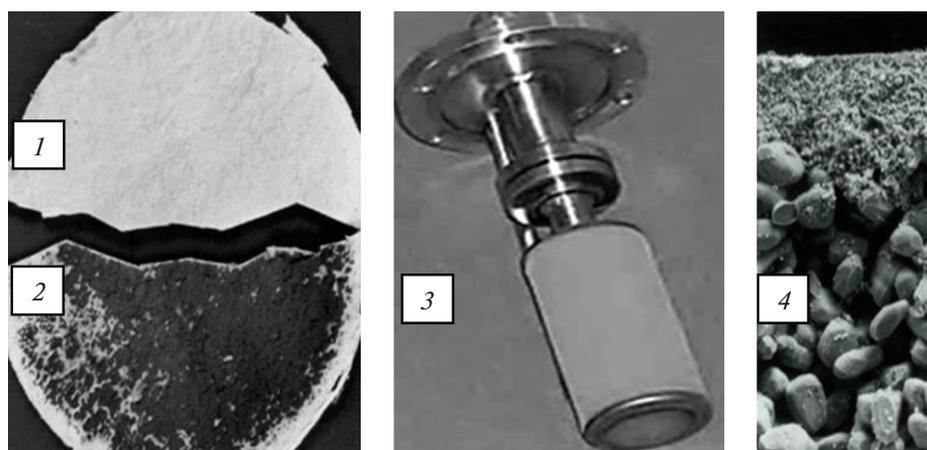


Рис. 3. Фотографии стекловолокнистого и мембранного из никеля фильтров: 1 и 2 – дисковый СВ-фильтр диаметром 80 мм соответственно до и после очистки 0.2 м³ гелия, содержащего частицы графита с изотопами йода и теллура при нагревании до 1400 К монолитного шарового имитатора ТВЭЛ; 3 – мембранный цилиндрический МК-фильтр; 4 – фотография многослойного материала МК-фильтра, состоящего из фильтрующего слоя с мембранной наноструктурой, нанесенного на грубопористое армирующее основание.

персный унос графита в течение 3 ч составлял менее 0.001% от массы 0.202 кг уран-графитового шара. Максимум счетной концентрации приходится на НЧ размером менее 0.2 мкм. На рис. 3 приведена фотография СВ-фильтра 2, на котором отчетливо виден черный осадок частиц графита с йодом и теллуrom, уловленных после пропускания 0.2 м³ гелия через камеру 8 с облученным шаром 9 при $T \approx 1400$ К. Без утечки радиоактивности из ТВЭЛ осадка графита практически не наблюдалось (фотография 1 на рис. 3).

На рис. 4 приведена гистограмма распределения γ -активности G в процентах от диаметра частиц графита с изотопами ¹³¹I, ¹³²I, ¹³³I, ¹³⁵I и ¹³²Te с суммарной γ -активностью $(1.71 \pm 0.12) \times 10^6$ Бк/м³ и концентрацией $\langle M \rangle \approx 10^{-5}$ кг/м³ за время отбора $\tau \approx 10^4$ с на СВ-фильтры в импакторе 10 через

~20 ч после облучения шара и нагревания при 1400 К. Столбец 1 соответствует $G = 78.2 \pm 8.6\%$ для частиц в интервале размеров $0.002 < d < 0.5$ мкм; 2 – $G = 16.9 \pm 1\%$ для $0.5 < d < 2.5$ мкм; 3 – $G = 5.17 \pm 0.34\%$ при $d = 2.5-5$ мкм; 4 – $G = 0.762 \pm 0.085\%$ для частиц с $d > 5$ мкм.

Из анализа данных рис. 4 следует, что ~80% γ -активности РА-нуклидов приходится на НЧ диаметром от 0.002 до 0.5 мкм, а при $d \approx 0.002-2.5$ мкм величина $G \leq 95\%$. Доля суммарной γ -активности ¹³²Te составляла 0.1, ¹³¹I – 4.1, ¹³²I – 7.1, ¹³³I – 54.7, ¹³⁵I – 34%.

Анализ траекторий движения дисперсных частиц в ультрамикроскопической кювете диаметром более 0.5 мкм под действием силы тяжести и горизонтального электрического поля показал,

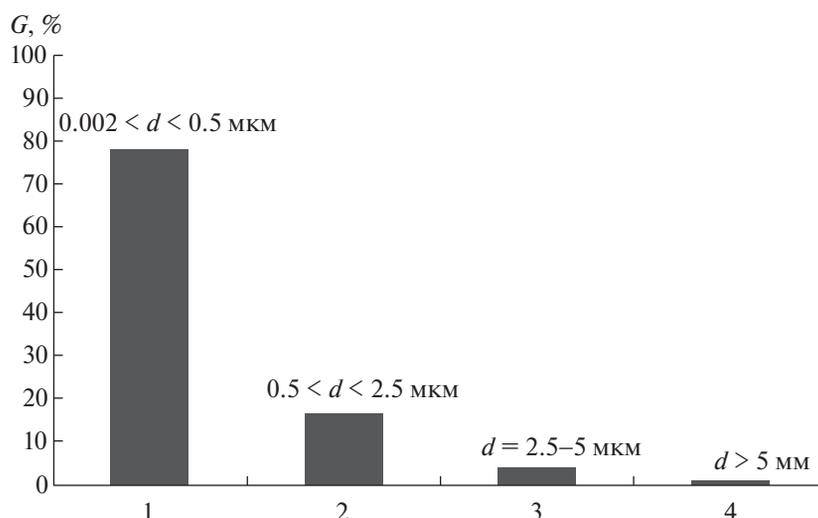


Рис. 4. Распределение γ -активности G в процентах в зависимости от аэродинамического диаметра d частиц графита с изотопами йода и ^{132}Te с суммарной γ -активностью $(1.71 \pm 0.12) \times 10^6$ Бк/м³ и концентрацией $\langle M \rangle \approx 10^{-5}$ кг/м³ за время отбора $\tau \approx 10^4$ с на СВ-фильтры в импакторе.

что частицы были частично биполярно заряжены с зарядом 1 или 2 электрона [11, 12].

Неоднократно проведенные опыты с облученными разными шарами с утечкой радиоактивности подтвердили полученные результаты. При этом массовые концентрации и γ -активность дисперсных частиц различались не более чем на 25–50%.

Отметим, что ~20 и 50 мас. % дисперсных микроразгазнений приходится на частицы с $d \approx 0.002-0.5$ и $d \approx 0.5-2.5$ мкм соответственно.

Механизм “пыления” облученного матричного графита при утечке газообразных продуктов деления, по-видимому, обусловлен замедленной диффузией йода с размером молекул $\sim 2.7 \times 10^{-8}$ см и его пузырьков через микротрещины с нарушением механической прочности в дефектах структуры графита и развитием микротрещин в его поверхностных порах.

Эффект высокотемпературной газовой коррозии поверхностных пор графита в результате взаимодействия углерода с молекулами и атомами йода, по-видимому, в проведенных экспериментах можно не учитывать. При пропускании через камеру 1 с образцами матричного графита 2 потока гелия особой чистоты с добавками паров стабильного йода (^{127}I) с давлением 50–100 Па при $T \approx 1400$ К практически не наблюдалось образования дисперсных частиц по сравнению с “пылением” облученного шарового ТВЭЛ 9 в камере 8 с утечкой радиоактивности.

Измеренная γ -активность НЧ графита с изотопами йода более чем в 10^4 превышала допустимую норму объемной активности паров йода в воздухе

помещений АЭС с постоянным пребыванием персонала. Для улавливания столь мелких частиц исследовалась их высокоэффективная локализация при температуре $T \approx 300-700$ К в потоке гелия СВ-фильтром класса Н10 и многослойными с мембранной наноструктурой из никеля цилиндрическими МК-фильтрами класса Н12 для высокой очистки [13, 15, 16]. Эффективность фильтрации определялась нефелометрическим методом, а также путем измерения токов переноса униполярно заряженных частиц до и после фильтра [9, 10]. Кроме того, измерялась γ -активность до и после фильтроэлементов дискового и цилиндрического типа (рис. 3). В результате показано, что эффективность улавливания наноаэрозолей для СВ-фильтра составляла $E \approx 99.5\%$ при $T < 400$ К, а для МК-фильтра начальное значение $E > 99.99\%$ при стандартной скорости фильтрации 5–15 см/с и $T \leq 700$ К. При этом фильтры из стекловолокна и никеля практически не улавливали парообразные РА-нуклиды йода по сравнению с адсорбентами, например, на основе углей типа СКТ–3 и т.п. [1–8].

При числах Рейнольдса $Re = \rho UD/\mu < 1$ и Кнудсена $Kn = \lambda/D \ll 1$ в нормальных условиях или при повышенном давлении, а также при высокой температуре газодинамическое сопротивление МК-фильтра определяется величиной динамической вязкости газа μ , линейно зависит от скорости его течения $U = Q/S$ и может быть рассчитано по уравнению Дарси $\Delta P = (U/U_0) \times \Delta P_0$, где ΔP_0 – сопротивление фильтра при скорости газа $U_0 = 1$ см/с, S – геометрическая площадь фронтальной поверхности МК-фильтра, $D = 0.5-2$ мкм – диаметр пор его фильтрующего тонкопористого

слоя (рис. 3), ρ и λ – плотность и средняя длина свободного пробега молекул газа соответственно.

Изменение сопротивления ΔP от T определяется зависимостью μ от T при $Kn \ll 1$ и $Re < 1$. При этом в азоте, аргоне или гелии ΔP не зависит от их давления $P \leq 5$ МПа при $U = \text{const}$ и $Re < 1$, так как величина μ практически не меняется при увеличении давления от 0.1 до 5 Мпа [13, 16].

В процессе модельного улавливания неактивных агломератов НЧ технического углерода из дисперсионного генератора 1б имело место накопление их осадка на поверхности тонкопористого фильтрующего слоя (рис. 3). В результате возрастало его сопротивление. Отметим, что первоначально зависимость сопротивления МК-фильтра от времени накопления твердого осадка была практически линейной. Однако при существенном накоплении фильтрата НЧ на поверхности тонкопористого слоя с массой $m > 0.015$ – 0.02 г/см² наблюдалась нелинейная зависимость ΔP от m . Это обусловлено уплотнением пористой структуры осадка частиц углерода под действием давления газа. Эффективность очистки МК-фильтра с осадком превосходила в 10^3 – 10^4 начальное значение E за счет эффекта автофильтрации частиц в порах осадка.

Регенерация МК-фильтра осуществлялась обратной импульсно-инжекционной отдувкой гелием. В результате осадок сбрасывался с поверхности фильтрующего слоя с мембранной наноструктурой, соответственно, существенно уменьшалось его сопротивление [13, 16].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследовано образование дисперсных частиц при нагревании матричного графита и имитаторов шаровых ТВЭЛ для ВТГР в гелии с примесями воды, кислорода и паров йода. Показано, что при эксплуатационных утечках газообразных и радиоактивных продуктов деления из ТВЭЛ возможно интенсивное образование радиоактивных дисперсных частиц диаметром от 0.002 до 50 мкм. Основная γ -активность приходится на наночастицы размером от 0.002 до 2–3 мкм. Их локализация в первом контуре ВТГР может быть осуществлена путем высокоэффективной очистки гелия от дисперсных микрозагрязнений при температуре до 700 К металлокерамическими цилиндрическими МК-фильтрами с регенерируемой и механически прочной мембранной наноструктурой. Диаметр МК-фильтра варьируется от 40 до 70 мм, а длина составляет до 2000 мм. Их про-

мышленное производство освоено УЭХК при поддержке НИЦ “Курчатовский институт”.

Работа выполнена по теме “Разработка физико-технических основ методов измерения параметров аэрозольных и парогазовых облаков, возникающих при крупномасштабных авариях на объектах ТЭЖ, и создание экспериментальных образцов систем диагностики аэрозольных облаков согласно приказу 2100 от 16.09.2019”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гребенник В.Н., Кухаркин Н.Е., Пономарев-Степной Н.Н. Высокотемпературные газоохлаждаемые реакторы – инновационное направление развития атомной энергетики. М.: Энергоатомиздат, 2008. 134 с.
2. Пономарев-Степной Н.Н., Алексеев С.В., Петрунин В.В., Кодочилов Н.Г. // Газовая промышленность. 2018. № 11. С. 94.
3. Черников А.С., Пономарев-Степной Н.Н., Конилев Ю.В. и др. // Атомно-водородная энергетика и технология. 1986. Вып. 7. С. 185.
4. Черников А.С., Комелев Е.В., Шокина З.А. и др. // Атомно-водородная энергетика и технология. 1979. Вып. 2. С. 160.
5. Бескорвайный Н.М., Калинин Б.А., Платонов П.А., Чернов И.А. Конструкционные материалы ядерных реакторов. М.: Атомиздат, 1995. 674 с.
6. Виргильев Ю.С., Селезнев А.Н., Свиридов А.А., Калягина И.П. // Рос. хим. журн. 2006. Т. 1. № 1. С. 4.
7. Кенжина И.Е., Чихрай Е.В., Шестаков В.П. и др. // Вестн. Казах. нац. ун-та. Сер. физ. 2017. № 2 (61). С. 39.
8. Зеленский В.Ф., Одейчук Н.П., Петельгузов И.А. и др. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. 2011. № 2. С. 116.
9. Райст П. Аэрозоли, введение в теорию. М.: Мир, 1987. 280 с.
10. Кириш А.А., Загнитько А.В., Чечуев П.В. // Журн. физ. химии. 1981. Т. 55. № 12. С. 3034.
11. Загнитько А.В., Кириш А.А., Стечкина И.Б. // Журн. физ. химии. 1988. Т. 62. № 11. С. 3058.
12. Загнитько А.В., Чувиллин Д.Ю. // Российские нанотехнологии. 2009. Т. 4. № 9–10. С. 103.
13. Загнитько А.В., Пушко Г.И. // Теоретические основы химической технологии. 2007. Т. 41. № 5. С. 507.
14. Загнитько А.В., Зарецкий Н.П., Каникевич А.В., Мацуков И.Д. // Приборы и техника эксперимента. 2019. № 4. С. 155.
15. ГОСТ Р 51251-99. Фильтры очистки воздуха. Классификация. Маркировка.
16. Zagnitko A.V., Trotsenko N.M., Prusakov V.N. et al. // J. Aerosol Sci. 1999. V. 30. № 9. P. 405.