СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Андрианова О.Н., Жердев Г.М., Кислицына Т.С., Николаев М.Н.** Обеспечение реакторов грядущего поколения ядерными данными. Тезисы докл. научно-технич. конф. «Нейтронно-физические проблемы атомной энергетики». Обнинск, 27—29 ноября 2019 г. Обнинск, ГНЦ РФ ФЭИ, 2019, с. 14—16.
2. **Леваков Б.Г., Лукин А.В., Магда Э.П. и др.** Импульсные ядерные реакторы РФЯЦ — ВНИИТФ. Под ред. А.В. Лукина. Снежинск, РФЯЦ — ВНИИТФ, 2002. 608 с.
3. **Воронцов С.В., Жуков И.В., Кувшинов М.И. и др.** Разработка и исследование макета манипулятора, оснащенного видеосистемой пространственной ориентации, предназначенного для повышения безопасности при работе с делящимися материалами. — В сб.: Проблемы лазеров с ядерной накачкой и импульсные реакторы. III Межд. конф. Снежинск, РФЯЦ — ВНИИТФ, 2003, с. 580—587.
4. **Kandiev Y.Z., Kashaeva E.A., Khatuntsev K.E. e.a.** PRIZMA Status. — Ann. Nucl. Energy, 2015, v. 82, p. 116—120.
5. **Кармишин А.А., Макаров В.М., Лукина С.В.** Киберфизические производственные системы. — Ритм машиностроения, 2022, № 9, с. 32—36.

Поступила в Редакцию 30.08.23

УДК 621.039.58:621.039.516.4

СОЗДАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КАМЕР БОЛЬШОГО ОБЪЕМА С ИНЕРТНОЙ АТМОСФЕРОЙ ВЫСОКОЙ ЧИСТОТЫ ДЛЯ ПИРОХИМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА

Кузьмин И.В., Лещенко А.Ю., Носов А.В., Смирнов В.П., Шамсутдинов Р.Н. (АО НПФ «Сосны», г. Димитровград), Мочалов Ю.С., Суханов Л.П. (АО «Прорыв», г. Москва)
e-mail: nav@sosny.ru

Основным направлением развития ядерной энергетики страны является опережающий рост числа быстрых реакторов и замыкание ядерного топливного цикла [1]. Предполагается, что отработавшее топливо таких реакторов будет перерабатываться по комбинированной схеме, сочетающей пирохимическую (сухую) и гидрометаллургическую (водную) технологии. Пирохимическая технология позволит перерабатывать отработавшее топливо после одного года выдержки, что существенно уменьшит затраты на его хранение [2, 3].

Пирохимические процессы длительное время в ограниченном объеме используются в США для подготовки металлического отработавшего топлива к длительному хранению [4—6]. Также ведутся разработки пирохимических технологий для переработки топлива PWR в целях производства металлического топлива для быстрых реакторов в Южной Корее [7]. Исследования в этой области проводились и в нашей стране, но довести их до практической реализации не удалось.

Применение пирохимических операций в переработке отработавшего топлива возможно при наличии радиационно-защитных камер большого объема с инертной средой высокой чистоты (табл. 1).

Таблица 1. **Характеристики инертных камер**

Параметр	FCF [8, 9]	HFEF [10, 11]	PRIDE [12]
Объем, м^3	1470	1473	1230
Разрежение, мм вод. ст.	51—102	20—100	10—200
Концентрация паров воды, млн$^{-1}$	<60	20—100	<50

В АО НПФ «Сосны» были разработаны и изготовлены два опытных образца инертных камер: одностеночная БИК-1 внутренним объемом 38,5 м^3 в 2016 г. и двустенная БИК-2 внутренним объемом 72 м^3 и объемом межстеночного пространства 30 м^3 в 2022 г., которые размещены в АО «ГНЦ НИИАР» и АО «СХК» соответственно. Камеры предназначены для проверки работоспособности инженерных систем, а также для испытаний макетов аппаратов пирохимической переработки нитридного топлива. Внутренняя поверхность БИК-1 при изготовлении подвергалась полировке стеклянными шариками, стенки БИК-2 таким способом не обрабатывались.

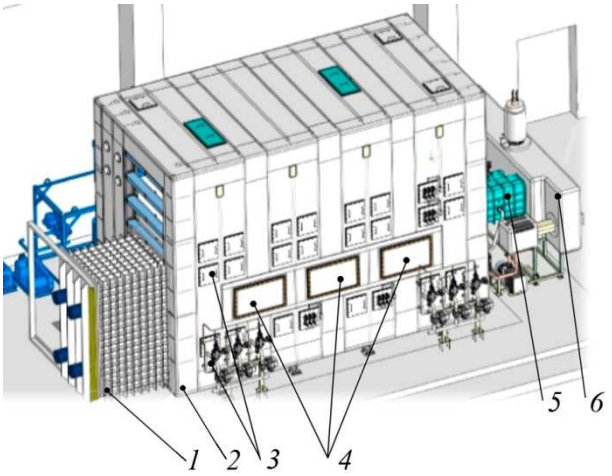
Основой двустенного корпуса БИК-2 является изготовленный из швеллеров жесткий каркас, который обеспечивает механическую прочность и устойчивость конструкции. Наружная и внутренняя поверхности каркаса облицованы

листами коррозионно-стойкой стали, межстеночное пространство заполнено инертным газом (аргоном). Технологические проходки, предназначенные для подвода к оборудованию электрических линий и газов, выполнены в виде кессона. Их внутренний объем также заполняется инертным газом под повышенным давлением.

В состав БИК-2 также входят шлюзовая камера, переходный шлюз, перчаточный бокс, системы рециркуляции и охлаждения аргона, смены и поддержания давления среды, контроля уплотнений и другие инженерные системы и оборудование (рис. 1).

Основной задачей шлюзовой камеры являются загрузка и выгрузка крупногабаритного оборудования с минимальным нарушением качества внутрикамерной атмосферы. Кроме герметичных дверей и транспортной системы для подачи оборудования в камеру, шлюзовая камера оснащена системой вакуумирования, обеспечивающей остаточное давление в ее объеме не более 10 Па, и системой инфракрасного нагрева. Предполагается, что комбинированное воздействие разрежения и нагрева на загружаемое оборудование позволит существенно уменьшить количество кислорода и влаги, сорбированных на его поверхностях, и, следовательно, снизить количество натекаемых примесей. Отработка технологии вакуумной сушки изделий, применяемых при изготовлении пирохимического оборудования, будет проведена на этапе изучения особенностей эксплуатации БИК-2.

Перчаточный бокс относится к вспомогательному оборудованию, в нем предполагается проводить экспериментальные и аналитические работы. Бокс может заполняться как воздухом, так и инертным газом высокой чистоты. Бокс оснащен шестью перчатками из гипалона и 12 перчатками из натурального каучука. Материалы и инструмент передаются между камерой и боксом через переходный шлюз.



Р и с. 1. Общий вид БИК-2 с инертной атмосферой: *1* — шлюзовая камера; *2* — корпус инертной камеры; *3* — технологические проходки; *4* — смотровые окна; *5* — переходный шлюз; *6* — перчаточный бокс

Замкнутая система рециркуляции аргона поддерживает заданную чистоту инертного газа внутри камеры и перчаточного бокса. Основными элементами системы являются три блока рециркуляции аргона, с помощью которых аргон очищается от примесей кислорода и воды до 1 млн$^{-1}$. Двухконтурная замкнутая система охлаждения инертной камеры способна отвести до 30 кВт тепловой энергии. Камера оснащена окнами с защитными стеклами, камерами видеонаблюдения, системой освещения.

Обе камеры снабжены силовыми манипуляторами. Для трущихся поверхностей манипуляторов и размещаемого в камере оборудования подобрана смазка на безводной основе, хорошо показавшая себя в инертных средах.

Определение скорости натекания примесей в атмосферу бокса. В ходе экспериментов с изменением давления в перчаточном боксе, входящем в состав БИК-2, измеряли концентрацию кислорода и паров воды в инертной атмосфере (табл. 2). Обнаружено, что скорость натекания кислорода зависит от разрежения в боксе и при

Т а б л и ц а 2. **Результаты экспериментов по определению герметичности бокса**

Давление в боксе относительно внешнего, Па	Скорость повышения концентрации, млн$^{-1}$/ч		Примечание
	кислорода	паров воды	
160—650	9	0,47	Открыты все перчаточные порты и нет заглушки у двери шлюза
–360— –690	13,6	0,39	То же
–360— –690	5	0,2—0,6	Открыты все перчаточные порты
–360— –690	1	0,2—0,6	Открыты шесть портов с перчатками из гипалона
–360— –690	0,5	0,2—0,6	Закрыты все перчаточные порты и двери шлюза

разрежении 250 Па составляет 8 млн$^{-1}$/ч через двери шлюза, 0,33 млн$^{-1}$/ч через одну перчатку из натурального каучука, 0,07 млн$^{-1}$/ч через одну перчатку из гипалона. Скорость натекания паров воды не зависит от закрытия перчаточных портов, дверей шлюза или давления.

Инертность БИК-1 и БИК-2 без пирохимического оборудования. Вывод камер на инертность до размещения пирохимического оборудования почти идентичен (табл. 3).

Таблица 3. **Основные параметры камер при выводе на инертность**

Параметр	БИК-1	БИК-2
Внутренний объем камеры, м^3	38,5	72/30*
Скорость продувания аргона, м^3/ч	3,2	6
Время продувания, ч	72	85
Продуваемый объем аргона, м^3	230	512
Концентрация на окончание продувки, млн$^{-1}$:		
кислорода	500	465
паров воды	400	—
Скорость обмена аргона при очистке, м^3/ч	90	82
Концентрация после очистки, млн$^{-1}$:		
кислорода	<1	1,5
паров воды	<1	<1
Время очистки от кислорода от 500 до 1 млн$^{-1}$ при давлении в камере ниже наружного на 200—300 Па, ч	—	6
Скорость натекания кислорода при давлении в камере на 200 Па ниже наружного, млн$^{-1}$/ч	—	0,7

*Межстеночный объем.

В предположении равномерного распределения кислорода и его постоянной суммарной натечки из внешней среды уравнение баланса кислорода в камере имеет вид

$$VdC = G_{н}C_{O_2}dt - G_{оч}[C(t) - C_{оч}]dt, \qquad (1)$$

где V — объем камеры, м^3; $G_{н}$ — объемная скорость поступления внешней среды в камеру (натекание), м^3/ч; C_{O_2} — содержание кислорода в натекающей внешней среде, отн. ед; $G_{оч}$ — расход газа через систему газоочистки, м^3/ч; $C(t)$ — текущее содержание кислорода в атмосфере камеры, отн. ед.; $C_{оч}$ — содержание кислорода в инертном газе после очистки, отн. ед.

Решение уравнения (1) для БИК-2 имеет вид

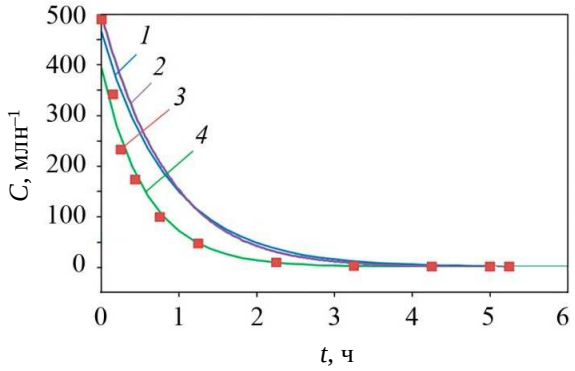


Рис. 2. Расчетная и измеренная концентрация кислорода в БИК-2 во время газоочистки при начальной 500 млн$^{-1}$: *1, 2* — аналитическая и численная модель соответственно; *3* — экспериментальные данные; *4* — аппроксимация экспериментальных данных

$$C(t) = 1{,}12 + 453{,}88\exp(-1{,}14t), \qquad (2)$$

где t — время от начала очистки, ч.

Измеренная и рассчитанная по уравнению (2) концентрация кислорода показана на рис. 2. Аппроксимация экспериментальных данных методом наименьших квадратов соответствует уравнению

$$C(t) = 1{,}364 + 391{,}7\exp(-1{,}71t). \qquad (3)$$

С использованием программного комплекса Ansys Fluent (США) выполнен нестационарный расчет распределения концентрации кислорода в аргоне в ходе очистки. На рис. 3 показана концентрация кислорода в центральном сечении инертной камеры через 1 ч после начала очистки. По результатам расчетов подтверждено совпадение аналитической и численной моделей изменения концентрации кислорода в атмосфере инертной камеры.

Поддержание инертности в БИК-1 с оборудованием. В рамках экспериментов, проведенных в АО «ГНЦ НИИАР» в 2015—2016 гг., в БИК-1 были размещены три экспериментальных

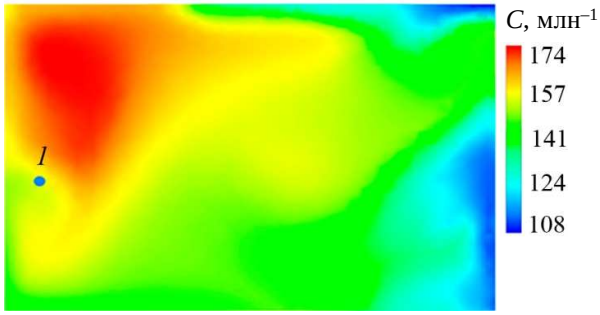


Рис. 3. Расчетное распределение концентрации кислорода в центральном сечении инертной камеры: *1* — точка измерения концентрации кислорода

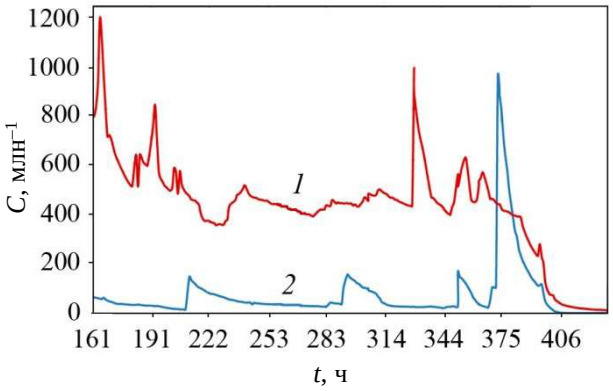
аппарата пирохимической переработки: снятия стальной оболочки жидким цинком, вакуумной отгонки кадмия, электрорафинирования. Продувка аргоном камеры с аппаратами осуществлялась со скоростью 3 м^3/ч в течение 160 ч. Отжиг аппаратов с очисткой аргона при повышенном давлении проводился в соответствии с технологией (см. табл. 2). В процессе отжига аппаратов неоднократно повышалась концентрация кислорода и воды в объеме камеры (рис. 4).

В эксперименте по снятию оболочки с модельного ядерного топлива жидким цинком наблюдался пик концентрации паров воды вследствие десорбции влаги из теплоизоляционных материалов аппарата. Максимальная концентрация паров воды наблюдалась на этапе охлаждения аппарата почти через 7 ч после достижения рабочей температуры (рис. 5).

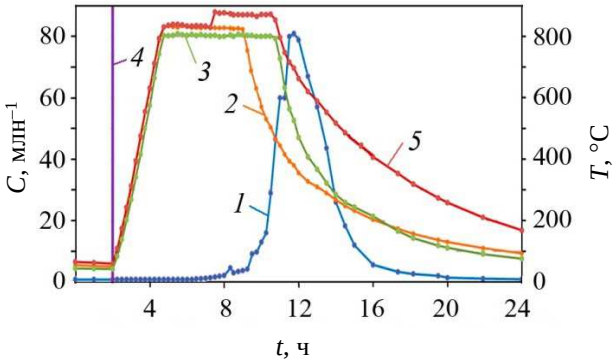
Заключение. Расчетами и экспериментами по определению основных механических, аэродинамических и тепловых характеристик установлено, что содержание кислорода и паров воды ниже 1 млн$^{-1}$ в обеих камерах без пирохимического оборудования достигается за 100 ч. При размещении пирохимического оборудования в камере БИК-1 концентрация примесей возрастала. Процесс требует дальнейшего изучения. Также будут проведены эксперименты по определению концентрации кислорода в нескольких точках объема камеры.

Отдельные конструкторские решения являются уникальными и будут использованы при проектировании модуля переработки опытно-демонстрационного энергетического комплекса АО «СХК» в части инженерии инертных камер. Результаты работ будут способствовать повышению надежности, эффективности и конкурентоспособности пирохимической переработки отработавшего топлива быстрых реакторов.

При выборе оптимальной конструкции промышленных инертных камер для модуля переработки будет проведена сравнительная оценка технологических и экономических аспектов создания и эксплуатации обоих представленных вариантов.



Р и с. 4. Концентрация примесей при отжиге аппаратов в БИК-1: *1, 2* — пары воды и кислород соответственно



Р и с. 5. Изменение концентрации водяных паров в эксперименте по снятию оболочки с модельного ядерного топлива жидким цинком: *1* — концентрация паров воды; *2, 3* — температура узлов получения расплава и слитка соответственно; *4* — начало нагрева аппарата снятия оболочки; *5* — температура узла снятия оболочки

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Белая** книга ядерной энергетики. Замкнутый ЯТЦ с быстрыми реакторами. Под общ. ред. Е.О. Адамова. М., АО «НИКИЭТ», 2020. 502 с.
2. **Шадрин А.Ю., Двоеглазов К.Н., Устинов О.А. и др.** РН-процесс — технология переработки смешанного уран-плутониевого топлива реактора БРЕСТ-ОД-300. — Радиохимия, 2016, т. 58, № 3, с. 234—241.
3. **Суханов Л.П., Южанин А.А.** Повышая градус. — Вестник Атомпрома, 2022, № 6, с. 24—27.
4. **McFarlane H., Lineberry M.** Spent fuel pyroprocessing demonstration. — In: Proc. of the Intern. Conf. on Fuel Management and Handling. British Nuclear Energy Soc. Edinburgh (United Kingdom), 1995, p. 149—155.
5. **Chemical** Engineering Divison Research Highlights. Rep. ANL-6875, May 1963 — April 1964.
6. **Choi E., Jeong S.** Electrochemical processing of spent nuclear fuels: an overview of oxide reduction in pyroprocessing technology. — Prog. Nat. Sci., 2015, v. 25, № 6, p. 572—582.
7. **Lee H., Park G., Kang K. e.a.** Pyroprocessing technology development at KAERI. — Nucl. Engng Techn., 2011, v. 43, № 4, p. 317—328.
8. **Holcomb W., Paige D., Coleman L.** Operating experience with the EBR-II fuel cycle facility inert atmosphere cell. — Nucl. Appl., 1966, v. 2, № 3, p. 254—255.
9. **Goff K., Wass J., Marsden K., Teske G.** Electrochemical processing of used nuclear fuel. — Nucl. Engng Techn., 2011, v. 43, № 4, p. 335—342.
10. **Hagmann D., Chilenskas A.** Conceptual Design for the Handling and Remote Disassembly of the Fuel Element

Failure Propagation Loop at the HFEF. Rep. ANL/HFEF-1, 1972.
11. **Herrmann S.** Pilot-Scale Equipment Development for Pyrochemical Treatment of Spent Oxide Fuel. Rep. ANL/NT/CP-98166, 1999.
12. **Ku J., Moon S., Cho I. e.a.** Development of pyroprocess integrated inactive demonstration facility. — Procedia Chem., 2012, v. 7, p. 779—784.

Поступила в Редакцию 28.06.23

УДК 66.061.35 + 001.891.573

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАСХОДА ПИТАЮЩЕГО РАСТВОРА НА АФФИНАЖ УРАНА В КАСКАДЕ ЭКСТРАКЦИОННЫХ КОЛОНН

Ушаков А.О., Жерин И.И. (ТПУ, г. Томск), Муслимова А.В., Носков М.Д. (СТИ НИЯУ МИФИ, г. Северск)
e-mail: 1alexander6@mail.ru

В атомной промышленности одним из эффективных способов разделения и очистки жидких смесей является экстракция из растворов с использованием растворителей [1, 2]. Экстракционная технология имеет наибольший потенциал для высокой степени извлечения веществ, регенерации необходимых продуктов или их очистки от примесей, разделения веществ, содержащих компоненты с близкими физико-химическими свойствами.

Среди актуальных направлений можно выделить экстракционный аффинаж природного урана в технологии получения ядерного топлива, при котором в качестве сырья используют концентрат природного урана. Урановый концентрат, представленный октаоксидом триурана (U_3O_8), необходимо тщательно очистить от примесей путем растворения в азотной кислоте с последующим переводом в уранил-нитрат [$UO_2(NO_3)_2$] и экстракцией в растворе трибутилфосфата и углеводородного разбавителя. Очистка урана от примесей способствует снижению концентрации элементов с большим сечением захвата нейтронов.

Широкое распространение при экстракционной очистке природного уранового концентрата получили колонные аппараты вследствие их относительной простоты и более высокой производительности по сравнению с центробежными экстракторами и смесителями-отстойниками [3—5]. С использованием информационно-вычислительных технологий можно моделировать экстракционные процессы, которые протекают в аппаратах разной конструкции, и оптимизировать степень очистки. В настоящей работе рассматриваются процессы в экстракционных пульсационных колоннах.

Экстракционные процессы в аппаратах колонного типа достаточно сложны для математического моделирования. В связи с этим одним из актуальных вопросов совершенствования экстракционной технологии является разработка математической модели экстракции в аппарате колонного типа для повышения эффективности и оптимизации экстракционного аффинажа. Есть несколько подходов к описанию массопереноса в пульсационных колоннах, например, восемь моделей пульсационных колонн [6]. По отдельности ни одна из них не описывает в полной мере массопередачу, однако при совокупном использовании результатов можно сделать выводы об особенностях массообмена. Предложено построение модели пульсационных колонн, согласно которому колонна представляет собой дифференциальный контактор с непрерывным изменением концентрации обеих фаз как функции высоты колонны.

Для моделирования экстракционных процессов в колонных аппаратах возможны подходы на основе ячеечной равновесной модели — колонна разбивается на ступени в предположении, что на каждой из них достигается равновесие между водной и органической фазой, и неравновесной — колонна разбивается на ступени в предположении, что в каждом ее малом элементе система водный раствор—экстрагент остается неравновесной.

В настоящей работе математическая модель экстракционной переработки концентрата урана в каскаде противоточных колонн применяется для исследования влияния потока водной фазы на степень извлечения урана из органической фазы [7].