

УДК 621.039

Экспериментальное обоснование оптимальных параметров работы оборудования системы охлаждения инертной камеры

© 2025 г. А. В. Носов¹, С. Ю. Каледин¹, Р. Н. Шамсутдинов¹, С. М. Савчиц²

¹АО Научно-производственная фирма «Сосны», Димитровград, 433507, Россия

²АО «Прорыв», Москва, 119607, Россия

Цель работы – исследование параметров системы охлаждения аргона, заполняющего внутренний объем инертной камеры. Достижение указанной цели обеспечивалось последовательным решением следующих задач: выполнение численного моделирования работы блока охлаждения в воздушной среде; экспериментальное определение хладопроизводительности блока охлаждения в воздушной среде и верификация результатов численного моделирования; численное моделирование работы блока охлаждения в аргоне. Практическая значимость исследования определяется возможностью использования полученных результатов для оптимизации проектирования и эксплуатации систем охлаждения инертных камер в технологических процессах с высокими тепловыми нагрузками. Предложенные параметры работы оборудования обеспечивают необходимую температуру, стабильность инертной среды при минимальных энергозатратах и максимальной эффективности теплосъема. Основные результаты исследования показали, что оптимальная работа системы достигается при определенных соотношениях скорости циркуляции аргона, температуры этиленгликоля и частоты вращения вентиляторов. Установлены критические значения параметров, при которых происходит снижение эффективности охлаждения. По результатам выполнения работы были получены данные, которые могут быть использованы при проектировании систем охлаждения газовых сред инертных камер.

Ключевые слова: система охлаждения, пирохимическая переработка отработавшего ядерного топлива, защитная камера с инертной атмосферой.

Введение

Замкнутый ядерный топливный цикл предполагает переработку отработавшего топлива быстрых реакторов с применением как пирохимической, так и гидрометаллургической технологий [1]. Пирохимическая технология подразумевает переработку отработавшего топлива после одного года выдержки, что позволяет снизить затраты на его хранение [2]. В настоящее время разработки пирохимических процессов проводятся в США [3–5], Южной Корее [6] и России [7].

Для верификации переделов бескислородной пирохимической технологии необходимо обеспечивать инертную атмосферу высокой чистоты, которая технологически достижима в радиационно-защитных камерах. Для реализации пирохимических технологий в промышленных масштабах радиационно-защитные камеры должны быть большого объема.

К контролируемым параметрам инертной среды в радиационно-защитной камере относятся чистота (содержание примесей) и температура. Поддержание заданной чистоты инертного газа внутри камеры обеспечивается функционированием замкнутой системы рециркуляции аргона. За поддержание заданной температуры отвечает двухконтурная замкнутая система охлаждения.

✉ А. В. Носов: office@sosny.ru
С. М. Савчиц: savchitssm@pnproryv.ru

Поступила в редакцию: 16.07.2025
После доработки: 20.09.2025
Принята к публикации: 23.09.2025

Описание оборудования системы охлаждения аргона

Система охлаждения аргона предназначена для поддержания температуры газа, поступающего в системы регенерации аргона, не более 40 °С, а также обеспечения охлаждения аргона до требуемой температуры при тепловой мощности источников тепла, находящихся в камере, до 30 кВт.

Основными элементами системы охлаждения являются пять блоков охлаждения (БО), параллельно подключенные к установке охлаждения жидкости УВ-П-1-2-4DES5-R507A. БО размещаются в рабочем объеме инертной камеры на ее стенах, а установка охлаждения жидкости – вне камеры. В состав каждого БО входят радиальный вентилятор и теплообменник, смонтированные в общем корпусе (рис. 1).

На входе радиального вентилятора установлен газоход для отбора аргона из верхней части камеры. Радиальный вентилятор обеспечивает расход охлаждаемой среды (аргона) через межтрубное пространство теплообменника. Трубный пучок теплообменника состоит из шестнадцати рядов труб $\varnothing 6 \times 1$ мм. Площадь теплообменной поверхности составляет 6,8 м². Охлаждающая среда – водный раствор этиленгликоля с концентрацией 35 %. Отвод тепла от раствора этиленгликоля в окружающую среду осуществляется с помощью установки охлаждения жидкости УВ-П-1-2-4DES5-R507A.

Аэродинамическая схема радиального вентилятора представлена на рис. 2. Корпус вентилятора очерчивается по правилу конструкторского квадрата [8]. Сторона квадрата равна четверти раскрытия корпуса. Из вершин этого квадрата радиусами проводятся дуги окружности, по которым очерчивается корпус. Геометрические параметры радиального вентилятора рассчитывали по следующим формулам:

$$a = 0.25 \cdot l = 0.25 \cdot 167 = 42 \text{ мм};$$

$$r_4 = 0.5 \cdot (D_2 + a) = 0.5 \cdot (417 + 41.75) = 271 \text{ мм};$$

$$r_3 = r_4 + a = 229.375 + 41.75 = 271 \text{ мм};$$

$$r_2 = r_3 + a = 271.125 + 41.75 = 313 \text{ мм};$$

$$r_1 = r_2 + a = 312.875 + 41.75 = 355 \text{ мм}.$$

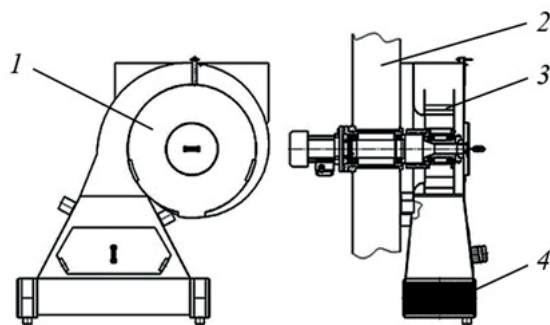


Рис. 1. Блок охлаждения: 1 – корпус; 2 – стенка камеры; 3 – лопаточный венец радиального вентилятора; 4 – теплообменник

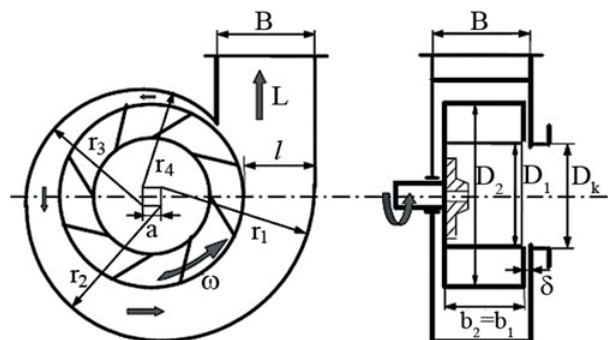


Рис. 2. Аэродинамическая схема радиального вентилятора

Для обеспечения температуры аргона в инертной камере не более 40 °С тепловая мощность, отводимая каждым БО, должна составлять не менее 6 кВт. Проверка выполнения данного требования является основной целью данной работы.

В связи с тем, что в ходе испытаний изделия отсутствовала возможность создания условий, эквивалентных условиям инертной камеры (в частности, по составу и температуре газовой среды), хладопроизводительность БО была определена методом численного моделирования. Верификация расчетной модели выполнена по результатам эксперимента на воздухе.

Таким образом, работа состояла из трех этапов:

– расчетное моделирование работы БО в воздушной среде;

- экспериментальное определение холодопроизводительности БО при работе в воздушной среде;
- верификация расчетной модели и расчетное моделирование работы БО в среде аргона.

Расчетное определение холодопроизводительности БО при работе в воздушной среде

Геометрическая модель БО приведена на рис. 3. Охлаждающая среда – водный раствор этиленгликоля с концентрацией 35 %. Охлаждаемая среда – воздух.

При расчете в качестве исходных данных приняты следующие параметры окружающей среды и режимов работы оборудования:

- температура воздуха – 25 °С;
- влажность воздуха – 40 %;
- скорость вращения радиального вентилятора – 750 об./мин;
- расход раствора этиленгликоля – 3 м³/ч;
- температура раствора этиленгликоля на входе в теплообменник – 1 °С.

Теплофизические свойства материалов, используемые в расчетной модели БО, приведены в табл. 1 [9].

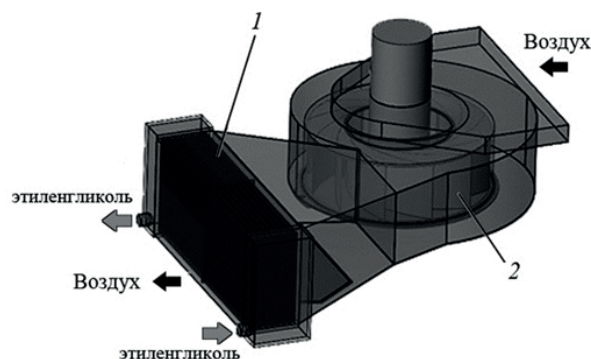


Рис. 3. Геометрическая модель блока охлаждения: 1 – теплообменник; 2 – лопаточный венец радиального вентилятора

Таблица 1. Теплофизические свойства материалов [9]

Материал	T , °С	ρ , кг/м ³	λ , Вт/(м·К)	C , Дж/(кг·К)
Сталь 12Х18Н10Т ГОСТ 5632–72	27	7960	15.100	505
	100		16.400	470
	200		17.600	495
	300		18.800	516
Воздух	10	1.247	0.025	1000
	25	1.184	0.026	1000
	30	1.165	0.027	1000
36 % водный раствор этиленгликоля	– 20	1069	0.462	3510
	0	1063	0.466	3560
	20	1055	0.470	3620

Расчет параметров БО на основе представленной модели и исходных данных выполнялся с помощью программного комплекса SolidWorks Flow Simulation [10], позволяющего моделировать потоки жидкости и газа методом конечного объема. Результаты численного моделирования БО представлены в табл. 2 и на рис. 4, 5.

Таблица 2. Результаты расчета параметров БО при работе на воздухе

Расчетный параметр	Значение
Объемный расход воздуха на выходе БО, м ³ /ч	1190
Массовый расход воздуха на выходе БО, кг/ч	1464
Средняя температура воздуха на выходе БО, °С	12.40
Холодопроизводительность, кВт	5.12

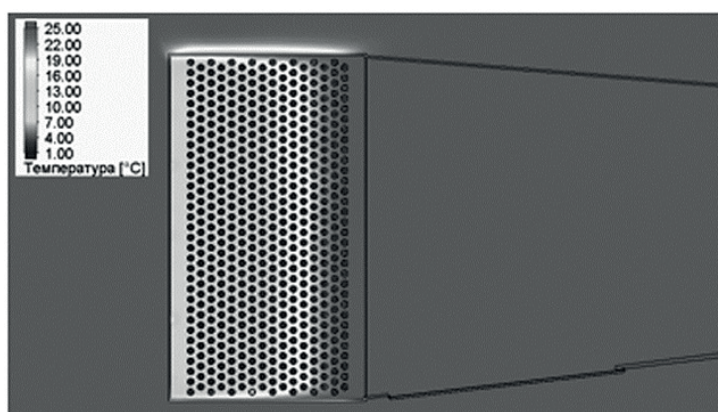


Рис. 4. Распределение температуры в центральном сечении теплообменника при работе на воздухе

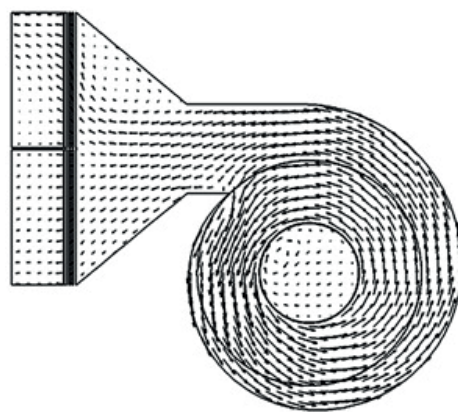


Рис. 5. Траектория газового потока в блоке охлаждения

Экспериментальное определение хладопроизводительности блока охлаждения при работе в воздушной среде

Экспериментальное определение хладопроизводительности БО выполнялось на экспериментальном стенде (рис. 6), состоящем из установки охлаждения жидкости и подключенного к ней БО. Для перемешивания охлажденного газа и усреднения его скорости и температуры на выходе из теплообменника БО устанавливался выпускной газопровод с проходным сечением 280×280 мм.

Хладопроизводительность БО определялась по тепловой мощности, отводимой от воздуха в теплообменнике БО. Для этого экспериментально определялись следующие параметры:

- температура воздуха на входе и выходе БО;
- объемный расход воздуха;
- атмосферное давление.

Температуру воздуха на входе в БО определяли с помощью стеклянного термометра керосинового типа СП-2, расположенного на уровне входа. Объемный расход и температуру воздуха на выходе из БО определяли с помощью анемометра Весоол ВС 9201. Для этого производили девять измерений температуры и влажности воздуха в выходном сечении выпускного газопровода. Положение анемометра

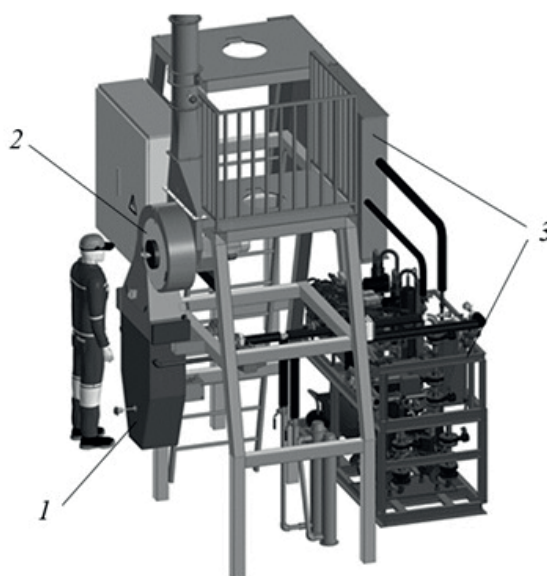


Рис. 6. 3D модель стенда для исследований: 1 – БО; 2 – выпускной газопровод; 3 – установка охлаждения жидкости

при измерениях – по квадратной сетке 3×3 позиции с шагом 95 мм по длине и ширине выходного сечения выпускного газохода. Атмосферное давление определяли с помощью измерителя абсолютного давления Testo 511.

Порядок проведения эксперимента:

- 1) включение установки охлаждения жидкости УВ-П-1-2-4DES5-R507A;
- 2) включение центробежного вентилятора БО;
- 3) регистрация контролируемых параметров после стабилизации температуры воздуха на входе и выходе теплообменника БО;
- 4) повторение измерений по п. 3 трижды с паузой 10 минут.

В случае расхождения температуры воздуха на входе в БО по результатам трех измерений выше 1 °С серию измерений повторяли.

Хладопроизводительность БО определяли по формуле:

$$Q = S \cdot v \cdot \rho \cdot \frac{P}{P_{\text{н.у.}}} (T_{\text{вых}} - T_{\text{вх}}), \quad (1)$$

где Q – хладопроизводительность БО, Вт; S – площадь выходного сечения выпускного газохода, м²; v – средняя скорость воздуха в выходном сечении выпускного газохода, м/с; ρ – плотность воздуха при температуре $T_{\text{вых}}$, кг/м³; P – атмосферное давление во время проведения эксперимента, Па; $P_{\text{н.у.}}$ – атмосферное давление при н.у. (101325 Па); $T_{\text{вх}}$, $T_{\text{вых}}$ – средняя по трем измерениям температура воздуха на входе и выходе БО соответственно, °С; C – теплоемкость воздуха, Дж/(кг×°С).

Результаты измерений регистрируемых параметров в эксперименте по определению хладопроизводительности БО приведены в табл. 3.

Таблица 3. Результаты измерений регистрируемых параметров в эксперименте по определению хладопроизводительности БО при работе в воздушной среде

Параметр	Значение
Площадь выходного сечения выпускного газохода, м ²	0.073
Средняя скорость воздуха в выходном сечении выпускного газохода, м/с	4.600
Средняя температура воздуха на входе БО, °С	30.600
Средняя температура воздуха на выходе БО, °С	17
Плотность воздуха, кг/м ³	1.205 [11]
Теплоемкость воздуха, кДж/(кг·°С)	1.005 [11]

С помощью формулы (1) на основе полученных экспериментальных данных было установлено, что хладопроизводительность БО при работе на воздухе составляет 5.47 кВт. Отклонение расчетного значения хладопроизводительности от значения, определенного экспериментально, составило 4.8%, что свидетельствует о приемлемой сходимости результатов расчета и эксперимента и, следовательно, о корректности расчетной модели БО.

Расчетное определение хладопроизводительности блока охлаждения при работе в аргоне

Задача расчетного исследования на данном этапе – определить хладопроизводительность БО при работе в аргоне при температуре 40 °С.

Геометрическая модель БО, теплофизические свойства материалов и сред, а также исходные данные идентичны принятым в расчете на воздухе. В качестве охлаждаемой среды принят сухой аргон с температурой 40 °С.

Результаты расчета приведены в табл. 4. При частоте вращения лопаточного венца 750 мин^{-1} расчетная хладопроизводительность БО составила 5.5 кВт, что на 8 % меньше максимального проектного значения.

Таблица 4. Результаты расчета хладопроизводительности БО при работе в аргоне

Расчетный параметр	Значение	
Частота вращения лопаточного венца, мин^{-1}	750	1500
Массовый расход аргона на выходе БО, кг/ч	1553	3080
Средняя температура аргона на выходе БО, °C	15.8	21.2
Хладопроизводительность, кВт	5.5	9.5

Хладопроизводительность БО может быть повышена за счет увеличения расхода аргона через БО путем повышения частоты вращения лопаточного венца радиального вентилятора. Это подтверждается результатом расчета БО для частоты вращения 1500 мин^{-1} , также приведенным в табл. 4. Принимая линейной зависимость между частотой вращения лопаточного венца и хладопроизводительностью БО, можно определить, что хладопроизводительность БО достигнет 6 кВт при частоте вращения 850 мин^{-1} .

Таким образом, данные, полученные в результате расчетно-экспериментальных исследований хладопроизводительности БО, подтверждают возможность обеспечения требуемого температурного режима газовой среды при работе инертной камеры с максимальной проектной тепловой нагрузкой.

Заключение

В результате проведенной работы была создана численная модель блока охлаждения инертной среды. Результаты расчетов с использованием разработанной модели были верифицированы с помощью натурных испытаний блока охлаждения при работе на воздухе. Численное моделирование параметров работы исследуемой установки в среде аргона подтвердили возможность обеспечения требуемого температурного режима газовой среды при работе инертной камеры с максимальной проектной тепловой нагрузкой.

Финансирование

Авторы заявляют об отсутствии источников финансирования.

Конфликт интересов

Конфликт интересов отсутствует.

Вклад авторов

А.В. Носов – формулировка идеи и целей исследования, постановка задачи, выбор методов исследования, выполнение измерений, анализ экспериментальных данных, выявление закономерностей, подбор литературных источников, редактирование текста статьи.

С.Ю. Каледин – постановка эксперимента, выполнение экспериментальных работ, обработка результатов; проведение численных расчетов, разработка математической модели, выполнение измерений, анализ экспериментальных данных, выявление закономерностей, подбор литературных источников, редактирование текста статьи.

Р.Н. Шамсутдинов – разработка математической модели, выполнение экспериментальных работ, обработка результатов; проведение численных расчетов.

С.М. Савчиц – участие в проведении исследования и обсуждении результатов.

Список литературы

1. Белая книга ядерной энергетики. Замкнутый ЯТЦ с быстрыми реакторами. Под общ. ред. Адамова Е.О. М.: АО «НИКИЭТ», 2020. 502 с.
2. Шадрин А.Ю., Двоеглазов К.Н., Устинов О.А., Масленников А.Г., Кащеев В.А., Третьякова С.Г., Шмидт О.В., Виданов В.П., Волк В.И., Веселов С.Н., Ишунин В.С. РН-процесс – технология переработки смешанного уран-плутониевого топлива реактора БРЕСТ-ОД-300 // Радиохимия, 2016. Т. 58. № 3. С. 234–241.
3. McFarlane H., Lineberry M. Spent fuel pyroprocessing demonstration. / Proc. of the International Conference on Fuel Management and Handling. // British Nuclear Energy Soc. Edinburgh (United Kingdom), 1995. P. 149–155.
4. Chemical Engineering Division Research Highlights. // Rep. ANL-6875, May 1963 – April 1964.
5. Choi E., Jeong S. Electrochemical processing of spent nuclear fuels: an overview of oxide reduction in pyroprocessing technology // Progress in Natural Science, 2015. V. 25. № 6. P. 572–582.
6. Lee H., Park G., Kang K., Hur J., Kim J., Ahn D., Cho Y., Kim E. Pyroprocessing technology development at KAERI. // Nuclear Engineering and Technology, 2011. V. 43. № 4. P. 317–328.
7. Кузьмин И.В., Лещенко А.Ю., Носов А.В., Смирнов В.П., Шамсутдинов Р.Н., Мочалов Ю.С., Суханов Л.П. Создание технологических камер большого объема с инертной атмосферой высокой чистоты для пирохимической переработки отработавшего топлива. // Атомная энергия, 2023. Т. 135. № 1–2. С. 27–31.
8. Пятибрат В.П. Упрощенные способы расчета нагнетателей. Ухта: УГТУ, 2013. 22 с.
9. Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники. М.: Атомиздат, 1968. 485 с.
10. Алямовский А.А., Собачкин А.А., Одинцов Е.В., Харитонович А.И., Пономарев Н.Б. SolidWorks 2007/2008. Компьютерное моделирование в инженерной практике. СПб.: БХВ-Петербург, 2008. 1040 с.
11. Луканин В.Н., Шatrov М.Г., Камфер Г.М. Теплотехника: Учебник для вузов. Под ред. Луканина В.Н. 2-е изд., перераб. М.: Высш. шк., 2000. 671 с. ISBN 5-06-003958-7.

Vestnik Natsional'nogo Issledovatel'skogo Yadernogo Universiteta «MIFI», 2025, vol. 14, no. 5, pp. 457–464

Experimental substantiation of optimal parameters of cooling system for inert gas cell

A. V. Nosov^{1,✉}, S. Yu. Kaledin¹, R. N. Shamsutdinov¹, S. M. Savchits^{1,✉}

¹AO Sosny Research and Development Company, Dimitrovgrad, 433507, Russia

JSC Propyv, Moscow, 119607, Russia

✉ office@sosny.ru

✉ savchitssm@pnproryv.ru

Received July 16, 2025; revised September 20, 2025; accepted September 23, 2025

The objective of the work presented in this publication was to study the parameters of a cooling system for argon filling the internal volume of an inert chamber. This objective was achieved by sequentially solving the following problems: numerical simulation of the cooling unit operation in an air environment; experimental determination of the cooling capacity of the cooling unit in an air environment and verification of the numerical simulation results; numerical simulation of the cooling unit operation in argon. The practical significance of the study is determined by the possibility of using the obtained results to optimize the design and operation of inert chamber cooling systems in technological processes with high thermal loads. The proposed operating parameters of the equipment ensure the required temperature, stability of the inert environment with minimal energy consumption and maximum heat removal efficiency. The main results of the study showed that optimal operation of the system is achieved at certain ratios of argon circulation rate, ethylene glycol temperature and fan speed. Critical values of the parameters at which the cooling efficiency decreases were established. Based on the results of the work, data were obtained that can be used in the design of cooling systems for gaseous media of inert chambers.

Keywords: cooling system, pyroprocessing treatment of spent nuclear fuel, shielded inert gas cell.

References

1. Belaya kniga yadernoi energetiki. Zamknutyi toplivnyi tsikl s bystryimi reaktorami [White book of nuclear energy. Closed NFC with fast reactors]. Edited by Adamov E.O. Moscow. AO NIKIET Publ., 2020, 502 p. (in Russian).
2. Shadrin A.U., Dvoeglazov K.N., Ustinov A.O., Maslennikov A.G., Kascheev V.A., Tretyakova S.G., Shmidt O.V., Vidanov V.P., Volk V.I., Veselov S.N., Ishunin V.S. RH-process – tekhnologiya pererabotki smeshannogo uran-plutoniyevoogo topliva reaktora BREST-OD-300 [RH-process – technology of reprocessing of mixed uranium-plutonium fuel from the BREST-OD-300 reactor]. Radiokhimiya, 2016. Vol. 58. No. 3. Pp. 234–241 (in Russian).
3. McFarlane H., Lineberry M. Spent fuel pyroprocessing demonstration. Proc. of the International Conference on Fuel Management and Handling. British Nuclear Energy Soc. Edinburgh (United Kingdom), 1995. Pp. 149–155.
4. Chemical Engineering Division Research Highlights. Rep. ANL-6875, May 1963 – April 1964.
5. Choi E., Jeong S. Electrochemical processing of spent nuclear fuels: an overview of oxide reduction in pyroprocessing technology. Progress in Natural Science, 2015. Vol. 25. № 6. Pp. 572–582.
6. Lee H., Park G., Kang K., Hur J., Kim J., Ahn D., Cho Y., Kim E. Pyroprocessing technology development at KAERI. Nuclear Engineering and Technology, 2011. Vol. 43. No. 4. Pp. 317–328.
7. Kuzmin I.V., Leschenko A.U., Nosov A.V., Smirnov V.P., Shamsutdinov R.N., Mochalov Yu.S., Sukhanov L.P. Sozdanie tekhnologicheskikh kamer bolshogo ob'ema s inertnoi atmosferoi vysokoi chistoty dlya pirokhimicheskoi pererabotki otrabotavshogo topliva [Development of large-scale purified inert atmosphere cells for pyroprocessing treatment of spent nuclear fuel]. Atomnaya energiya, 2023. Vol. 135. No. 1–2. Pp. 27–31 (in Russian).
8. Pyatibrat V.P. Uproshchennyye sposoby rascheta nagnetateley [Streamline calculations of blowers]. Ukhta, UGTU Publ., 2013. 22 p. (in Russian).
9. Chirkin V.S. Teplofizicheskie svoystva materialov yadernoi tekhniki [Thermal and physical properties of nuclear engineering materials]. Moscow, Atomizdat Publ., 1968, 485 p. (in Russian).
10. Alyamovskiy A.A., Sobachkin A.A., Odintsov Ye.V., Kharitonovich A.I., Ponomarev N.B. SolidWorks 2007/2008. Computernoe modelirovanie v ingenernoi practice [SolidWorks 2007/2008. Computer modeling in engineering]. S.-Petersburg, BKhV-Peterburg Publ., 2008. 1040 p. (in Russian).
11. Teplo tekhnika: Uchebnik dlya vuzov [Thermal engineering: Proc. for universities]. Edited by Lukanin V.N., 2nd ed. revised. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2000. 671 p. ISBN 5-06-003958-7 (in Russian).