

Оценка пожаровзрывобезопасного применения анионообменной смолы АВ-17-8 в нитратной форме в сорбционной колонне

Александра Михайловна Кошечева ✉, Кирилл Владимирович Шеламо́в, Антон Владимирович Понизов

Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности (НТЦ ЯРБ), г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. На объектах использования атомной энергии широко применяются ионообменные смолы (ИОС). При эксплуатации смол в азотнокислых средах не исключено их саморазложение при повышенных температурах, что может приводить к аварийным ситуациям. Известно, что анионообменные смолы в нитратной форме разлагаются при температурах выше 220 °С с тепловыделением, превышающим 300 Дж/г, что может представлять потенциальную опасность для технологий извлечения, разделения и очистки радионуклидов.

Цель и задачи. Целью данной работы является оценка граничных условий пожаровзрывобезопасного применения анионита АВ-17-8 в сорбционной колонне. Задачи включают исследование термической стабильности анионита методом дифференциально-сканирующей калориметрии, оценку кинетических параметров протекающих реакций окисления, моделирование процесса тепловыделения в сорбционной колонне. С учетом полученных данных проведена оценка граничных условий возникновения теплового взрыва в оборудовании с АВ-17-8.

Методическая часть. При изучении термической стабильности образцов нагрев проводили в синхронном термическом анализаторе STA 449 F3 Jupiter. Последующую обработку данных осуществляли с использованием программного комплекса Arks фирмы ЗАО «Химинформ», этапы которой включали первичную обработку (вычитание базовой линии, восстановление данных, определение величин тепловых эффектов) и последующее моделирование тепловыделения в колонне, заполненной сорбентом, с определенными геометрическими и теплофизическими параметрами.

Результаты и обсуждение. Методом ДСК установлено, что смола АВ-17-8 в нитратной форме разлагается в две стадии в диапазоне температур 100–200 и 200–320 °С с тепловыделением 148 ± 13 и 425 ± 43 Дж/г соответственно. Для двух экзотермических эффектов оценены кинетические параметры разложения анионита, с помощью которых определены граничные температуры возникновения теплового взрыва в сорбционной колонне в зависимости от ее геометрии.

Выводы. Программный комплекс Arks позволяет моделировать условия возникновения теплового взрыва в технологическом оборудовании. С учетом оцененных параметров представляется возможным спрогнозировать развитие неуправляемых экзотермических реакций, которые определяют пожаровзрывобезопасность применения анионообменных смол.

Ключевые слова: ионообменная смола; моделирование; кинетические параметры; термическая стабильность; пожаровзрывоопасность

Для цитирования: Кошечева А.М., Шеламо́в К.В., Понизов А.В. Оценка пожаровзрывобезопасного применения анионообменной смолы АВ-17-8 в нитратной форме в сорбционной колонне // Пожаровзрывобезопасность/ Fire and Explosion Safety. 2025. Т. 34. № 4. С. 32–41. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.04.32-41

✉ Кошечева Александра Михайловна, e-mail: koscheeva@secnrs.ru

Assessment of fire and explosion safe use of the anion exchange resin AV-17-8 in nitrate form in a sorption column

Aleksandra M. Koscheeva ✉, Kirill V. Shelamov, Anton V. Ponizov

Scientific and engineering centre for nuclear and radiation safety (STC NRS), Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Ion exchange resins are widely used at nuclear fuel cycle facilities. During the exploitation of resins in nitric acid solutions, its self-decomposition at high temperatures is not excluded, which can lead to accidental

situations. It is known that anion exchange resins in nitrate form decompose with heat release with the value higher than 300 J/g at the temperatures above 220 °C, which may pose a potential danger to technologies of extraction, separation and purification of radionuclides.

Aims and objectives. In this study, the problem was set to assess boundary conditions of fire and explosion safe use of AV-17-8 anion exchange resins in a sorption column. The objectives included the following steps: investigation of thermal stability of the anionite by differential scanning calorimetry; assessment of the kinetic parameters of the ongoing oxidation reactions; modeling of the process of the heat release in a sorption column. Based on the data obtained, the assessment of the boundary condition for a thermal explosion occurrence in equipment with AV-17-8 was carried out.

Methodology. For the investigation of the samples under study thermal stability, the heating was conducted in synchronous thermal analyzer STA 449 F3 Jupiter. Subsequent data analysis was performed in the Arks specialized software CJS "Khiminform", the stages of which included primary processing (base line subtraction, deconvolution of the heat flow signal, determination of thermal effects values), and modeling of the heat release in the column filled with sorbent with certain geometric and thermophysical parameters.

Results and discussion. It was determined by differential scanning calorimetry that the AV-17-8 resin in nitrate form decomposes in two stages at the temperature ranges of 100–200 and 200–320 °C with the heat release values of 148 ± 13 and 425 ± 43 J/g respectively. For these two exothermic effects, the kinetic parameters of the anionite decomposition, with the use of which the boundary temperatures of a thermal explosion in the sorption column depending on its radius are determined.

Conclusion. The Arks software provides an opportunity to simulate conditions for a thermal explosion occurrence in technological equipment. Considering the estimated parameters, it is possible to predict the development of uncontrolled exothermic reactions which determine fire and explosion safety of anion exchange resins application.

Keywords: ion exchange resin; modeling; kinetic parameters; thermal stability, fire and explosion hazard

Для цитирования: Koscheeva A.M., Shelamov K.V., Ponizov A.V. Assessment of fire and explosion safe use of the anion exchange resin AV-17-8 in nitrate form in a sorption column. *Pozharovzryvobezopasnost' Fire and Explosion Safety*. 2025; 34(4):32-41. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.04.32-41 (rus).

✉ Aleksandra Mikhailovna Koscheeva, e-mail: koscheeva@secnrs.ru

Введение

В связи с активным развитием атомной энергетики в мире [1, 2] и в Российской Федерации [3–5] актуальной проблемой являются накопленные радиоактивные отходы (РАО)^{1,2} и обращение с ними [6, 7]. Так, для извлечения целевых компонентов из растворов при обращении с жидкими РАО широко используют ионообменные смолы (ИОС) [8]. При эксплуатации ИОС подвергаются химическим и физическим воздействиям, что приводит к разрушению ковалентных связей [9] и, как следствие, к выработке их ресурса. Необходимо учитывать, что в сорбционном оборудовании анионообменные смолы находятся в нитратной форме и контактируют с азотнокислыми средами, поэтому предположительно способны к саморазложению с выделением тепла вследствие протекания окислительных процессов, что может потенциально приводить к авариям [10, 11] при эксплуатации.

Следует отметить, что для обработавших ИОС [12–14], при переработке такими методами, как цементирование [15], битумирование [9], пиролиз [16] и ряд других [17], в литературных источниках приводятся немногочисленные результаты по оценке пожаровзрывобезопасности [18]. Так, например,

в работе [19] авторами была исследована термическая стабильность высокоосновного анионита АВ-17-8 и его химического аналога Токем 845 методами дифференциально сканирующей калориметрии применительно к захоронению смолы в невозвратном защитном контейнере. Установлено, что аниониты в нитратной форме экзотермически разлагаются в температурном диапазоне 220–330 °C с тепловыделением > 300 Дж/г, что позволяет классифицировать их как вещества, способные к саморазложению, согласно Международному стандарту³. Однако для процессов применения смолы АВ-17-8 в сорбционном оборудовании в случаях нарушения нормальной эксплуатации анализ литературных данных не выявил работ по определению показателей ПВБ, а именно температуры начала возникновения теплового взрыва. В связи с чем в данной работе поставлена цель оценить граничные условия пожаровзрывобезопасного обращения со смолой АВ-17-8 при ее эксплуатации в сорбционном оборудовании. Для этого была исследована термическая устойчивость анионита после контакта с азотнокислыми средами методом дифференциально-сканирующей калориметрии (ДСК), оценены кинетические параметры протекающих реакций окисления и граничные условия возникновения теплового взрыва в сорбционной колонне с АВ-17-8.

¹ Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации : Федеральный закон от 11.07.2011 № 190-ФЗ.

² НП-019-15. Сбор, переработка, хранение и кондиционирование жидких радиоактивных отходов. Требования безопасности.

³ United Nations Economic Commission for Europe, 2019. Recommendations on the Transport of Dangerous Goods. Model Regulations. Vol. I, 21st revised edition, New York and Geneva.

Методическая часть

Объектом исследования являлась высокоосновная анионообменная смола АВ-17-8 в нитратной форме. Для ее приготовления навеску исходной смолы в хлоридной форме, помещенную в пробирку, заливали 6 моль/л азотной кислотой так, что весь объем смолы был заполнен раствором. Далее выдерживали систему в течение 1 суток, декантировали смолу и высушивали при комнатной температуре до постоянной массы.

Информацию о поведении АВ-17-8 при термическом нагреве получали методом ДСК, анализ проводили с помощью синхронного термического анализатора STA 449 F3 Jupiter. Для этого исследуемые образцы массой 5–15 мг помещали в корундовые тигли и проводили нагрев в инертной атмосфере (70 мл N_2 /мин) до температур 450–600 °С. Скорость нагрева составляла 1, 2 и 5 К/мин.

Первичную обработку кривых ДСК осуществляли с помощью программного обеспечения (ПО) Arks Thermal Analysis (Arks TA) фирмы ЗАО «Химинформ»⁴. Начальным этапом обработки являлись операции вычитания базовой линии пустого тигля, восстановления исходного сигнала и температуры образца [20]. В специализированном ПО Arks Formal Kinetics (Arks FK)⁵, которое реализует методы математической оптимизации, были оценены кинетические параметры разложения анионита АВ-17-8. При проведении анализа для заданной модели подбирали такой набор параметров, который обеспечивает минимальное значение суммы квадратов отклонений между экспериментальными и расчетными величинами. Моделирование граничных условий возникновения теплового взрыва в сорбционной колонне проводили в ПО Arks Thermal Analysis (Arks TE)⁶, реализующем решение системы дифференциальных уравнений в частных производных, включая уравнение теплового баланса и кинетическое уравнение химической реакции. При моделировании рассматривался случай нарушения нормальной эксплуатации, связанный с работой гидродинамического режима оборудования, вследствие чего возможно частичное осушение колонны с загруженным анионитом. Тепловыделение нереакционного происхождения при этом может приводить к повышению температуры в колонне и протеканию окислительных процессов. При моделировании задавали геометрию колонны и теплофизические параметры, представленные на рис. 1, исходя из того, что загрузка смолы состав-

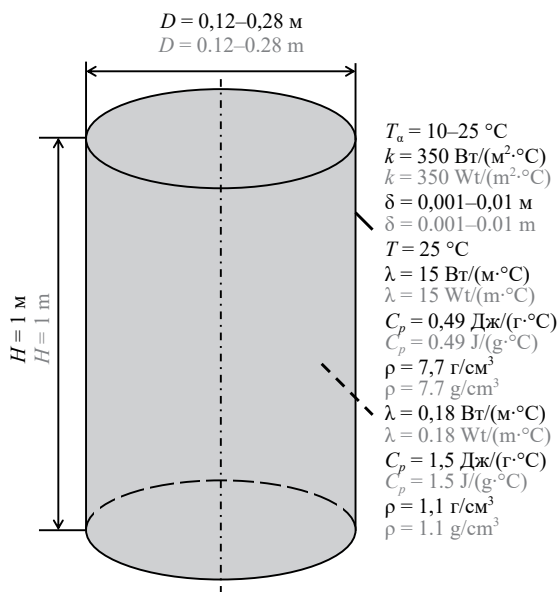


Рис. 1. Геометрия рабочего объема колонны с АВ-17-8 и теплофизические параметры для расчета условия возникновения теплового взрыва

Fig. 1. Geometry of the sorption column and thermophysical parameters for the thermal explosion calculations

ляет 2/3 от общего объема колонны. Рабочие характеристики: диаметр $D = 0,12-0,28 \text{ м}$, высота $H = 1 \text{ м}$, колонна из нержавеющей стали с толщиной стенки в диапазоне $\delta = 0,1-1 \text{ см}$, охлаждаемая водой, циркулирующей в рубашке (принята температура воды $T_a = 10-25 \text{ }^\circ\text{C}$). Задаваемые теплофизические характеристики: коэффициент теплообмена колонны с рубашкой $k = 350 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$, плотность, теплоемкость и теплопроводность стали равна соответственно $\rho = 7,7 \text{ г/см}^3$, $C_p = 0,49 \text{ Дж/(г}\cdot^\circ\text{C)}$, $\lambda = 15 \text{ Вт/(м}\cdot^\circ\text{C)}$; плотность, теплоемкость и теплопроводность смолы АВ-17-8: $\rho = 1,1 \text{ г/см}^3$, $C_p = 1,5 \text{ Дж/(г}\cdot^\circ\text{C)}$, $\lambda = 0,18 \text{ Вт/(м}\cdot^\circ\text{C)}$ соответственно, начальная температура стенки $T = 10-25 \text{ }^\circ\text{C}$. С использованием указанных параметров исследовано влияние геометрии колонны на критическую температуру возникновения теплового взрыва.

Процесс теплового взрыва моделировали посредством решения системы нестационарных дифференциальных уравнений в частных производных, состоящей из уравнения теплового баланса и кинетического уравнения химической реакции. Для цилиндра ограниченной высоты уравнение теплового баланса имеет форму уравнения нестационарной теплопроводности [20]:

$$C_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda(r, z) \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda(r, z) \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \sum_{i=1}^{NC} Q^{\infty(i)} W^{(i)}, \quad (1)$$

где C_p — теплоемкость системы;

⁴ Arks TA Software. URL: <https://www.cisp.spb.ru/arks-ta> (дата обращения: 28.02.2025).

⁵ Arks FK Software. URL: <https://www.cisp.spb.ru/arks-fk> (дата обращения: 28.02.2025).

⁶ Arks TE Software. URL: <https://www.cisp.spb.ru/arks-te> (дата обращения: 28.02.2025).

- ρ — плотность системы;
- T — температура в системе;
- t — время с начала моделирования;
- r — радиус колонны;
- z — высота колонны;
- λ — теплопроводность системы;
- NC — количество независимых реакций;
- $Q^{(i)}$ — тепловой эффект i -й реакции;
- $W^{(i)}$ — ее скорость.

Кинетическое уравнение описывается следующим выражением [20]:

$$\frac{d\alpha^{(i)}}{dt} = W^{(i)}, \quad i = 1, \dots, NC, \quad (2)$$

где $\alpha^{(i)}$ — степень превращения для i -й реакции.

Результаты и их обсуждение

Термограммы термической деструкции образцов смолы АВ-17-8 в нитратной форме после длительного контакта с 4 моль/л азотной кислотой представлены на рис. 2. Установлено, что нагрев сопровождается двумя экзотермическими процессами, протекающими в диапазоне температур 100–200 и 200–320 °С с тепловыделением 148 ± 13 и 425 ± 43 Дж/г соответственно. При этом с уменьшением скорости нагрева наблюдается небольшое смещение максимума скорости тепловыделения в область меньших температур, что указывает на возможный автокаталитический характер процесса. Первый наблюдаемый эффект, вероятно, связан с несорбированной азотной кислотой, находя-

щейся в межпоровом пространстве смолы. Второй эффект совпадает по температурным диапазонам с установленным ранее [19].

В специализированном ПО Arks FK оценены кинетические параметры окисления исследованных образцов. Для этого предложена упрощенная схема реакции вида $A \rightarrow B \rightarrow C$, учитывающая экзотермические эффекты, которые соответствуют процессам окисления функциональных групп и матрицы смолы соответственно. Реакции описываются уравнением общего автокатализа, что позволяет учесть смещение тепловых эффектов по температуре при уменьшении скорости нагрева:

$$r_i = k_0 e^{-E/RT} (1 - \alpha_1)^{n_1} (z_0 e^{-E_z/RT} + \alpha_2)^{n_2}. \quad (3)$$

В первом приближении принято допущение, что величина тепловыделения не зависит от скорости нагрева. Методом компьютерной оптимизации оценены параметры кинетического уравнения, которые представлены в таблице. Экспериментальные кривые теплового потока сопоставлены с расчетными (рис. 3), отмечена высокая сходимость результатов.

С помощью полученных кинетических параметров разложения анионита АВ-17-8 в нитратной форме были проведены оценочные расчеты возможности возникновения теплового взрыва в сорбционной колонне, представленные на рис. 4, 5. Рассмотрено влияние начальной температуры в колонне на ее рост с течением времени и изменение кривых превращения реакций $A \rightarrow B$ и $B \rightarrow C$. Расчеты проведены для радиуса колонны

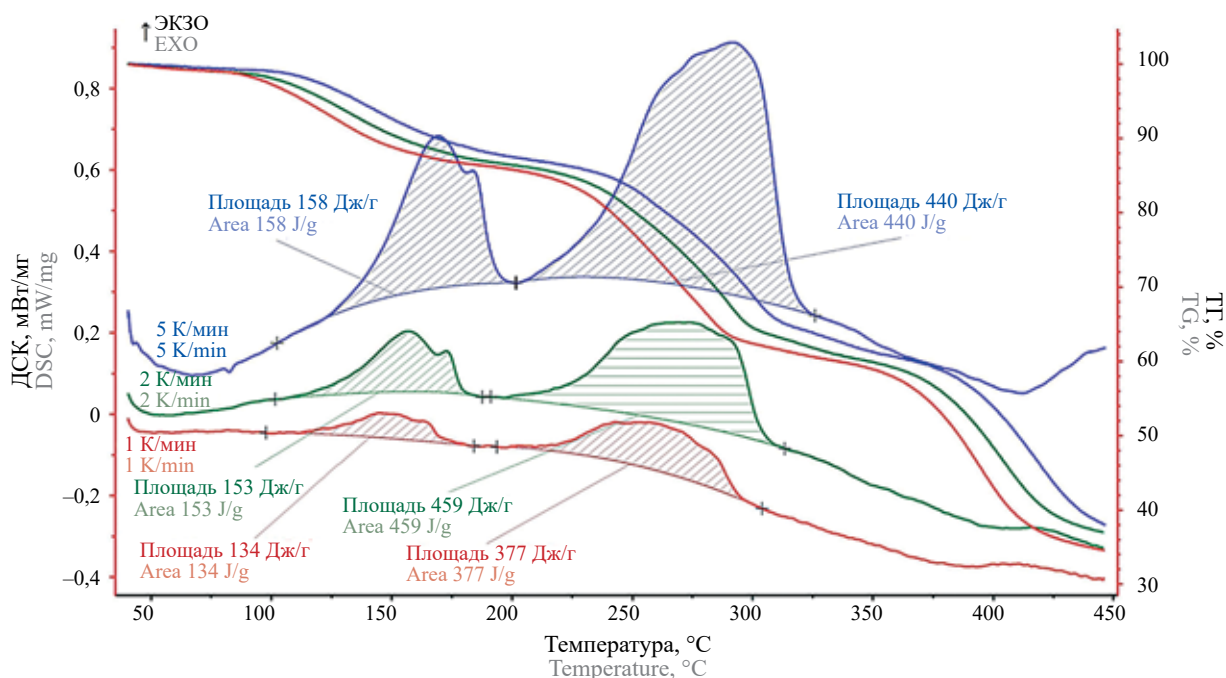


Рис. 2. Термограммы смолы АВ-17-8 в нитратной форме в инертной атмосфере при разных скоростях нагрева
 Fig. 2. The thermograms of the AV-17-8 anion exchange resin in nitrate form in nitrate atmosphere on the different rates

Кинетические параметры разложения анионита АВ-17-8 в нитратной форме

The kinetic parameters of the decomposition of the AV-17-8 anion exchange resin in nitrate form

Параметр Parameter	Единица измерения Unit	Значение для стадии $A \rightarrow B$ Value for the $A \rightarrow B$ stage	Значение для стадии $B \rightarrow C$ Value for the $B \rightarrow C$ stage	
Предэкспоненциальный множитель Preexponential factor	k_0	с^{-1} sec^{-1}	$3,11 \cdot 10^{12}$	$1,95 \cdot 10^{12}$
Энергия активации Activation energy	E	кДж/моль kJ/mol	122,3	163,0
Порядок реакции Reaction order	n_1	—	2,00	1,70
	n_2		1,70	0,73
Теплота реакции Reaction heat	Q	кДж/кг kJ/kg	167	437
Константа автокатализа Autocatalysis factor	z_0	—	0,9	32,9
Энергия активации реакции автокатализа Activation energy of the autocatalysis reaction	E_z	Дж/моль J/mol	1,9	6,6

0,1 м и толщины ее стенки 0,01 м. Так, при температуре 104 °С в начальный момент времени наблюдается саморазогрев внутреннего содержимого колонны на 10 °С, возникающий вследствие протекания реакции $A \rightarrow B$ (степень превращения достигает порядка 20 %). При этом в точке K (рис. 4), соответствующей 114 °С, теплоотвод из системы начинает превышать реакционное тепловыделение, что приводит к плавному остыванию до температуры окружающей среды. В другом случае, при начальной температуре 108 °С, саморазогрев происходит за счет протекания реакции $A \rightarrow B$ и дости-

гает порядка 70 °С. При этом реакция завершается практически на 100 %, однако, температура внутри колонны не достигает необходимой величины для начала второй высокотемпературной реакции $B \rightarrow C$. Поэтому после достижения максимума температуры (рис. 4, точка L , 176 °С) также с течением времени наблюдается плавное остывание системы до температуры окружающей среды. Напротив, при начальной температуре 113 °С реакция $A \rightarrow B$ завершается на 100 % менее чем за 1 ч, что приводит к росту температуры свыше 200 °С. При этом достигаются температуры протекания реакции

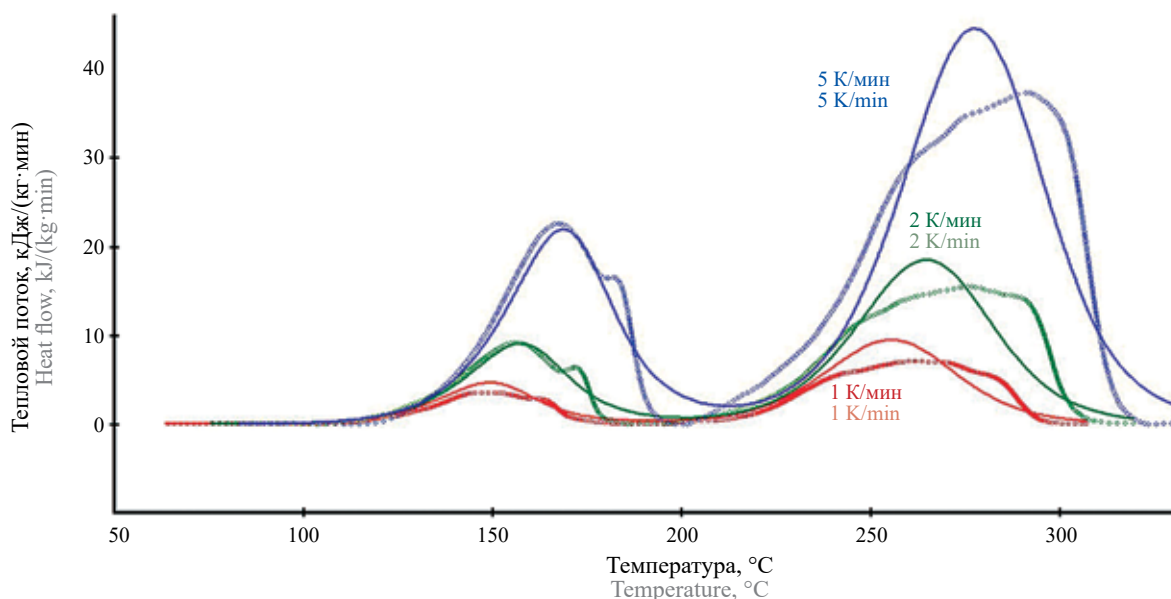


Рис. 3. Экспериментальные данные (точки) разложения смолы АВ-17-8 в нитратной форме и их описание математической моделью (линии)

Fig. 3. Experimental data (dotted lines) of the decomposition of the AV-17-8 anion exchange resin in nitrate form and its description by mathematical model (solid lines)

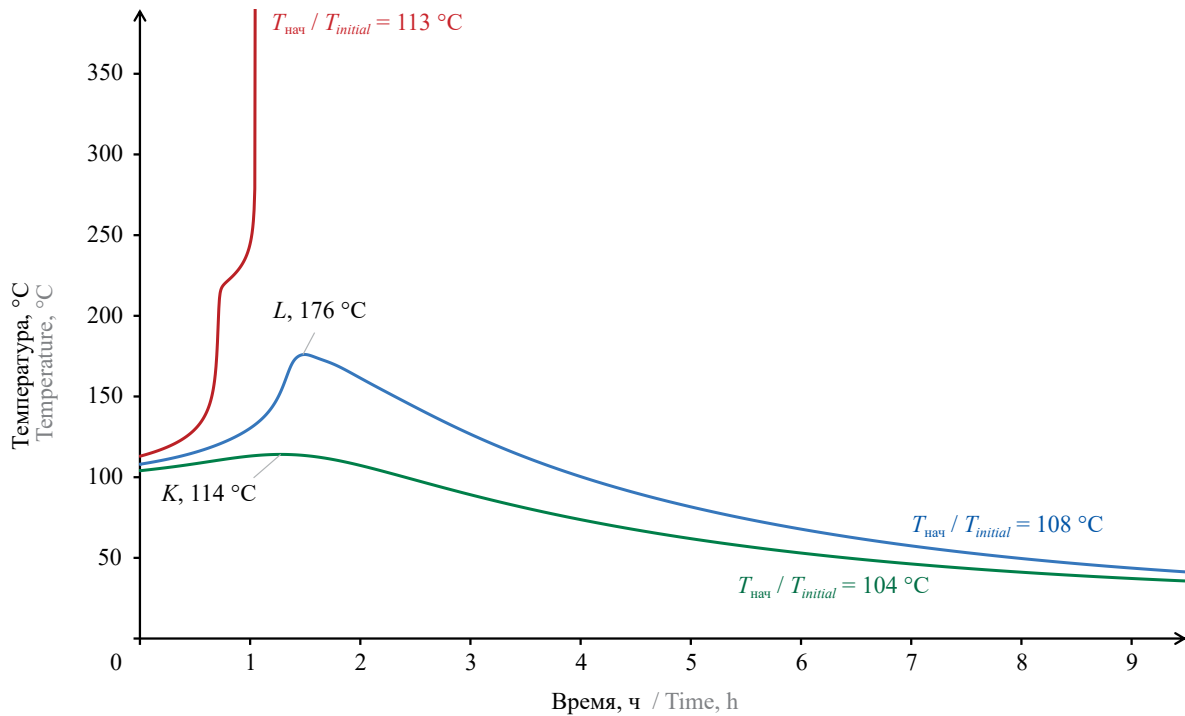


Рис. 4. Расчетное изменение температуры в сорбционной колонне в зависимости от начальной температуры анионита АВ-17-8 в нитратной форме

Fig. 4. Calculated temperature change in the sorption column depending on the initial temperature of the AV-17-8 anion exchange resin in nitrate form

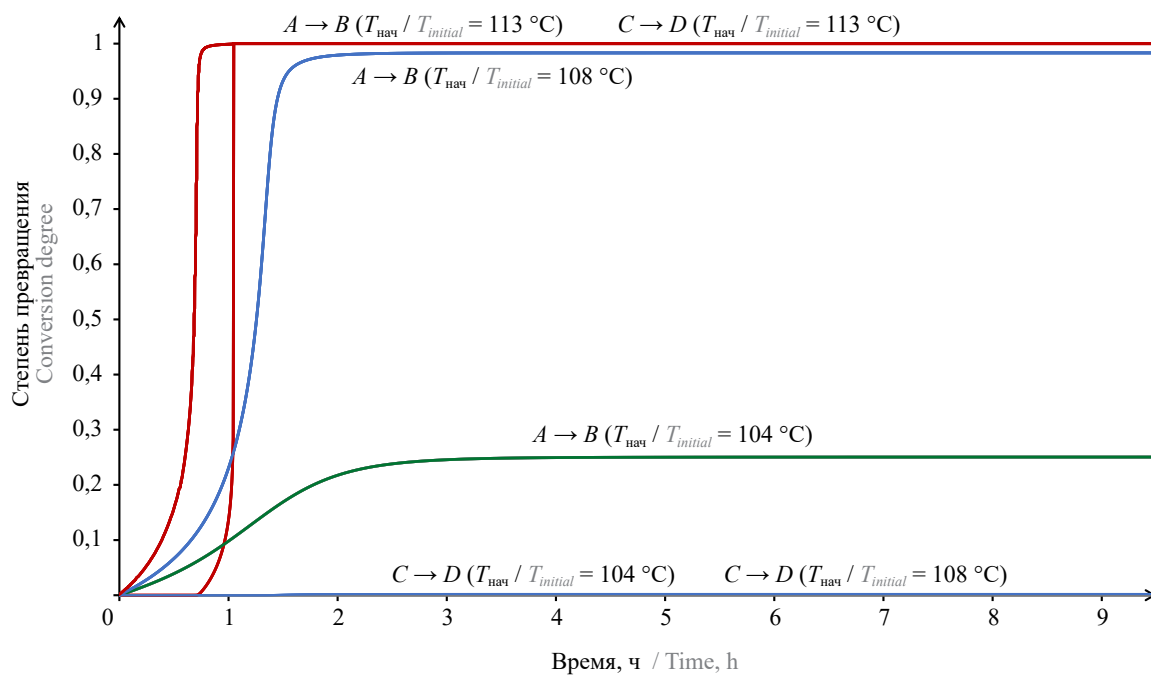


Рис. 5. Расчетные кривые превращения реакций $A \rightarrow B$ и $C \rightarrow D$ во времени в зависимости от начальной температуры анионита АВ-17-8 в нитратной форме

Fig. 5. Calculated conversion curves of the $A \rightarrow B$ and $C \rightarrow D$ reactions depending on the initial temperature of the AV-17-8 anion exchange resin in nitrate form

$B \rightarrow C$, вследствие чего наблюдается дальнейший резкий рост температуры. На основании полученных данных за критическую температуру АВ-17-8, при которой не исключено развитие теплового

взрыва, принимали $108\text{ }^\circ\text{C}$, соответствующую практически полной завершенности реакции $A \rightarrow B$.

Таким образом, методом компьютерной оптимизации была оценена критическая температура,

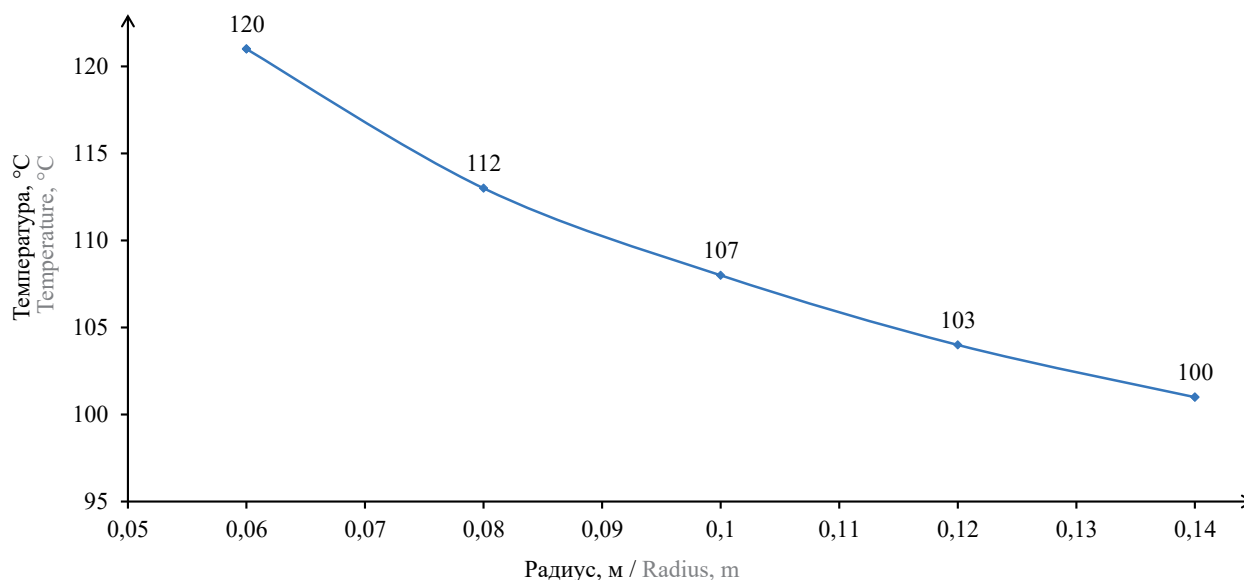


Рис. 6. Температура теплового взрыва в сорбционной колонне в зависимости от ее радиуса
Fig. 6. The temperatures of a thermal explosion in the sorption column depending on its radius

при которой не исключено развитие теплового взрыва в оборудовании. Используя данный подход, было показано, что при изменении геометрических размеров колонны возможно изменение граничных условий возникновения теплового взрыва (рис. 6). Установлено, что с увеличением радиуса снижается температура, при которой возможно развитие экзотермических реакций. Следует отметить, что изменение высоты колонны не влияет на данную величину и на критическую температуру, поскольку они лимитируются теплоотдачей из зоны саморазогрева к стенке колонны, а не по высоте. Снижение температуры с ростом радиуса может быть обусловлено тем, что теплоотдача по боковой поверхности колонны прямо пропорциональна ее радиусу, а тепловыделение внутри колонны пропорционально квадрату радиуса колонны.

Установлено, что, помимо радиуса колонны, на величину температуры возникновения теплового взрыва влияет также толщина стенки (δ). С уменьшением δ от 1 см до 1 мм температура снижается на 3 °С.

Следует отметить, что, помимо рассмотренных параметров, на температуру возникновения теплового взрыва будут оказывать влияние тепловыделяющие радионуклиды, присутствующие в азотно-кислых средах радиохимических производств, что также необходимо учитывать при определении граничных условий.

Выводы

Методом дифференциально-сканирующей калориметрии исследована термическая стабильность ани-

онита АВ-17-8 в нитратной форме при скоростях нагрева 1, 2 и 5 К/мин. Установлено, что деструкция смолы сопровождается двухстадийным экзотермическим процессом в температурном диапазоне 100–320 °С. Разложение носит автокаталитический характер, что выражается в снижении температур начала тепловыделения при уменьшении скорости нагрева. Лимитирующей стадией тепловыделения соответствует экзотермический эффект в температурной области 100–200 °С.

Предложена кинетическая модель вида $A \rightarrow B \rightarrow C$ для математического описания термического разложения исследуемого анионита. Оценены кинетические параметры каждой стадии и показана высокая сходимость экспериментальных данных с расчетными. Методом компьютерного моделирования с использованием программного обеспечения Arks установлено, что при радиусе сорбционной колонны 0,1 м критическая температура составляет 108 °С. Также определена зависимость температуры от геометрических размеров колонны для оценки возникновения теплового взрыва. Установлено, что при увеличении радиуса и толщины колонны снижается температура, тем самым уменьшаются эксплуатационные пределы применения анионита АВ-17-8, поскольку в оборудовании возможно развитие неуправляемых экзотермических реакций при температурах менее 101 °С.

Полученные экспериментальные и расчетные результаты являются важными для оценки пожаро-взрывобезопасного использования анионообменных смол при эксплуатации в сорбционном оборудовании, которые необходимо учитывать при разработке технологических решений, связанных с применением АВ-17-8.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Brook B.W., Alonso A., Meneley D.A., Misak J., Bles T., van Erp J.B.* Why nuclear energy is sustainable and has to be part of the energy mix // *Sustainable Materials and Technologies*. 2014. Vol. 1–2. Pp. 8–16. DOI: 10.1016/j.susmat.2014.11.001
2. *Rodríguez-Penalonga L., Moratilla Soria B.Y.* A review of the nuclear fuel cycle strategies and the spent nuclear fuel management technologies // *Energies*. 2017. Vol. 10. No. 8. P. 1235. DOI: 10.3390/en10081235
3. *Глебов А.П.* Развитие атомной энергетики в России и мире с реакторами поколений 3+ и 4 // *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы*. 2020. № 1. С. 77–93. DOI: 10.55176/2414-1038-2020-1-77-93. EDN NZSJEN.
4. *Адамов Е.О., Асмолов В.Г., Большов Л.А., Иванов В.К.* Двухкомпонентная ядерная энергетика // *Вестник российской академии наук*. 2021. Т. 91. № 5. С. 450–458. DOI: 10.31857/S0869587321050029. EDN OXNFZF.
5. *Оленин Ю.А., Игоревич И.В.* Актуальные научно-технические проблемы атомной энергетики // *Вестник Российской академии наук*. 2019. Т. 89. № 4. С. 335–342. DOI: 10.31857/S0869-5873894335-342. EDN DLNNXZ.
6. *Пензин Р.А., Свитцов А.А.* Развитие технологий обращения с жидкими радиоактивными отходами АЭС // *Радиоактивные отходы*. 2020. № 4 (13). С. 90–98. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-4-90-98. EDN BVKZTV.
7. *Адамов Е.О., Мочалов Ю.С., Рачков В.И., Хомяков Ю.С., Кащеев В.А., Хаперская А.В. и др.* Переработка отработавшего ядерного топлива и рециклирование ядерных материалов в двухкомпонентной ядерной энергетике // *Атомная энергия*. 2021. Т. 130. № 1. С. 28–34. EDN QSPXSB.
8. *Abdel Rahman R.O., Metwally S.S., El-Kamash A.M.* Life cycle of ion exchangers in nuclear industry: application and management of spent exchangers // *Handbook of Ecomaterials*. 2019. Vol. 5. Pp. 3709–3732. DOI: 10.1007/978-3-319-68255-6_108. EDN TRIGLR.
9. *Wang J., Wan Z.* Treatment and disposal of spent radioactive ion-exchange resins produced in the nuclear industry // *Progress in Nuclear Energy*. 2015. Vol. 78. Pp. 47–55. DOI: 10.1016/j.pnucene.2014.08.003. EDN URURSH.
10. *Calmon C.* Explosion hazards of using nitric acid in ion-exchange equipment // *Chemical engineering*. 1980. Vol. 87. No. 23. Pp. 271–274.
11. *Тулунов П.Е., Полянский Н.Г.* Термическая устойчивость анионообменных смол // *Успехи химии*. 1973. Т. 42. № 9. С. 754–771. DOI: 10.1070/RC1973v042n09ABEH002730
12. *Осташкина Е.Е., Савкин А.Е.* Научно-технологическое обоснование выбора способа кондиционирования отработавших радиоактивных ионообменных смол // *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Материаловедение и новые материалы*. 2020. № 3 (104). С. 37–50. EDN CWAYAN.
13. *Андреева Е.В., Костов М.А., Наземцева Г.И., Чупрынин С.А.* Анализ и обобщение опыта методов переработки отработавших ионообменных смол // *Энергетические установки и технологии*. 2015. Т. 1. № 1. С. 71–77. EDN VPNTTR.
14. *Wang J., Wan Z.* Treatment and disposal of spent radioactive ion-exchange resins produced in the nuclear industry // *Progress in Nuclear Energy*. 2015. Vol. 78. Pp. 47–55. DOI: 10.1016/j.pnucene.2014.08.003. EDN URURSH.
15. *Li J., Wang J.* Advances in cement solidification technology for waste radioactive ion exchange resins : a review // *Journal of hazardous materials*. 2006. Vol. 135. No. 1–3. Pp. 443–448. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2005.11.053. EDN KJXFMF.
16. *Chun U.K., Choi K., Yang K.H., Park J.K., Song M.J.* Waste minimization pretreatment via pyrolysis and oxidative pyrolysis of organic ion exchange resin // *Waste Management*. 1998. Vol. 18. No. 3. Pp. 183–196. DOI: 10.1016/S0956-053X(98)00020-8
17. *Сорокин В.Т., Дёмин А.В., Прохоров Н.А., Великина С.А., Гатауллин Р.М., Медеяев И.А.* Хранение отработавших ионообменных смол низкого и среднего уровня удельной активности в контейнерах типа НЗК без включения в матрицу // *Ядерная и радиационная безопасность*. 2009. № 4 (54). С. 19–22. EDN KXSFXF.
18. *Петров С.С., Гоменюк И.В., Корнюшкина О.В., Матвеев А.В., Родин А.В., Шкурыгин Д.М. и др.* Оценка безопасности применения технологии кондиционирования ОИОС методом их осушки (обезвоживания) // *Радиоактивные отходы*. 2024. № 3 (28). С. 7–18. DOI: 10.25283/2587-9707-2024-3-7-18
19. *Родин А.В., Шелапов К.В., Гёзаян Л.В., Понизов А.В., Шарафутдинов Р.Б.* Оценка условий самовозгорания анионообменных смол в нитратной форме в осушенном виде // *Ядерная и радиационная безопасность*. 2023. № 3 (109). С. 5–19. DOI: 10.26277/SECNRS.2023.109.3.001. EDN PZPUJI.
20. *Бенин А.И.* Программный комплекс «Тепловой взрыв» (TSS). Научные основы и методология. СПб : Литео, 2017. 672 с. EDN KSKSTT.

REFERENCES

1. Brook B.W., Alonso A., Meneley D.A., Misak J., Bles T. et al. Why nuclear energy is sustainable and has to be part of the energy mix. *Sustainable Materials and Technologies*. 2014; 1-2:8-16. DOI: 10.1016/j.susmat.2014.11.001
2. Rodríguez-Penalonga L., Moratilla Soria B.Y. A review of the nuclear fuel cycle strategies and the spent nuclear fuel management technologies. *Energies*. 2017; 10(8):1235. DOI: 10.3390/en10081235
3. Glebov A.P. Development of nuclear power in Russia and the world with generation 3+ and 4 reactors. *Problems of atomic science and technology series nuclear and reactor constants*. 2020; 1:77-93. DOI: 10.55176/2414-1038-2020-1-77-93. EDN NZSJEN. (rus).
4. Adamov E.O., Asmolov V.G., Bolshov L.A., Ivanov V.K. Two-component nuclear power engineering. *Herald Russian Academy of Sciences*. 2021; 91(5):450-458. DOI: 10.31857/S0869587321050029. EDN OXNFZF. (rus).
5. Olenin Y.A., Il'gisonis V.I. Challenging scientific and technical problems of nuclear power. *Herald of the Russian Academy of Sciences*. 2019; 89(4):335-342. DOI: 10.31857/S0869-5873894335-342. EDN DLNNXZ. (rus).
6. Penzin R.A., Svitsov A.A. Development of Technologies for Handling Liquid Radioactive Waste of Nuclear Power Plants. *Radioactive Waste*. 2020; 4(13):90-98. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-4-90-98. EDN BVKZTV. (rus).
7. Adamov E.O., Mochalov Y.S., Rachkov V.I., Khomyakov Y.S., Shadrin A.Y., Kascheev V.A. et al. Spent nuclear fuel reprocessing and nuclear materials recycling in two-component nuclear energy. *Atomic energy*. 2021; 130(1):28-34. EDN QSPXSB. (rus).
8. Abdel Rahman R.O., Metwally S.S., El-Kamash A.M. Life cycle of ion exchangers in nuclear industry: application and management of spent exchangers. *Handbook of Ecomaterials*. 2019; 5:3709-3732. DOI: 10.1007/978-3-319-68255-6_108. EDN TRIGLR.
9. Wang J., Wan Z. Treatment and disposal of spent radioactive ion-exchange resins produced in the nuclear industry. *Progress in Nuclear Energy*. 2015; 78:47-55. DOI: 10.1016/j.pnucene.2014.08.003. EDN URURSH.
10. Calmon C. Explosion hazards of using nitric acid in ion-exchange equipment *Chemical engineering*. 1980; 87(23):271-274.
11. Tulupov P.E., Polyanskiy N.G. Thermal Stability of Anion-exchange Resins. *Russian Chemical Reviews*. 1973; 42(9):754-771. DOI: 10.1070/RC1973v042n09ABEH002730 (rus).
12. Ostashkina E.E., Savkin A.E. Scientific and technological justification of the choice of a method for conditioning spent radioactive ion exchange resins. *Problems of nuclear science and technology. Series: materials science and new materials*. 2020; 3(104):37-50. EDN CWAYAN. (rus).
13. Andreeva E.V., Kostov M.A., Nazemtseva G.I., Chuprynin S.A. The analysis and generalization experience of methods for wasted ion-exchanging resins processing. *Power plants and technologies*. 2015; 1(1):71-77. EDN VPNTTR. (rus).
14. Wang J., Wan Z. Treatment and disposal of spent radioactive ion-exchange resins produced in the nuclear industry. *Progress in Nuclear Energy*. 2015; 78:47-55. DOI: 10.1016/j.pnucene.2014.08.003. EDN URURSH.
15. Li J., Wang J. Advances in cement solidification technology for waste radioactive ion exchange resins : a review. *Journal of hazardous materials*. 2006; 135(1-3):443-448. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2005.11.053. EDN KJXFMM.
16. Chun U.K., Choi K., Yang K.H., Park J.K., Song M.J. Waste minimization pretreatment via pyrolysis and oxidative pyrolysis of organic ion exchange resin. *Waste Management*. 1998; 18(3):183-196. DOI: 10.1016/S0956-053X(98)00020-8
17. Sorokin V.T., Demin A.V., Prohorov N.A., Velikina S.A. Storage of spent ion exchange resins of low and medium specific activity levels in containers of the NPC type without inclusion in the matrix. *Nuclear and radiation safety journal*. 2009; 4(54):19-22. EDN KXSFXF. (rus).
18. Petrov S.S., Gomenyuk I.V., Korniyushkina O.V., Matveenkov A.V., Rodin A.V., Shkurygin D.M. et al. Safety Assessment of a SIER Conditioning Method Based on SIER Dehydration (Dewatering). *Radioactive Waste*. 2024; 3(28):7-18. DOI: 10.25283/2587-9707-2024-3-7-18 (rus).
19. Rodin A.V., Shelamov K.V., Gezalyan L.V., Ponizov A.V., Sharafutdinov R.B. Estimation of conditions of self-ignition of dried anion-exchange resins in nitrate form. *Nuclear and radiation safety journal*. 2023; 3(109):5-19. DOI: 10.26277/SECNRS.2023.109.3.001. EDN PZPUJI. (rus).
20. Benin A.I. *Software Package "Thermal Explosion" (TSS). Scientific Basis And Modelling*. St. Petersburg, Liteo, 2017; 672. EDN KSKSTT. (rus).

Поступила 31.01.2025, после доработки 28.04.2025;

принята к публикации 08.07.2025

Received January 31, 2025; Received in revised form April 28, 2025;

Accepted July 8, 2025

Информация об авторах

КОЩЕЕВА Александра Михайловна, к.х.н., начальник участка экспериментальных исследований безопасности объектов использования атомной энергии, Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности (НТЦ ЯРБ), Россия, 107140, г. Москва, ул. Малая Красносельская, 2/8, корп. 5; ORCID: 0009-0003-7393-5173; e-mail: koscheeva@secnrs.ru

ШЕЛАМОВ Кирилл Владимирович, младший научный сотрудник, Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности (НТЦ ЯРБ), Россия, 107140, г. Москва, ул. Малая Красносельская, 2/8, корп. 5; ORCID: 0009-0008-1657-4064; e-mail: shelamov@secnrs.ru

ПОНИЗОВ Антон Владимирович, к.т.н., заместитель директора, Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности (НТЦ ЯРБ); Россия, 107140, г. Москва, ул. Малая Красносельская, 2/8, корп. 5; ORCID: 0009-0007-0961-6759; e-mail: ponizov@secnrs.ru

Вклад авторов: *все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.*
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors

Aleksandra M. KOSCHEEVA, Cand. Sci. (Chem.), Head of the Laboratory for Experimental Research, Division for Safety of Fuel Cycle Facilities, Scientific and engineering centre for nuclear and radiation safety (STC NRS). Malaya Krasnoselskaya st., 2/8 5, Moscow, 107140, Russian Federation; ORCID: 0009-0003-7393-5173; e-mail: koscheeva@secnrs.ru

Kirill V. SHELAMOV, junior researcher, Scientific and engineering centre for nuclear and radiation safety (STC NRS), Malaya Krasnoselskaya st., 2/8 5, Moscow, 107140, Russian Federation; ORCID: 0009-0008-1657-4064; e-mail: shelamov@secnrs.ru

Anton V. PONIZOV, Cand. Sci. (Eng.), deputy director, Scientific and engineering centre for nuclear and radiation safety (STC NRS), Malaya Krasnoselskaya st., 2/8 5, Moscow, 107140, Russian Federation; ORCID: 0009-0007-0961-6759; e-mail: ponizov@secnrs.ru

Contribution of the authors: *all authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication.*
The authors declare that there is no conflict of interest.