

УДК 614.876,551.521,574.46

АНАЛИЗ СРЕДНЕМНОГОЛЕТНЕЙ ОБЪЕМНОЙ АКТИВНОСТИ РАДИОНУКЛИДОВ И ГОДОВОЙ ПОГЛОЩЕННОЙ ДОЗЫ В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ ВОЗДУХА ПРИ ПОСТОЯННЫХ РАДИОАКТИВНЫХ ВЫБРОСАХ (НА ПРИМЕРЕ ЛЕНИНГРАДСКОЙ АЭС-2)

Переволоцкая Т.В., Переволоцкий А.Н. (ВНИИРАЭ, г. Обнинск)

e-mail: forest_rad@mail.ru

Активность ежегодного выброса АЭС с ВВЭР может достигать 10^{14} Бк на 1 ГВт мощности энергоблока. При этом основной вклад в суммарную активность обусловлен радиоактивными благородными газами, которые почти не осаждаются на земную поверхность, однако их β - и γ -излучение в зоне постоянного выброса является фактором воздействия на биологические объекты [1—3]. Таким образом, цели исследования — анализ распределения среднемноголетней объемной активности в приземном слое воздуха и ожидаемой годовой поглощенной дозы β -, γ -излучения в зоне распространения постоянного выброса АЭС.

Материалы и методика. Прогнозировали объемную активность радионуклидов постоянного выброса в приземном слое воздуха с применением гауссовой модели [4, 5]. Активность годового выброса радионуклидов и аэрологические характеристики территории — наиболее вероятная категория устойчивости атмосферы и средневзвешенная скорость ветра приняты в соответствии с данными [6]. Расчеты выполняли для радионуклидов, которые отличались физико-химическими свойствами: ^3H , ^{85}Kr , ^{133}Xe , ^{131}I и ^{137}Cs . Относительно близкая активность указанных и других радионуклидов позволяет оценить их среднемноголетнюю активность в составе годового выброса [3, 6]. Так, годовой выброс ^{88}Kr и ^{135}Xe сопоставим с выбросом ^3H . Выброс ^{14}C , ^{83m}Kr , ^{87}Kr , ^{131m}Xe и ^{138}Xe близок по активности к ^{85}Kr . Радиоактивные изотопы иода имеют близкую активность в составе годового выброса, соответственно среднемноголетняя объемная активность $^{132-135}\text{I}$ на исследуемой территории сопоставима с ^{131}I . Распределение ^{51}Cr , ^{54}Mn , ^{60}Co , ^{89}Sr , ^{90}Sr , ^{134}Cs , выбрасываемых в составе аэрозолей, можно оценить по активности ^{137}Cs .

На основании среднемноголетней объемной активности радионуклидов в приземном слое воздуха рассчитана годовая поглощенная доза β -, γ -излучения.

В качестве геометрии излучения принято полубесконечное пространство с равномерно распределенной объемной активностью радионуклидов постоянного выброса в приземном слое воздуха. Расчет мощности поглощенной дозы γ -излучения радионуклидов основан на дозовой функции ослабления точечного источника с учетом дозового фактора накопления рассеянного излучения [7]:

$$D_{\gamma}(x) = 1,6 \cdot 10^{-13} A \sum_{i=1}^k \frac{v_{mk,i} E_i n_i}{4\pi x^2} \exp(-\mu_i d) B(\mu_i d, E_i), \quad (1)$$

где A — активность источника, Бк (для единичной активности мощность поглощенной дозы P является коэффициентом дозового преобразования); k — число линий спектра γ -излучения; $v_{mk,i}$ — массовый коэффициент поглощения i -й энергии квантов в ткани, $\text{м}^2/\text{кг}$; E_i — i -я энергия γ -квантов, МэВ; n_i — выход квантов i -й энергии спектра на распад, отн. ед.; x — массовая толщина среды прохождения излучения от источника до точки детектирования, $\text{кг}/\text{м}^2$; μ_i — массовый коэффициент ослабления в среде прохождения излучения, $\text{м}^2/\text{кг}$; d — массовая толщина среды прохождения излучения между источником и детектором, $\text{кг}/\text{м}^2$; $B(\mu_i d, E_i)$ — дозовый фактор накопления для учета вклада рассеянного излучения, отн. ед.

Мощность поглощенной дозы β -излучения рассчитана на основе дозовой функции точечного источника излучения с единственным спектром [8]:

$$D_{\beta}(x) = \frac{1,6 \cdot 10^{-10} a_{21} Q n_{\beta} \bar{E}_{\beta}}{4\pi x^2} \times \\ \times [A a_{21} \rho x \exp(-v_1 a_{21} \rho x) + \\ + B \exp(-v_2 a_{21} \rho x) + C \exp(-v_3 a_{21} \rho x)], \quad (2)$$

где $a_{21} = 0,89$ — коэффициент, учитывающий плотность среды, отличной от воды; Q — активность точечного источника, Бк; n_{β} — выход

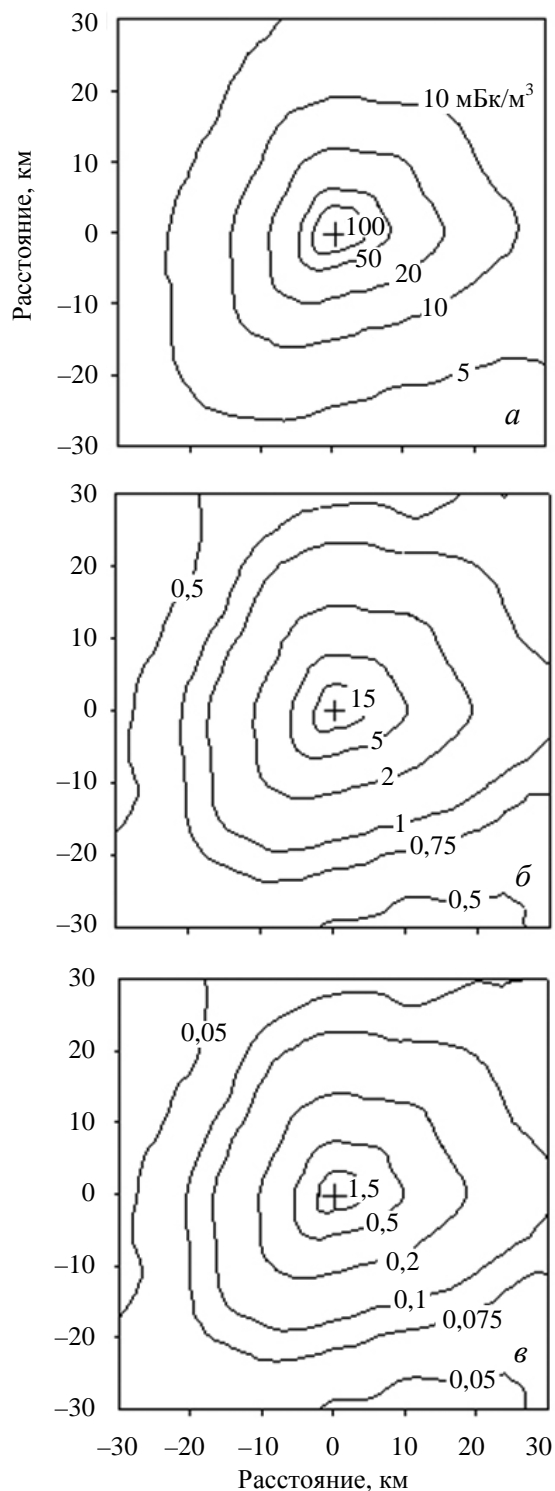
β -частиц на распад, отн. ед.; \bar{E}_β — средняя энергия β -излучения, МэВ; ρ — плотность среды распространения, г/см³; x — расстояние от источника излучения, см; $A, B, C, \nu_1, \nu_2, \nu_3$ — безразмерные параметры, зависящие от максимальной энергии β -излучения [8].

Мощность поглощенной дозы интегрировали по времени и рассчитывали ожидаемую годовую поглощенную дозу.

Результаты и обсуждение. Изолинии, характеризующие распределение среднесуточной объемной активности ¹³³Xe, ⁸⁵Kr, ³H, ¹³¹I и ¹³⁷Cs в пределах 30-километровой зоны вокруг источника выброса, показаны на рис. 1, 2. Наибольшее распространение радионуклидов — в северо-восточном квадранте относительно источника выброса. Это связано с преобладанием ветров соответствующих румбов (повторяемость в течение года достигает 12%). Немного меньшее распространение прогнозируется в северо-западном квадранте, что связано с редким направлением ветра с востока и юго-востока (повторяемость <5%).

Зона с наибольшей среднесуточной объемной активностью простирается на расстояние <5 км в северо-восточном квадранте, в то время как по остальным направлениям менее чем на 3 км и ограничена изолиниями, мБк/м³: 100 ¹³³Xe, 15 ³H, 1,5 ⁸⁵Kr, 0,2 ¹³¹I, 0,1 ¹³⁷Cs. В ее пределах на удалении 1100—1500 м от источника выброса в восточном направлении среднесуточная объемная активность может достигать максимальной, мБк/м³: 300 ¹³³Xe, 50 ³H, 4 ⁸⁵Kr, 10 ¹³¹I, 5 ¹³⁷Cs. Следует отметить, что даже на данном участке прогнозная концентрация радионуклидов в воздухе в 10⁵ раз меньше по сравнению с установленными нормативами НРБ-99/2009.

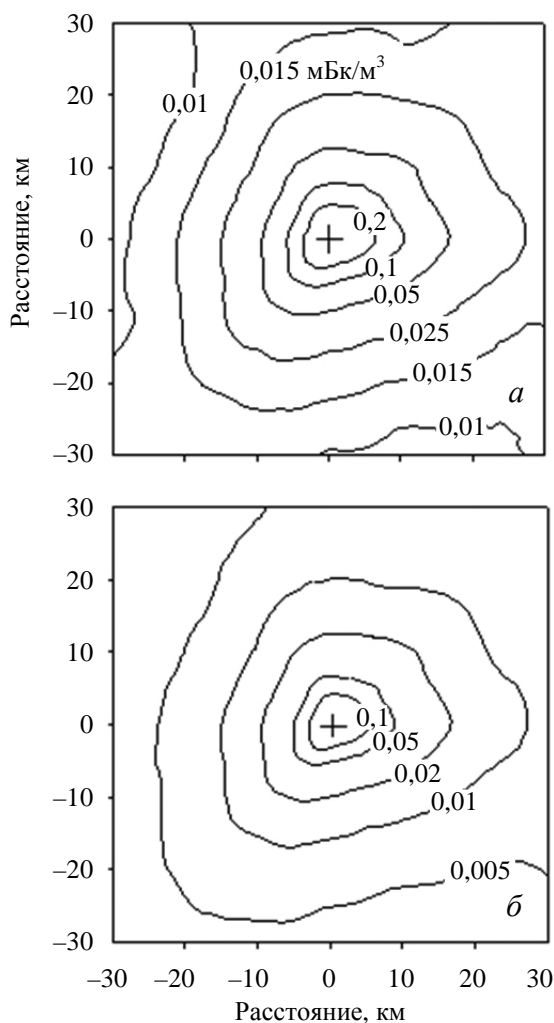
Изолиния 10 мБк/м³ среднесуточной объемной активности ¹³³Xe проходит на удалении ~25 км в северо-восточном квадранте и <20 км в других направлениях (см. рис. 1, а). За пределы 30-километровой зоны изолиния 5 мБк/м³ выходит только в северо-восточном квадранте. Изолинии 1 мБк/м³ ³H в приземном слое воздуха и 0,1 мБк/м³ ⁸⁵Kr выходят за пределы 30-километровой зоны только в восточном направлении (см. рис. 1, б, в). Такая объемная активность будет отмечаться ближе к источнику



Р и с. 1. Пространственное распределение объемной активности ¹³³Xe (а), ³H (б), ⁸⁵Kr (в)

выброса в северо-западном и юго-восточном квадрантах.

Изолинии 0,025 мБк/м³ среднесуточной объемной активности ¹³¹I и 0,01 мБк/м³ ¹³⁷Cs проходят на расстоянии 25—28 км от источника выброса в северо-восточном квадранте и <20 км — в остальных направлениях (см. рис. 2).



Р и с. 2. Пространственное распределение объемной активности ^{131}I (а), ^{137}Cs (б)

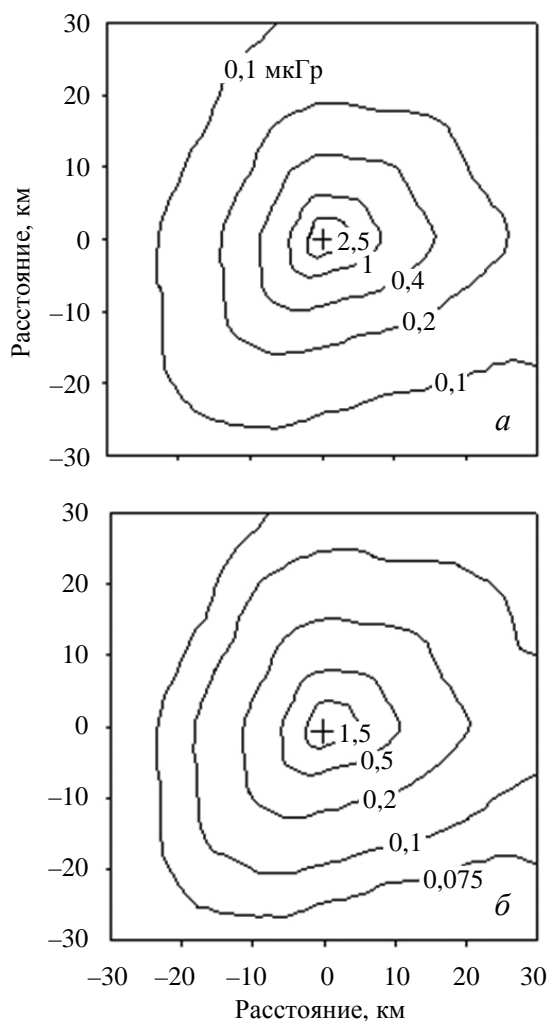
За пределами 30-километровой зоны в восточном направлении их возможная концентрация составит 0,015 и 0,005 мБк/м³ соответственно.

Пространственное распределение объемной активности радионуклидов в составе аэрозолей постоянного выброса АЭС (^{51}Cr , ^{54}Mn , ^{60}Co , ^{89}Sr , ^{90}Sr , ^{134}Cs) будет соответствовать таковому для ^{137}Cs , однако абсолютная среднегодовое объемная активность будет для них ниже от 1,5 раза ^{134}Cs до 10 тыс. раз ^{90}Sr .

В целом прогнозируемая среднегодовое объемная активность исследуемых радионуклидов в приземном слое воздуха согласуется с результатами других исследователей [1, 9—11]. Отмечено [10—12], что объемная активность ^{133}Xe характеризуется широким диапазоном значений — от сотых долей до десятков мБк/м³, при этом наибольшие значения из указанного диапазона наблюдаются в промышлен-

ных районах с широким применением ядерных технологий. Объемная активность ^{85}Kr с середины 1950-х годов возросла в 10^6 раз — до 1—5 Бк/м³ в настоящее время [9—11, 13]. Причем прогнозируется ежегодное увеличение активности радионуклида интенсивностью 0,01 Бк/м³ [9, 13]. Исследуемые показатели по ^{137}Cs и ^{90}Sr находятся в диапазоне 0,1—0,2 мБк/м³ [1]. Важно отметить, что выявить объемную активность радионуклидов в приземном слое воздуха, вносимую постоянными выбросами атомных станций, представляется крайне сложно в методическом аспекте на фоне значительного содержания радионуклидов в атмосферном воздухе [1, 11—13].

Пространственное распределение среднегодовое поглощенной дозы β - и γ -излучения в приземном слое воздуха показано на рис. 3. Максимальная поглощенная доза, мкГр/год: 0,6 β - и 0,45 γ -излучения вероятна для зоны с наибольшей среднегодовое объем-



Р и с. 3. Годовая поглощенная доза β - (а), γ -излучения (б)

ной активностью радионуклидов постоянного выброса. Он расположен на удалении 1100—1500 м от АЭС в восточном направлении. По мере удаления от источника выброса на расстоянии 5 км в восточном направлении и 3 км в остальных годовая поглощенная доза β -, γ -излучения снизится примерно в 3 раза и составит 0,25 и 0,15 мкГр соответственно. За пределами 30-километровой зоны дозовый показатель β -излучения в диапазоне 0,01—0,02 мкГр прогнозируется в северо-восточном квадранте, γ -излучения — только в восточном направлении.

Годовая поглощенная доза β -, γ -излучения в приземном слое воздуха более чем в 1000 раз меньше по сравнению с естественным радиационным фоном на исследуемой территории [10]. Очевидно, что малое повышение дозы (<0,1%), обусловленное поступлением радионуклидов постоянного выброса в атмосферу к естественному радиационному фону (0,06—0,18 мкГр/ч, или 0,5—1,5 мГр/год) [6], не может быть достоверно определено имеющимися инструментальными средствами.

Наибольший вклад в годовую поглощенную дозу по обоим видам излучения вносят радиоактивные изотопы благородных газов, которые определяют γ -излучение в приземном слое воздуха при постоянных радиоактивных выбросах и 99% β -излучения (см. таблицу). При этом наиболее представительными в β -спектре являются ^{133}Xe (30%), ^{135}Xe (25%) и ^{88}Kr (20%), ~60% энергии γ -излучения определяется ^{88}Kr , а также ^{133}Xe и ^{135}Xe (по 14%).

Вклад радионуклидов из состава постоянного выброса АЭС в годовую поглощенную дозу β -, γ -излучения, %

Радионуклид	Вклад, %	
	β -излучения	γ -излучения
^3H	0,25	—
^{14}C	0,16	—
^{85}Kr	0,88	0,01
$^{85\text{m}}\text{Kr}$	5,66	3,0
^{87}Kr	15,96	4,99
^{88}Kr	19,83	61,76
^{133}Xe	30,39	14,3
^{135}Xe	25,15	14,21
^{138}Xe	1,72	1,68

Заключение. Таким образом, анализ показал, что среднесуточная объемная активность радионуклидов из состава постоянного

выброса в приземном слое воздуха с применением гауссовой модели в 10^5 раз меньше по сравнению с установленными нормативами НРБ-99/2009, годовая поглощенная доза β - и γ -излучения в 1000 раз меньше по сравнению с естественным радиационным фоном. Эти данные могут быть использованы при оценке радиационного воздействия на окружающую среду планируемой деятельности АЭС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2018 г. Ежегодник. Обнинск: Росгидромет, ФГБУ «НПО Тайфун», 2019. 324 с.
2. Sources and Effects of Ionizing Radiation. Rep. of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation to the General Assembly with scientific annexes. V. 1. Sources. New York: United Nations, 2008. 463 p.
3. **Переволоцкая Т.В., Переволоцкий А.Н., Спиридонов С.И.** Кластерный анализ для оценки радиационного воздействия штатных выбросов АЭС на биоту. — Радиация и риск, 2018, т. 27, № 1, с. 43—52.
4. **Методические** рекомендации по расчету нормативов предельно допустимых выбросов радиоактивных веществ из организованных источников в атмосферный воздух применительно для организации Госкорпорации «Росатом». № 1-1/310-р. М., Госкорпорация «Росатом», 2014. 84 с.
5. **Разработка** и установление нормативов предельно допустимых выбросов радиоактивных веществ атомных станций в атмосферный воздух. Методика. МТ 1.2.1.15.1176—2016. М., АО «Концерн Росэнергоатом», 2016. 75 с.
6. **Ленинградская АЭС, энергоблоки № 1 и № 2.** Охрана окружающей среды. Материалы оценки воздействия на окружающую среду. Т. 1, кн. 2. М., АО «Атомпроект», 2015. 415 с.
7. **Кимель Л.Р., Машкович В.П.** Защита от ионизирующих излучений. Справочник. М.: Атомиздат, 1972. 312 с.
8. **Спирин Е.В., Пименов Е.В.** Разработка дозиметрических моделей для оценки доз облучения почвенного микробоценоза и мезофауны при радиоактивном загрязнении окружающей среды. Обнинск, ВНИИСХРАЭ, 2011. 55 с.
9. **Корсаков А.Т., Тертышник Э.Г.** Криптон-85 в атмосфере. — АНРИ, 2013, № 4, с. 19—27.
10. **Содержание** радионуклидов ^{85}Kr и Xe в атмосферном воздухе Северо-Западного региона России в 2006—2008 гг. — Труды Радиового ин-та В.Г. Хлопина, 2011, т. XV, с. 141—167.
11. **Achim P., Generoso S., Morin M.** Characterization of Xe-133 global atmospheric background. Implications for the Int. Monitoring System of the Comprehensive Nuclear-

- Test-Ban Treaty. — J. Geophys. Res.: Atmospheres, 2016, v. 121, № 5, p. 4951—4966.
12. **Stockburger H., Sartorius H., Sittkus A.** Messung der ^{85}Kr und ^{133}Xe Aktivität der Atmosphärischen Luft. — Zeitschrift Naturforschung, 1977, № 32a, s. 1249—1253.

13. **Tomasek M., Wilhelmova L.** Development of ^{85}Kr atmospheric activity and comparison with prognosis. — J. Radioanal. Nucl. Chem., 1997, v. 218, № 1, p. 119—121.

Поступила в Редакцию 21.10.19

Рефераты

УДК 621.039.524:536.24

Перепелица Н.И. **Решетки со смесительными элементами для ТВС ВВЭР.** — Атомная энергия, 2020, т. 128, вып. 3, с. 123—130.

Проанализированы конструкции решетки со смесительными элементами для ТВС ВВЭР и экспериментальные исследования их теплогидравлических и массообменных характеристик. Решетки изготовлены в ПАО «Новосибирский завод химконцентратов» и ПАО «Машиностроительный завод». По результатам исследований на моделях ТВС ВВЭР с перемешивающими решетками, дистанционирующими перемешивающими решетками и без них проведена сравнительная оценка интенсивности перемешивания теплоносителя, повышения критического теплового потока и критической мощности, коэффициента гидравлического сопротивления. Показано, что использование в моделях ТВС перемешивающих решеток, выбранных для оснащения усовершенствованных сборок ТВС-2М и ТВСА, повышает их критическую мощность при режимных параметрах, близких к номинальным ТВС ВВЭР-1000, на 5,1—14% и 10—12% соответственно. Рис. 4, список лит. 26 назв.

УДК 621.039.524:536.24

Perpelitsa N.I. (JSC «SSC RF — IPPE», Obninsk). **Grids with Mixing Element for FA ВВЭР.** — Atomic Energy, 2020, v. 128, № 3, p. 123—130.

The grid designs with mixing elements for ВВЭР fuel assemblies and the available results of experimental studies of their thermal-hydraulic and mass transfer characteristics are analyzed. Grid was made in the Public joint stock companies Novosibirsk Chemical Concentrates Plant and Mashinostroitelny Zavod. According to the results of studies on the models of FA with mixing grids, spacing mixing grids and without them, a comparative assessment of the coolant mixing intensity, the increase in critical heat flux and critical power, the coefficient of hydraulic resistance was carried out. It is shown that the use of mixing grids in FA models selected for equipping advanced FA-2M and FAA assemblies increases their critical power at operating parameters close to the nominal ВВЭР-1000 FA by 5,1—14% and 10—12%, respectively. Fig. 4, ref. 26.

УДК 533.72

Абанников В.В., Клосс Ю.Ю., Шайхатов О.К., Додулад О.И., Щербakov Д.В., Любимов Д.Ю. **Анализ поведения радионуклидов в вакуумно-цезиевой системе термоэмиссионного реактора-пре-**

образователя методами кинетической теории. — Атомная энергия, 2020, т. 128, вып. 3, с. 130—135.

Настоящая работа посвящена применению метода численного решения уравнения Больцмана для моделирования поведения криптона и ксенона и технологических газов (монооксида углерода) в вакуумно-цезиевом канале термоэмиссионного реактора-преобразователя ЯЭУ. В ходе работы были разработаны методики моделирования и реализован программный комплекс. Проведены серии расчетов для вариации начального потока радионуклидов, получена зависимость потока радионуклидов на выходе от потока на входе, получена зависимость давления монооксида углерода в отверстии соединительного канала от размера отверстия и оценено время его зарастания за счет конденсации карбоната цезия. Рис. 5, список лит. 11 назв.

UDC 533.72

Abannikov V.V. (LTD «Technoim», Moscow), Kloss Yu.Yu., Shaykhatarov O.K., Dodulad O.I., Shcherbakov D.V. (MIPT, Dolgoprudny, NRC «Kurchatov Institute», Moscow), Lubimov D.Yu. (MIPT, Dolgoprudny, NPO «Luch», Podolsk). **Analysis of the Radionuclides Behavior in a Vacuum-Cesium System of a Thermo-emission Reactor-Converter by Methods of Kinetic Theory.** — Atomic Energy, 2020, v. 128, № 3, p. 130—135.

The paper is devoted to the application of numerical solution of the Boltzmann equation method for modeling the behavior of radionuclides (Xe and Kr) and process gases (CO) in the vacuum-cesium channel of a thermionic reactor-converter, which is used in a space nuclear power generator. In this work, we developed modeling techniques and implemented them in a software package. We performed series of calculations for different initial flux of radionuclides and evaluated the dependence of the radionuclides output flux on the input flux. In addition, the dependence of the carbon monoxide pressure in the connecting channel on the size of the channel and the time of its overgrowing due to condensation of cesium carbonate were estimated. Fig. 5, ref. 11.

УДК 621.039.542.44

Белоногов М.Н., Волков И.А., Модестов Д.Г., Рыкованов Г.Н., Симоненко В.А., Хмельницкий Д.В. **Об оптимальном режиме трансмутации минорных актиноидов в жидкосолево-**

реакторе. — Атомная энергия, 2020, т. 128, вып. 3, с. 135—142.

В статье рассматриваются основные закономерности трансмутации Np, Am и Cm в жидкосолево-