

В. И. Орловская, А. Г. Трифонов

*Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук
Беларуси, Минск, Республика Беларусь*

ОЦЕНКА РАДИАЦИОННОГО РИСКА ДЛЯ ПЕРСОНАЛА АЭС-2006 ПРИ РАЗЛИЧНЫХ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

Аннотация. Приводятся результаты оценки радиационного риска для персонала атомной электрической станции проекта АЭС-2006 при проектной аварии (падение при перегрузке топлива отработавшей кассеты на кассеты, расположенные в активной зоне реактора или бассейне выдержки) и запроектной аварии (большая течь теплоносителя первого контура с отказом активной части системы аварийного охлаждения активной зоны и полным обесточиванием на 24 ч). Оценка основывается на современных моделях радиационных рисков Научного комитета по действию атомной радиации при Организации Объединенных Наций и Международной комиссии по радиологической защите. Расчет показателей риска при профессиональном облучении персонала АЭС в условиях аварийных ситуаций проведен на основании данных, полученных с использованием программного модуля, созданного в мультифизическом комплексе COMSOL 5.6, значений дозовых нагрузок от радиоактивного облака и внутреннего облучения за счет ингаляции для таких дозообразующих радионуклидов, как ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{131}I , ^{133}I , ^{90}Sr . Особенностью проведенных расчетов является максимальный учет деталей инфраструктуры промышленной площадки АЭС, что позволяет получить более точную оценку распространения радиоактивных веществ. Рассчитываемые показатели могут являться основанием для разработки рекомендаций по повышению безопасности АЭС с целью управления рисками.

Ключевые слова: аварийное облучение, дозовые нагрузки, запроектная авария, избыточный абсолютный риск, избыточный относительный риск, проектная авария, радиационный риск, эффективная доза, эквивалентная доза, щитовидная железа

Для цитирования: Орловская, В. И. Оценка радиационного риска для персонала АЭС-2006 при различных аварийных ситуациях / В. И. Орловская, А. Г. Трифонов // Вестн. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2021. – Т. 66, № 3. – С. 378–384. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2021-66-3-378-384>

Valentina I. Orlovskaya, Alexander G. Trifonov

*Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk,
Republic of Belarus*

RADIATION RISK ASSESSMENT FOR NUCLEAR POWER PLANT STAFF IN DIFFERENT EMERGENCY SITUATIONS

Abstract. The paper presents the results of radiation risk assessment for the staff of a nuclear power plant design during design basis accident (spent nuclear fuel assembly falling on fuel in reactor core or storage pool during refueling operations) and a beyond design basis accident (large leakage of the primary coolant with failure of the active part of the emergency cooling system and complete blackout for 24 h). The assessment is based on state-of-the-art radiation risk models from the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR) and the International Commission on Radiological Protection (ICRP). The calculation of risk indicators for occupational exposure of NPP staff in emergency situations was carried out on the basis of data obtained using a computational module created in the COMSOL 5.6 multiphysics software, doses from a radioactive cloud and internal exposure due to inhalation for such radionuclides as ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{131}I , ^{133}I , ^{90}Sr . A feature of this approach is the detailed consideration of the NPP industrial site infrastructure, which allows obtaining a more accurate assessment of the radionuclide air distribution and fallout.

Keywords: beyond design basis accident, dose, design basis accident, effective dose, emergency exposure, equivalent dose, excess absolute risk, excess relative risk, radiation risk, thyroid

For citation: Orlovskaya V. I., Trifonov A. G. Radiation risk assessment for nuclear power plant staff in different emergency situations. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2021, vol. 66, no. 3, pp. 378–384 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2021-66-3-378-384>

Введение. Атомные электростанции вследствие накопления в процессе эксплуатации значительных количеств радиоактивных продуктов и наличия принципиальной возможности выхода их при авариях за предусмотренные границы представляют собой источник потенциальной опасности и источник риска радиационного воздействия на персонал, население и окружающую среду. Определение уровней возможной радиационной опасности является одной из важнейших задач, которые необходимо решать на всех этапах жизненного цикла станции. Другими словами, следует определить количественные оценки вероятностей и последствий возможных аварий, которые могут использоваться в качестве приемлемых показателей достигнутого уровня безопасности.

Согласно Закону Республики Беларусь «О радиационной безопасности», при обосновании практической деятельности, связанной с источниками ионизирующего излучения, необходимо иметь сведения об оценке возможных рисков возникновения вредного воздействия ионизирующего излучения на здоровье человека и окружающую среду.

В соответствии с Международными основными нормами безопасности Международного агентства по атомной энергии риски для здоровья людей при облучении от источников ионизирующего излучения должны быть оценены в зависимости от ситуации облучения (планируемого, существующего и аварийного), а также работодатели обязаны предоставить работникам необходимую информацию о рисках для здоровья, связанных с их профессиональным облучением при нормальной эксплуатации источников ионизирующего излучения, планируемых при эксплуатации событий и в аварийных условиях.

Определение потенциального облучения в целях планирования или выбора мер защиты основано на разработке типичных сценариев, которые представляют всю цепь событий, приводящих к облучению; оценке вероятности реализации этих сценариев; оценке доз и наносимого облучением в таких дозах вреда; сравнении результатов с некоторым критерием приемлемости этого вреда и оптимизации защиты [1].

Цель данной работы – оценить возможные радиационных рисков в ситуациях аварийного облучения, используя модели радиационных рисков, рекомендованные Научным комитетом по действию атомной радиации при Организации Объединенных Наций и Международной комиссией по радиологической защите. Исходными данными для оценки являются прогнозные дозы внешнего и внутреннего облучения персонала проекта АЭС-2006 при проектных и запроектных авариях. Методика проведения расчета распределения относительной концентрации радиоактивных аэрозолей по зонам удаления от источника выброса с использованием программного модуля, созданного в мультифизическом комплексе COMSOL 5.6, и методика расчета дозовых нагрузок на персонал подробно описаны в [2–4].

Концепция оценки риска. В радиационной защите рассматриваются два вида вредных для здоровья человека эффектов. Высокие дозы излучения (свыше 100 мЗв) вызывают детерминированные эффекты (тканевые реакции), которые часто имеют остро возникающий характер. Низкие дозы (до 100 мЗв) могут вызывать стохастические эффекты, то есть рак и наследуемые заболевания. Согласно [1], при дозах ниже 100 мЗв увеличение дозы приводит к прямо пропорциональному увеличению вероятности развития рака или наследственных эффектов, связанных с облучением. Такую модель зависимости доза–эффект называют линейной беспороговой моделью, использование которой совместно с экспертной оценкой коэффициента эффективности дозы и мощности дозы (DDREF) обеспечивает устойчивую основу для практических целей радиационной защиты, то есть для управления рисками облучения в малых дозах. Важно отметить, что понятия эквивалентной и эффективной дозы не следует использовать для количественной оценки повышенных доз облучения (оценка тканевых реакций). В таких ситуациях необходима оценка поглощенной дозы с учетом соответствующего значения относительной биологической эффективности [1].

Определить вероятностный ущерб здоровью от полученной дозы можно, используя концепцию радиационного риска, согласно которой индивидуальный риск от облучения рассматривается

как вклад полученной дозы в вероятность реализации всех типов рака на протяжении всей жизни человека [1].

В настоящее время для прогноза радиационных рисков заболеваемости злокачественными новообразованиями используются следующие типы моделей:

модель интенсивности радиационных рисков Международной комиссии по радиологической защите (модель МКРЗ);

модель интенсивности радиационных рисков Научного комитета по действию атомной радиации при Организации Объединенных Наций (модель НКДАР ООН);

модель интенсивности радиационных рисков Всемирной организации здравоохранения (модель ВОЗ).

В данной работе для оценки возможных радиационных рисков при однократном облучении в случае аварийной ситуации на АЭС использовались модели МКРЗ избыточного абсолютного и относительного рисков, а для расчета радиационного риска злокачественных новообразований щитовидной железы при однократном облучении за счет радиоизотопов йода – модель НКДАР ООН.

При облучении сравнительные описания радиационного риска согласно [1] могут быть выполнены с помощью мультипликативной модели избыточного относительного (ERR) или аддитивной модели избыточного абсолютного (EAR) риска развития солидных злокачественных новообразований, причем эти модели позволяют вводить изменения избыточного риска в зависимости от таких факторов, как пол, возраст дожития и возраст на момент облучения. Различие этих двух моделей заключается в том, что для вычисления интенсивности избыточного радиационного риска (аддитивного к фоновой заболеваемости) модель ERR предполагает предварительное домножение на значение фоновой заболеваемости, а модель EAR используется непосредственно как аддитивная добавка к фоновой заболеваемости.

Модели интенсивностей избыточного абсолютного риска (EAR) и избыточного относительного риска (ERR) представлены следующими формулами [5]:

$$EAR_{\text{однокр.}}^{\text{МКРЗ}}(s, c, g, a, d) = d \cdot \beta_{\text{EAR}}(s, c) \cdot \left(\frac{a}{70}\right)^{\omega_{\text{EAR}}(c)} \cdot \left(1 + \frac{\gamma_{\text{EAR}}(c)}{100}\right)^{0,1(g-30)}, \quad (1)$$

$$ERR_{\text{однокр.}}^{\text{МКРЗ}}(s, c, g, a, d) = d \cdot \beta_{\text{ERR}}(s, c) \cdot \left(\frac{a}{70}\right)^{\omega_{\text{ERR}}(c)} \cdot \left(1 + \frac{\gamma_{\text{ERR}}(c)}{100}\right)^{0,1(g-30)}, \quad (2)$$

где s – пол; c – локализация злокачественного новообразования; g – возраст при облучении; a – возраст, на который рассчитывается риск (достигнутый возраст); d – доза облучения, Зв; β_{EAR} , ω_{EAR} , γ_{EAR} – параметры аддитивной модели; β_{ERR} , ω_{ERR} , γ_{ERR} – параметры мультипликативной модели.

Т а б л и ц а 1. Параметры моделей МКРЗ интенсивности радиационных рисков заболеваемости для всех солидных злокачественных новообразований [1, 5]

T a b l e 1. Parameters of ICRP models for solid cancers radiation risks [1, 5]

Пол	$\beta_{\text{ERR}}, \text{Зв}^{-1}$	γ_{ERR}	ω_{ERR}	$\beta_{\text{EAR}}, \times 10^{-4}, \text{Зв}^{-1}$	γ_{EAR}	ω_{EAR}
Мужской	0,35	-17	-1,65	43,20	-24	2,22
Женский	0,58			59,83		

Модели интенсивности радиационных рисков, для локализации злокачественных новообразований в щитовидной железе, разработанные НКДАР ООН, имеют следующий вид:

$$EAR_{\text{однокр.}}^{\text{НКДАР}}(s, c, g, a, d) = 2,6287 \cdot 10^{-4} \cdot d \cdot g^{-0,3883} \cdot e^{1,3626 \cdot s}, \quad (3)$$

$$ERR_{\text{однокр.}}^{\text{НКДАР}}(s, c, g, a, d) = 3,80452 \cdot 10^4 \cdot d \cdot g^{-0,4405} \cdot a^{-2,197}, \quad (4)$$

где s – пол (0 для мужчин и 1 для женщин); d – эквивалентная доза облучения, Зв.

Численная оценка риска. Оценка радиационного риска при профессиональном облучении осуществлялась на основании полученных с использованием программного модуля, созданного в мультифизическом комплексе COMSOL 5.6, значений дозовых нагрузок на персонал АЭС от радиоактивного облака и внутреннего облучения за счет ингаляции для таких дозообразующих радионуклидов, как ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{131}I , ^{133}I , ^{90}Sr .

Подробная методика расчета распределения относительной концентрации радиоактивных аэрозолей по зонам удаления от источника выброса описана в [2, 4]. Особенностью примененного методического подхода является учет инфраструктуры промышленной площадки станции, которая может вносить значительные возмущения в воздушный перенос радиоактивных аэрозолей и, как следствие, неравномерности распределения концентраций, прежде всего на небольших расстояниях, что актуально для промплощадки АЭС. Возможной областью применения данного метода расчета является прогнозирование радиационных последствий аварий на радиационных объектах и объектах использования атомной энергии в условиях значительной неоднородности подстилающей поверхности.

Подробная методика проведения расчетов дозовых нагрузок на персонал на ранней стадии проектной и запроектной аварий представлена в [2] и [3] соответственно. Оцененное радиационное воздействие на персонал в случае аварийных ситуаций в целом хорошо коррелирует с проектными данными, представленными в окончательном отчете по обоснованию безопасности блока №1 Белорусской АЭС (предварительная редакция).

В качестве примера расчета дозовых нагрузок и радиационного риска авторами настоящей статьи приведен расчет прогнозной оценки аварийных доз персонала, связанных с выбросом радионуклидов в окружающую среду при проектной аварии (падение при перегрузке топлива отработавшей кассеты на кассеты, расположенные в активной зоне реактора или бассейне выдержки) и при запроектной аварии (большая течь теплоносителя первого контура с отказом активной части системы аварийного охлаждения активной зоны и полным обесточиванием на 24 ч). Распространение радионуклидов на промплощадке оценивалось для летних условий, скорости ветра – 10 м/с, скорости осаждения примесных аэрозолей – 0,05 м/с.

Результаты расчета прогнозной оценки аварийных доз персонала, необходимые для оценки радиационного риска при профессиональном облучении, в результате проектной и запроектной аварий, представлены в табл. 2 и 3 соответственно.

Таблица 2. Прогнозная оценка аварийных доз персонала на промплощадке при скорости ветра 10 м/с и скорости осаждения 0,05 м/с (проектная авария)

Table 2. The predictive assessment of staff emergency doses at site for design accident. Wind speed 10 m/s, deposition rate 0.05 m/s (design basis accident)

Доза облучения	Величина дозы облучения, мЗв				
	Зона 1 (~ 190–270 м)	Зона 2 (~ 270–370 м)	Зона 3 (~ 370–490 м)	Зона 4 (~ 490–660 м)	Зона 5 (~ 660–900 м)
Общая эффективная доза, мЗв	8,79	7,33	5,87	4,40	2,93
Суммарная эквивалентная доза на щитовидную железу, мЗв	101,56	84,63	67,70	50,78	33,85
Ожидаемая эффективная доза на щитовидную железу, мЗв	4,06	3,39	2,71	2,03	1,35

Таблица 3. Прогнозная оценка аварийных доз персонала на промплощадке при скорости ветра 10 м/с и скорости осаждения 0,05 м/с (запроектная авария)

Table 3. Emergency dose assessment for staff on NPP site. Wind speed 10 m/s, deposition rate – 0.05 m/s (beyond design basis accident)

Доза облучения	Величина дозы облучения, мЗв				
	Зона 1 (~ 40 м)	Зона 2 (~ 40–60 м)	Зона 3 (~ 60–90 м)	Зона 4 (~ 90–105 м)	Зона 5 (~ 105–165 м)
Общая эффективная доза, мЗв	61,98	51,65	41,31	30,98	20,67
Эквивалентная доза в щитовидной железе, мЗв	680,87	567,39	453,91	340,44	226,96
Эффективная доза на щитовидную железу, мЗв	27,23	22,70	18,16	13,62	9,08

Результаты расчета интенсивностей радиационного риска для всех солидных злокачественных новообразований и злокачественных новообразований щитовидной железы от полученной дозы в результате проектной аварии представлены в табл. 4, при остром кратковременном облучении в результате запроектной аварии – в табл. 5. Расчет радиационных рисков выполнялся для ситуации однократного облучения мужчин в возрасте 30 лет, латентный период для солидных раков и рака щитовидной железы был принят 10 лет ($a = 40$ лет).

Т а б л и ц а 4. Прогнозные значения радиационного риска при проектной аварии

T a b l e 4. Anticipated radiation risk values for design basis accident

Показатели риска	Значение радиационного риска при проектной аварии				
	Зона 1 (~ 190–270 м)	Зона 2 (~ 270–370 м)	Зона 3 (~ 370–490 м)	Зона 4 (~ 490–660 м)	Зона 5 (~ 660–900 м)
Избыточный абсолютный риск (EAR) (для всех солидных злокачественных новообразований в совокупности), количество дополнительных смертей на 100 000 чел.	$3,9 \cdot 10^{-2}$	$3,3 \cdot 10^{-2}$	$2,6 \cdot 10^{-2}$	$2,0 \cdot 10^{-2}$	$1,3 \cdot 10^{-2}$
Избыточный относительный риск (ERR) (для всех солидных злокачественных новообразований в совокупности)	$0,9 \cdot 10^{-2}$	$0,8 \cdot 10^{-2}$	$0,6 \cdot 10^{-2}$	$0,5 \cdot 10^{-2}$	$0,3 \cdot 10^{-2}$
Избыточный абсолютный риск (EAR) (для злокачественных новообразований в щитовидной железе), количество дополнительных смертей на 100 000 чел.	$7,1 \cdot 10^{-6}$	$5,9 \cdot 10^{-6}$	$4,8 \cdot 10^{-6}$	$3,6 \cdot 10^{-6}$	$2,4 \cdot 10^{-6}$
Избыточный относительный риск (ERR) (для злокачественных новообразований в щитовидной железе)	$26,0 \cdot 10^{-2}$	$21,7 \cdot 10^{-2}$	$17,4 \cdot 10^{-2}$	$13,0 \cdot 10^{-2}$	$8,7 \cdot 10^{-2}$

Т а б л и ц а 5. Прогнозные значения радиационного риска при запроектной аварии

T a b l e 5. Anticipated radiation risk values for beyond design basis accident

Показатели риска	Значение радиационного риска при запроектной аварии				
	Зона 1 (~ 40 м)	Зона 2 (~ 40–60 м)	Зона 3 (~ 60–90 м)	Зона 4 (~ 90–105 м)	Зона 5 (~ 105–165 м)
Избыточный абсолютный риск (EAR) (для всех солидных злокачественных новообразований в совокупности), количество дополнительных смертей на 100 000 чел.	$31,0 \cdot 10^{-2}$	$25,8 \cdot 10^{-2}$	$20,7 \cdot 10^{-2}$	$15,5 \cdot 10^{-2}$	$10,3 \cdot 10^{-2}$
Избыточный относительный риск (ERR) (для всех солидных злокачественных новообразований в совокупности)	$7,3 \cdot 10^{-2}$	$6,1 \cdot 10^{-2}$	$4,9 \cdot 10^{-2}$	$3,6 \cdot 10^{-2}$	$2,4 \cdot 10^{-2}$
Избыточный абсолютный риск (EAR) (для злокачественных новообразований в щитовидной железе), количество дополнительных смертей на 100 000 чел.	$4,8 \cdot 10^{-5}$	$4,0 \cdot 10^{-5}$	$3,2 \cdot 10^{-5}$	$2,4 \cdot 10^{-5}$	$1,6 \cdot 10^{-5}$
Избыточный относительный риск (ERR) (для злокачественных новообразований в щитовидной железе)	$17,5 \cdot 10^{-1}$	$14,6 \cdot 10^{-1}$	$11,7 \cdot 10^{-1}$	$8,8 \cdot 10^{-1}$	$5,8 \cdot 10^{-1}$

Таким образом, для ситуации однократного облучения мужчин в возрасте 30 лет при запроектной аварии (общая эффективная доза для наиболее загрязненной зоны 1 равна 61,98 мЗв) избыточный абсолютный риск для всех злокачественных образований равен 0,31, то есть 3,1 дополнительных смертей на 10^6 человек; при проектной аварии (общая эффективная доза для наиболее загрязненной зоны 1 равна 8,79 мЗв) избыточный абсолютный риск для всех злокачественных образований составляет 0,039, то есть 0,39 дополнительных смертей на 10^6 человек.

Заключение. Ситуация аварийного облучения является непредвиденной и требует проведения неотложных защитных мероприятий, а также определенных мер защиты персонала, населения и окружающей среды. Следовательно, необходимо иметь план быстрого и эффективного реагирования на аварийные ситуации, который включает в себя оценку радиологической ситуации и заблаговременную выработку критериев, определяющих, когда должны предприниматься различные защитные меры.

В работе показана применимость разработанного программного модуля, созданного в мультифизическом комплексе COMSOL 5.6, для комплексной оценки радиационного воздействия на персонал АЭС при различных аварийных ситуациях. На основании полученных значений относительной концентрации радиоактивных аэрозолей по зонам удаления от источника выброса проведены дальнейшие расчеты средних объемных активностей радионуклидов в приземном слое воздуха, суммарной ингаляционной дозы, эффективной дозы внешнего облучения, избыточного и абсолютного рисков для злокачественных новообразований щитовидной железы при различных условиях, общей эффективной дозы облучения персонала, а также показателей радиационного риска при профессиональном облучении.

Данная информация может быть использована, в том числе, для заблаговременной выработки критериев принятия различных защитных мер в аварийных ситуациях на АЭС с выбросом радионуклидов. Тем самым обеспечивается возможность управления радиационными рисками персонала атомной станции при ликвидации последствий аварии, что включает предотвращение серьезных детерминированных эффектов и разумное снижение риска стохастических эффектов.

Главной особенностью примененного методического подхода является анализ процессов переноса и осаждения аэрозольных частиц в турбулентном потоке с учетом инфраструктуры промышленной площадки станции, которая может вносить значительные возмущения в воздушный перенос радиоактивных аэрозолей и, как следствие, неравномерности распределения концентраций, особенно на небольших расстояниях, что актуально для промплощадки АЭС.

Алгоритм оценки радиологических последствий при различных аварийных ситуациях используется в деятельности Экспертного научно-технического центра НАН Беларуси.

Список использованных источников

1. Публикация 103 Международной комиссии по радиационной защите (МКРЗ) / под ред. М. Ф. Киселёва, Н. К. Шандалы. – М.: ООО ПКФ «Алана», 2009. – 312 с.
2. Орловская, В. И. Прогнозная оценка дозовых нагрузок на персонал АЭС-2006 при проектных авариях с учетом типовой инфраструктуры промплощадки / В. И. Орловская, А. Г. Трифонов // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2018. – Т. 63, № 1. – С. 111–118. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-1-111-118>
3. Орловская, В. И. Прогнозная оценка дозовых нагрузок на персонал АЭС-2006 при запроектных авариях с учетом типовой инфраструктуры промплощадки / В. И. Орловская, А. Г. Трифонов // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2019. – Т. 64, № 4. – С. 485–490. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-4-485-490>
4. Андрижиевский, А. А. Анализ процессов переноса и осаждения аэрозольных частиц на характерных поверхностях инфраструктуры АЭС / А. А. Андрижиевский, А. Г. Трифонов, Л. С. Кулик // Труды БГТУ. Химия и технология неорганических веществ. – 2014. – № 3 (167). – С. 89–93.
5. Исследование современных моделей радиационных рисков НКДАР ООН, МКРЗ и ВОЗ при их применении для оценки радиационных рисков в ситуациях аварийного облучения / С. Ю. Чекин [и др.] // Радиация и риск. – 2020. – Т. 29, № 2. – С. 5–20.

References

1. Kiselyov M. F., Shandala N. K. (eds.). *Publication 103 International Commissions on Radiation Protection (ICRP)*. Moscow, Prod. LLC PKF Alana, 2009. 312 p. (in Russian).
2. Orlovskaya V. I., Trifonov A. G. Dose assessment for NPP-2006 staff for design basis accident taking into account typical site's infrastructure. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2018, vol. 63, no. 1, pp. 111–118 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-1-111-118>
3. Orlovskaya V. I., Trifonov A. G. Dose assessment for NPP-2006 staff for beyond design basis accident taking into account typical site's infrastructure. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2019, vol. 64, no. 4, pp. 485–490 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-4-485-490>
4. Andrizhievskii A. A., Trifonov A. G., Kulik L. S. Analysis of transfer and deposition processes of aerosol particles on the characteristic surfaces of NPP infrastructure. *Trudy BGTU. Khimiya i tekhnologiya neorganicheskikh veschestv [Proceedings of BSTU. Chemistry and Technology of Inorganic Substances]*, 2014, no. 3 (167), pp. 89–93 (in Russian).
5. Chekin S. Yu., Lovachev S. S., Kashcheeva P. V., Kashcheev V. V., Maksoutov M. A., Vlasov O. K., Shchukina N. V. Research of modern models of radiation risks from UNSCEAR, ICRP and WHO at their application for assessment of radiation risks in emergency exposure situations *Radiatsiya i risk = Radiation & Risk*, 2020, vol. 29, no. 2, pp. 5–20 (in Russian).

Информация об авторах

Орловская Валентина Игоревна – научный сотрудник, Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси (а/я 119, 220109, Минск, Республика Беларусь). E-mail: valentina.valentina.orlovskaya@mail.ru

Трифонов Александр Георгиевич – доктор технических наук, доцент, заместитель генерального директора по науке, Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси (а/я 119, 220109, Минск, Республика Беларусь). E-mail: tral@sosny.bas-net.by

Information about the authors

Valentina I. Orlovskaya – Researcher, Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus (220109, Minsk, P. O. Box 119). E-mail: valentina.valentina.orlovskaya@mail.ru

Alexander G. Trifonov – D. Sc. (Engineering), Associate Professor, Deputy Director General on Science Work, Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus (220109, Minsk, P. O. Box 119). E-mail: tral@sosny.bas-net.by