

УДК 621.039.553.5

УСЛОВИЯ И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ РАДИОАКТИВНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ И ДОЗОВЫХ НАГРУЗОК НА НАСЕЛЕНИЕ ВСЛЕДСТВИЕ ЯДЕРНОЙ АВАРИИ НА АТОМНОЙ ПОДВОДНОЙ ЛОДКЕ В БУХТЕ ЧАЖМА

*Саркисов А.А., Высоцкий В.Л., Припачкин Д.А., Дзама Д.В., Игнатов Р.Ю. (ИБРАЭ РАН, г. Москва),
Рубинштейн К.Г. (Гидрометцентр России, г. Москва)*

e-mail: vvl@ibrae.ac.ru

На всех этапах развития ядерных технологий наиболее чувствительной для населения и персонала является радиационная безопасность. В настоящее время накоплен опыт эксплуатации большого числа объектов использования атомной энергии, неотъемлемой частью которого являются прогнозирование, оценка радиационной обстановки и ликвидация последствий аварий. Аварии на таких объектах являются редкими событиями и отличаются исходными предпосылками, протеканием и последствиями. Большинство из них изучено и описано — на ПО «Маяк» в 1957 г., Чернобыльской АЭС в 1986 г., АЭС «Фукусима-1» (Япония) в 2011 г. и др. Однако событие, произошедшее на атомной подводной лодке К-431 10 августа 1985 г. на судоремонтном заводе в б. Чажма (Приморский край), осталось недооцененным.

Исследования ИБРАЭ РАН направлены на восстановление полноты радиационных последствий аварии, которая является самой масштабной и опасной в истории атомного флота. Определен радиоактивный выброс дозообразующих радионуклидов, восстановлены траектории радиоактивного облака в отдаленные районы, а также радиоактивное загрязнение окружающей среды, дозовые нагрузки на персонал и население, включая классификацию аварии по Международной шкале радиационной опасности INES.

Методология восстановления прошлых событий основана на сборе, анализе разрозненных данных и создании на их основе с использованием современных методов прогноза целостного образа аварии, приемлемого для нормативной оценки ее последствий.

Статья является постановочной, ориентирована на обоснование исходных данных и граничных условий в целях повышения точности прогноза радиационных последствий ядерной

аварии с учетом переоценки накопленной информации и использования восстановленных среднесрочных погодных условий.

Мощность выброса техногенных радионуклидов. Активность выброса в приземный слой атмосферы была обусловлена тремя источниками: свежим ядерным материалом $^{235,238}\text{U}$, продуктами деления топлива ^{235}U и активации, накопившимися во внутренних конструкциях реактора за несколько лет [1].

Суммарная α -активность $^{235,238}\text{U}$ в реакторе перед аварией составляла 6 ГБк. После возникновения неконтролируемой самоподдерживающейся цепной реакции и взрыва около 80—90% разрушенного ядерного материала осело в эпицентре радиусом 100—120 м от источника. Из них до 60—70% оказалось в корпусе реактора, реакторном отсеке, на палубах стоявших рядом кораблей и судов обеспечения, а также пирсе. За пределы судоремонтного завода вышло не более 3—3,5%. Для населения и окружающей среды этот источник оказался не опасным, поверхностное загрязнение прилегающей части площадки в первые сутки ликвидировали удалением верхнего слоя покрытий.

Суммарная активность продуктов мгновенного деления ^{235}U по оценкам РНЦ «Курчатовский институт», в основном, определялась короткоживущими радионуклидами. В результате радиоактивного распада их активность в выбросе через 1 мин уменьшилась примерно в 10 раз, 1 ч — 10^3 раз, 24 ч — 10^5 раз. Эту составляющую источника как неопасную для населения далее не учитывали [2].

Основное внимание уделили оценке выброса радиоактивного иода, который составил, ГБк: ^{131}I 40 ± 15 , ^{132}I 60 ± 20 , ^{133}I 600 ± 200 , ^{134}I $17\,000 \pm 5000$, ^{135}I 3600 ± 1700 . Его активность была приведена к максимальному числу делений ядерного топлива в реакторе $5 \cdot 10^{19}$. Выброс

^{137}Cs и ^{90}Sr был принят на уровне $0,3 \pm 0,1$ и $0,06 \pm 0,02$ ГБк вследствие удовлетворительного согласования с оценками, полученными разными отечественными организациями и специалистами. В зарубежных исследованиях [3—5] по причине отдаленности расположения прилегающих стран (150—700 км) исходили из опасности, которую мог представлять ^{131}I (29 ГБк), ^{133}I (620 ГБк) и ^{135}I (1800 ГБк). Влияние ^{60}Co , ^{90}Sr , ^{132}I , ^{134}I и ^{137}Cs не учитывали. Кроме этого, рассматривали зимний период, когда радиоактивное облако могло подойти к берегам Японии и КНДР.

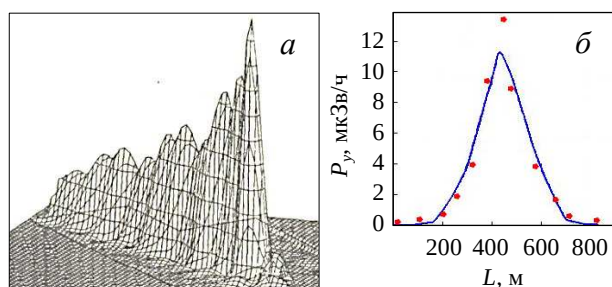
В действительности опасность для персонала, населения и окружающей среды представлял ^{60}Co . На время аварии в реакторе за три кампании его активность составила 71 ± 20 ТБк. При взрыве активная зона была оплавлена и разрушена. Крупные фрагменты остались в реакторном отсеке, малоразмерные разлетелись до 150 м от источника, загрязнив прилегающую часть берега и завода, попавшие в морскую воду осели на дно б. Чажма [1]. Летучая часть выброса в дымовом облаке от взрыва, включающая грубо- и мелкодисперсную, а также аэрозольную составляющие, продолжила перемещаться по ветру в направлении завода, загрязняя территорию и сооружения. Над источником облако поднялось на 20—25 м. В условиях низкой облачности и выпадения дождя его высота перемещения по заводу оставалась почти неизменной. По показаниям очевидцев, за пределами завода в 700—800 м от места аварии облако, подойдя к покрытой лесом сопке высотой 70 м, ударилось о ее подножие и стало подниматься вверх. Растительность интенсивно сорбировала радиоактивную примесь и, в первую очередь, ее грубодисперсную составляющую, мелкодисперсная и аэрозоли в уменьшенном количестве продолжили перемещаться над п-вом Дунай. Сопка превратилась в радиационно опасный объект, который в течение года реабилитировали путем удаления.

Многие исследователи не дифференцировали эти явления и не оценивали выброс мелкодисперсной и аэрозольной составляющей ^{60}Co , которые считаются определяющими при организации безопасной жизнедеятельности людей и

охраны окружающей среды. В итоге результаты разнились от 7 до 27 ТБк и предельно могли достигать 30—70 ТБк [1, 6—8]. Для устранения этого пробела область загрязнения разделили на три участка: зона строгого режима до 120 м, территория завода — до 600 м и прилегающая к нему сопка (0,8—1,1 км), а также невозмущенный радиоактивный след на п-ве Дунай (1,1—5,5 км, дезактивация не проводилась). На втором и третьем участках, начиная с первых суток после аварии, в контрольных точках измеряли мощность экспозиционной дозы γ -излучения и плотность β -загрязнения. Последовательно приближая полученные данные к результатам прогноза, уточнили исходный диапазон выброса летучей фракции ^{60}Co , который составил 10—15 ТБк, после истощения облака сопкой его мелкодисперсной и аэрозольной составляющих — 4—10 ТБк.

Ретроспективный радиационный прогноз. Он осуществлялся с использованием программных средств ПАРРАД и РОУЗ [9, 10]. Эффективность ПАРРАД оценивали по данным эксперимента ACURATE (США), аварии на АЭС «Фукусима-1» и других инцидентов с использованием метеорологических полей высокого разрешения по модели WRF-ARW [11, 12]. РОУЗ сертифицировано для оценки радиационной обстановки на промплощадках АЭС при атмосферных выбросах радиоактивных веществ с учетом 3D-геометрии объекта [10].

Адаптация ПАРРАД для оценки последствий аварии в б. Чажма проведена путем проверки сходимости натурных данных загрязнения п-ва Дунай с прогнозным. Расхождение мощности экспозиционной дозы укладывалось в диапазон $\pm 15\%$, ширины следа — $\pm 27\%$ при мощности источника образования берегового радиоактивного следа ^{60}Co 7 ± 3 ТБк (рис. 1, табл. 1). Аналогичная процедура была применена к загрязнению судоремонтного завода. Наиболее близкими к плотности нормального распределения оказались экспериментальные данные, относящиеся к мощности выброса 13 ± 4 ТБк. Это позволило прийти к заключению, что выпадение радиоактивных веществ на территории завода и столкновение облака с сопкой снизили исходный выброс ^{60}Co и остальных

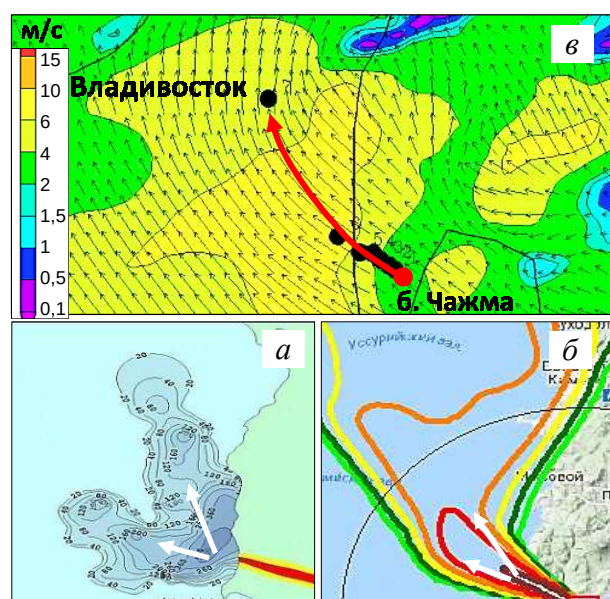


Р и с. 1. Береговой радиоактивный след в 1,1—5,5 км от места аварии (а), расчетная на 1,2 км плотность распределения мощности экспозиционной дозы γ -излучения ^{60}Co с нанесенными результатами измерений 1991 г., приведенными к 10 августа 1985 г. (б)

радионуклидов примерно на 85%. Затем ПАРРАД оптимизировали в интересах отображения конфигурации загрязнения донных отложений Уссурийского залива вблизи береговой линии в двух направлениях [6] путем прогноза его поверхностного загрязнения (рис. 2).

Анализ ретроспективного прогноза метеобстановки показал, что это явление было вызвано различием скорости и направления ветра в слоях воздуха до 100 м и выше. Одновременно при обтекании мыса Голый высотой 18—21 м воздушным потоком с Японского моря в прибрежной зоне возник сдвиговый поток северного направления. С учетом результатов исследований [6] также установлено, что превышение скорости ветра в 1,5—2 раза на высоте более 100 м по отношению к нижележащему слою способствовало опережающему переносу до 20—30% радиоактивной примеси в верхних слоях западного направления, в то время как остальная перемещалась над заливом.

Радиационный контроль. Он сыграл определяющую роль в оценке направления переноса



Р и с. 2. Распределение удельной активности ^{60}Co в донных отложениях по результатам измерений 1990 г. (а), прогноз поверхностного загрязнения морской воды (б), усредненное поле ветра в Уссурийском заливе на высоте 10 м (в)

радиоактивной примеси после пересечения радиоактивным облаком п-ва Дунай. Его систематически проводили специалисты службы радиационной безопасности завода и Тихоокеанского флота, эпизодически — контролирующие органы и независимые организации. В течение 9 месяцев он осуществлялся в интересах реабилитационных работ, в последующие годы — для оценки загрязнения окружающей среды в целях уточнения дозовых нагрузок населения. Он частично охватывал п-в Дунай, Уссурийский залив и з. Стрелок, полностью — б. Чажма, территорию завода, пос. Дунай, Темп, Разбойник [2].

Сразу после аварии специалистами флота была проведена широкомасштабная автомобильная радиационная разведка в более чем

Т а б л и ц а 1. Сходимость экспериментальных данных с результатами моделирования берегового радиоактивного следа на п-ве Дунай

Параметр	Расстояние до источника, км				
	1,2	2	3	4	5
Максимальная экспозиционная доза, мкЗв/ч	13,6, 11,2*	4,2, 4,6	3,1, 3,2	2,3, 2,3	1,5, 1,3
Расхождение, %	–18	9	3	0	–13
Ширина следа, м**	700, 600	750, 550	800, 600	670, 800	620, 850
Расхождение, %	–14	–27	–25	16	27

*Первая цифра — эксперимент, вторая — прогноз.
 **Верхний предел фона 0,2 мкЗв/ч.

10 прилегающих населенных пунктах по федеральным и местным дорогам вокруг Уссурийского залива. В течение последующих дней специалисты химической и медицинской служб флота осуществили пешеходный и автомобильный мониторинг западного побережья залива в местах отдыха и проживания населения, отобрали пробы разных объектов внешней среды. Восточный берег обследовала служба радиационной безопасности Дальневосточного завода «Звезда». Радиоактивное загрязнение выше природного фона не обнаружили. Облако пошло на север над акваторией Уссурийского залива в направлении континентальной части Приморья. Это заключение подтвердили и независимые стационарные радиоэкологические пункты (лаборатории), расположенные в радиусе до 50 км от места аварии: дальневосточный филиал НПО «Тайфун» Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды в Приморском крае с постами наблюдений во Владивостоке, Уссурийске, Находке и пос. Рудная Пристань, ведомственные организации — в бухтах Чажма и Большой Камень и Тихоокеанский флот (рис. 3) [13].



Р и с. 3. Расположение стационарных пунктов наблюдений за радиоактивным загрязнением окружающей среды: ● — Приморское управление, Владивосток, Находка; ● — заводы в бухтах Чажма и Б. Камень; ● — Тихоокеанский флот, Владивосток, б. Павловского; ● — место ядерной аварии; → — направление переноса радиоактивного облака

Из табл. 2 следует, что 10 августа 1985 г. в результате аварии интенсивному загрязнению подверглись только приземный слой атмосферы, территория судоремонтного завода и часть акватории б. Чажма. Вывод о локальном загрязнении подтверждается тем, что через год эти же пункты одновременно зафиксировали последствия

Т а б л и ц а 2. Изменение объемной активности аэрозолей и плотности радиоактивных выпадений в августе 1985 г. в 50-км зоне от места аварии

Дата, август	Судоремонтный завод в б. Чажма		Владивосток		Б. Камень	Находка	Рудная Пристань*
	10^{-5} Бк/м ³	Бк/(м ² ·сут)	10^{-5} Бк/м ³	Бк/(м ² ·сут)	Бк/(м ² ·сут)	Бк/(м ² ·сут)	Бк/(м ² ·сут)
5	26,7	1,6	19,5	1,0	2,6	2,2	2,0
6	16,6	1,1	7	1,9	2,2	1,8	1,2
7	14,2	0,9	14,2	1,5	2,5	3,2	1,2
8	18,5	1,3	5,5	1,3	1,6	2,0	0,1
9	24,3	1,7	6,5	1,5	1,1	1,9	0,9
10**	410 000	9400	12,7	1,3	1,9	1,4	2,9
11	36 000	2700	16,3	1,3	1,9	1,5	1,7
12	3800	300	14,9	2,8	2,2	3	0,8
13	3600	200	7,1	1,9	1,1	0,1	1
14	3700	18	6,6	1,3	1,7	0,5	0,7
15	2600	90	7,1	1,6	2,1	0,8	2,2
16	3500	280	12	2,8	2,4	1,9	1,8
17	2500	20	31,1	2,9	3,3	1,1	2,4
18	1100	20	21	1,6	2,6	3,4	0,7
19	2300	7	9,8	3,2	3,9	1,3	0,8
20	700	5	13,1	5,5	4,5	1,1	2,9

*Поселок расположен в 280 км на востоке от места аварии и является фоновым районом.

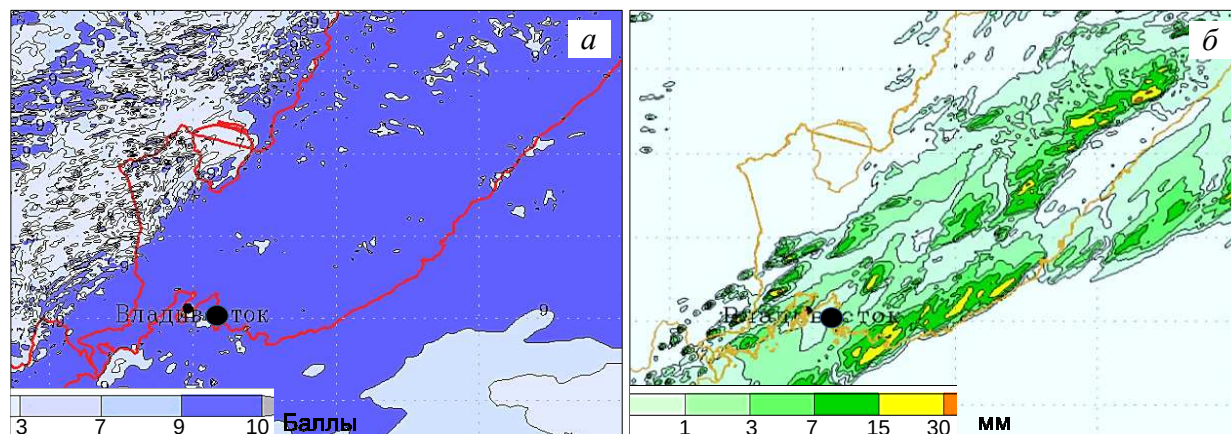
**День аварии в б. Чажма.

аварии на Чернобыльской АЭС. По данным Приморского управления [13] во Владивостоке в начале мая 1986 г. объемная β -активность аэрозолей воздуха по сравнению с апрелем повысилась в 14—16 раз, ведомственных пунктов — в 8—12 раз. Лаборатория Приморского управления на расстоянии 7200 км от источника обнаружила в воздухе ^{99}Mo , ^{131}I , ^{132}Te , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{140}Ba . Среднемесячная концентрация составила, 10^{-3} Бк/м³: ^{131}I 4,3, ^{134}Cs 0,7, ^{137}Cs 1,2, что по НРБ-99 не превышало 0,02% допустимой годовой нормы для населения. На акватории з. Петра Великого последствия аварии стали заметны в 1987 г. — в 1,5—2 раза возросло содержание ^{90}Sr в морской воде, куда он был привнесен речными стоками с юга Приморья. В оз. Ханка, расположенном в долине, его активность повысилась в 1,2 раза только в 1988 г.

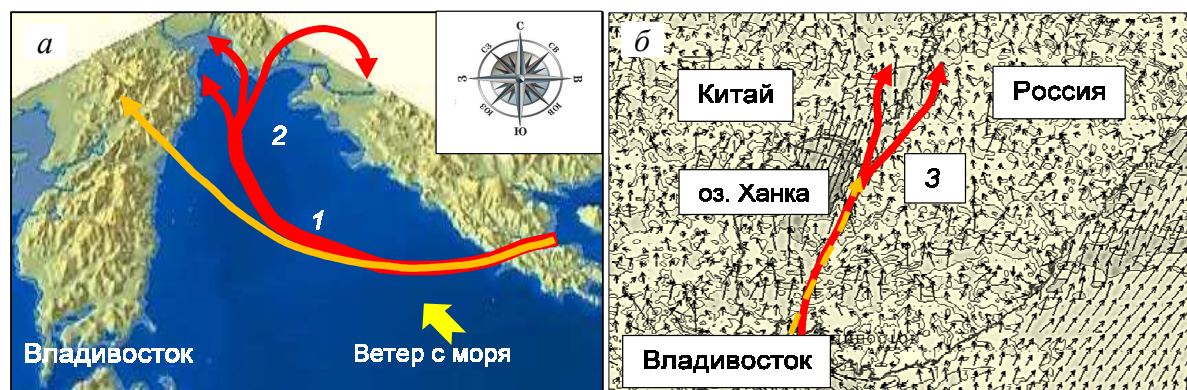
Причина необнаруженных последствий аварии в б. Чажма независимыми стационарными системами радиоактивного загрязнения окружающей среды одна — радиоактивное облако не подошло или кратковременно находилось в районе расположения этих пунктов и не загрязнило прибрежную зону Уссурийского залива выше фона. На рис. 3 видно, что после аварии неконтролируемым оставался только Уссурийский залив — ширина у входа 42 км, глубина 67 м, длина 51 км, площадь 1154 км². Из этого следует, что по сравнению с аварией на Чернобыльской АЭС, последствия которой были зафиксированы по всему Дальнему Востоку, ядерная авария на атомной подводной лодке в б. Чажма носила локальный, а не региональный характер.

Для восстановления полной картины перемещения и рассеяния радиоактивного облака над з. Петра Великого и территорией Приморья в отмеченных граничных условиях потребовалось восстановить погодные условия на день, предшествующий аварии, и последующие сутки в масштабах от 2000×2000 до 70×70 км, которые выполнили специалисты Гидрометцентра России. Это позволило проследить за перемещением воздушных масс над Японским морем, з. Петра Великого, Приморьем, прилегающей частью Хабаровского края, Амурской области и Китая, а также в Желтом море, на Корейском полуострове, Японских островах и о. Сахалин. Оценено влияние антициклонов в регионе и теплового воздушного фронта в Приморье, который прошел над местом аварии. В интересах объективности прогноза определены устойчивость и турбулентность приземного слоя атмосферы, температура почвы в береговой зоне и на территории края, воды в з. Петра Великого и северо-западной части Японского моря, облачность и интенсивность атмосферных выпадений (рис. 4).

В день аварии погода была пасмурная с низкой облачностью 9—10 баллов и атмосферными выпадениями разной интенсивности (морось, умеренный и сильный дождь), что подтверждено метеостанциями Владивостока, Уссурийска и Находки, а также очевидцами. К 12—16 ч вторых суток дождь в б. Чажма прекратился, на территории Приморья это произошло на 8—10 ч раньше. Для этих условий в приземном слое были восстановлены поля ветров и



Р и с. 4. Результаты прогноза распределения облачности (а) и атмосферных выпадений (б) над з. Петра Великого и Приморским краем в день аварии: ● — место ядерной аварии



Р и с. 5. Основные направления перемещения воздушных масс над з. Петра Великого на высоте ниже (—) и выше 100 м (—) (а) и Приморским краем (б) в первые сутки после аварии: 1, 2, 3 — зона неустойчивости

выполнен анализ перемещения воздушных масс над п-вом Дунай, з. Петра Великого, Приморьем и приграничной зоной между Китаем и Россией (рис. 5).

Ветер в приземном слое атмосферы до 100 м на акватории Уссурийского залива несколько раз менял силу и направление, переходя от свежего (6—10 м/с) к слабому (4—6 м/с) и тихому (≤ 1 м/с, см. рис. 2, в), выше 100 м он достигал 8—12 м/с (сильный). В слое ниже 100 м воздушные массы перемещались преимущественно по акватории Уссурийского залива. Препятствием для них являлся горный хребет п-ва Муравьев-Амурский с высотами 150—250 м, который преодолевали только потоки воздуха выше 100 м.

Соответственно в заливе возникли две разнородные области перемещения воздушных масс в центральной его части 1 и вершине 2, где в прибрежных низинах дополнительно возникали зоны застоя (см. рис. 2, в, 5, а). Однако после выхода на континент оба потока стали перемещаться на север. Между Уссурийским заливом и оз. Ханка воздушные массы передвигались относительно устойчиво со скоростью 3—5 м/с, но в районе оз. Ханка в приграничной области они вновь разделились — сформировалась неустойчивая зона 3 (см. рис. 5, б).

Заключение. Комплексный анализ экспериментальных данных, оценка источников радиоактивного загрязнения окружающей среды, выброса дозообразующих радионуклидов из аварийного реактора атомной подводной лодки

в атмосферу в сочетании с восстановлением погодных условий в предшествующий период, на время ядерной аварии и последующие сутки в б. Чажма и прилегающих районах, а также ретроспективный прогноз переноса и распространения радиоактивной примеси над акваторией з. Петра Великого, территориями Приморского края и прилегающей частью Китая позволили обосновать исходные данные и граничные условия, необходимые для оценки радиационных последствий аварии на население и окружающую среду на удалении до 300—400 км от источника опасности.

Исследования проведены при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 17-19-01674).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Саркисов А.А., Высоцкий В.Л. Ядерная авария на атомной подводной лодке в бухте Чажма. — Вестник РАН, 2018, т. 88, № 7, с. 599—618.
2. Сивинцев Ю.В., Вакуловский С.М., Высоцкий В.Л. и др. Техногенные радионуклиды в морях, омывающих Россию. Радиоэкологические последствия удаления радиоактивных отходов в арктические и дальневосточные моря («Белая книга-2000»). М.: ИздАТ, 2005. 624 с.
3. Takano M., Yamazawa H., Sivintsev Yu.V. et al. Reactivity accident of nuclear submarine near Vladivostok. — J. Nucl. Sci. Technol., 2001, v. 38, № 2, p. 143—157.
4. Compton K., Novikov V.N., Parker F. et al. The Radioactive Legacy of the Russian Pacific Fleet Operations and its Potential Impact on Neighboring Countries. Austria, Laxenburg, Intern. Institute for Applied Systems Analysis, Final Review Draft, 2002.
5. Cross-Border Environmental Problems Emanating from Defence-Related Installations and Activities. NATO/CCMS

- Pilot Study Phase 11 1995—1998. Final Rep., v. 4. Environmental Risk Assessment for Two Defence-Related Problems. Rep. № 227, 1998.
6. Арутюнян Р.В., Данилян В.А., Высоцкий В.Л. и др. Анализ и оценка радиоэкологических последствий ядерной аварии в бухте Чажма: Препринт № IBRAE-1998-09. 1998. 43 с.
 7. Богатов С.А., Киселев А.А. Моделирование распространения радионуклидов при аварии в бухте Чажма с учетом полидисперсности и топографии местности. — Атомная энергия, 2012, т. 112, вып. 4, с. 233—236.
 8. Богатов С.А., Данилян В.А., Киселев В.П. и др. Оценка выхода радионуклидов для ряда гипотетических аварий на объектах ВМФ: Препринт № IBRAE-2001-07, 2001. 33 с.
 9. Арутюнян Р.В., Припачкин Д.А., Сорокикова О.С. и др. Система ПАРРАД и ее испытания на реальных выбросах радиоактивных веществ в атмосферу. — Атомная энергия, 2016, т. 121, вып. 3, с. 69—73.
 10. Дзама Д.В., Сорокикова О.С. Верификация математической модели расчета дозы облучения от радиоактивного облака произвольной формы с учетом экранирования зданиями. — Там же, 2016, т. 12, вып. 6, с. 351—354.
 11. Арутюнян Р.В., Большов Л.А., Припачкин Д.А. и др. Оценка выброса радионуклидов при аварии на АЭС «Фукусима-1» (Япония). — Там же, 2012, т. 112, вып. 3, с. 159—163.
 12. Skamarock W., Klemp J., Dudhia J. et al. A Description of the Advanced Research WRF. Vers. 3. USA, NCAR/TN—475+STR, 2008, p. 113.
 13. Чайковская Э.Л., Высоцкий В.Л., Гичев Д.В. Закономерности формирования радиационной обстановки на территории Приморского края. — Атомная энергия, 2001, т. 91, вып. 3, с. 223—237.

Поступила в Редакцию 7.06.19

Р е ф е р а т ы

УДК 621.039.5.01.08

И р к и м б е к о в Р.А., Ж а г и п а р о в а Л.К., К о т о в В.М., В у р и м А.Д., Г н ы р я В.С. **Нейтронно-физическая модель реактора ИВГ.1М: разработка и верификация по критическому состоянию.** — Атомная энергия, 2019, т. 127, вып. 2, с. 63—69.

Представлены результаты верификации модели реактора ИВГ.1М на основе экспериментов, проведенных в 1990 и 2017 гг. Для верификации выбраны пуски реактора, связанные с его выводом в критическое состояние и изменением мощности, плотности потока нейтронов, эффективности органов СУЗ. Рассчитан изотопный состав топлива и бериллиевых блоков, сформировавшийся к выгрузке из реактора первых водоохлаждаемых технологических каналов с высокообогащенным топливом (2017 г.). По результатам верификации установлено хорошее соответствие измеренных параметров с расчетными. Модель реактора ИВГ.1М в настоящее время используется для оценки характеристик реактора после конверсии, а также параметров планируемых экспериментов. Рис. 6, табл. 4, список лит. 3 назв.

UDC 621.039.5.01.08

I r k i m b e k o v R.A., Z h a g i p a r o v a L.K., K o t o v V.M., V u r i m A.D., G n y r y a V.S. (Institute of

Atomic Energy Branch RSE NNC RK). **Neutronic Model of the ИВГ.1М Reactor: Designing and Verification According to Critical State.** — Atomic Energy, 2019, v. 127, № 2, p. 63—69.

Results of verification of the ИВГ.1М reactor model based on experiments that have been carried out in 1990 and 2017 are presented. For verification of the neutronic model the reactor critical states with measured values of the power of splits, neutron flux density and control power system components efficiency were selected. Isotopic composition of the fuel and the beryllium blocks was calculated for a period of unloading from the reactor of the first water-cooled technological channels with highly enriched uranium fuel (2017). According to verification results, good agreement of measured parameters with calculated one was established. Currently, model of the ИВГ.1М reactor is used to estimate characteristics of the reactor after conversion and to evaluate parameters of future experiments. Fig. 6, tab. 4, ref. 3.

УДК 621.039.578

К а р н а у х о в В.Е., У с т и н о в В.С., У р т е н о в Д.С., В о р о б ь е в Ю.Б., З у д и н Ю.Б., Л у к а ш е н к о М.Л. **Особенности массопереноса неконденсирующихся газов теплоносителем первого контура реакторных установок атомных ледоколов.** — Атомная энергия, 2019, т. 127, вып. 2, с. 69—73.