

- зоны реактора с жидкометаллическим теплоносителем, реализованные в коде ЕВКЛИД/V2. — Теплоэнергетика, 2019, т. 55, № 4, с. 302—308.
2. **Усов Э.В., Бутов А.А., Чухно В.И. и др.** Моделирование плавления твэла быстрого реактора и затвердевания образующегося расплава с помощью модуля SAFR/V1 интегрального кода ЕВКЛИД/V2. — Атомная энергия, 2018, т. 124, вып. 3, с. 123—126. // **Usov E.V., Butov A.A., Chukhno V.I. e. a.** Fuel pin melting in a fast reactor and melt solidification: simulation using the SAFR/V1 module of the EVKLID/V2 integral code. — Atomic Energy, 2018, v. 124, № 3, p. 147—153.
 3. **Бутов А.А., Каменская Д.Д., Климонов И.А. и др.** Моделирование поведения расплава в устройстве для сбора топлива реакторной установки с натриевым теплоносителем с помощью модуля HEFEST-FR интегрального кода ЕВКЛИД/V2. — Теплоэнергетика, 2023, т. 70, № 11, с. 5—13.
 4. **Сайкина Т.А., Усов Э.В., Чухно В.И. и др.** Валидация тяжелоаварийного модуля интегрального кода ЕВКЛИД/V2 на базе экспериментов по разрушению имитаторов одиночных твэлов и ТВС. — Там же, № 4, с. 45—54.
 5. **Бутов А.А., Жданов В.С., Климонов И.А. и др.** Верификация кода ЕВКЛИД/V2 на основе экспериментов с разрушением элементов активной зоны реактора с жидкометаллическим теплоносителем. — Там же, 2019, т. 55, № 5, с. 16—24.
 6. **Усов Э.В., Бутов А.А., Чухно В.И. и др.** Верификация на основе экспериментальных исследований модуля термического разрушения твэла быстрого реактора SAFR/V1 интегрального кода ЕВКЛИД/V2. — Атомная энергия, 2018, т. 124, вып. 5, с. 243—245. // **Usov E.V., Butov A.A., Chukhno V.I. e. a.** Experiment-based verification of the SAFR/V1 module of the EVKLID/V2 integral code for thermal breakdown of fuel pins in a fast reactor. — Atomic Energy, 2018, v. 124, № 5, p. 287—291.
 7. **Климонов И.А., Усов Э.В., Дугаров Г.А. и др.** Верификация теплогидравлического кода HYDRA-IBRAE/LM/V1 на основе экспериментов на БН-600. — Там же, 2017, т. 122, вып. 5, с. 258—262. // **Klimonov I.A., Usov E.V., Dugarov G.A. e. a.** HYDRA-IBRAE/LM/V1 Thermohydraulic code verification based on BN-600 experiments. — Ibid., 2018, v. 124, № 5, p. 311—318.
 8. **Browning W.E., Miller C.E., Shields R.P., Roberts B.F.** Release of fission products during in-pile melting of UO₂. — Nucl. Sci. Eng., 1964, v. 18, p. 151—162.
 9. **Parker G.W., Creek G.E., Barton C.J. e. a.** Out-of-pile studies of fission-product release from overheated reactor fuels at ORNL. ORNL-3981. Oak Ridge, USA: ORNL, 1967, 129 p.
 10. **Усов Э.В., Чухно В.И., Климонов И.А. и др.** Модель выхода продуктов деления из бассейна расплава во время тяжелой аварии в реакторе с жидкометаллическим охлаждением. — Теплоэнергетика, 2021, т. 68, № 2, с. 79—85.
 11. **Olson W.M., Mulford R.N.R.** The Decomposition pressure and melting point of uranium mononitride. — J. Phys. Chem., 1963, v. 67, is. 4, p. 952—954.
 12. **Усов Э.В., Чухно В.И., Кудашов И.Г., Сычева Т.В.** Модель для расчета скорости диссоциации нитридного топлива при высоких температурах. — Теплофизика высоких температур, 2020, т. 58, № 2, с. 238—243.
 13. **Lunev A.V., Mikhalechik V.V., Tennishev A.V., Baranov V.G.** Kinetic and microstructural studies of thermal decomposition in uranium mononitride compacts subjected to heating in high-purity helium. — J. Nucl. Mat., 2016, v. 475, p. 266—273.
 14. **Baranov V.G., Lunev A.V., Mikhalechik V.V. e. a.** High temperature behavior of simulated mixed nitrides. — IOP Conf. Series: Materials Science and Engng., 2016, v. 130, 5 p.
 15. **Baranov V.G., Tennishev A.V., Kuzmin R.S. e. a.** Thermal stability investigation technique for uranium nitride. — Ann. Nucl. Energy., 2014, v. 87, is. 2, p. 784—792.
 16. **Mikhalechik V.V., Tennishev A.V., Baranov V.G., Kuzmin R.S.** High temperature uranium nitride decomposition. — Adv. Mater. Res., 2014, v. 1040, p. 47—52.
 17. **Krivov M.P., Kireev G.A., Tennishev A.V. e. a.** Thermogravimetric study of mixed uranium-plutonium fuel for prospective generation IV reactors. — J. Nucl. Mat., 2022, v. 567, 9 p. — Website of Elsevier B.V. Access mode: by subscription. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022311522002847> (date of the application 07.11.2023).

Поступила в Редакцию 15.11.23

УДК 504.3.054:621.039.587

ВЛИЯНИЕ МЕТЕОПАРАМЕТРОВ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ВЫБРОСА ТРИТИЯ ИЗ БРЫЗГАЛЬНЫХ БАССЕЙНОВ

Екидин А.А., Антонов К.Л., Васянович М.Е., Десятов Д.Д. (ИПЭ УрО РАН, г. Екатеринбург)
e-mail: desyatovdenis1995@gmail.com

Основные дозообразующие радионуклиды, формирующие не менее 95% годовой эффективной

дозы населения, в газоаэрозольных выбросах реакторов разных атомных электростанций существ-

венно отличаются [1]. Глобальное поступление трития в атмосферу при эксплуатации АЭС не превышает 1% от поступления из естественных источников его образования [2]. Тем не менее высокая миграционная способность этого радионуклида обуславливает его широкое распространение во всех компонентах окружающей среды в результате техногенной деятельности [3].

Тритий в источниках выбросов АЭС признан фактором, определяющим радиационное воздействие на окружающую среду [4]. Проведенные радиационно-технические обследования с применением методов детектирования радионуклидов с низким по сравнению с методами рутинного контроля на АЭС порогом обнаружения позволили обосновать необходимость нормирования выбросов определенных радиоизотопов, включая тритий, из источников АЭС с реакторами ВВЭР [5]. При работе ядерного реактора соединения трития могут поступать в атмосферу как из организованных стационарных источников (труб вентиляционной системы), так и неорганизованных площадных источников (брызгальных бассейнов). Результаты специальных исследований и оценки поступления трития в атмосферу при охлаждении воды брызгальных бассейнов АЭС с реакторами ВВЭР показали необходимость контроля выбросов из этих площадных источников [6, 7]. Для Ростовской и Балаковской АЭС объемная активность трития в воздухе в критической точке местности большей частью определяется выбросом из брызгальных бассейнов [8]. Причиной его формирования может являться использование избытка запаса дистиллята, для того чтобы компенсировать потери воды при испарении и каплеуносе. Удельная активность трития в воде баков запаса дистиллята может достигать $1,0 \cdot 10^7$ Бк/л [9]. Потери воды на испарение зависят от внешних метеоусловий и температуры воды в брызгальном бассейне, а интенсивность может составлять 2% от текущего расхода воды [10, 11].

Для неорганизованных площадных источников отсутствует возможность контролировать поступление трития в атмосферный воздух инструментальными методами, чтобы подтвердить

соблюдение нормативов выброса. Требования национального законодательства в области охраны окружающей среды предусматривают разработку и инструментальное подтверждение методики расчета на основе измерения физических параметров, однозначно связанных с интенсивностью выброса загрязняющего вещества. Наиболее простой способ оценки испарения воды с открытой поверхности водоема дает эмпирическая формула Н.Н. Иванова на основе исходных данных о средней температуре и влажности воздуха за месяц [12]. Но для брызгальных бассейнов данная формула не применима, т. к. не учитывает существенное увеличение эффективной площади испарения при разбрызгивании воды для интенсивного охлаждения. Эффективная площадь испарения существенно зависит от неконтролируемого параметра — количества и распределения капель воды по размерам.

Один из возможных способов получения максимально точной оценки испарения воды с поверхности водоемов дает метод [13], для реализации которого исходные данные должны содержать как измеряемые параметры: скорость ветра, температуру воздуха и воды, влажность воздуха, так и неизмеряемые, т. е. рассчитываемые и табулированные. К последним относят поглощенную водой суммарную солнечную радиацию, поглощенное водой встречное излучение атмосферы, теплообмен водной массы с ложем водоема, длину разгона воздушного потока и параметры, зависящие от скорости ветра, длины разгона воздушного потока, абсолютной влажности воздуха, общей и нижней облачности [13].

Методы оценки испарения воды могут применяться для расчета выброса трития с поверхности промышленных водоемов, используемых в качестве объектов хранения жидких радиоактивных отходов [14, 15]. Альтернативные алгоритмы контроля потери воды из брызгальных бассейнов могут быть основаны:

на изменении температуры воды на входе и выходе из бассейнов [10, 11, 16];

на разнице парциального давления паров воды при определенной температуре атмосферного воздуха и воды в бассейнах [16, 17];

на учете способа контроля объема воды на восполнение потерь.

Потеря воды в брызгальных бассейнах происходит не только из-за испарения, но и за счет неконтролируемого объема фильтрации в грунт. Температура воды на входе и выходе изменяется как вследствие испарения, так и неконтролируемой передачи тепла элементам конструкций бассейнов. Для непрерывного контроля поступления трития из брызгальных бассейнов в атмосферу предпочтительны алгоритмы расчета на основе параметров непрерывного контроля технологического процесса охлаждения воды. Таковую возможность дает, например, формула Дальтона, именуемая в инженерных справочниках всего мира формулой стандарта VDI 2089 или Общества немецких инженеров [18]. Формула позволяет связывать через эмпирический коэффициент интенсивность испарения с площадью водной поверхности бассейна и разностью парциального давления воды при определенной температуре атмосферного воздуха и воды в бассейне. В статье исследовано влияние каждого параметра принятого алгоритма расчета на интенсивность поступления трития в атмосферный воздух при испарении воды из брызгальных бассейнов.

Алгоритм расчета, исходные данные и методы анализа. Алгоритм расчета выброса тритиевой воды из брызгальных бассейнов АЭС основан на фундаментальной термодинамической закономерности для воды — формировать насыщенный водяной пар над своей поверхностью. Все требуемые для реализации алгоритма исходные данные являются результатами прямых измерений, выполняемых штатными средствами контроля на АЭС. Нет необходимости проектировать и внедрять дополнительные системы контроля и средства измерения или запрашивать данные у сторонних организаций. В число доступных результатов контроля и измерения, являющихся исходными данными для расчета испарения воды из брызгальных бассейнов, включены средние за сутки значения температуры воды и активности трития в воде для каждого бассейна, температуры воздуха и его

относительной влажности в месте расположения АЭС.

Зная температуру воды в каждом брызгальном бассейне, можно рассчитать парциальное давление водяных паров насыщенного воздуха, которое может быть создано за счет испарения при данной температуре. Давление водяных паров насыщенного воздуха за сутки специфично для каждого бассейна. Данные о температуре воздуха и его относительной влажности позволяют рассчитать парциальное давление водяных паров при установленных условиях, одинаковое для всех брызгальных бассейнов одной АЭС на протяжении дня, что дает возможность определить, какая концентрация водяного пара в приземной атмосфере уже сформирована. Разница между парциальным давлением водяных паров насыщенного воздуха при температуре воды и воздуха (с учетом его относительной влажности) определяет количество воды, которое может дополнительно поступить в атмосферу за счет испарения из бассейна в среднем за каждый час:

$$D_{j_d} = 10^{-5} \varepsilon_j (P_{j_d}^b - P_d^l), \quad (1)$$

где D_{j_d} — количество воды, которое каждый час суток d может дополнительно поступить в атмосферу за счет испарения из j -го бассейна, л/ч; $10^{-5} \varepsilon$ — постоянный эмпирический коэффициент пропорциональности, определенный экспериментально (опытным путем), л/(м²·ч·Па); S_j — площадь j -го бассейна, м²; $P_{j_d}^b$ — парциальное давление водяных паров насыщенного воздуха j -го бассейна в сутки d при температуре воды, Па; P_d^l — парциальное давление водяных паров в сутки d при температуре воздуха, Па.

Зная интенсивность испарения воды при ее охлаждении в брызгальном бассейне, по объемной активности трития в сутки в воде бассейна можно рассчитать интенсивность поступления этого изотопа в атмосферу в форме водяного пара, содержащего молекулы тритиевой воды, в среднем за каждый час:

$$\bar{Q}_{jh}^{\text{неорг}} = D_{j_d} C_{j_d}, \quad (2)$$

где $\bar{Q}_{jh}^{\text{неорг}}$ — средняя интенсивность поступления трития в атмосферу из j -го бассейна за каждый час h суток d , Бк/ч; C_{jd} — удельная активность трития в сутки d в воде каждого j -го бассейна, Бк/л.

С учетом формулы (1) интенсивность выброса трития определяется как

$$\bar{Q}_{jh}^{\text{неорг}} = 10^{-5} \varepsilon S_j (P_{jd}^b - P_d^l) C_{jd}. \quad (3)$$

Значение эмпирического коэффициента $10^{-5} \varepsilon$ получено авторами экспериментально и принято равным 0,608 л/(м²·ч·ГПа). Использование в расчетах выражения (3) подразумевает следующие консервативные условия:

режим разбрызгивания не меняется круглый год;

с каждого квадратного метра поверхности бассейнов испаряется одинаковое количество воды с одинаковой скоростью;

третий равномерно распределен в массе воды бассейнов;

плотность воды 1 кг/л не изменяется при изменении ее температуры;

третиевая вода испаряется так же, как и обычная вода без трития.

Для расчета P_{jd}^b используют значения температуры воды в j -ом бассейне по данным объектовой системы постоянного контроля температуры воды в среднем за сутки:

$$P_{jd}^b = 1,84 \cdot 10^{11} \exp\left(-\frac{5330}{273,15 + t_{jw}}\right), \quad (4)$$

где t_{jw} — температура воды в каждом j -м бассейне, °C.

При расчете P_d^l требуется учитывать относительную влажность и температуру атмосферного воздуха в районе размещения АЭС по данным объектовой системы мониторинга метеорологических характеристик окружающей среды в среднем за сутки:

$$P_d^l = \varphi_d \cdot 1,84 \cdot 10^{11} \exp\left(-\frac{5330}{273,15 + t_{ad}}\right), \quad (5)$$

где t_{ad} — температура атмосферного воздуха за сутки d , °C; φ_d — относительная влажность атмосферного воздуха за сутки d , %.

Расчеты P_{jd}^b и P_d^l проводят для всех суток календарного года, но первый — для каждого брызгального бассейна в отдельности, а второй — общий для всех брызгальных бассейнов АЭС. Разницу значений между расчетами вычисляют для каждых суток календарного года для каждого j -го бассейна в отдельности.

Чтобы обосновать возможность регулирования выбросов трития при охлаждении воды в бассейнах, требуется провести анализ влияния на интенсивность испарения трех основных параметров в формуле (3) при их изменении в допустимых диапазонах в течение календарного года — температуры воды для каждого бассейна, температуры воздуха и его относительной влажности в месте расположения АЭС. Очевидно, интенсивность выброса трития прямо пропорциональна его удельной активности в воде бассейна. Учет влияния метеорологических параметров атмосферы и температуры воды брызгальных бассейнов позволит обосновать выбор оптимального сценария поступления трития в атмосферу, гарантирующего соблюдение установленных контрольных уровней и нормативов.

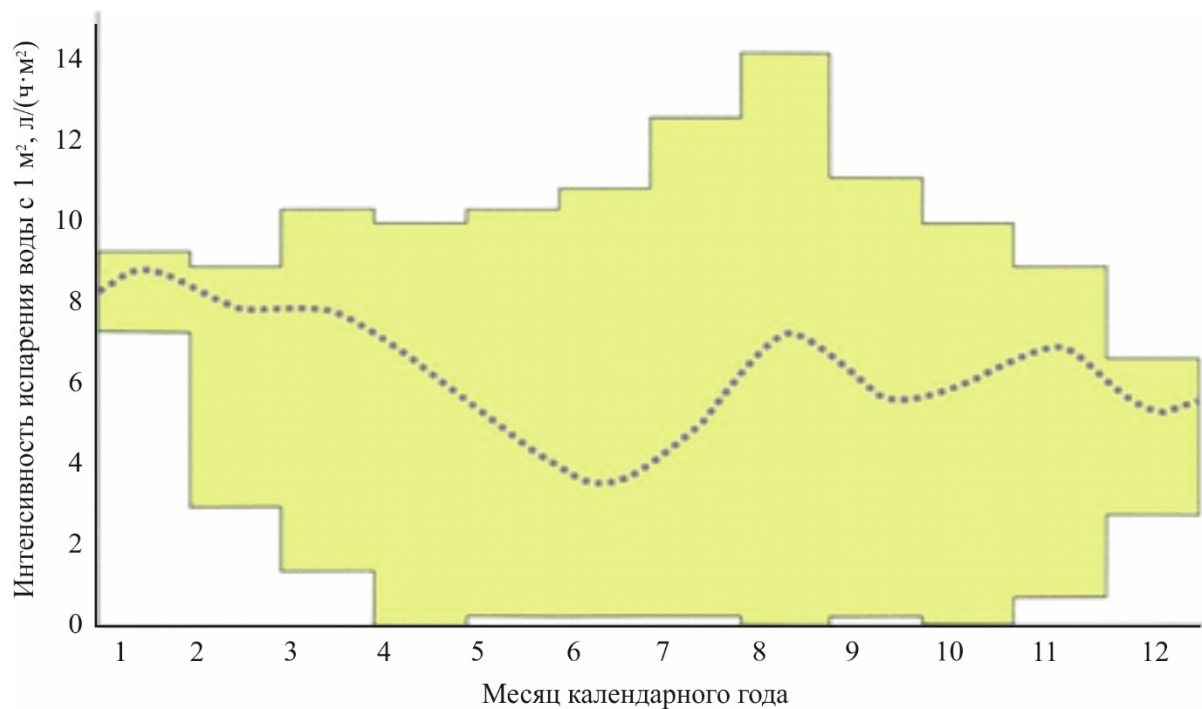
Влияние температуры воды, температуры и влажности атмосферного воздуха на интенсивность выброса трития. В работе использованы восьмисрочные данные метеонаблюдений за период с первого января 2019 г. по 31 декабря 2023 г. на метеостанции Цимлянска (WMO ID 34646) из открытого интернет-архива погоды [19]. Данные этой метеостанции по диапазону значений соответствуют метеоданным в месте расположения Ростовской АЭС, эксплуатирующей брызгальные бассейны [17]. Для анализа влияния температуры и влажности атмосферного воздуха на выброс трития из бассейнов рассматривали единичную площадь бассейна (1 м²) с единичной объемной активностью трития в воде (1 Бк/л). Используемые среднесуточные значения метеопараметров принимали постоянными за все месяцы календарного года. Диапазон и средние значения величин получены за все одноименные месяцы в рассмотренный пятилетний период.

Для случая постоянной единичной активности трития в воде бассейна интенсивность поступления этого изотопа при испарении с единицы поверхности будет определяться разностью парциального давления водяных паров при температуре воздуха и воды. Целесообразно рассмотреть годовую динамику парциального давления воды над поверхностью бассейна с учетом данных о температуре и относительной влажности атмосферного воздуха, характерных для каждого календарного месяца. Очевидно, что при высокой температуре воздуха в летний период будет наблюдаться максимум — до 39,5 гПа в июле. Минимум характерен для января и может составлять 0,96 гПа. Однако такое наблюдение не позволяет сделать однозначный вывод о максимуме интенсивности испарения воды в летний и минимуме в зимний период года. Данные таблицы свидетельствуют о существенной сезонной динамике относительной влажности воздуха. Летние значения относительной влажности на 24—30% ниже осенних и весенних и на 55% ниже зимних. Таким ростом относительной

влажности воздуха частично компенсируется снижение скорости испарения при уменьшении температуры воздуха осенью и зимой. Среднемесячные значения метеопараметров и температуры воды в брызгальных бассейнах позволяют оценить наиболее вероятную скорость испарения воды и визуализировать характер изменения интенсивности поступления трития в атмосферу в течение календарного года. Температура воды в j -м бассейне Ростовской АЭС в году находится в диапазоне от 10 до 24,7 °С при среднем значении 17,5 °С. Применяя формулу (4), получим, что давление водяных паров насыщенного воздуха при температуре воды 17,5 °С составит 19,9 гПа, а для минимальной и максимальной температуры воды в брызгальном бассейне — 12,3 и 31,1 гПа соответственно. Используя данные таблицы для последовательных расчетов по формулам (3—5), можно оценить интенсивность испарения воды с площади 1 м² и получить ожидаемый диапазон значений выброса трития для каждого календарного месяца, как показано на рисунке.

Относительная влажность и температура атмосферного воздуха

Период	Среднее значение	Минимум		Максимум	
		Абсолютный	Средний	Абсолютный	Средний
Относительная влажность, %					
Январь	85,6	47,0	55,6	99,0	97,6
Февраль	80,9	32,0	40,4	98,0	97,0
Март	71,6	23,0	30,6	99,0	96,8
Апрель	65,1	16,0	27,8	99,0	97,0
Май	65,3	21,0	25,0	99,0	97,4
Июнь	56,1	5,0	18,4	99,0	95,6
Июль	55,0	15,0	21,6	98,0	96,4
Август	51,4	16,0	20,8	97,0	94,8
Сентябрь	59,2	21,0	24,6	97,0	93,2
Октябрь	70,3	28,0	33,4	98,0	97,0
Ноябрь	81,2	32,0	41,8	98,0	97,2
Декабрь	85,7	34,0	52,0	100,0	97,8
Год	68,9	5,0	18,4	100,0	97,8
Температура, °С					
Январь	−1,7	−21,9	−13,6	10,6	8,1
Февраль	−0,8	−20,5	−13,6	15,9	12,7
Март	4,0	−10,7	−7,1	18,6	16,1
Апрель	10,6	−3,9	−0,4	26,5	23,6
Май	16,6	4,6	5,8	31,5	28,5
Июнь	23,3	12,9	13,5	36,7	33,9
Июль	24,9	11,0	14,6	39,3	35,7
Август	25,2	10,7	14,3	37,8	35,4
Сентябрь	17,9	4,1	6,4	34,6	30,9
Октябрь	12,0	−2,2	0,0	26,0	23,1
Ноябрь	4,8	−9,1	−6,5	20,4	16,9
Декабрь	−0,3	−15,5	−10,6	15,7	9,1
Год	11,5	−21,9	−13,6	39,3	35,7



Изменение интенсивности испарения воды в зависимости от календарного месяца: — наиболее вероятная интенсивность испарения по средним значениям температуры воды, воздуха, его относительной влажности; ■ — диапазон оценок по максимальным и минимальным значениям температуры воды, воздуха, его относительной влажности

Результаты расчетов показывают, что в среднем с каждого квадратного метра поверхности брызгального бассейна происходит испарение воды интенсивностью 6,2 л/(ч·м²). Диапазон ожидаемых и наиболее вероятных значений интенсивности испарения воды при охлаждении в бассейне специфичен для каждого месяца. В теплый период года вероятны короткие интервалы времени с высокой относительной влажностью воздуха и минимальной разницей между температурой атмосферного воздуха и воды бассейна, при которых интенсивность испарения близка к нулю. Максимальная ожидаемая интенсивность испарения воды может составить 14,0 л/(ч·м²). Такая интенсивность возможна в августе при низких температуре (14,3 °С) и относительной влажности атмосферного воздуха (20,8%) и высокой температуре воды брызгального бассейна (не ниже 22 °С).

Условия соблюдения нормативов и контрольных уровней выброса трития. Полученные оценки интенсивности испарения воды в брызгальном бассейне позволяют рассчитать консервативные и оптимальные значения

активности трития, при которых не будут нарушены принятые контрольные уровни и установленные нормативы выброса в атмосферу из этого неорганизованного источника. Консервативные условия могут основываться на полученных максимальных оценках интенсивности испарения, а оптимизированные условия могут быть определены для наиболее вероятных значений интенсивности испарения, характерных для каждого календарного месяца. Условие, консервативно гарантирующее выполнение контрольного уровня суточного выброса трития из всех брызгальных бассейнов АЭС, может быть представлено в виде

$$RL_d \geq \bar{Q}_d^{\text{неорг}} = 24 \sum_j 14 S_j C_{j,d}, \quad (6)$$

где RL_d — контрольный уровень суточного выброса трития, Бк/сут; $\bar{Q}_d^{\text{неорг}}$ — интенсивность выброса трития за сутки d с площади всех бассейнов, Бк/сут; 24 — количество часов в сутки, ч; 14 — максимальная ожидаемая интенсивность испарения воды бассейнов, л/(ч·м²), м.

Из выражения (6) может быть вычислена средняя для всех брызгальных бассейнов допус-

тимая удельная активность трития в воде за сутки d , при которой будет соблюдаться контрольный суточный выброс:

$$C_d = \frac{1}{j} \sum_j C_{jd} \leq \frac{RL_d}{336 \sum_j S_j}, \quad (7)$$

где C_d — средняя для всех бассейнов допустимая удельная активность трития в воде в среднем за сутки d , Бк/л; 336 — максимальная ожидаемая интенсивность испарения воды с каждого квадратного метра бассейна, л/(сут·м²).

Зная объем воды в системе бассейнов и удельную активность дистиллята, можно рассчитать суммарный суточный сброс избытка дистиллята, который создаст удельную активность в воде бассейнов не выше C_d , рассчитанной по выражению (7).

Аналогичные консервативные условия предельной удельной активности трития в воде брызгальных бассейнов для соблюдения контрольных уровней выброса за месяц и нормативов выброса трития за год могут быть получены путем учета количества часов за рассматриваемый календарный месяц и год соответственно.

Для оптимизированной допустимой оценки удельной активности трития в воде брызгальных бассейнов необходимо в выражении (7) вместо значения 336 использовать значения наиболее вероятного испарения воды в бассейне для каждого календарного месяца, л/(сут·м²):

Январь.....	210,2
Февраль.....	184,8
Март.....	185,8
Апрель.....	151,5
Май.....	110,2
Июнь.....	83,8
Июль.....	119,5
Август.....	170,0
Сентябрь.....	136,5
Октябрь.....	143,2
Ноябрь.....	162,5
Декабрь.....	127,6

Заключение. Полученные в ходе исследований выражения (1—7) связи интенсивности выброса и удельной активности воды брызгальных бассейнов специфичны только для региона расположения Ростовской АЭС и не могут без изменения быть использованы даже для однотипных АЭС и систем охлаждения, находящихся в других климатических зонах.

Анализ метеорологических и технологических факторов, влияющих на интенсивность испарения воды при охлаждении в брызгальных бассейнах Ростовской АЭС, позволяет выполнять оценку выброса трития из неорганизованного площадного источника. Максимальная интенсивность этого выброса может наблюдаться в августе и достигать 14 Бк/ч с каждого квадратного метра поверхности на каждый 1 Бк/л трития в воде брызгальных бассейнов. Минимальная интенсивность поступления трития в атмосферу происходит в условиях повышенной относительной влажности воздуха и минимальной разницы между температурой воды и атмосферного воздуха.

Полученные консервативные и оптимизированные оценки интенсивности испарения способствуют объективному прогнозу допустимой удельной активности трития в воде бассейнов, при которой будут соблюдаться контрольные уровни и нормативы выброса трития при охлаждении воды в брызгальных бассейнах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Екидин А.А., Жуковский М.В., Васянович М.Е. Идентификация основных дозообразующих радионуклидов в выбросах АЭС. — Атомная энергия, 2016, т. 120, вып. 2, с. 106—108. // Ekinidin A.A., Zhukovskii M.V., Vasyanovich M.E. Identification of the main dose-forming radionuclides in NPP emissions. — Atomic Energy, 2016, v. 120, is. 2, p. 685—693.
2. Десятов Д.Д., Екидин А.А. Оценка поступления трития в окружающую среду от выбросов АЭС. — Биосферная совместимость: человек, регион, технологии, 2018, № 1 (21), с. 88—96.

3. Антонова Е.В., Антонов К.Л., Васянович М.Е., Панченко С.В. Тритий от молекулы до биосферы. 1. Закономерности поведения в окружающей среде. — Экология, 2022, № 4, с. 255—288.
4. Korinny A., Phillips J. INPRO methodology for sustainability assessment of nuclear energy systems: safety of nuclear reactors. INPRO manual. Vienna, Austria: IAEA, 2020, 112 p.
5. Екидин А.А., Васянович М.Е., Васильев А.В. и др. Определение радионуклидного состава и оценка доз облучения населения за счет атмосферных выбросов российских АЭС. — Траектория исследований — человек, природа, технологии, 2022, № 2(2), с. 53—63.
6. Строганов А.А., Курындин А.В., Шаповалов А.С. О радиационном воздействии выбросов брызгальных бассейнов атомных станций. — Ядерная и радиационная безопасность, 2014, № 4(74), с. 11—17.
7. Vasilyev A., Ekinin A., Vasyanovich M. e. a. Conservative tritium exposure assessment in the atmosphere from the spray ponds of the Balakovo NPP. — FST, 2020, v. 76, is. 4, p. 526—535.
8. Крышев А.И., Васянович М.Е., Екидин А.А. Поступление трития в атмосферу с выбросами АЭС с ВВЭР и оценка дозы облучения населения. — Атомная энергия, 2020, т. 128, вып. 6, с. 333—336. // Kryshev A.I., Vasyanovich M.E., Ekinin A.A. Tritium entry into the atmosphere with emissions from NPP-VVER and population irradiation dose assessment. — Atomic Energy, 2020, v. 128, is. 3, p. 362—367.
9. Екидин А.А., Васильев А.В., Васянович М.Е. и др. Анализ возможности поступления трития в атмосферу из баков запаса дистиллята (на примере Балаковской АЭС). — Вопросы радиационной безопасности, 2019, № 1(93), с. 16—24.
10. Пономаренко В.С., Арефьев Ю.И. Градирни промышленных и энергетических предприятий: справочное пос. Под общ. ред. В.С. Пономаренко. М.: Энергоатомиздат, 1998, 376 с.
11. Козин В.Н., Лазаренко Ю.И., Наталюк Н.Т., Шиманский Б.А. Методические указания по предотвращению образования минеральных и органических отложений в конденсаторах турбин и их очистке. РД 34.22.501-87. М: СПО «Союзтехэнерго», 1989, 80 с.
12. Иванов Н.Н. Об определении величины испаряемости. — Известия всесоюзного географического общества, 1954, т. 86, вып. 2, с. 189—196.
13. Кузнецов В.И., Голубев В.С., Федорова Т.Г. Указания по расчету испарения с поверхности водоемов. Л.: Гидрометеиздат, 1969, 85 с.
14. Екидин А.А., Антонов К.Л., Жуковский М.В. Оценка загрязнения атмосферы тритием при испарении воды с поверхности промышленных водоемов. — Вопросы радиационной безопасности, 2012, № 3 (67), с. 3—10.
15. Востротин В.В., Янов А.Ю. Оценка уровня годового поступления трития в воздух с поверхности озера Кызылташ. — Радиационная гигиена, 2022, т. 15, № 4, с. 88—96.
16. Екидин А.А., Антонов К.Л., Васильев А.В. и др. Оценка поступления трития в атмосферу из брызгальных бассейнов Балаковской АЭС в холодный период. — Ядерная и радиационная безопасность, 2017, № 3 (85), с. 35—46.
17. Екидин А.А., Антонов К.Л., Васянович М.Е. и др. Обоснование метода оценки поступления трития в атмосферу при охлаждении воды в брызгальных бассейнах Ростовской АЭС. — Траектория исследований — человек, природа, технологии, 2022, № 1 (1), с. 86—101.
18. Зеликов В.В. Справочник инженера по отоплению, вентиляции и кондиционированию. М.: Инфра-Инженерия, 2011, 624 с.
19. Архив прогноза погоды в г. Цимлянске [Электронный ресурс]. Сайт «Расписание погоды (rp5.ru)». Режим доступа: в открытом доступе. URL: https://rp5.ru/Weather_archive_in_Tsimlyansk (дата обращения 20.11.2023).

Поступила в Редакцию 21.11.23