

УДК 504.3.054, 621.039.587

ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА ОЦЕНКИ ПОСТУПЛЕНИЯ ТРИТИЯ В АТМОСФЕРУ ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ ВОДЫ В БРЫЗГАЛЬНЫХ БАССЕЙНАХ РОСТОВСКОЙ АЭС

А. А. Екидин ¹, К. Л. Антонов ¹, М. Е. Васянович ¹, М. Д. Пышкина ¹,
А. Ф. Меркулов ², П. А. Фоменко ²

¹ ФГБУН Институт промышленной экологии Уральского отделения РАН,
г. Екатеринбург, Россия

² Филиал ОАО «Концерн Росэнергоатом» Ростовская атомная станция,
г. Волгодонск, Россия

В настоящей работе обоснован выбор модели для оценки поступления трития в атмосферу при охлаждении воды в брызгальных бассейнах Ростовской АЭС. В основе модели лежит фундаментальная термодинамическая закономерность формирования насыщенного водяного пара над поверхностью воды. Экспериментальным путем подтвержден эмпирический коэффициент, связывающий интенсивность поступления трития в атмосферу с активностью трития в воде, площадью брызгальных бассейнов и разностью парциальных давлений насыщенного пара при температуре воды и температуре воздуха. Для климатических условий размещения Ростовской АЭС значение коэффициента составило 0,32 л/(м²·час·гПа). Разработанный метод и порядок проведения расчета выбросов тритиевой воды из брызгальных бассейнов в атмосферный воздух Ростовской АЭС позволяет оперативно контролировать воздействие на окружающую среду и гарантировать безопасность населения. В случае применения разработанного алгоритма для других климатических условий (других АЭС) потребуется экспериментальное определение значения эмпирического коэффициента на основе натурных измерений, аналогичных представленным в настоящей работе.

Ключевые слова: тритий, температура, влажность, испарение, активность, фактор разбавления.

1. Введение

Развитие и применение ядерных технологий способствует решению социальных и экономических проблем как в регионах присутствия объектов использования атомной энергии, так и страны в целом [1]. Производство электроэнергии на атомных электростанциях играет ключевую роль в предотвращении загрязнения окружающей среды выбросами и сбросами вредных химических веществ, захламления промышленными отходами [2]. Специфические виды воздействия АЭС, связанные с применением ядерных материалов и обращением с радиоактивными веществами, не создают угрозы персоналу, населению, окружающей среде при нормальных условиях эксплуатации.

Ключевым элементом подтверждения безопасности эксплуатации любой ядерной установки является систематический контроль поступления радиоактивных веществ в окружающую среду. Контроль поступления радионуклидов в атмосферный воздух на российских АЭС осуществляется для каждого стационарного источника, создающего при выбросе без учета рассеивания индивидуальную годовую эффективную дозу более 10 мкЗв; и для всех радионуклидов, в отношении которых применяются меры государственного регулирования в области охраны окружающей среды, суммарный вклад которых в годовую эффективную дозу облучения лиц из

критической группы населения, создаваемую выбросом этого источника, составляет не менее 99 %.

До 2012 г. тритий не входил в число радионуклидов, выбросы которых должны нормироваться и контролироваться при нормальной эксплуатации АЭС РФ. Вследствие этого отсутствовали приборы и методы для такого контроля [3]. В связи с существенными изменениями с 2012 г. в подходах к нормированию выбросов радиоактивных веществ в атмосферный воздух потребовалось проведение масштабных исследований радионуклидного состава и активности газовой смеси каждого источника выброса на всех российских АЭС [4]. По результатам радиационно-технических обследований источников выбросов радионуклидов АЭС России (филиалов АО «Концерн Росэнергоатом») установлено, что тритий входит в число пятнадцати радионуклидов, определяющих не менее 99 % дозы облучения критической группы населения от выбросов АЭС [5, 6].

При работе ядерного реактора соединения трития могут поступать в атмосферу как от организованных стационарных источников (трубы вентиляционной системы), так и неорганизованных стационарных источников, таких как брызгальные бассейны [7, 8]. Брызгальные бассейны (далее ББ) на АЭС применяются в качестве промышленных систем охлаждения [9]. Охлаждение воды в ББ происходит за счет испарения. Применяемая на АЭС система предупреждения формирования взрывоопасной смеси водорода и кислорода переводит все изотопы водорода в оксидную форму H_2O . Наиболее вероятное соединение воды, содержащей тритий (Т), – НТО, крайне редко DTO и T_2O (где D – дейтерий, не радиоактивный изотоп водорода с атомной массой 2). При испарении воды, содержащей тритий, формируется источник поступления трития в атмосферу. Так, вклад трех ББ в суммарный выброс трития из всех нормируемых источников Ростовской АЭС составляет 45 %.

Организованные стационарные источники выброса АЭС России оснащены пробоотборными устройствами для отбора образцов воздуха на определение содержания трития, что позволяет определить среднесрочное поступление трития в атмосферу и сравнить с установленным нормативом. Для неорганизованных стационарных источников нет возможности контролировать выбросы трития инструментальными методами. Чтобы контролировать соблюдение нормативов выброса трития из неорганизованных источников требуется разработать, обосновать методику расчета выброса трития на основе измерения физических параметров, однозначно связанных с интенсивностью выброса трития. До начала практического применения такой методики выбранный алгоритм расчета выброса трития из ББ, учитывающий характерные климатические условия района размещения АЭС, должен быть подтвержден экспериментально.

2. Материалы и методы

2.1. Основная модель оценки поступления трития в атмосферу при охлаждении воды в брызгальных бассейнах

Метод расчета выброса трития из брызгальных бассейнов при охлаждении воды основан на оценке интенсивности испарения. Количество испаряемого пара с поверхности воды определяется установленным термодинамическим равновесием с жидкостью. Оценка интенсивности испарения опирается на:

- метеорологические данные о температуре и об относительной влажности воздуха в окрестности ББ;
- расчетные данные о парциальном давлении насыщенных паров воды над поверхностью бассейна при температуре воздуха, равной температуре воды, поступающей в бассейны;

- расчетные данные о парциальном давлении насыщенных паров воды в атмосферном воздухе вне бассейна.

Для оценки поступления трития из ББ Ростовской АЭС в атмосферу консервативно принимается, что вода в форме НТО испаряется так же, как и обычная вода в форме H_2O , а плотность воды 1 кг/л не изменяется при изменении температуры. Эти допущения гарантированно предотвращают заниженную оценку выброса трития из ББ.

В качестве основной модели для оценки интенсивность испарения воды с площади ББ выбрана формула Дальтона, имеющая широкое применение для расчета интенсивности испарения влаги с открытых водных поверхностей бассейнов (D , л/ч) и именуемая в инженерных справочниках всего мира как формула стандарта VDI 2089 или Общества немецких инженеров [10]:

$$D = 10^{-5} \cdot \varepsilon \cdot S \cdot (P^b - P^l), \quad (1)$$

где S – площадь брызгального бассейна, m^2 ;

P^b – давление водяных паров насыщенного воздуха при температуре воды (t_w), поступающей в брызгальный бассейн в сутки d , Па;

P^l – парциальное давление водяных паров при температуре (t_a) и относительной влажности воздуха по данным метеостанции за сутки d , Па;

ε – эмпирический коэффициент, учитывающий назначение бассейна и, как следствие, изменение эффективной площади испарения, л/($m^2 \cdot \text{час} \cdot \text{Па}$).

Для перехода от интенсивности испарения (D , л/ч) к мощности выброса трития (Q , Бк/ч) при испарении воды в ББ с учетом принятых консервативных условий, необходимо значение интенсивности испарения умножить на значение удельной активности трития (C , Бк/л) в воде ББ:

$$Q = D \cdot C = 10^{-5} \cdot \varepsilon \cdot S \cdot (P^b - P^l) \cdot C, \quad (2)$$

где D – интенсивность испарения воды с площади каждого ББ по формуле (1), л/ч;

C – удельная активность трития в воде ББ, Бк/л.

На Ростовской АЭС эксплуатируется три брызгальных бассейна одинаковой площади. Интенсивность выброса трития (Q , Бк/ч) при испарении воды в ББ является величиной аддитивной. Таким образом, суммарная интенсивность выброса трития из трех брызгальных бассейнов будет равна сумме интенсивности выброса из каждого ББ. Выброс трития из каждого ББ определяется разностью парциальных давлений насыщенных паров воды над поверхностью каждого из трех ББ и в атмосферном воздухе вне каждого ББ, удельной активностью трития в воде ББ и площадью неорганизованного источника. Принятые условия консервативности, выбранная модель (2) и результаты экспериментальной работы позволяют применить в качестве расчетного алгоритма интенсивности выброса трития ($Q_h^{\text{неорг}}$, Бк/ч) из трех брызгальных бассейнов Ростовской АЭС следующую формулу [7, 10]:

$$Q_h^{\text{неорг}} = \sum_j Q_{j,h}^{\text{неорг}} = \sum_j 0,32 \cdot S_j \cdot (P_{j,d}^b - P_d^l) \cdot C_{j,d}, \quad (3)$$

где 0,32 – эмпирический коэффициент, л/($m^2 \cdot \text{час} \cdot \text{гПа}$);

S_j – площадь j -го брызгального бассейна, m^2 ;

$P_{j,d}^b$ – давление водяных паров насыщенного воздуха при температуре воды ($t_{j,w}$), поступающей в j -й брызгальный бассейн за сутки d , гПа;

P_d^l – парциальное давление водяных паров при температуре ($t_{a,d}$) и относительной влажности воздуха по данным близлежащей к Ростовской АЭС метеостанции за сутки d , гПа;

$C_{j,d}$ – среднее значение удельной активности трития в воде j -го брызгального бассейна за сутки d , Бк/л;

$\underline{Q}_{j,h}^{\text{неорг}}$ – среднее за каждый час суток значение мощности выброса трития при испарении воды из j -го брызгального бассейна, Бк/ч.

Среднее значение суточного выброса трития в форме НТО ($\underline{Q}_d^{\text{неорг}}$) из трех брызгальных бассейнов Ростовской АЭС равно сумме выброса из каждого ББ ($\underline{Q}_{j,h}^{\text{неорг}}$) за одни сутки (Бк/сут):

$$\underline{Q}_d^{\text{неорг}} = 24 \cdot \sum_j \underline{Q}_{j,h}^{\text{неорг}}. \quad (4)$$

Значение выброса трития в форме НТО из каждого ББ Ростовской АЭС в среднем за месяц определяется по формуле (Бк/мес):

$$\underline{Q}_{j,m}^{\text{неорг}} = \sum_{d=1}^{30} \underline{Q}_{j,d}^{\text{неорг}}. \quad (5)$$

Активность годового выброса трития в форме НТО из каждого ББ Ростовской АЭС за год выполняется по формуле (Бк/год):

$$\underline{Q}_j^{\text{неорг}} = \sum_{m=1}^{12} \underline{Q}_{j,m}^{\text{неорг}}. \quad (6)$$

Аналитическое выражение для расчета парциального давления паров воды при заданной температуре t представлено в виде экспоненциальной зависимости, (Па) [11]:

$$P_d = 1,84 \cdot 10^{11} \exp\left(-\frac{5330}{273,15+t}\right). \quad (7)$$

В инженерных справочниках иногда предлагаются другие выражения для расчета парциального давления паров воды при заданной температуре. Сравнение результатов расчета по формуле (7) с альтернативными формулами показало отличие значений парциального давления паров воды в диапазоне температур от 5 до 35 °С – не более 0,5 %, для других возможных температур при нормальной эксплуатации ББ – не более 1,5 % [10].

Для расчета $P_{j,d}^b$ по формуле (7) величина t принимается равной значению температуры воды ($t_{j,w}$), поступающей в j -й брызгальный бассейн по данным объектовой системы постоянного контроля температуры воды в среднем за сутки d , (Па):

$$P_{j,d}^b = 1,84 \cdot 10^{11} \exp\left(-\frac{5330}{273,15+t_{j,w}}\right), \quad (8)$$

где $t_{j,w}$ – средняя за сутки d температура воды, поступающей в j -й брызгальный бассейн, °С.

При расчете P_d^l по формуле (7) требуется учитывать значение относительной влажности воздуха (φ), а величина t принимается равной значению температуры атмосферного воздуха ($t_{a,d}$) в районе размещения АЭС по данным объектовой системы мониторинга метеорологических характеристик окружающей среды в среднем за сутки d :

$$P_d^l = \varphi \cdot 1,84 \cdot 10^{11} \exp\left(-\frac{5330}{273,15+t_{a,d}}\right), \quad (9)$$

где φ – средняя за сутки относительной влажности воздуха, %;

$t_{a,d}$ – средняя за сутки d температура атмосферного воздуха в районе размещения Ростовской АЭС, °С.

2.2. Валидация основной модели

Валидация основной модели для расчета величин выбросов трития из брызгальных бассейнов Ростовской АЭС в атмосферный воздух проведена путем сравнения количественных характеристик выбросов радионуклида, полученных на основе инструментальных измерений и расчетным путем по формуле (3). В период с 22 по 23 июня 2021 г. выполнен отбор проб воздуха для определения объемной активности (ОА) трития в приземном слое воздуха вблизи брызгальных бассейнов Ростовской АЭС. Для отбора проб воздуха использовались три мобильные установки отбора проб трития (УОТ). УОТ устанавливались у каждого ББ в направлении движения потока воздуха на расстоянии 25 м от водной поверхности. Схема расположения установок отбора проб трития (УОТ) возле каждого ББ представлена на рис.1.

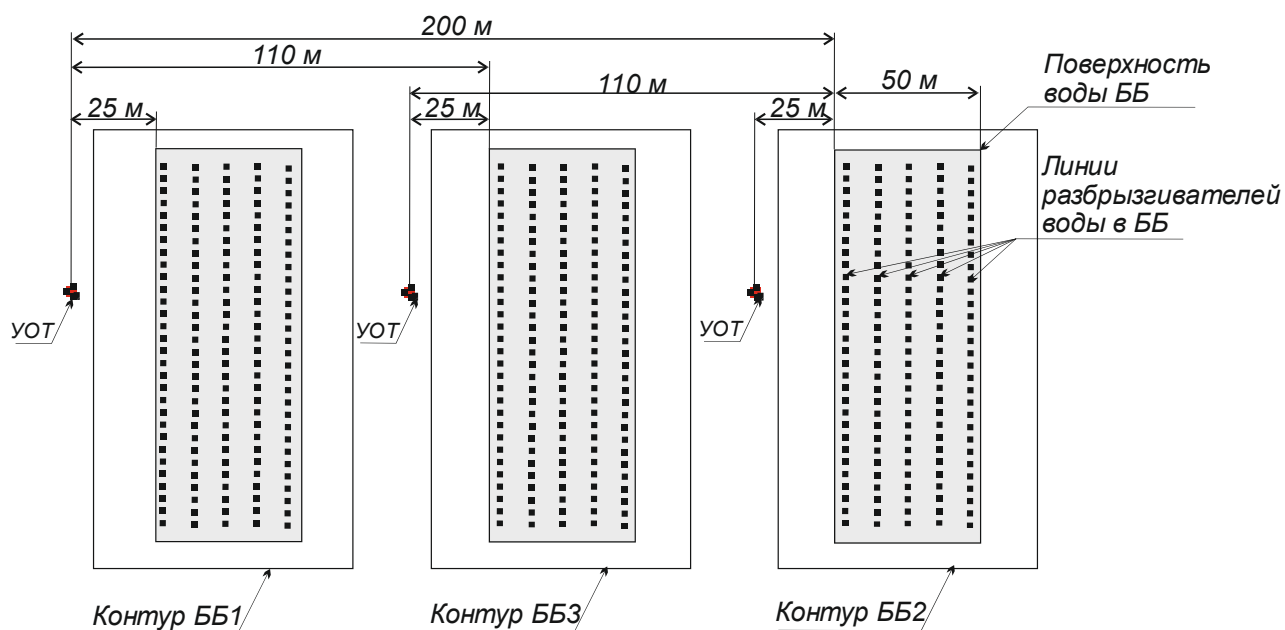


Рисунок 1. Схема расположения УОТ возле каждого ББ

Каждая УОТ позволяет в двух параллельных пробоотборных линиях производить отбор проб воздуха для получения двух счетных образцов для определения ОА трития в приземном слое воздуха в месте установки УОТ. Методика определения ОА трития в приземном слое воздуха – «Методика измерений объемной активности трития в приземной атмосфере и газообразных выбросах с использованием установки автоматизированной пробоотбора трития и углерода УОТ-02» зарегистрирована в федеральном информационном фонде аттестованных методик ФР.3.38.2020.00132. Измерения активности счетных образцов выполнены методом жидкой сцинтилляционной спектрометрии.

Измеренные значения ОА трития в воздухе на заданном расстоянии от каждого ББ позволили рассчитать соответствующую интенсивность выброса трития из ББ с учетом фактического разбавления примеси в атмосфере, характерного для интервала времени проведения эксперимента. Эта величина может быть определена согласно методике разработки и установления нормативов предельно допустимых выбросов радиоактивных веществ в атмосферный воздух [12]:

$$Q^T = C_n^T(x)/G_n^T(x), \quad (10)$$

где Q^T – мощность непрерывного выброса трития из ББ, Бк/с;

$C_n^T(x)$ – измеренное значение приземной объемной активности трития на расстоянии x от границы ББ в направлении n -го румба движения потока воздуха, Бк/м³;

$G_n^T(x)$ – значение (метеорологического) фактора разбавления примеси в приземном слое воздуха для трития на расстоянии x от границы ББ в направлении n -го румба, с/м³.

Расчет метеорологического фактора разбавления в каждой точке измерения ОА трития, если рассматривать ситуацию суточного отбора пробы воздуха как сценарий последовательных разовых выбросов в трехчасовые интервалы времени, допустимо проводить согласно методике для залпового выброса радиоактивных веществ [13]. Сценарий формирования источника – ветровой унос с площадного источника шириной 50 м и высотой выброса 1 м.

Сравнение результатов расчета по формуле (10) с результатами расчета по формуле (3) за один и тот же интервал времени дает возможность сделать вывод о применимости алгоритма расчета интенсивности выброса трития из ББ, адекватности выбранной физической модели и достоверности предложенного алгоритма. Такое сравнение требуется проводить с учетом объективного свойства аддитивности интенсивности выброса трития во времени. Поскольку размерность результатов расчета в формуле (10) представлена в Бк/с, то и результаты расчета по формуле (3) необходимо перевести в размерность Бк/с.

Наряду с валидацией алгоритма расчета интенсивности выброса трития из ББ на основе выбранной модели выполнена его верификация путем сравнения с результатами расчета альтернативным алгоритмом.

2.3. Верификация основной модели

Для верификации формулы расчета величины выброса трития из ББ Ростовской АЭС рассмотрены по отдельности два пути формирования выброса:

- за счет испарения с поверхности струй и капель непосредственно на площади ББ (P_1);
- за счет испарения капель воды (каплеунос), унесенных за пределы площади ББ (P_2).

В основе первой оценки лежит фундаментальная теплофизическая закономерность – при парообразовании часть тепла жидкости расходуется на совершение работы по преодолению сил сцепления между молекулами конденсированной среды (жидкой воды) при увеличении объема тела (образования пара). В результате происходит изменение внутренней энергии конденсированного вещества и его охлаждение. Таким образом, изменение температуры воды на входе и выходе из ББ будет пропорционально массе испарившейся жидкости. Согласно многочисленным опубликованным справочным материалам, рекомендациям и методическим указаниям расчет потерь воды ББ на испарение в процентах от производительности описывается эмпирической формулой [14, 15]:

$$P_1 = K \cdot \Delta t, \quad (11)$$

где Δt – перепад температур воды на входе и выходе из ББ, °С;

K – коэффициент, зависящий от температуры воздуха, %/°С.

Для брызгальных бассейнов значение K приводится в табл. 1.

Таблица 1. Значение коэффициента K для температуры воздуха

| | | | | | |
|-------------------------|-----|------|------|------|------|
| Температура воздуха, °С | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 |
| Коэффициент K , %/°С | 0,1 | 0,12 | 0,14 | 0,15 | 0,16 |

Для оценки второго пути формирования выброса в атмосферу трития из ББ Ростовской АЭС за счет каплеуноса и последующего испарения таких капель используются эмпирические данные о потерях воды из системы охлаждения в результате капельного уноса. Согласно справочным данным [3, 9] и рекомендациям такие потери для ББ с производительностью от 500 до 5 000 м³/ч без каплеуловителя могут составить 1,5 % от расхода воды. Если консервативно принять, что все унесенные из ББ капли воды испарились в короткое время, игнорировать частичный сток обратно в ББ и инфильтрацию в грунт, то значение P_2 также можно считать равным 1,5 %.

3. Результаты

3.1. Валидация формулы расчета величин выбросов трития из брызгальных бассейнов Ростовской АЭС в атмосферный воздух

Инструментальный метод. Для валидации расчетного метода путем сравнения с экспериментальными данными инструментального метода выбран интервал времени с максимальными сезонными температурами атмосферного воздуха и высоким значением активности трития в воде брызгальных бассейнов. Данные об активности трития в воде каждого ББ и результаты измерения ОА трития в приземном слое атмосферы в 25 м от водной поверхности ББ обобщены в табл. 2. Характеристики атмосферы, учитываемые при определении мощности выброса и параметров разбавления паров НТО в атмосфере в период отбора проб воздуха, представлены в табл. 3.

Среднее значение ОА трития в приземном слое в направлении движения потока воздуха на расстоянии 25 м от водной поверхности ББ составило: для ББ1 – 651,5 Бк/м³; для ББ2 – 257,0 Бк/м³; для ББ3 – 1109,0 Бк/м³. В период отбора проб направление движения ветра было со стороны ББ2 на ББ3 и далее на ББ1. Выбросы трития из ББ2 с учетом фактора разбавления могли оказывать влияние на формирование ОА трития в приземном слое атмосферы вблизи ББ3 и ББ1.

Значение фактора метеорологического разбавления в фиксированной точке отбора пробы воздуха специфично для каждой категории устойчивости и наблюдаемой скорости ветра в период отбора. Полученные значения фактора метеорологического разбавления каждой категории устойчивости представлены в табл. 4.

Для каждого интервала наблюдения комбинация категории устойчивости атмосферы и скорости ветра из табл. 3 определяет фактор разбавления по табл. 4. Полученные в результате инструментальных измерений средние значения ОА трития в воздухе вблизи каждого ББ и установленные значения фактора метеорологического разбавления позволяют оценить мощность выброса для каждого рассматриваемого интервала времени в период отбора проб воздуха (см. табл. 5).

Средние значения мощности выброса из каждого ББ за рассматриваемые интервалы времени позволяют оценить суммарную активность поступившего в атмосферу трития из всех трех ББ в $1,01 \cdot 10^{11}$ Бк; при этом средняя мощность выброса из всех ББ суммарно составила $9,33 \cdot 10^5$ Бк/с.

Таблица 2. Содержание трития в воде ББ и приземном слое атмосферы

| Брызгальный бассейн | Содержание трития | | |
|---------------------|-------------------|---|---|
| | В воде ББ, Бк/л | В приземной атмосфере, проба 1, Бк/м ³ | В приземной атмосфере, проба 2, Бк/м ³ |
| ББ 1 | 43 000 | 625 ± 157 | 678 ± 110 |
| ББ 2 | 32 200 | 315 ± 80 | 199 ± 50 |
| ББ 3 | 56 000 | 840 ± 210 | 1 378 ± 344 |

Таблица 3. Характеристика атмосферы в период отбора проб воздуха

| Дата, время | Ветер, дующий с | Скорость ветра, м/с | Категория устойчивости атмосферы | Температура воздуха, °С | Относительная влажность воздуха, % |
|-------------------|-----------------|---------------------|----------------------------------|-------------------------|------------------------------------|
| 23.06.21 15:00 | СВ | 4,0 | В | 33,1 | 39 |
| 23.06.21 12:00 | СВ | 3,0 | А | 31,9 | 39 |
| 23.06.21 09:00 | ВСВ | 3,0 | В | 26,6 | 50 |
| 23.06.21 06:00 | СВ | 2,0 | Д | 24,1 | 57 |
| 23.06.21 03:00 | СВ | 3,0 | F | 25,4 | 46 |
| 23.06.21 00:00 | В | 2,0 | G | 25,9 | 46 |
| 22.06.21 21:00 | В | 3,0 | E | 30,2 | 37 |
| 22.06.21 18:00 | ВСВ | 3,0 | Д | 32,3 | 37 |
| 22.06.21 15:00 | ВСВ | 3,0 | В | 31,7 | 39 |
| 22.06.21 12:00 | ВСВ | 3,0 | А | 29,9 | 44 |

Таблица 4. Значения метеорологического фактора разбавления $G_n^T(x)$ на расстоянии 25 м от поверхности воды ББ

| Скорость ветра, м/с | Метеорологический фактор разбавления, с/м ³ | | | | | |
|---------------------|--|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | А | В | С | Д | Е | F |
| 2,0 | $1,65 \cdot 10^{-3}$ | $2,83 \cdot 10^{-3}$ | $3,35 \cdot 10^{-3}$ | $3,98 \cdot 10^{-3}$ | $6,81 \cdot 10^{-3}$ | $1,32 \cdot 10^{-2}$ |
| 3,0 | $1,10 \cdot 10^{-3}$ | $1,89 \cdot 10^{-3}$ | $2,23 \cdot 10^{-3}$ | $2,65 \cdot 10^{-3}$ | $4,54 \cdot 10^{-3}$ | $8,83 \cdot 10^{-3}$ |
| 4,0 | $8,27 \cdot 10^{-4}$ | $1,41 \cdot 10^{-3}$ | $1,67 \cdot 10^{-3}$ | $1,99 \cdot 10^{-3}$ | $3,41 \cdot 10^{-3}$ | $6,62 \cdot 10^{-3}$ |

А, В, С – разная степень неустойчивости (хорошие условия рассеивания), Д – безразличное состояние, Е и F – устойчивая стратификация (плохое рассеивание)

Таблица 5. Мощность выброса трития при испарении воды из ББ Ростовской АЭС на основе инструментального метода

| Дата, время | Метеорологический фактор разбавления, с/м ³ | Мощность выброса, Бк/с | | |
|---|--|------------------------|-------------------|-------------------|
| | | ББ 1 | ББ 2 | ББ 3 |
| 23.06.21 15:00 | $1,41 \cdot 10^{-3}$ | $4,62 \cdot 10^5$ | $1,82 \cdot 10^5$ | $7,87 \cdot 10^5$ |
| 23.06.21 12:00 | $1,10 \cdot 10^{-3}$ | $5,92 \cdot 10^5$ | $2,34 \cdot 10^5$ | $1,01 \cdot 10^6$ |
| 23.06.21 09:00 | $1,89 \cdot 10^{-3}$ | $3,45 \cdot 10^5$ | $1,36 \cdot 10^5$ | $5,87 \cdot 10^5$ |
| 23.06.21 06:00 | $3,98 \cdot 10^{-3}$ | $1,64 \cdot 10^5$ | $6,46 \cdot 10^4$ | $2,79 \cdot 10^5$ |
| 23.06.21 03:00 | $8,83 \cdot 10^{-3}$ | $7,38 \cdot 10^4$ | $2,91 \cdot 10^4$ | $1,26 \cdot 10^5$ |
| 23.06.21 00:00 | $1,32 \cdot 10^{-2}$ | $4,94 \cdot 10^4$ | $1,95 \cdot 10^4$ | $8,40 \cdot 10^4$ |
| 22.06.21 21:00 | $4,54 \cdot 10^{-3}$ | $1,44 \cdot 10^5$ | $5,66 \cdot 10^4$ | $2,44 \cdot 10^5$ |
| 22.06.21 18:00 | $2,65 \cdot 10^{-3}$ | $2,46 \cdot 10^5$ | $9,70 \cdot 10^4$ | $4,18 \cdot 10^5$ |
| 22.06.21 15:00 | $1,89 \cdot 10^{-3}$ | $3,45 \cdot 10^5$ | $1,36 \cdot 10^5$ | $5,87 \cdot 10^5$ |
| 22.06.21 12:00 | $1,10 \cdot 10^{-3}$ | $5,92 \cdot 10^5$ | $2,34 \cdot 10^5$ | $1,01 \cdot 10^6$ |
| Среднее значение за период наблюдения | | $3,01 \cdot 10^5$ | $1,19 \cdot 10^5$ | $5,13 \cdot 10^5$ |
| Мощность выброса трех ББ за период наблюдения | | $9,33 \cdot 10^5$ | | |

Расчетный метод (основная модель). Оценка мощности выброса трития из ББ расчетным путем по алгоритму настоящей методики (формула 3) выполнена для метеорологических условий и температурного режима воды ББ в период с 22.06.2021 по 23.06.2021. Расчет интенсивности выброса трития проведен как для отдельных интервалов времени, соответствующих рассмотренным интервалам в инструментальном методе (табл. 6 и 7), так и по усредненным параметрам за весь период наблюдения.

Температура воды во всех ББ по данным автоматической системы контроля составляла 22,5 °С. Давление водяных паров насыщенного воздуха при температуре воды 22,5 °С, рассчитанное по формуле (8), составляет 27,25 гПа. Данные метеонаблюдений о температуре и относительной влажности воздуха в период отбора проб (см. табл. 3) позволяют определить парциальное давление водяных паров в районе расположения ББ и рассчитать разницу между ним и давлением водяных паров насыщенного воздуха при температуре воды в ББ для каждого рассматриваемого трехчасового интервала времени в период отбора проб воздуха. Согласно расчетной формуле 3 настоящей методики, полученное значение разности давлений, удельная активность воды в ББ (см. табл. 2), площадь каждого ББ (8 580 м²) и эмпирический коэффициент (0,32 л/(м²·час·гПа)) определяют мощность выброса трития из каждого ББ в среднем за каждый час в рассмотренных трехчасовых интервалах времени. Результаты расчета мощности выброса в размерности Бк/с по расчетному алгоритму методики (формула 3) представлены в табл. 6.

Таблица 6. Мощность выброса трития при испарении воды из ББ Ростовской АЭС на основе расчетного метода

| Дата, время | Парциальное давление водяных паров, гПа | Мощность выброса, Бк/с | | |
|---|---|------------------------|-------------------|-------------------|
| | | ББ 1 | ББ 2 | ББ 3 |
| 23.06.21 15:00 | 19,83 | $2,43 \cdot 10^5$ | $1,82 \cdot 10^5$ | $3,17 \cdot 10^5$ |
| 23.06.21 12:00 | 18,52 | $2,86 \cdot 10^5$ | $2,14 \cdot 10^5$ | $3,73 \cdot 10^5$ |
| 23.06.21 09:00 | 17,43 | $3,22 \cdot 10^5$ | $2,41 \cdot 10^5$ | $4,19 \cdot 10^5$ |
| 23.06.21 06:00 | 17,11 | $3,32 \cdot 10^5$ | $2,49 \cdot 10^5$ | $4,33 \cdot 10^5$ |
| 23.06.21 03:00 | 14,93 | $4,04 \cdot 10^5$ | $3,02 \cdot 10^5$ | $5,26 \cdot 10^5$ |
| 23.06.21 00:00 | 15,39 | $3,89 \cdot 10^5$ | $2,91 \cdot 10^5$ | $5,07 \cdot 10^5$ |
| 22.06.21 21:00 | 15,93 | $3,71 \cdot 10^5$ | $2,78 \cdot 10^5$ | $4,83 \cdot 10^5$ |
| 22.06.21 18:00 | 17,98 | $3,04 \cdot 10^5$ | $2,28 \cdot 10^5$ | $3,96 \cdot 10^5$ |
| 22.06.21 15:00 | 18,31 | $2,93 \cdot 10^5$ | $2,19 \cdot 10^5$ | $3,82 \cdot 10^5$ |
| 22.06.21 12:00 | 18,62 | $2,83 \cdot 10^5$ | $2,12 \cdot 10^5$ | $3,69 \cdot 10^5$ |
| Среднее значение за период наблюдения | | $3,23 \cdot 10^5$ | $2,42 \cdot 10^5$ | $4,20 \cdot 10^5$ |
| Мощность выброса трех ББ за период наблюдения | | $9,85 \cdot 10^5$ | | |

Полученные средние значения мощности выброса из каждого ББ расчетным методом (по основной модели) за рассматриваемые интервалы времени дают оценку суммарной активности поступившего в атмосферу трития из всех трех ББ на уровне $1,06 \cdot 10^{11}$ Бк; средняя мощность выброса из всех трех ББ Ростовской АЭС составила $9,85 \cdot 10^5$ Бк/с.

3.2. Верификация формулы расчета величин выбросов трития из брызгальных бассейнов Ростовской АЭС в атмосферный воздух

Для верификации модели расчета выбросов трития из ББ Ростовской АЭС по формуле (11) использованы теплофизические характеристики сред за рассматриваемый период времени (табл. 7). По данным табл. 7 рассчитаны значения интенсивности потерь воды в ББ за счет испарения (табл. 8).

В результате, зная содержание трития в воде каждого ББ (см. табл. 2), мы оценили его выброс при испарении воды за рассмотренный период на уровне $4,16 \cdot 10^9$ Бк для ББ1; $1,50 \cdot 10^9$ Бк для ББ2 и $7,60 \cdot 10^7$ Бк для ББ3. Суммарное количество трития, поступившего в атмосферу при испарении воды из всех трех ББ, составило $5,74 \cdot 10^9$ Бк. С учетом известного значения P_2 (1,5 %), а также данных о расходе воды в ББ ($3\,000 \text{ м}^3/\text{ч}$) и о содержании трития в воде каждого ББ были получены значения поступления трития в атмосферу при каплеуносе: $5,81 \cdot 10^{10}$ Бк из ББ1; $4,35 \cdot 10^{10}$ Бк из ББ2 и $7,56 \cdot 10^9$ Бк из ББ3. Суммарное количество трития, поступившего в атмосферу при каплеуносе воды из всех трех ББ, составило $1,09 \cdot 10^{11}$ Бк.

Общее количество поступившего в атмосферу трития при испарении воды (P_1) во всех трех ББ и каплеуносе воды (P_2) из всех трех ББ оценивается в $1,15 \cdot 10^{11}$ Бк.

Таблица 7. Теплофизические характеристики сред для расчета P_1 при испарении воды в ББ

| Дата, время | Температура воздуха, °С | Значение коэффициента K , %/°С | Перепад температур, °С | | |
|----------------|-------------------------|----------------------------------|------------------------|------|------|
| | | | ББ 1 | ББ 2 | ББ 3 |
| 23.06.21 15:00 | 33,1 | 0,154 | 0,7 | 0,1 | 0,1 |
| 23.06.21 12:00 | 31,9 | 0,153 | 0,9 | 0,2 | 0,0 |
| 23.06.21 09:00 | 26,6 | 0,147 | 0,7 | 0,3 | 0,1 |
| 23.06.21 06:00 | 24,1 | 0,144 | 0,7 | 0,4 | 0,1 |
| 23.06.21 03:00 | 25,4 | 0,146 | 0,6 | 0,5 | 0,2 |
| 23.06.21 00:00 | 25,9 | 0,146 | 0,5 | 0,5 | 0,2 |
| 22.06.21 21:00 | 30,2 | 0,151 | 0,6 | 0,5 | 0,2 |
| 22.06.21 18:00 | 32,3 | 0,153 | 0,8 | 0,3 | 0,1 |
| 22.06.21 15:00 | 31,7 | 0,153 | 0,8 | 0,3 | 0,2 |
| 22.06.21 12:00 | 29,9 | 0,151 | 0,8 | 0,4 | 0,1 |

Таблица 8. Потеря воды при испарении воды из ББ Ростовской АЭС

| Дата, время | Значение P_1 за интервал (Зч), % | | | Потеря воды на испарение за интервал (Зч), м ³ | | |
|---|------------------------------------|------|------|---|------|------|
| | ББ 1 | ББ 2 | ББ 3 | ББ 1 | ББ 2 | ББ 3 |
| 23.06.21 15:00 | 0,11 | 0,01 | 0,02 | 10,2 | 0,9 | 1,4 |
| 23.06.21 12:00 | 0,14 | 0,03 | 0,00 | 12,4 | 2,8 | 0,0 |
| 23.06.21 09:00 | 0,10 | 0,05 | 0,02 | 8,8 | 4,4 | 1,8 |
| 23.06.21 06:00 | 0,10 | 0,06 | 0,02 | 9,1 | 5,2 | 1,7 |
| 23.06.21 03:00 | 0,09 | 0,07 | 0,03 | 8,3 | 6,6 | 2,6 |
| 23.06.21 00:00 | 0,08 | 0,07 | 0,03 | 7,0 | 6,6 | 3,1 |
| 22.06.21 21:00 | 0,09 | 0,07 | 0,03 | 8,2 | 6,3 | 2,7 |
| 22.06.21 18:00 | 0,12 | 0,04 | 0,01 | 11,0 | 3,7 | 0,9 |
| 22.06.21 15:00 | 0,13 | 0,05 | 0,03 | 11,4 | 4,1 | 2,7 |
| 22.06.21 12:00 | 0,12 | 0,07 | 0,02 | 10,4 | 5,9 | 1,4 |
| Суммарное значение за период наблюдения | | | | 96,9 | 46,5 | 18,3 |

4. Обсуждение

Сравнение результатов в табл. 5 и 6 показывает, что предлагаемый расчетный алгоритм оценки мощности выброса трития из брызгальных бассейнов Ростовской АЭС является более консервативным, чем инструментальный метод, и на 5,6 % завышает значение мощности выброса. Консервативный характер расчетного алгоритма гарантированно обеспечивает безопасность для населения и окружающей среды при контроле выбросов трития из ББ Ростовской АЭС. Усреднение значений парциального давления водяных паров за весь период наблюдения не приводит к изменению результата оценки характеристики площадного источника выброса трития Ростовской АЭС.

Сравнение результатов оценок поступления трития в атмосферу из ББ Ростовской АЭС на основе инструментального метода и расчетных методов на основе

термодинамического подхода (формула Дальтона) и учет испарения с каплеуносом показал приемлемый уровень консерватизма расчетного подхода, предложенного в настоящей работе (табл. 9).

Таблица 9. Результаты оценки выброса трития из ББ различными методами

| Метод | Мощность выброса, Бк/с | Суммарная активность, Бк | Отличие мощности от инструментальной оценки, % |
|-------------------------------------|------------------------|--------------------------|--|
| Инструментальный | $9,33 \cdot 10^5$ | $1,01 \cdot 10^{11}$ | – |
| Расчетный | $9,85 \cdot 10^5$ | $1,06 \cdot 10^{11}$ | 5,6 |
| Верификация (испарение + каплеунос) | $1,06 \cdot 10^6$ | $1,15 \cdot 10^{11}$ | 13,6 |

Обоснованный алгоритм расчетного метода позволяет определить нижнюю границу контролируемого годового выброса трития из брызгальных бассейнов Ростовской АЭС для характерных метеоусловий каждого месяца (среднесуточная температура и относительная влажность воздуха). Минимальный контролируемый годовой выброс трития гипотетически может произойти при активности трития в воде каждого ББ ниже порога измерения (далее НПИ) применяемого метода (10 Бк/л). В этом случае в формуле (3) применяется значение удельной активности трития, равное $0,5$ НПИ (5 Бк/л). Для среднесуточной температуры воды 20 °С и среднесуточной относительной влажности воздуха 50 % минимальное контролируемое значение годовой активности выброса трития из брызгальных бассейнов Ростовской АЭС составит $5,53 \cdot 10^9$ Бк/год.

Установленные на момент проведения исследования нормативы выброса трития для трех ББ Ростовской АЭС составляли $4,89 \cdot 10^{13}$ Бк/год и $2,45 \cdot 10^{14}$ Бк/год для допустимого выброса (ДВ) и предельно допустимого выброса (ПДВ) трития за год соответственно. Предлагаемый расчетный метод позволяет регистрировать годовое поступление трития в атмосферу при охлаждении воды в брызгальных бассейнах на уровне $0,011$ % от установленного значения ДВ и $0,002$ % от установленного значения ПДВ. При фактическом выбросе трития из всех ББ Ростовской АЭС $2,86 \cdot 10^{12}$ Бк/год разработанный метод, с показанным минимальным контролируемым значением, обеспечивает контроль за поступлением трития, начиная с $0,2$ % реального поступления трития в атмосферу.

5. Выводы

Предложенный в настоящей работе расчетный алгоритм оценки мощности выброса трития из брызгальных бассейнов на основе фундаментальной термодинамической закономерности – формирования насыщенного водяного пара над поверхностью воды – является более консервативным, чем инструментальный метод на основе измерений объемной активности трития вблизи источников с учетом процессов его разбавления в приземной атмосфере. Результаты валидации показывают, что алгоритм примерно на 6 % завышает значение мощности выброса, и это дополнительно обеспечивает запас по уровню безопасности для населения и окружающей среды при контроле выбросов трития из ББ Ростовской АЭС. Верификация предложенного алгоритма указывает на то, что он учитывает формирование выброса трития из ББ как за счет испарения с поверхности струй и капель непосредственно на площади ББ, так и за счет испарения капель воды, унесенных за пределы площади ББ.

Расчетный метод многократно сокращает затраты на контроль поступления трития из ББ. На результаты расчетного метода не влияют важнейшие динамические

метеопараметры (скорость и направление ветра), определяющие количество и месторасположение точек отбора проб воздуха. Этот метод может быть использован для инвентаризации источников выбросов трития, обоснования нормативов выброса трития и контроля за соблюдением установленных нормативов выброса трития из ББ Ростовской АЭС, а также для контроля радиационной обстановки в районе расположения Ростовской АЭС. Допускается применение расчетного метода для оценки воздействия на окружающую среду паров воды, содержащих тритий, при испарении в процессе ее охлаждения в ББ энергоблока № 1 с реакторной установкой ВВЭР-1000 Ростовской АЭС.

Разработанный и подтвержденный экспериментально алгоритм расчета выбросов трития в атмосферный воздух из брызгальных бассейнов основан на климатических условиях, характерных для района размещения Ростовской АЭС. Применение данного алгоритма для других АЭС в полном объеме невозможно, так как эмпирический коэффициент в расчетной формуле специфичен для климатических условий района размещения Ростовской АЭС. Применение разработанного алгоритма в других климатических условиях потребует экспериментального определения значений эмпирического коэффициента на основе натурных измерений, аналогичных представленным в настоящей работе.

Минимальное контролируемое значение годового поступления трития в атмосферу при охлаждении воды в брызгальных бассейнах Ростовской АЭС, равное $5,53 \cdot 10^9$ Бк/год, гарантирует адекватный контроль за соблюдением установленных нормативов выбросов трития и подтверждение соблюдения условий радиационной безопасности при эксплуатации стационарных неорганизованных источников выброса трития.

6. Список литературы

1. Nuclear power and sustainable development // International Atomic Energy Agency. 2016. Vienna: IAEA.
2. Горин Н.В., Екидин А.А., Головихина О.С. Атомная энергетика в национальных проектах России // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. 2021. № 1. С. 5-15.
3. Санитарные правила проектирования и эксплуатации атомных станций. (СП АС-03) СанПиН 2.6.1.24-03. М.: 2003.
4. Курындин А.В., Шаповалов А.С., Тимофеев Н.Б. О методах выбора нормируемых радионуклидов и источников выброса при разработке нормативов предельно допустимых выбросов радиоактивных веществ в атмосферный воздух // Ядерная и радиационная безопасность. 2019. № 2 (92). С. 17-23.
5. Vasyanovich M., Vasilyev A., Ekinin A., Kapustin I., Kryshev A. Special monitoring results for determination of radionuclide composition of Russian NPP atmospheric releases // Nuclear Engineering and Technology. 2019. Vol. 51. No. 4. P. 1176-1179.
6. Vasyanovich M.E., Ekinin A.A., Vasilyev A.V., Kryshev A.I., Sazykina T.G., Kosykh I.V., Kapustin I.A. Determination of radionuclide composition of the Russian NPPs atmospheric releases and dose assessment to population // Journal of Environmental Radioactivity. 2019. Vol. 208-209. 106006.
7. Екидин А.А., Антонов К.Л., Васильев А.В., Васянович М.Е., 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.
8. Vasilyev A., Ekinin A., Vasyanovich M., Pyshkina M., Antonov K., Antushevskiy A., Semenov M., Murashova E. Conservative tritium exposure assessment in the

atmosphere from the spray ponds of the Balakovo NPP // Fusion Science and Technology. 2020. Vol. 76. No 4. С. 526-535.

9. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. ИТС 20-2016. Промышленные системы охлаждения. Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. Москва, бюро НДТ, 2016.
10. Зеликов В.В. Справочник инженера по отоплению, вентиляции и кондиционированию: Справочник / В.В. Зеликов. - М.: Инфра-Инженерия, 2011. - 624 с.
11. СП 50.13330.2012 «Свод правил. Тепловая защита зданий. Thermal performance of the buildings».
12. Методика разработки и установления нормативов предельно допустимых выбросов радиоактивных веществ в атмосферный воздух (ПДВ-2012). Зарегистрирована Министерством юстиции Российской Федерации от 18.01.2013 № 26595.
13. Руководство по безопасности. Рекомендуемые методы оценки и прогнозирования радиационных последствий аварий на объектах ядерного топливного цикла. РБ-134-17. ФБУ «НТЦ ЯРБ». 2017, Москва.
14. Пономаренко В.С., Арефьев Ю.И. Градирни промышленных и энергетических предприятий: Справочное пособие/ Под общ. ред. В. с. Пономаренко. М.: Энергоатомиздат: 1998. 376 с.
15. В.Н.Козин, Ю.И.Лазаренко, Н.Т.Наталюк, Б.А.Шиманский. Методические указания по предотвращению образования минеральных и органических отложений в конденсаторах турбин и их очистке. РД 34.22.501-87 «Союзтехэнерго».

Сведения об авторах:

Екидин Алексей Акимович, ИПЭ УрО РАН, к.ф.-м.н., в.н.с. г. Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 20, ekidin@mail.ru

Антонов Константин Леонидович, ИПЭ УрО РАН, к.ф.-м.н., с.н.с. г. Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 20

Васянович Максим Евгеньевич, ИПЭ УрО РАН, к.ф.-м.н., н.с. г. Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 20

Пышкина Мария Дмитриевна, ИПЭ УрО РАН, м.н.с. г. Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 20

Меркулов Александр Федорович, филиал АО «Концерн Росэнергоатом» «Ростовская атомная станция», начальник отдела радиационной безопасности, г. Волгодонск, Ростовская АЭС

Фоменко Павел Александрович, филиал АО «Концерн Росэнергоатом» «Ростовская атомная станция», заместитель начальника отдела радиационной безопасности, г. Волгодонск, Ростовская АЭС

SUBSTANTIATION OF THE METHOD FOR ASSESSING THE TRITIUM RELEASE INTO THE ATMOSPHERE WHEN COOLING WATER IN THE SPRAY PONDS OF THE ROSTOV NPP

A. A. Ekidin ¹, K. L. Antonov ¹, M. E. Vasyanovich ¹, M. D. Pyshkina ¹,
A.F. Merkulov ², P.A. Fomenko ²

¹ Institute of Industrial Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
Ekaterinburg, Russia

² Branch of JSC Rosenergoatom Concern Rostov Nuclear Power Plant,
Volgodonsk, Russia

In this paper, we substantiate the choice of a model for estimating the tritium release into the atmosphere during water cooling in the spray ponds of the Rostov NPP. The model is based on a fundamental thermodynamic regularity for water to form saturated water vapor above its surface. An empirical coefficient was confirmed experimentally that relates the intensity of tritium entry into the atmosphere with the activity of tritium in water, the area of spray pools, and the difference in partial pressures of saturated steam at water temperature and air temperature. For the climatic conditions of the Rostov NPP location, the value of the coefficient was 0.32 l/(m² h hPa). The method and procedure for calculating the release of tritium water from spray ponds into the atmosphere near the Rostov NPP allows you to quickly control the impact on the environment and guarantee the safety of the population. In the case of applying the algorithm for other climatic conditions (other nuclear power plants), it will be necessary to experimentally confirm the value of the empirical coefficient based on field measurements similar to those presented in this paper.

Key words: tritium, temperature, humidity, evaporation, activity, dilution factor

References

1. Nuclear power and sustainable development // International Atomic Energy Agency. 2016. Vienna: IAEA.
2. Gorin N.V., Ekidin A.A., Golovihina O.S. Nuclear Power Engineering as an Important Element of Russia's National Priority Projects. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Yadernaya energetika*. 2021. № 1. P. 5-15. (In Russian).
3. Sanitarnye pravila proektirovaniya i ekspluatacii atomnyh stancij. (SP AS-03) SanPiN 2.6.1.24-03. M.: 2003.
4. Kuryndin A.V., Shapovalov A.S., Timofeev N.B. On methods for selection of radioactive airborne discharge sources and radionuclides for which discharge limits shall be set. *Yadernaya i radiacionnaya bezopasnost'*. 2019. № 2 (92). P. 17-23. (In Russian).
5. Vasyanovich M., Vasilyev A., Ekidin A., Kapustin I., Kryshev A. Special monitoring results for determination of radionuclide composition of Russian NPP atmospheric releases. *Nuclear Engineering and Technology*. 2019. Vol. 51. No. 4. P. 1176-1179.
6. Vasyanovich M.E., Ekidin A.A., Vasilyev A.V., Kryshev A.I., Sazykina T.G., Kosykh I.V., Kapustin I.A. Determination of radionuclide composition of the Russian NPPs atmospheric releases and dose assessment to population. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2019. Vol. 208-209. 106006.
7. Ekidin A.A., Antonov K.L., Vasil'ev A.V., Vasyanovich M.E., et al. Assessment of tritium escape from atmosphere from the spray ponds of the Balakovo NPP in cold season. *Yadernaya i radiacionnaya bezopasnost'*, 2017, № 3(85). P. 35-46. (In Russian).
8. Vasilyev A., Ekidin A., Vasyanovich M., Pyshkina M., Antonov K., Antushevskiy A., Semenov M., Murashova E. Conservative tritium exposure assessment in the

atmosphere from the spray ponds of the Balakovo NPP. Fusion Science and Technology. 2020. Vol. 76. No 4. P. 526-535.

9. Informacionno-tehnicheskij spravochnik po nailuchshim dostupnym tekhnologiyam. ITS 20-2016. Promyshlennye sistemy ohlazhdeniya. Federal'noe agentstvo po tekhnicheskomu regulirovaniyu i metrologii. Moskva, byuro NDT, 2016. (In Russian).
10. Zelikov V.V. Spravochnik inzhenera po otopleniyu, ventilyacii i kondicionirovaniyu: Spravochnik. V.V. Zelikov. - M.: Infra-Inzheneriya, 2011. - 624 p. (In Russian).
11. SP 50.13330.2012 «Svod pravil. Teplovaya zashchita zdaniy. Thermal performance of the buildings». (In Russian).
12. Metodika razrabotki i ustanovleniya normativov predel'no dopustimyh vybrosov radioaktivnyh veshchestv v atmosfernyj vozduh (PDV-2012). Zaregistriravana Ministerstvom yusticii Rossijskoj Federacii ot 18.01.2013 № 26595. (In Russian).
13. Rukovodstvo po bezopasnosti. Rekomenduemye metody ocenki i prognozirovaniya radi-acionnyh posledstvij avarij na ob"ektah yadernogo toplivnogo cikla. RB-134-17. FBU «NTC YARB». 2017, Moskva. (In Russian).
14. Ponomarenko V.S., Aref'ev YU.I. Gradirni promyshlennyh i energeticheskikh predpriyatij: Spravochnoe posobie/ Pod obshch. red. V. s. Ponomarenko. M.: Enerroatomizdat: 1998. 376 p. (In Russian).
15. V.N.Kozin, Yu.I.Lazarenko, H.T.Natalyuk, B.A.Shimanskij. Metodicheskie ukazaniya po predotvrashcheniyu obrazovaniya mineral'nyh i organicheskikh otlozhenij v kondensatorah turbin i ih ochistke. RD 34.22.501-87 «Soyuztekhenergo». (In Russian).