

УДК 67.02, 608.2, 504.054, 504.3.054, 551.521.9, 629.039.58

## ОЦЕНКА ПОСТУПЛЕНИЯ ТРИТИЯ В АТМОСФЕРУ ИЗ БРЫЗГАЛЬНЫХ БАССЕЙНОВ БАЛАКОВСКОЙ АЭС В ХОЛОДНЫЙ ПЕРИОД

Екидин А.А., к.ф.-м.н. (ekidin@ecko.uran.ru), Антонов К.Л., к.ф.-м.н. (antonov@ecko.uran.ru),  
 Васильев А.В., к.т.н. (alexey.vasiljev@gmail.com), Васянович М.Е. (vasyanovich\_maks@mail.ru),  
 Пышкина М.А. (maria1pyshkina@gmail.com) (ИПЭ УрО РАН),  
 Курьиндин А.В., к.т.н. (kuryndin@secnrs.ru), Шаповалов А.С. (shapovalov@secnrs.ru)  
 (ФБУ «НТЦ ЯРБ»),  
 Антушевский А.С. (antalex1956@mail.ru), Семенов М.А. (semenovmw@mail.ru),  
 Мурашова Е.А. (katiy77mr@gmail.com) (ФГУП «ПО Маяк»),  
 Капустин И.А., к.х.н. (kapustin@bk.ru), Филатов И.Ю. (fiu@electrospinning.ru)  
 (ОАО «НИФХИ им. Л.Я. Карпова»)

*В настоящей работе представлены результаты оценки поступления трития из брызгальных бассейнов Балаковской АЭС в атмосферу в холодный период. Показано отличие условий формирования газоаэрозольного облака тритированной воды над поверхностью брызгальных бассейнов в холодный и теплый периоды года. Проведено сравнение возможных подходов к оценке интенсивности выбросов трития с поверхности брызгальных бассейнов. Выполнена оценка накопления трития в снежном покрове в районе расположения брызгальных бассейнов. Получена консервативная оценка облучения критической группы населения, показывающая необходимость нормирования выбросов трития из брызгальных бассейнов Балаковской АЭС.*

► **Ключевые слова:** тритий, температура, влажность, испарение, аэрозоль, выпадение, направление ветра, снег.

## ASSESSMENT OF ADMISSION OF TRITIUM INTO THE ATMOSPHERE FROM SPRAY COOLING PONDS BY BALAKOVO NPP IN COLD PERIOD OF TIME

Ekidin A., Ph. D., Antonov K., Ph. D., Vasiljev A., Ph. D., Vasyanovich M., Pyshkina M.  
 (Ural branch of Russian academy of sciences Institute of Industrial Ecology),  
 Kuryndin A., Ph.D., Shapovalov A. (SEC NRS),  
 Antushevskiy A., Semenov M., Murashova E. (FSUE «Mayak PA»),  
 Kapustin I., Ph. D., Philatov I. (JSC «Karpov Institute of Physical Chemistry»)

*The article provides results of assessment of airborne radiological releases of tritium from spray cooling ponds of Balakovo NPP during cold season. The differences in conditions of generation of tritiated water cloud near the surface of spray cooling ponds between cold and warm seasons are demonstrated. The results of comparison of reasonable approaches for assessment of intensity of tritium discharge from spray cooling ponds are provided as well. The issues of accumulation of tritium in snow cover near Balakovo NPP are addressed and demonstrated in article. Results of conservative assessments of radiological impact of the tritium discharges show that Balakovo NPP spray cooling ponds are source for which discharge limits shall be set and properly controlled.*

► **Key words:** tritium, temperature, humidity, vaporization, aerosol, deposition, wind direction, snow.

## Введение

После утверждения методики [1] подходы к нормированию выбросов радиоактивных веществ в атмосферный воздух претерпели существенные изменения. Так, если до 2012 г. принятой практикой для АЭС являлось нормирование ограниченного перечня радионуклидов ( $^{131}\text{I}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$ , ИРГ и  $^{24}\text{Na}$  (для реакторов БН-600) в выбросах организованных источников (вентиляционных трубах)), то новые подходы [1] диктуют необходимость нормирования именно тех радионуклидов, в отношении которых применяются меры государственного регулирования в области охраны окружающей среды [2], при этом критерием отбора нормируемых источников и радионуклидов является их значимость с точки зрения радиационного воздействия, что соответствует общепринятым международным подходам [3].

Примером, подтверждающим корректность новых подходов к нормированию и их ориентированность на обеспечение радиационной безопасности, являются брызгальные бассейны Балаковской АЭС, которые, как показано в [4], относятся к источникам выбросов (в том числе выбросов трития), подлежащим государственному учету и нормированию, для которых необходимо установление нормативов предельно допустимых выбросов.

### 1. Особенности поступления трития в атмосферу из брызгальных бассейнов в холодный (зимний) период

Брызгальные бассейны на Балаковской АЭС применяются для непрерывного охлаждения технологического оборудования ответственных потребителей I, II, III каналов систем безопасности энергоблоков. Открытая поверхность бассейнов, применение разбрызгивателей, высокое содержание трития в воде системы технического водоснабжения ответственных потребителей реакторного отделения создают условия поступления трития в атмосферу в процессе охлаждения в брызгальных бассейнах. Однако отсутствие достоверных данных о результатах долговременного мониторинга объемной активности трития в воздухе вблизи бассейнов не позволяет однозначно судить о значимости вклада в облучение населения и персонала выбросов трития из брызгальных бассейнов [4, 5].

Интенсивность поступления трития в атмосферу определяется удельной активностью трития в воде брызгальных бассейнов, интенсивностью

испарения воды при охлаждении и интенсивностью образования капель при их разбрызгивании. При этом поведение газоаэрозольного облака тритированной воды (НТО) в атмосфере над брызгальными бассейнами зависит от многих факторов, в том числе от продолжительности светлого времени суток, скорости и направления ветра, влажности воздуха, осадков, облачности, температуры воздуха.

По условиям эксплуатации брызгальных бассейнов и внешним условиям различаются два периода, влияющих на формирование газоаэрозольного облака НТО:

- теплый период года – с мая по октябрь включительно;
- холодный период года – с ноября по апрель включительно.

В теплый период года техническая вода поступает на сопла разбрызгивателей в брызгальном бассейне под давлением 1 кгс/м<sup>2</sup>, что приводит к образованию капель диаметром 1,5 – 1,8 мм. В холодный период предусматривается холостой сброс воды без разбрызгивания для обеспечения поддержания требуемого температурного режима потребителей. Визуальное различие холостого сброса в холодный период и разбрызгивание под давлением представлено на рис. 1.1.

В районе расположения Балаковской АЭС теплый и холодный периоды года существенно различаются метеорологическими параметрами. Указанные различия формируют в холодный период условия для меньшей интенсивности выброса трития по сравнению с условиями теплого периода.

### II. Оценка интенсивности испарения воды из брызгальных бассейнов

Для оценки поступления трития из брызгальных бассейнов в атмосферу консервативно принимается, что НТО испаряется так же, как и обычная вода (H<sub>2</sub>O). С учетом критических замечаний к оценке интенсивности испарения по объему восполнения воды в брызгальных бассейнах [5] в настоящей работе оценка интенсивности выброса трития получена двумя способами, условно названными:

- термодинамический – по разности парциальных давлений насыщенных паров воды над поверхностью бассейна и в атмосферном воздухе вне бассейна;
- теплофизический – по разности температур на входе и выходе воды из брызгального бассейна.

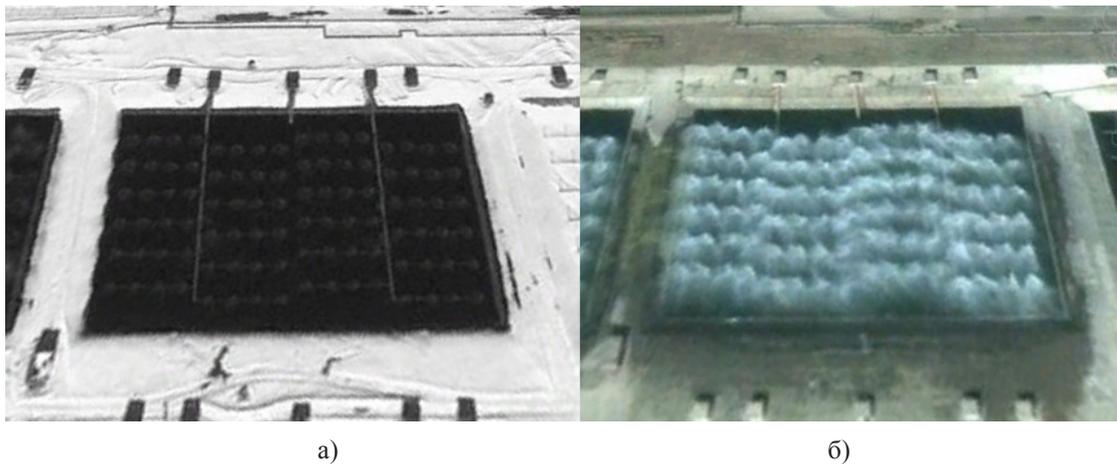


Рис. 1.1. Холостой сброс воды (а) и подача под давлением (б)

### 2.1. Термодинамический подход оценки интенсивности испарения воды в брызгальном бассейне

Термодинамический подход дает нижнюю границу из возможных оценок интенсивности испарения НТО, так как не учитывает потери воды с каплеуносом. Данный подход опирается:

- на метеорологические данные о температуре и об относительной влажности воздуха в окрестности брызгальных бассейнов;
- на расчетные данные о парциальном давлении насыщенных паров воды над поверхностью бассейна при температуре воздуха, равной температуре воды, поступающей в бассейны;
- на расчетные данные о парциальном давлении насыщенных паров воды в атмосферном воздухе вне бассейна.

Интенсивность парообразования ( $W$ ) может быть определена как на основании модифицированной формулы Дальтона [6], так и формулы Бязина-Крумме [7]. В первом случае интенсивность парообразования определяется как:

$$W = 30 \cdot S \cdot (P_b - P_l), \text{ г/ч}, \quad (2.1)$$

где:

$P_b$  – давление водяных паров насыщенного воздуха при температуре воды, поступающей в бассейн, гПа;

$P_l$  – парциальное давление водяных паров при температуре и относительной влажности воздуха по данным метеостанции, гПа;

$S$  – площадь брызгального бассейна, м<sup>2</sup>;

30 – эмпирический коэффициент, г/(м<sup>2</sup>·час·гПа).

$$W = \left( 0,118 + \frac{0,01995 \cdot 1,5 \cdot (P_b - P_l)}{1,333} \right) \cdot S, \text{ л/ч}, \quad (2.2)$$

где:

$P_b$  – давление водяных паров насыщенного воздуха при температуре воды, поступающей в бассейн, гПа;

$P_l$  – парциальное давление водяных паров при температуре и относительной влажности воздуха по данным метеостанции, гПа;

$S$  – площадь брызгального бассейна, м<sup>2</sup>;

1,5 – эмпирический коэффициент, л/(м<sup>2</sup>·час·гПа).

Для расчетов по формулам (2.1) и (2.2) в настоящей работе использованы результаты наблюдений метеорологических параметров (каждые 3 часа) [8]. Сравнение результатов расчетов интенсивности испарения на основании модифицированной формулы Дальтона и формулы Бязина-Крумме представлены на рис. 2.1.

Среднее расчетное значение интенсивности испарения из всех брызгальных бассейнов в холодный период составило 17,7 м<sup>3</sup>/ч и 18,0 м<sup>3</sup>/ч по модифицированной формуле Дальтона и Бязина-Крумме, соответственно.

В последующих расчетах поступления трития в атмосферу при испарении воды из брызгальных бассейнов использованы результаты оценок испарения по модифицированной формуле Дальтона. Расчет интенсивности испарения проведен для периода с 13.11.2016 по 03.02.2017. Начало этого интервала времени соответствует периоду формирования устойчивого снежного покрова, окончание интервала соответствует дате отбора проб снега в районе расположения брызгальных бассейнов. Оценка суммарного значения испарившейся воды из всех брызгальных бассейнов за 82 дня в период с 13.11.2016 по 03.02.2017 составила 34 874 м<sup>3</sup>.



Рис. 2.1. Оценка интенсивности испарения воды из брызгальных бассейнов в холодный период по формулам (2.1) и (2.2)

### 2.2. Теплофизический подход оценки интенсивности испарения воды в брызгальном бассейне

Теплофизический подход консервативно предполагает, что вода в брызгальном бассейне остывает только за счет затрат энергии на испарение воды. При этом не учитывается потеря тепла в результате теплопередачи материалам конструкции бассейна и трубопроводам, не учитывается потеря тепла от излучения. Для таких условий тепло, затраченное на испарение воды, можно определить из уравнения баланса, связывающего изменение температуры с изменением массы воды (2.3):

$$dT = \frac{r}{c} \cdot \frac{dm}{m} = \frac{r}{c} d(\ln m), \quad (2.3)$$

где:

$r$  – скрытая теплота испарения, Дж/моль;

$c$  – теплоемкость воды, Дж/(кг·градус);

$T$  – температура воды, °С;

$m$  – масса воды, кг.

Дифференциальное уравнение (2.3) имеет решение вида:

$$\frac{r}{c} d(\ln m) = T + const \quad (2.4)$$

Для начального нагретого состояния ( $T = T_0$  и  $m = m_0$ ):

$$\frac{r}{c} d(\ln m_0) = T_0 + const. \quad (2.5)$$

Вычитая из уравнения (2.4) уравнение (2.5), получаем:

$$\Delta T = T - T_0 = \frac{r}{c} \ln \frac{m}{m_0} = \frac{r}{c} \ln \left( 1 + \frac{\Delta m}{m_0} \right). \quad (2.6)$$

Зная изменение температуры в брызгальном бассейне, консервативно можно оценить интенсивность испарения:

$$\Delta m = m_0 \left[ e^{\left( \frac{\Delta T \cdot c}{r} \right)} - 1 \right]. \quad (2.7)$$

Теплофизический подход дает заведомо завышенные оценки интенсивности испарения, не достижимые в реальных условиях. Расчеты по формуле (2.7) показали, что среднее значение интенсивности испарения воды с поверхности одного брызгального бассейна составляет 6 311 кг/ч, 6 081 кг/ч, 2 855 кг/ч, соответственно, в каналах системы безопасности 1, 2 и 3. При такой интенсивности испарения суммарное количество воды, испарившейся из всех брызгальных бассейнов за 82 дня в период с 13.11.2016 по 03.02.2017, составило 60 010 м³.

Сравнение результатов термодинамического и теплофизического подходов оценки интенсивности испарения из брызгальных бассейнов представлено на рис. 2.2.

Использование теплофизического подхода к оценке интенсивности испарения и оценки суммарного объема испарившейся воды приводит к завышению результатов в среднем в 2 раза по

сравнению с аналогичными оценками, полученными с применением термодинамического подхода. Реальные значения испарившейся воды из всех брызгальных бассейнов за 82 дня в период с 13.11.2016 по 03.02.2017 находятся в интервале от 34 874 м<sup>3</sup> до 60 010 м<sup>3</sup>. Принимая площадь поверхности воды в одном бассейне при холостом сбросе в холодный период равной 6 700 м<sup>2</sup>, можно оценить среднюю интенсивность испарения с одного квадратного метра значением в диапазоне от 0,44 кг/(м<sup>2</sup>·ч) до 0,76 кг/(м<sup>2</sup>·ч).

### III. Оценка интенсивности поступления трития в атмосферу при испарении воды из брызгальных бассейнов

Данные радиационного контроля содержания трития в воде брызгальных бассейнов и полученные оценки испарения воды позволяют рассчитать интенсивность поступления трития в атмосферу за период с 13.11.2016 по 03.02.2017. На рис. 3.1 представлены результаты оценки интенсивности поступления трития в атмосферу при испарении воды из брызгальных бассейнов I канала системы безопасности.

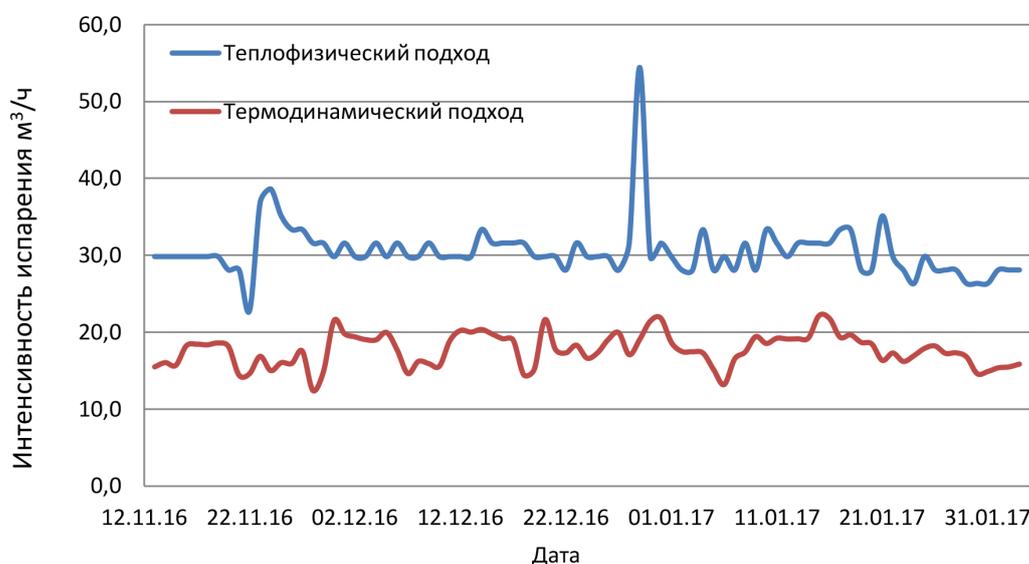


Рис. 2.2. Результаты оценки интенсивности испарения из брызгальных бассейнов

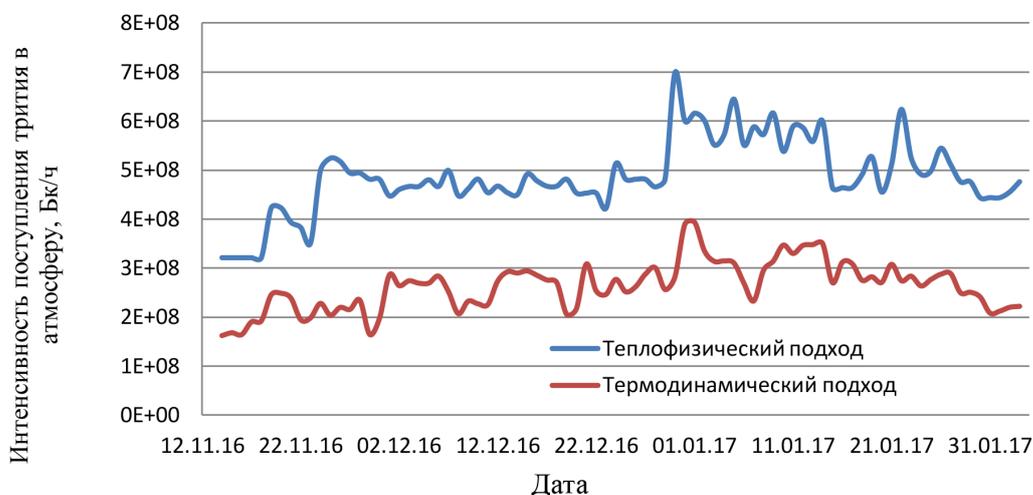


Рис. 3.1. Интенсивность поступления трития в атмосферу при испарении воды из брызгальных бассейнов

Средние значения интенсивности выброса трития при испарении воды из брызгальных бассейнов всех каналов системы безопасности за рассматриваемый период оценены величинами  $2,66 \cdot 10^8$  Бк/ч (термодинамический подход) и  $4,91 \cdot 10^8$  Бк/ч (теплофизический подход). Реальное значение суммарной активности трития, поступившего в атмосферу при испарении воды из всех брызгальных бассейнов за 82 дня в холодный период, находится в интервале от  $5,23 \cdot 10^{11}$  Бк до  $9,67 \cdot 10^{11}$  Бк.

#### IV. Оценка выпадения трития, поступившего в атмосферу при испарении воды из брызгальных бассейнов

В холодный период из брызгальных бассейнов тритированная вода поступает в атмосферу в газообразном виде. Начальная температура формирующегося облака паров тритированной воды выше температуры окружающего воздуха. При охлаждении часть газообразной тритированной воды создаст аэрозоли. За счет сухого осаждения и «вымывания» снегом аэрозольная фракция будет удаляться из атмосферы и накапливаться в снежном покрове, газообразная же фракция будет распространяться в атмосфере под действием метеорологических условий.

Оценка активности трития, накопленного в снегу за период устойчивого снежного покрова, позволяет определить доли аэрозольной и газообразной фракций НТО, поступившей в атмосферу

при испарении воды из брызгальных бассейнов. В период исследований время накопления активности трития в снежном покрове в районе расположения брызгальных бассейнов составило 82 дня с 13 ноября 2016 г. (начало накопления снега в виде устойчивого покрова) по 03 февраля 2017 г. (произведение отбора проб снега).

Для оценки запасов трития, накопленного в снежном покрове в районе размещения брызгальных бассейнов, выбраны пробные площадки с учетом повторяемости направлений и скорости ветра. Преимущественное направление распространения облака газоаэрозольной смеси НТО в период устойчивого снежного покрова наблюдалось вдоль румба восток-северо-восток (рис. 4.1).

Отбор проб снега выполнен на 17 пробных площадках, ориентированных по румбам относительно условного центра территории размещения брызгальных бассейнов. На каждой пробной площадке отбирался керн от поверхности снега до земли. Площадь каждого керна составляла  $0,0441 \text{ м}^2$ . Высота каждого керна фиксировалась в полевом журнале. При отборе каждая проба помещалась в полиэтиленовый пакет и доставлялась в теплое помещение лаборатории внешнего радиационного контроля Балаковской АЭС в г. Балаково. Для каждой пробы в лаборатории определялся объем воды, образованной после полного таяния снега. Расположение пробных площадок представлено на рис. 4.2.

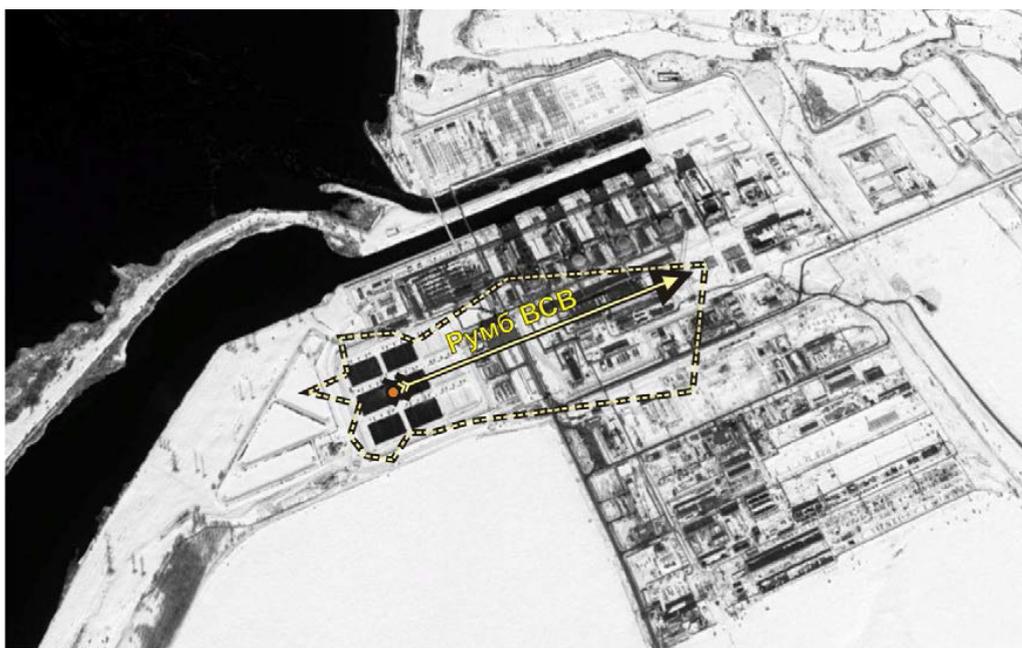


Рис. 4.1. Направление преимущественного распространения газоаэрозольной смеси НТО, поступающей в атмосферу при испарении воды брызгальных бассейнов

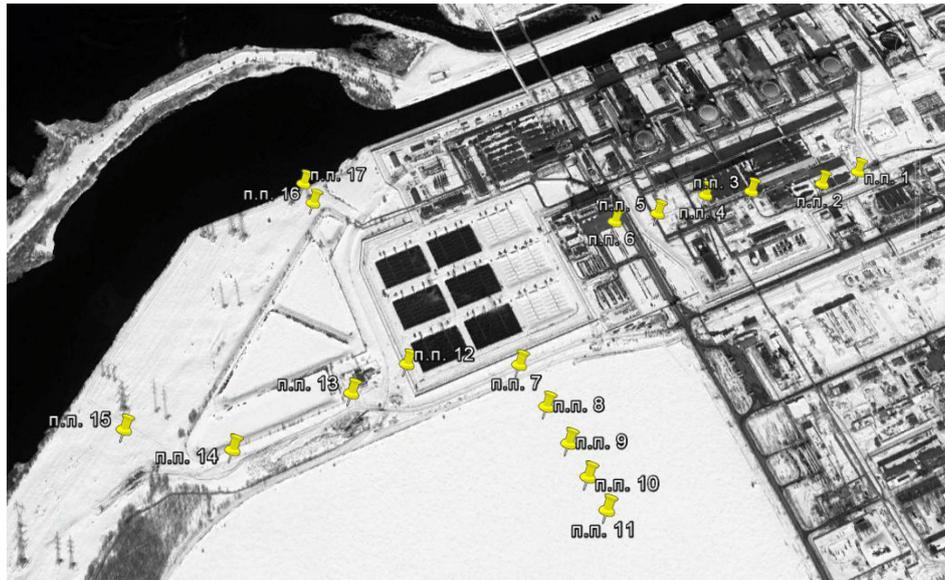


Рис. 4.2. Площадки отбора проб снега 03.02.2017

Для определения удельной активности трития из каждого образца талой воды отбиралась проба объемом 100 мл. Измерение трития выполнялось методом жидкостной сцинтилляционной спектрометрии. Поверхностная плотность активности (кБк/м<sup>2</sup>) рассчитывалась путем деления суммарной активности пробы, равной произведению удельной активности на объем талой воды, на площадь зерна (0,0441 м<sup>2</sup>). Удельные активности каждой пробы корректировались на фоновые значения, полученные 03.03.2009 в контрольной точке п. Маянга в 17 км от г. Балаково в юго-западном направлении – 5,9 Бк/л. Результаты расчетов поверхностной плотности активности трития использовались для построения модели пространственного распределения плотности загрязнения снега тритием.

Пространственное распределение плотности загрязнения снега тритием (кБк/м<sup>2</sup>) вокруг источника выбросов оценивалось для двух модельных участков – сектора с углом 45° в направлении преимущественного распространения газоаerosольного облака НТО (румб ВСВ) и сектора 315° во всех остальных направлениях. Анализ показал, что для обоих участков наилучшую аппроксимацию результатов пробоотбора дает экспоненциальная зависимость содержания трития ( $y(x)$ , кБк/м<sup>2</sup>) от расстояния ( $x$ , км) до источника выброса:

$$y(x) = e^{(b_0 + b_1 \cdot x)}, \quad (4.1)$$

где  $b_0$  и  $b_1$  – коэффициенты линейной регрессии для переменной  $\ln\{y(x)\}$  (рис. 4.3).

Качество аппроксимации оценивалось по коэффициенту детерминации  $R^2$ . Отметим, что

для модельного сектора 315° оценка зависимости  $y(x)$  проведена по направлению ЮЮВ, содержащему наибольшее количество точек пробоотбора.

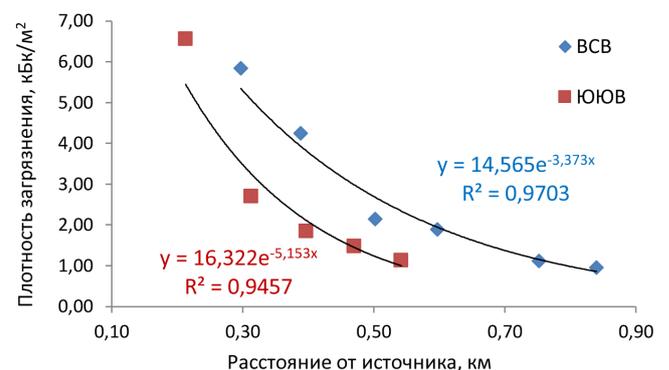


Рис. 4.3. Содержание трития в снежном покрове (кБк/м<sup>2</sup>) в зависимости от расстояния (км) от источника выбросов (брызгальных бассейнов)

На основе найденных функций  $y(x)$  в направлениях ВСВ и ЮЮВ от источника авторами вычислен запас трития ( $I$ ) в снежном покрове в интервале 0,2 – 2,0 км с помощью формулы, примененной ранее для оценки интегральных запасов радионуклидов в почвах головной части Восточно-Уральского радиоактивного следа [9]:

$$I = 2\pi \cdot \frac{\Phi}{360} \cdot \int_{0,2}^{2,0} x \cdot e^{(b_0 + b_1 \cdot x)} dx, \text{ ГБк.} \quad (4.2)$$

Результаты расчетов представлены в таблице.

### Результаты оценки запасов трития в границах модельных секторов

Параметр	Направление (румб)			Сумма
	ВСВ	ЮЮВ	Остальные румбы	
Сектор, град	45	45	270	360
Площадь, кв.км	1,56	1,56	9,33	12,44
$b_0$	2,6789	2,7925		
$b_1$	-3,3734	-5,1530		
$R^2$	0,97	0,95		
Запас (ГБк)	0,848	0,350	2,097	3,296

Доля выпавшего трития от суммарного выброса в атмосферу при испарении из брызгальных бассейнов составила:

- 0,6 % при термодинамическом подходе (3,296 ГБк/523 ГБк);
- 0,3 % при теплофизическом подходе (3,296 ГБк/967 ГБк).

Оценка показала, что в холодный период практически весь тритий, поступивший в атмосферу при испарении из брызгальных бассейнов, рассеивается в газообразной форме, не подвергаясь влажному вымыванию и сухому осаждению.

#### V. Оценка радиационного воздействия НТО на критическую группу населения за счет поступления трития без учета рассеивания

Для неорганизованного площадного источника выбросов трития расчетными методами затруднительно определить объемную активность в источнике без разбавления, поэтому в настоящем исследовании выполнены расчеты объемной активности, фактора разбавления и оценка облучения на границе брызгальных бассейнов для холодного периода.

Расчет рассеивания трития, поступившего в атмосферу при испарении воды из брызгальных бассейнов, проводился по методике [10]. На основе доступных метеорологических данных, соответствующих периоду пробоотбора с 13.11.2016 по 03.02.2017, была сформирована матрица повторяемости метеорологических условий, включающая совместную реализацию направления ветра  $\varphi_n$  (в  $n$ -м румбе), категории устойчивости пограничного слоя атмосферы (градация  $j$ ) и модуля скорости ветра  $U_k$  (градация  $k$ ). Временные ряды содержали 664 значения для каждого метеорологического параметра (периодичность – 1 раз в 3 часа) [8].

Среднегодовой метеорологический фактор разбавления на расстоянии  $x$  от неорганизованного площадного источника выбросов, который в рамках настоящей методики предлагается моделировать в виде квадрата со стороной  $2 \cdot a$ , м, в направлении ветра  $n$ -го румба, рассчитывается по формуле из [10] и [11]:

$$\bar{G}_n^r = \sum_j \sum_k \int_{-a}^a \frac{\omega_{n,j,k}}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_{j,z} (x - \zeta) \cdot u_k \cdot S} \cdot P_j(x - \zeta) d\zeta, \tag{5.1}$$

где:

$S$  – площадь поверхности площадного источника, равная  $4 \cdot a^2$ , м<sup>2</sup>;

$a$  – половина длины стороны площадного источника, м;

$x$  – расстояние от центра площадного источника вдоль направления ветра, не превышающее  $5,093 \cdot a$ , м;

$\zeta$  – переменная интегрирования, м.

Брызгальные бассейны рассматривались как неорганизованный приземный площадной источник со стороной  $a = 150$  м.

$P_j$  – функция, определяемая следующей формулой:

$$P_j(x) = \sum_{l=-2}^2 \left[ \exp\left(-\frac{(2 \cdot l \cdot H - z)^2}{2 \cdot \sigma_{j,z}^2(x)}\right) + \exp\left(-\frac{(2 \cdot l \cdot H + z)^2}{2 \cdot \sigma_{j,z}^2(x)}\right) \right], \tag{5.2}$$

где:

$H$  – высота слоя перемешивания, м;

$z$  – высота над поверхностью земли, которую рекомендуется принимать равной 1 м;

$l$  – переменная суммирования;

$\sigma_{jz}$  – вертикальная дисперсия струи, которая рассчитывается по формулам Смита-Хоскера [10] следующим образом:

$$\sigma_z(x) = \begin{cases} f(z_0, x) \cdot g(x) \text{ при } f(z_0, x) \cdot g(x) < \sigma \\ \sigma_z^{max} \text{ при } f(z_0, x) \cdot g(x) > \sigma_z^{max} \end{cases}, \quad (5.3)$$

$$f(z_0, x) = \begin{cases} \ln \left[ c_1 \cdot x^{d_1} \cdot \left( 1 + \frac{1}{c_2 \cdot x^{d_2}} \right) \right] \text{ при } z_0 > 0,1 \\ \ln \left[ \frac{c_1 \cdot x^{d_1}}{1 + c_2 \cdot x^{d_2}} \right] \text{ при } z_0 \leq 0,1, \end{cases} \quad (5.4)$$

$$g(x) = \frac{a_1 \cdot x^{b_1}}{1 + a_2 \cdot x^{b_2}}, \quad (5.5)$$

Значение параметров  $a_1, a_2, b_1, b_2$  в зависимости от категории устойчивости атмосферы и  $c_1, c_2, d_1, d_2$  в зависимости от коэффициента шероховатости предложены в работе [12].

Расчет объемной активности в приземном слое атмосферы выполнен согласно [13] по формуле:

$$A_V^{НТО} = q \cdot \overline{G}_n^r, \quad (5.6)$$

где  $q$  – мощность выброса, Бк/с.

На границе брызгальных бассейнов объемная активность трития в приземном слое в направлении различных румбов будет составлять:

- при термодинамическом подходе в диапазоне от 1 до 5 Бк/м<sup>3</sup>;
- при теплофизическом подходе от 2 до 10 Бк/м<sup>3</sup>.

Эффективная доза облучения населения за счет поступления трития ингаляционно, перорально и

через кожные покровы без учета рассеивания рассчитывается по формуле [11] и [14]:

$$E = A_V \cdot k \cdot t, \quad (5.7)$$

где:

$A_V$  – объемная активность НТО, приходящаяся на 1 л паров воды в воздухе, Бк/л;

$k$  – дозовый коэффициент, Зв·л/Бк·с (для НТО  $k = 8,25 \cdot 10^{-16}$ , Зв·л/Бк·с) [11] и [14];

$t$  – время облучения, с.

Объемная активность НТО, приходящаяся на 1 л паров воды в воздухе, может быть найдена по формуле:

$$A_V = \frac{A_V^{НТО}}{f_{возд}}, \quad (5.8)$$

где:

$A_V^{НТО}$  – объемная активность НТО, Бк/м<sup>3</sup>;

$f_{возд}$  – абсолютная влажность воздуха, л/м<sup>3</sup>.

Эффективная доза облучения населения может быть найдена согласно формуле:

$$E = \frac{\overline{G}_n^r \cdot Q}{f_{возд}} \cdot k \cdot t. \quad (5.9)$$

Мощность источника составила от  $7,39 \cdot 10^4$  до  $1,36 \cdot 10^5$  Бк/с на основании оценок с использованием термодинамического и теплофизического подходов, соответственно. Абсолютная влажность воздуха была усреднена для каждого румба за период наблюдения. Значения эффективной дозы облучения критической группы населения без учета рассеивания на границе брызгальных бассейнов представлены на рис. 5.1.

За рассмотренный период максимальная оценка эффективной дозы облучения критической группы населения в холодный период на границе брызгальных бассейнов получена в направлении восточного румба и составляет:

- 16 мкЗв – при термодинамическом подходе;
- 30 мкЗв – при теплофизическом подходе.

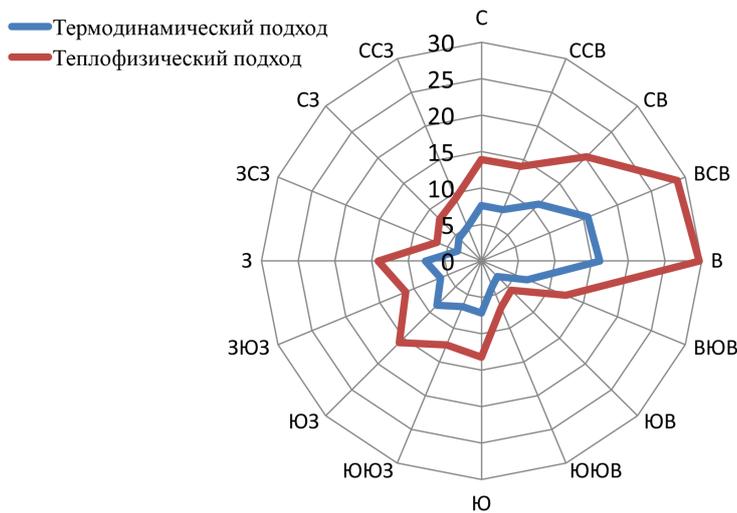


Рис. 5.1. Эффективная доза облучения критической группы населения без учета рассеивания

### Заключение

Режим эксплуатации брызгальных бассейнов и метеорологические параметры в холодный период обуславливают меньшую интенсивность выброса трития в сравнении с условиями теплого периода.

Нижняя оценка количества испарившейся воды за рассмотренный период составила  $34\,874\text{ м}^3$ , а верхняя –  $60\,010\text{ м}^3$ . Это соответствует суммарной активности трития, поступившей в атмосферу при испарении воды из всех брызгальных бассейнов в интервале от  $5,23 \cdot 10^{11}$  Бк до  $9,67 \cdot 10^{11}$  Бк. Мощность неорганизованного источника составила от  $7,39 \cdot 10^4$  до  $1,36 \cdot 10^5$  Бк/с согласно термодинамическому и теплофизическому подходам соответственно.

В холодный период выбросы трития рассеиваются в газообразной форме, не подвергаясь влажному вымыванию и сухому осаждению, только от 0,3 % до 0,6 % активности трития, поступившего в

атмосферу при испарении из брызгальных бассейнов, накапливается в снежном покрове.

Поскольку для неорганизованного площадного источника выбросов трития расчетными методами невозможно определить объемную активность в источнике без разбавления, оценка облучения выполнена на границе брызгальных бассейнов. Максимальная оценка эффективной дозы облучения критической группы населения в холодный период получена в направлении восточного румба. При термодинамическом подходе эта величина составляет 16 мкЗв, а при теплофизическом подходе – 30 мкЗв.

Таким образом, результаты выполненной работы подтверждают выводы [4] о том, что брызгальные бассейны Балаковской АЭС являются нормируемым источником выбросов, для которых необходимо установление нормативов предельно допустимых выбросов.

### Список литературы

1. Методика разработки и установления нормативов предельно допустимых выбросов радиоактивных веществ в атмосферный воздух, утвержденная приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 07.11.2012 № 639.
2. Перечень загрязняющих веществ, в отношении которых применяются меры государственного регулирования в области охраны окружающей среды, утвержденный распоряжением Правительства Российской Федерации от 08.07.2015 № 1316-р.
3. Safety guide № WS-G-2.3 Regulatory control of radioactive discharges to the environment, IAEA, Vienna, 2001.
4. Строганов А.А., Курындин А.В., Шаповалов А.С. О радиационном воздействии выбросов брызгальных бассейнов атомных станций. Ядерная и радиационная безопасность, № 4 (74), 2014.

5. Барчуков В.Г., Кочетков О.А., Фомин Г.В., Кабанов Д.И., Иванов Е.А. Распространение трития и его соединений воздушным путем при нормальных условиях эксплуатации Балаковской АЭС. АНРИ, № 1, 2016.
6. VDI 2089 Blatt 3:2000-07 Technische Gebäudeaus- rüstung von Schwimmbädern; Freibäder (Building installations in swimming baths; Open air pools).
7. Зеликов В.В. Справочник инженера по отоплению, вентиляции и кондиционированию. – М., Инфра-Инженерия, 2011.
8. Архив погоды [Электронный ресурс] / ООО «Расписание погоды». – URL: <http://rp5.ru>. – (Дата обращения: 05.02.2017).
9. Molchanova I., Mikhailovskaya L., Antonov K., et al. Current assessment of integrated content of long-lived radionuclides in soils of the head part of the East Ural Radioactive Trace. J. Environ. Radioact. 2014, vol. 138.
10. Методика. Разработка и установление нормативов предельно допустимых выбросов радиоактивных веществ атомных станций в атмосферный воздух. МТ 1.2.1.15.1176-2016.: утверждена АО «Концерн Росэнергоатом» от 29.12.2016 № 9/1786-П.
11. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии. Рекомендуемые методы расчета параметров, необходимых для разработки и установления нормативов предельно допустимых выбросов радиоактивных веществ в атмосферный воздух. РБ-106-15.: утверждено приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 11.11.2015 № 458.
12. HPA-RPD-058. The Methodology for Assessing the Radiological Consequences of Routine Releases of Radionuclides to the Environment Used in PC-CREAM 08 / Health Protection Agency. Radiation Protection Division. Chilton, Didcot, Oxfordshire, 2015.
13. Гусев Н.Г., Беляев В.А. Радиоактивные выбросы в биосфере: Справочник. – 2-е изд., перераб. и доп. – М., Энергоатомиздат, 1991.
14. Safety Reports Series №19 Generic models for use in assessing the impact of discharges of radioactive substances to the environment, IAEA, Vienna, 2001.

#### References

1. Methodology for Development and Establishment of Radioactive Substances Maximum Permissible Atmospheric Discharge Limits approved by the Order of the Federal Environmental, Industrial and Nuclear Supervision Service No.639 of 07.11.2012.
2. List of Pollutants Subject to State Regulation in the Field of Environmental Protection, approved by the Decree of the RF Government No.1316-r of 08.07.2015.
3. Safety guide No.WS-G-2.3 Regulatory Control of Radioactive Discharges to the Environment, IAEA, Vienna, 2001.
4. Stroganov A.A., Kuryndin A.V., Shapovalov A.S. The Radiation Exposure due to Discharges of Nuclear Power Plants Spray Ponds. “Nuclear and Radiation Safety” Periodical, No.4 (74), 2014.
5. Barchukov V.G., Kochetkov O.A., Fomin G.V., Kabonov D.I., Ivanov E.A. Propagation of Tritium and its Compounds by Air under Normal Operation Conditions of the Balakovo NPP. ASEP, No.1, 2016.
6. VDI 2089 Blatt 3:2000-07 Technische Gebäudeaus- rüstung von Schwimmbädern; Freibäder (Building installations in swimming baths; Open air pools).
7. Zelikov V.V. Heating, Ventilation and Air Conditioning Engineers’ Handbook. – Moscow, Infra-Engineering, 2011.
8. Weather Forecast Archive [Internet Information Resource] / LLC “Raspisaniye Pogody”. – URL: <http://rp5.ru>. – (on the date: 05.02.2017).
9. Molchanova I., Mikhailovskaya L., Antonov K., et al. Current Assessment of Integrated Content of Long-Lived Radionuclides in Soils of the Head Part of the East Ural Radioactive Trace. J. Environ. Radioact. 2014, vol. 138.
10. Methodology. Development and Establishment of NPP Radioactive Substances Maximum Permissible Atmospheric Discharge Limits. МТ 1.2.1.15.1176-2016.: approved by JSC “Concern Rosenergoatom” No.9/1786-P of 29.12.2016.

11. Safety Guide in Atomic Energy Use. Recommended Methods of Parameters Calculation which are Necessary to Prepare and Establish Permissible Limits of Radioactive Substances Discharges into Atmosphere” RB-106-15.: approved by Order of the Federal Environmental, Industrial and Nuclear Supervision Service No. 458, dated of 11.11.2015.

12. HPA-RPD-058. The Methodology for Assessing the Radiological Consequences of Routine Releases of Radionuclides to the Environment Used in PC-CREAM 08 / Health Protection Agency. Radiation Protection Division. Chilton, Didcot, Oxfordshire, 2015.

13. Gusev N.G., Belyaev V.V. Handbook of Radioactive Emissions in the Biosphere. – Rev. 2, updated and ammended. – Moscow, Energoatomizdat, 1991.

14. Safety Reports Series №19 Generic Models for Use in Assessing the Impact of Discharges of Radioactive Substances to the Environment, IAEA, Vienna, 2001.

