

Распространение трития и его соединений воздушным путем при нормальных условиях эксплуатации Балаковской АЭС

В статье рассматриваются итоги натурных исследований распространения трития и его соединений из вентиляционной трубы (ВТ) реакторных залов и брызгальных бассейнов (ББ) 1 – 4 блоков Балаковской АЭС в санитарно-защитной зоне станции и зоне наблюдения (ЗН). Показано, что основной вклад в формирование эффективной дозы от трития и его соединений у населения вносят выбросы из ВТ. В ЗН присутствие трития и его соединений, в основном, обусловлено выбросами из ВТ.

Ключевые слова: тритий, оксид трития, органически связанный тритий, брызгальные бассейны, выбросы трития, объемная активность трития в воздухе ЗН.

В.Г.Барчуков, О.А.Кочетков, Г.В.Фомин, Д.И.Кабанов (ФГБУ ГНЦ РФ ФМБЦ им.А.И.Бурназяна ФМБА России, г.Москва), Е.А.Иванов (АО «ВНИИАЭС», г.Москва)

Введение. Современные АЭС – это высокотехнологичные и безопасные установки. Системы безопасности атомных станций позволяют свести к минимуму воздействие ионизирующего излучения на персонал и население, проживающее вблизи этих объектов. При этом основным источником воздействия на население являются выбросы и сбросы, которые неизбежны при работе АЭС. Системы защиты на АЭС позволяют максимально уловить образующиеся радионуклиды. Исключение составляют радиоизотоп водорода тритий (^3H , $T_{1/2} = 12,3$ лет) и радиоизотоп углерода – радиоуглерод (^{14}C , $T_{1/2} = 5730$ лет).

В настоящей статье обсуждаются отдельные аспекты формирования загрязнения атмосферного воздуха за счет выбросов трития с АЭС. Аналогичные вопросы, обусловленные выбросами

радиоуглерода с АЭС требуют отдельного рассмотрения.

Существующие методы очистки технологических сред АЭС от трития трудоемки, дорогостоящи и малоэффективны, что обуславливает практически беспрепятственное его поступление с АЭС в окружающую среду. При этом атомы трития, заменяя водород в молекулах водорода, способствуют образованию тритированного газа (НТ), в молекулах воды формируют образование оксида трития (НТО), в органических молекулах способствуют образованию органически связанного трития (ОСТ). Особенностью этих соединений является то, что они имеют различные степени биологической опасности для человека. Наименее опасным является тритий в газообразном состоянии, а наиболее опасным – в органических соединениях, особенно в форме тимидина [1].

С учетом отмеченных обстоятельств, мировое сообщество уде-

ляет пристальное внимание анализу образования трития при работе АЭС. Надзорные органы ведущих стран мира, развивающих ядерную энергетику, требуют учета поступления трития с выбросами и сбросами АЭС в окружающую среду, которые, в зависимости от типа, мощности, способа регулирования реактивности реакторной установки и др., как правило, варьируют от нескольких единиц до нескольких десятков ТБк в год.

Так, например, в 2010 г. годовое поступление трития с АЭС Франции со сбросами составляло от 5,9 ТБк до 55,2 ТБк, а с выбросами от 0,075 ТБк до 1,41 ТБк – в зависимости от типа станции [2].

Расчеты показывают, что при эксплуатации АЭС с ВВЭР-1000 ежегодное поступление трития и его соединений в атмосферу составляет более 50 ТБк/ГВт(эл.) [3].

На ряде АЭС с ВВЭР-1000 проекта В-320 (Балаковская (энер-

гоблоки №1–4), Ростовская (энергоблоки №1–3), Калининская (энергоблоки №3–4) АЭС) предусмотрено поступление очищенных дебалансных вод, содержащих тритий, в брызгальные бассейны (ББ), используемые для непрерывного охлаждения технологического оборудования ответственных потребителей I, II, III каналов систем безопасности. В силу указанного обстоятельства, ББ являются источниками поступления трития в атмосферный воздух.

По расчетным данным [4] суммарное годовое поступление (унос с паром и капельный унос) трития в атмосферный воздух из ББ Калининской АЭС (в настоящее время сброс дебалансных вод осуществляется на полигон глупинского захоронения) составляет $1,87 \cdot 10^{-4}$ ТБк, Ростовской АЭС – 7,31 ТБк, Балаковской АЭС – 67 ТБк (по данным специалистов Балаковской АЭС – 14 ТБк).

В работе [4], исходя из указанных выше значений, принятых модельных представлений о процессах распространения радионуклидов в окружающей среде и формировании дозы облучения населения, получено, что за пределами промплощадок Балаковской АЭС и Ростовской АЭС, согласно оценкам, годовые эффективные дозы облучения населения многократно превышают минимально значимую дозу (10 мкЗв/год), установленную в НРБ-99/2009 и ОСПОРБ-99/2010 в качестве нижней границы дозового критерия при оптимизации радиационной защиты населения.

Такой вывод следует признать достаточно революционным, так как он означает, что основным источником облучения населения от выбросов нормально эксплуатируемых Балаковской АЭС и Ростовской АЭС являются не организованные выбросы радионукли-

дов из венттруб (ВТ) реакторных отделений, а брызгальные бассейны (ББ). При этом оценки дозы облучения от выбросов ББ Балаковской АЭС и Ростовской АЭС, согласно [4], на два порядка превышают соответствующие оценки дозы от фактических выбросов нормируемых радионуклидов из ВТ этих станций.

С нашей точки зрения, к полученным в [4] результатам следует отнестись с крайней осторожностью. К такому восприятию работы подталкивают следующие аргументы.

В [4] не представлена методика расчета выбросов радионуклидов из ББ в атмосферный воздух, а полученные оценки выбросов представляются значительно завышенными, по крайней мере, для Балаковской АЭС.

Представляется проблематичным и недостаточно обоснованным использование авторами модели атмосферного переноса от площадного источника, реализованной в программном средстве GENII [5] при неизвестном дисперсном составе гидроаэрозолей и нахождении трития в форме различных соединений.

Следует также отметить, что в этой модели не учтен ряд новых данных о свойствах трития и, в частности, о влиянии неорганических и органических соединений трития на закономерности формирования эффективной дозы от трития. Для принятия взвешенного и объективного решения МАГАТЭ в таких случаях рекомендует проводить натурные измерения [6]. В этой связи актуальными являются исследования по определению содержания трития и его соединений в атмосферном воздухе как СЗЗ, так и ЗН, что позволит получить более реалистичное представление об эффективной дозе от трития и его соединений как персонала, так и населения,

проживающего вблизи АЭС, а также существенно снизит неопределенность оценок.

Исследование путей поступления трития и его соединений в организм населения, проживающего вблизи действующих ядерных энергетических установок, показали, что через органы дыхания и кожные покровы (т.е. воздушным путем) поступает до 65 % трития и его соединений. Следовательно, вклад воздушного поступления трития для этой когорты населения является значимым при оценке дозы. Если говорить о персонале, то следует учесть, что при выполнении своих функциональных обязанностей с питанием и водопотреблением он тритий не получает, поэтому ингаляционный путь поступления трития в организм для персонала является основным.

Для получения объективной картины формирования эффективной дозы от трития, поступающего с АЭС, с учетом разной биологической опасности для организма человека его соединений, были проведены натурные исследования на Балаковской АЭС.

Материалы и методы исследования. Для определения объемной активности трития в воздухе был использован «Коллектор трития OS1700» фирмы АМТЕК/ORTEC, США. Особенность этого прибора заключается в том, что тритий собирается с использованием двухстадийного процесса. Каждая стадия для сбора субстрата имеет по три пробирки. В первых трех пробирках собирается тритий, находящийся в соединениях, присутствующих в воздухе и которые способны переходить в воду. Далее воздух, очищенный от соединений трития, способных переходить в воду, попадает на систему, где тритий, находящийся в газообразной форме, окисляется. При этом рас-

Табл.1. Метеоусловия и места отбора проб воздуха на промплощадке Балаковской АЭС и в зоне наблюдения.

Место отбора проб	Время забора	Температура воздуха, °С	Влажность воздуха, %	Скорость, м/с	Направление ветра (°)
Реакторный зал блока 4	19.06.2014	21	34		
Спец. прачечная	20.06.2014	25	70		
1 м от северного края ББ №2-1	18.06.2014	19	70	0,6	198
	24.06.2014	21	53	4,8	272
П.Натальино (северо-восточная окраина поселка)	21.06.2014	25	35	0,9	141
П.Широкий Буерак на берегу Волги около детского сада	22.06.2014	26	52	1,8	180
Воздух в центре п.Матвеевка	23.06.2014	21	53	2,0	200

Табл.2. Содержание трития и его соединений в воздухе в исследованных точках.

Место отбора проб	Объемная активность трития, в воздухе, Бк/м ³	Объемная активность трития (газ), Бк/м ³	Объемная активность НТО, Бк/м ³	Объемная активность ОСТ, Бк/м ³	Соотношение НТ:НТО:ОСТ, %
Реакторный зал блока 4	3358	946	965	1447	28:29:43
Спец. прачечная	3,2	0,2	2	1	6:63:31
ББ №2-1	42	0	21	21	0:50:50
	38	0	20	18	0:53:47
П.Натальино (северо-восточная окраина поселка)	5,2	4,6	0,3	0,3	88:6:6
П.Широкий Буерак на берегу Волги около детского сада	5,1	0,7	3,2	1,2	14:63:23
Воздух в центре п.Матвеевка	0,22	0,2	0,01	0,01	90:5:5

щепляются и окисляются все газообразные соединения; тритий и этот окисленный тритий в виде НТО собирается во втором наборе пробирок.

Для разделения соединений трития, содержащихся в воздухе, использовали принцип его кондиционирования, т.е. перевод паров воздуха в конденсат. Эта задача была решена с помощью бытового осушителя воздуха «Master DN 711». В образующийся конденсат переходят содержащиеся в воздухе соединения трития, способные переходить в воду (НТО и ОСТ), тогда как газообразные формы (НТ, Т₂, СН₂Т, NT и т.д.) остаются в воздухе. Стоит задача разделить соединения трития (НТО и ОСТ), находящиеся в конденсате. С этой целью использовали разработанный нами метод, основанный на каскадной филь-

рации воды [7], позволяющий разделить НТО от ОСТ.

Измерения трития выполнялись методом жидкостной сцинтилляционной спектрометрии на жидкостном сцинтилляционном альфа-бета-спектрометре Tri-Carb, калибруемом с помощью стандартных образцов тритиевой воды, входящих в комплект спектрометра. В анализаторе Tri-Carb модели 3180 TR/SL, на котором проводились измерения содержания трития, схема измерения дополнительно улучшена путем использования медленной сцинтилляции, детекторной защиты из оксида висмута-германия (BGO), что дает более низкий фон и высокую чувствительность по сравнению с другими аналогичными счетчиками. МДА счетчика Tri-Carb3180TR/SL составляет 1Бк/л.

Для перехода от удельной активности трития в полученном конденсате к объемной активности трития в воздухе использовали графики перевода [8], которые учитывают показатели измеренной влажности и температуры окружающей среды на момент забора пробы. При этом по графикам определяется абсолютное содержание влаги в 1 м³ воздуха (г/м³), а затем это значение умножается на показатель удельной активности трития в конденсате (Бк/г).

Отбор проб воздуха осуществлялся в течение 24 ч в каждой точке, в частности, в воздухе реакторного зала и помещениях постоянного пребывания персонала зоны контролируемого доступа (ЗКД) АЭС, около ББ и на различных расстояниях от АЭС в ЗН (табл.1). При отборе проб «Коллектор трития OS1700» и

осушитель воздуха «Master DH 711» располагали на высоте 1 м от поверхности земли на расстоянии 0,5 м друг от друга.

Результаты исследований. В результате исследований установлено, что при проведении плановых ремонтных работ объемная активность трития и его соединений в воздухе реакторного зала достигала 3400 Бк/м^3 . При этом чуть больше четверти общей активности трития находилось в газообразном состоянии. Такое же количество трития находилось в виде оксида и почти половина – в форме ОСТ (табл.2). В помещениях ЗКД и, в частности, в спецпрачечной содержание трития в воздухе снижается на три порядка. При этом его минимальное количество содержится в виде газа, две трети общего количества – в форме НТО и одна треть – в форме ОСТ.

Как отмечено выше, согласно работе [4], кроме ВТ реакторных отделений энергоблоков №1–4 Балаковской АЭС, к значимым источникам облучения населения следует отнести ББ. С учетом этого обстоятельства были проведены исследования содержания трития и его соединений в воздухе у края ББ. Аппаратура была размещена на расстоянии 1 м от северного края ББ №2–1. Исследования были проведены дважды: в пасмурный день, когда во время забора воздуха прошел мелкий дождь (10.06.2014), и в ясный солнечный день (24.06.2014). Полученные данные свидетельствуют о том, что независимо от метеоусловий объемная активность трития в воздухе была примерно одинаковой и составила 42 Бк/м^3 (10.06.2014) и 38 Бк/м^3 (24.06.2014). При этом тритий присутствовал только в форме НТО и ОСТ в равных пропорциях, в то

время как в газообразной форме обнаружен не был.

Для оценки содержания трития во влаге воздуха и исследования закономерностей его распространения в зоне наблюдения (ЗН) был осуществлен забор проб воздуха в трех населенных пунктах, расположенных вокруг Балаковской АЭС, в частности, в поселках Натальино, Широкий Буерак и Матвеевка (рис.1).

При проведении исследований учитывали не только метеоусловия в момент забора воздуха, но и расстояние от станции. Из рис.1 видно, что при исследовании в п.Натальино и п.Широкий Буерак направление ветра от станции было примерно одинаковым по касательной к поселкам, тогда как по отношению к п.Матвеевка направление ветра было от поселка к станции.

Исследование содержания трития и его соединений в воздухе п.Натальино, п.Широкий Буерак и п.Матвеевка показали, что в первых двух населенных пунктах объемная активность трития и

его соединений была примерно одинаковой и составляла соответственно $5,2 \text{ Бк/м}^3$ и $5,1 \text{ Бк/м}^3$, тогда как в п.Матвеевка этот показатель был меньше более чем в 20 раз и составил $0,22 \text{ Бк/м}^3$. Соотношение НТ:НТО:ОСТ при этом было: в п. Натальино 88:6:6, в п.Широкий Буерак 14:63:23 и в п.Матвеевка 90:5:5.

Следует отметить, что полученные оценки объемной активности трития в атмосферном воздухе п.Натальино и п.Широкий Буерак примерно в 370 раз меньше допустимой среднегодовой объемной активности трития в атмосферном воздухе ($DOA_{\text{нас}} = 1900 \text{ Бк/м}^3$), установленной в приложении 2 к НРБ-99/2009.

Можно предположить, что с учетом розы ветров в районе расположения Балаковской АЭС, фактическая среднегодовая объемная активность трития в атмосферном воздухе п.Натальино и п.Широкий Буерак на порядок ниже, чем указанная выше разовая объемная активность этого радионуклида. Тогда грубая оцен-

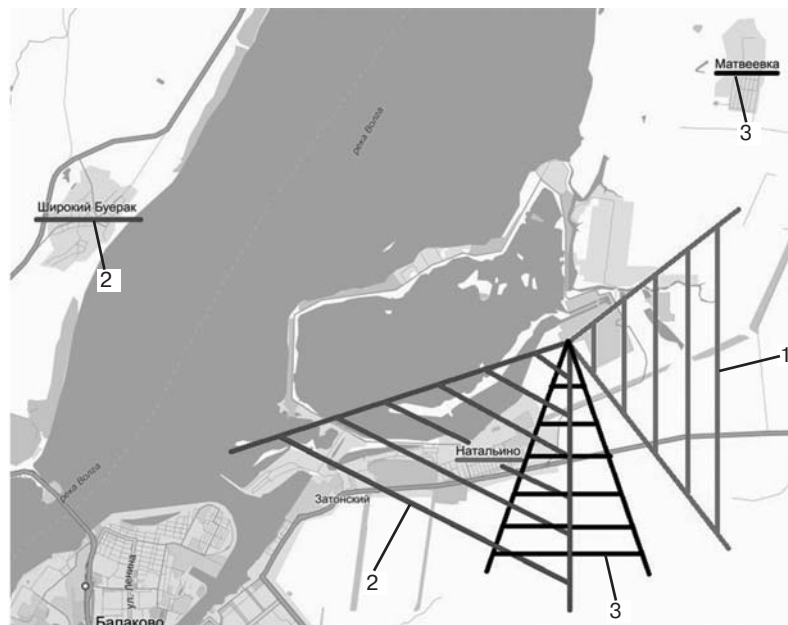


Рис. 1. Расположение обследованных населенных пунктов по отношению к станции. Секторами отмечено направление ветра в период проведения забора воздуха: 1 – в п.Натальино; 2 – в п.Широкий Буерак; 3 – в п.Матвеевка.

ка годовой эффективной дозы облучения населения за счет выбросов трития с АЭС в этих населенных пунктах составляет несколько микрозиверт.

Представленные выше оценки объемной активности трития в атмосферном воздухе отдельных населенных пунктов и, тем более, оценки дозы носят предварительный характер. Вместе с тем, они однозначно указывают на необходимость учета поступления трития и его соединений с атомной станции в окружающую среду в задаче оптимизации радиационной защиты населения в условиях нормальной эксплуатации АЭС.

Для получения достоверных оценок дозовых нагрузок на население за счет выбросов трития с АЭС необходимо проведение комплексных систематических расчетно-теоретических и экспериментальных (натурных и лабораторных) исследований всех аспектов, связанных с образованием, трансформацией соединений, переносом и миграцией трития в объектах окружающей среды.

Альтернативой указанного пути является получение сверхконсервативных дозовых оценок, влекущих за собой необоснованные затраты на оптимизацию радиационной защиты населения при нормальной эксплуатации АЭС.

Обсуждение полученных результатов. Анализируя полученные данные, можно заключить, что основными источниками трития являются ВТ реакторных отделений. Образующийся тритий поступает в реакторный зал и оттуда – в вытяжную трубу. Максимум приземной объемной активности трития достигается на расстоянии примерно 1,5 км от ВТ. Этим можно объяснить отсутствие газообразного трития в районе ББ, которые находятся на расстоянии не более 200 м от ВТ. Соответственно

источником обнаруженных соединений трития у края ББ является вода, поступающая в эти бассейны. Если учесть, что в июле 2014 года (самый жаркий месяц в году) для восполнения испарившейся в бассейнах воды, по данным АЭС, потребовалось 131822 м³ воды, то при полученной удельной активности соединений трития во влаге воздуха 4000 Бк/кг около ББ (что при метеоусловиях в период проведения исследований соответствует объемной активности соединений трития в воздухе 40 Бк/м³) за рассматриваемый месяц выброс соединений трития (консервативно принято, что все потери воды обусловлены испарением) составил примерно 0,53 ТБк.

Следует отметить тот факт, что в воздухе обследованных населенных пунктов, в отличие от воздуха вблизи брызгальных бассейнов, обнаруживается газообразный тритий, который может поступать в атмосферный воздух только из ВТ, т.к. у такого потенциального источника трития, как ББ он, по полученным данным, отсутствует. В населенных пунктах, находящихся по направлению ветра от станции (п.Натальино и п.Широкий Буерак), объемная активность трития и его соединений в воздухе примерно одинакова (несмотря на то, что исследование проводили в разные дни) и, соответственно, равна 5,2 Бк/м³ и 5,1 Бк/м³, тогда как в населенном пункте Матвеевка, находящемся с противоположной стороны по направлению ветра от станции, этот показатель был равен 0,22 Бк/м³.

Обращает внимание тот факт, что в населенных пунктах, расположенных рядом с АЭС (п.Натальино и п.Матвеевка), соотношение НТ : НТО : ОСТ было 88 : 6 : 6 и 90 : 5 : 5, соответственно, а в населенном пункте п.Широкий Буерак, который находится на рас-

стоянии в 3 раза дальше от станции через р.Волга, чем п.Натальино, это соотношение было 14 : 63 : 23. Эти данные свидетельствуют о том, что в процессе переноса воздушных масс от станции через р.Волга к п.Широкий Буерак они взаимодействуют с испаряющимися с поверхности реки парами воды, и происходит более активный переход трития из газообразных соединений в НТО и ОСТ, судя по превалированию НТО в пробах воздуха.

Заключение. Полученные данные свидетельствуют о том, что тритий и его соединения принимают значимое участие в процессе формирования дозы облучения персонала и населения за счет выбросов АЭС.

Вместе с тем, опубликованные оценки дозы облучения за счет поступления трития из ББ АЭС с ВВЭР-1000 [4,10], основанные на очень консервативных исходных данных (например, о подпитке ББ, дисперсном составе гидроаэрозолей ББ и др.), моделях распространения и миграции трития, приемлемость которых вызывает сомнение и не подтверждена верификационными экспериментами, и не учитывающие существенно различное поведение различных соединений трития в окружающей среде, представляются чрезмерно консервативными.

Для получения достоверных количественных оценок дозы от выбросов трития и его соединений необходимо проведение крупномасштабных расчетно-теоретических и экспериментальных (полевых и лабораторных) исследований источников образования и переноса трития и его соединений на АЭС, процессов формирования и параметров выбросов, а также миграции трития и его соединений в объектах окружающей среды в районах расположения АЭС.

Литература

1. Итоги 58 сессии научного комитета ООН по действию атомной радиации (НКДАР), 2011. 112 с.
2. Сайт EDF (Франция) <http://energie.edf.com/nucleaire/environnement/resultats-mensuels-de-la-surveillance-45714.html>.
3. В.Н.Шалимов. Нерешенные проблемы радиационной безопасности АЭС с реактором ВВЭР-1000. Сборник докладов IV Международной радиоэкологической конференции: "Утилизация плутония: проблемы и решения". Россия, Красноярск, 5-10 июня 2000.
4. Строганов А.А., Курындин А.В., Шаповалов А.С. О радиационном воздействии выбросов брызгальных бассейнов атомных станций. Ядерная и радиационная безопасность. № 4, т.74, 2014. С. 1-7.
5. GENII Version 2 Software Design Document. Pacific Northwest National Laboratory. B.A.Napier, P.W.Eslinger, D.K.Streng, C.Fosmire, J.V.Ramsdell Jr. November 2004.
6. Отчеты по безопасности МАГАТЭ №19 (2001). Общие модели для применения в оценке влияния сбросов/выбросов радиоактивных веществ в окружающую среду.
7. МУК 4.3. 44 - 2012. Методика определения объемной активности органических и неорганических соединений трития в водных объектах методом жидкостинтилляционной спектрометрии.
8. График зависимости влажности воздуха от температуры www.eco-kvartal.com.ua.
9. Техничко-экономическое обоснование сооружения энергоблоков № 3 и № 4. Том 13. Оценка воздействий на окружающую среду. Часть 3. Общая характеристика энергоблоков. Хмельницкая АЭС, 2011.

Distribution of Tritium and its Compounds by Air Under Normal Conditions of Operating of Balakovo NPP

Barchukov Valery, Kochetkov Oleg, Fomin Gennady, Kabanov Dmirty (FGBU SSC RF FMBC them. AI.Burnazyana FMBA Russia, Moscow, Russia); Ivanov Evgeny (JSC "VNIIAES", Moscow, Russia)

Abstract. The article discusses the results of field studies of tritium and its compounds spreading from the ventilation tube (VT) in reactor halls and spray ponds (SP) of 1 to 4 blocks of Balakovo nuclear power plant in the health protection zone and supervision area (SA). It is shown that emissions from Tubes make the main contribution to the effective public dose induced by tritium and its compounds. The presence of tritium and its compounds within SA is mainly due to emissions from VT.

Key words: *tritium, tritium oxide, organically bound tritium, spray ponds, emissions of tritium, tritium volume activity in the air surveillance zone.*

В.Г.Барчуков, О.А.Кочетков, Г.В.Фомин, Д.И.Кабанов (ФГБУ ГНЦ РФ ФМБЦ им.А.И.Бурназяна ФМБА России, г.Москва), Е.А.Иванов (АО «ВНИИАЭС», г.Москва).

Контакты: тел.: +7 (499) 190-93-41; e-mail: kabdima@yandex.ru.