

# Стабильность выбросов радионуклидов при нормальной эксплуатации АЭС

В статье обсуждается вопрос стабильности выбросов радионуклидов при нормальной эксплуатации АЭС. Предложена и проверена гипотеза о стабильности характеристик атмосферных выбросов АЭС и стабильности суммарной дозы, создаваемой активностью рассматриваемых выбросов. Показано, что средние характеристики выброса при нормальной эксплуатации АЭС, ответственные за формирование дозы, являются стабильными и могут быть использованы для установления нормативов выбросов.

## **Ключевые слова:**

*АЭС, дозиметрический контроль, эффективная доза, активность, радиоактивные вещества, радионуклиды, НПИ, атмосферные выбросы, окружающая среда.*

**А.-Н.В.Вуколова<sup>1</sup>, А.П.Долгих<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Научный Исследовательский Центр «Курчатовский институт», г. Москва

<sup>2</sup> Технологический филиал АО «Концерн Росэнергоатом», г. Москва

**П**ри нормировании и контроле выбросов радиоактивных веществ при нормальной работе АЭС актуальной является задача минимизации количества нормируемых и контролируемых радионуклидов (далее – задача минимизации).

При решении этой задачи возникает вопрос об изменении во времени (стабильности) характеристик выбросов. Если характеристики не меняются во времени, то задача минимизации сильно упрощается.

Связь числа контролируемых радионуклидов и стабильности выброса видна из следующего примера. Если взять идеальную АЭС, выбросы которой не изменяются от года к году ни по радионуклидному составу, ни по относительной активности отдельных радионуклидов, то для контроля характеристик выброса достаточно только одного (реперного) радионуклида, чтобы контролировать активность выброса 94 радионуклидов, как того требует Постановление Правительства РФ [1].

Для сравнения необходимо и достаточно построить нуклидный вектор (НВ). Нуклидный вектор по активности содержит перечень регистрируемых радионуклидов и их относительную активность ( $a_i$ ). Нуклидный вектор приводит выбросы всех АЭС к одному знаменателю и делает возможным сравнение выбросов в разные годы и на разных атомных станциях.

Нуклидный вектор обладает следующими свойствами:

$$a_{ij} = \frac{A_{ij}}{A_{\Sigma j}} = \frac{A_{ij}}{\sum_{i=1}^n A_{ij}}, \quad (1)$$

где  $A_{ij}$  – суммарная годовая активность  $i$  радионуклида за  $j$  год;  $n$  – число регистрируемых радионуклидов;  $A_{\Sigma j}$  – суммарная активность всех радионуклидов за  $j$  год.

Но идеальных АЭС не бывает, и характеристики выбросов меняются во времени. Однако вопрос об использовании НВ для нормирования и контроля остается актуальным.

Целью данной работы является анализ стабильности характеристик выбросов радиоактивных веществ (нуклидов) при нормальной эксплуатации АЭС.

Для достижения поставленной цели в данной работе для каждой зарубежной европейской АЭС с легководным реактором (ВВЭР, PWR, BWR) были решены следующие задачи.

Для каждого  $j$  года наблюдения построен нуклидный вектор по активности ( $a_{ij}$ ), в который вошли все регистрируемые на данной АЭС радионуклиды.

По физическом смысле  $a_i$  является активностью, приведенной к единичному выбросу, и по ней рассчитывается доза ( $d_{ij}$ ), создаваемая годовым выбросом  $i$  радионуклида в  $j$  году, а затем рассчитываются  $D_{\Sigma j} = \sum_{i=1}^n d_{ij}$  – суммарная по всем радионуклидам годовая доза выбросов АЭС в  $j$  году и усредненная по годам  $D_{\Sigma cp}$ .

В данной работе выдвинута и подтверждена гипотеза, что суммарные годовые дозы выбросов АЭС по годам  $D_{\Sigma j}$  являются случайными и

независимыми величинами, которые распределены по нормальному закону.

Рассчитаны средняя по годам доза ( $\bar{x} = D_{\Sigma cp}$ ) и дисперсия ( $\sigma$ ).

Показано, что  $\bar{x} + \sigma \leq 2\bar{x}$  с учетом консервативности оценки.

Установлен критерий стабильности выбросов. Критерием стабильности является требование, чтобы суммарная годовая доза для любого года наблюдения отличалась от усредненной по годам дозы не более чем в 2 раза (целевой предел).

### Материалы и методы

В данной статье используются следующие представления об условиях выброса:

- время выброса – календарный год;
- характеристики выброса – перечень регистрируемых радионуклидов, их абсолютная и относительная активность по годам, годовая эффективная доза (далее – годовая доза, доза), создаваемая регистрируемым радионуклидом, суммарная эффективная годовая доза (далее – суммарная годовая доза, суммарная доза), а также усредненные по годам активности и дозы (далее – среднегодовая активность и среднегодовая доза);
- годовая доза – это доза, создаваемая годовым выбросом  $i$  радионуклида;
- суммарная годовая доза равна сумме годовых доз;
- годовая доза рассчитывается для случая отсутствия разбавления в атмосфере;
- характеристики могут меняться во времени в течение календарного года.

Для достижения поставленной цели были использованы данные наблюдения за годовой активностью регистрируемых радионуклидов в атмосферных выбросах 59 зарубежных европейских АЭС с энергоблоками ВВЭР, PWR и BWR в течение периода нормальной эксплуатации, представленные Европейской комиссией по выбросам и сбросам [2].

На основе данных об активности выбросов для каждой АЭС были построены нуклидные вектора (НВ) по активности. Формальный вид НВ представлен выражением (1). НВ обладает тем свойством, что, зная активность одного радионуклида (реперного), можно определить активность любого другого радионуклида, входящего в НВ (2).

$$A_{xj} = a_{xj} \cdot (A_{cj} / a_{cj}), \quad (2)$$

где  $A_{xj}$  – активность искомого радионуклида;  $A_{cj}$  – известная активность реперного радионуклида;  $a_{xj}$ ,  $a_{cj}$  – относительная активность искомого и реперного радионуклидов ( $x$  и  $c$  – номера в перечне радионуклидов НВ).

По физическому смыслу  $a_{ij}$  – это активность, и по ней может быть рассчитана доза  $d_{ij}$  для искомого радионуклида.

В данной работе для каждой АЭС, каждого радионуклида и каждого года наблюдения были рассчитаны годовые дозы (далее – дозы) без учета атмосферного разбавления. Расчеты проводились в соответствии с [3]. Подробнее ознакомиться с примененными методами расчета доз и результатами расчетов можно в статье авторов о дозообразующих радионуклидах [4].

Так как в данной статье рассматривается нормальная эксплуатация АЭС, все технологические процессы (выход и работа на мощности, ремонты, операции с топливом) проходят постоянно и регулярно и на разных блоках одной атомной станции, и поэтому характеристики выбросов считаются постоянными, более точно – квазипостоянными.

Формально будем считать, что годовые суммарные дозы, создаваемые выбросами рассматриваемых АЭС по годам, с точки зрения статистики являются случайными независимыми величинами.

Соответственно, разумно предположить, что данные величины распределены в соответствии с законом нормального распределения.

Это не очень жесткое ограничение, т. к. большинство случайных величин в природе имеют

именно нормальное или логнормальное распределение, что связано с тем, что большинство случайных величин является суммой или произведением других случайных величин. Сумма случайных величин распределена по гауссу, а произведение – по логнормальному закону.

В данной статье для каждой зарубежной АЭС с РУ ВВЭР, PWR, BWR выдвинута и проверена гипотеза, что распределение суммарных годовых доз является нормальным.

Ввиду малого объема выборок (наименьшая из них включает 9 значений, а наибольшая достигает 23 значения) для проверки гипотезы о нормальном распределении значений доз выбранных АЭС был использован критерий Шапиро-Уилка [5]. Данный критерий основан на регрессионном анализе порядковых статистик по их ожидаемым значениям. Критерий Шапиро-Уилка является критерием типа дисперсионного анализа для полной выборки. Статистика критерия ( $W$ ) – это отношение квадрата суммы линейной разности выборочных порядковых статистик  $S$  к обычной оценке дисперсии  $nm_2$  (3).

Для вычислений использована методика расчетов, изложенная в [5].

Так как критерий Шапиро-Уилка основан на упорядоченных наблюдениях, то расположим значения доз в каждой выборке в порядке неубывания и обозначим их через  $x_i$ , где  $i$  является порядковым номером значения, содержащегося в выборке объема  $n$ . Теперь в соответствии с [5] вычислим значения критерия Шапиро-Уилка  $W$  для каждой выборки, т. е. для каждой рассматриваемой АЭС:

$$W = \frac{S^2}{nm_2} = \frac{\sum a_k \cdot [x_{(n-k+1)} - x_k]}{\sum (x_i - \bar{x})^2}, \quad (3)$$

где  $k$  – индекс, имеющий значения от 1 до  $n/2$  или от 1 до  $(n-1)/2$  при четном и нечетном  $n$  соответственно;  $a_k$  – коэффициент, имеющий специальные значения для объема выборки  $n$  (значения приведены в [5]);  $\bar{x}$  – среднее

арифметическое значение выборки ( $\bar{x} = D_{\Sigma cp}$ ,  $x_i = D_{\Sigma j}$ ).

Полученные значения  $W$  критерия Шапиро-Уилка сравниваются с табличными значениями [5], характерными для объема рассматриваемой выборки и выбранного уровня значимости ( $\alpha$ ). Если табличное значение меньше расчетного значения  $W$ , гипотеза о нормальном распределении выборки принимается при заданном уровне значимости.

Уровень значимости  $\alpha$  – это вероятность того, что различия считаются существенными, а они на самом деле случайны. Когда указывается, что различия достоверны на 5%-м уровне значимости, или при  $\alpha < 0,05$ , то имеется в виду, что вероятность того, что они все-таки недостоверны, составляет 0,05. Соответственно, уровень значимости – это вероятность отклонения нулевой гипотезы, в то время как она верна.

### Результаты проверки гипотезы о нормальном распределении

В табл.1 представлены результаты проверки гипотезы о нормальном распределении значений доз выбранных АЭС (далее – гипотеза).

Для 93,2% рассмотренных АЭС гипотеза о нормальном распределении выборок, составленных из доз, создаваемых атмосферными выбросами данных АЭС, подтвердилась.

Ниже представлены результаты анализа причин, по которым гипотеза о нормальном распределении не подтвердилась.

Причиной отсутствия нормального распределения для некоторых АЭС является появление нескольких областей в зависимости дозы

от времени, которые могут быть связаны, например, с изменением числа регистрируемых нуклидов.

Для примера на рис.1 представлено отношение суммарной годовой дозы, созданной выбросом АЭС в  $j$  год, к суммарной средней дозе ( $D_{\Sigma j}/D_{\Sigma cp}$ ) для АЭС Рингхальс-1 (BWR, Швеция), для которой гипотеза оказалась неверной.

Для анализа стабильности в данной статье используется отношение  $D_{\Sigma j}/D_{\Sigma cp}$ , где  $D_{\Sigma j}$  – доза за  $j$  год,  $D_{\Sigma cp}$  – доза, усредненная по всем годам наблюдения.

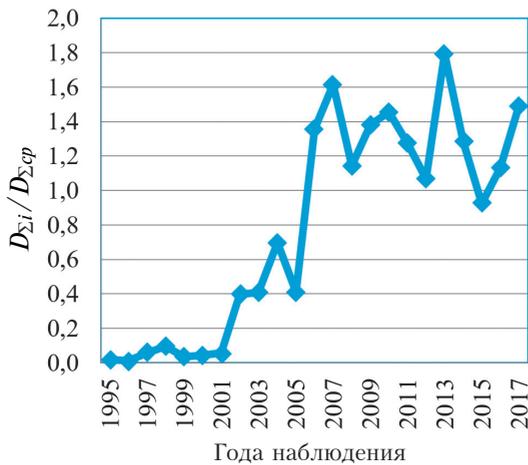
Очевидно, что в случае совпадения  $D_{\Sigma j}/D_{\Sigma cp} = 1$ . В данной статье выброс считается стабильным, если  $D_{\Sigma j}/D_{\Sigma cp} \leq 2$ .

Формально полученный отрицательный результат при проверке гипотезы о нормальном распределении может говорить о необходимости пересмотра объема полученной выборки. Фактически это означает необходимость учета изменений в технологических процессах, а изменение объема выборки – есть инструмент для проведения повторного анализа для рассмотрения объекта исследования при неизменности условий эксплуатации. Это соответствует данным, представленным на рис.1.

В соответствии с критерием Шапиро-Уилка, выборка для АЭС Рингхальс для периода наблюдения с 1995 года по 2017 год не соответствует нормальному распределению на уровне значимости  $\alpha = 0,05$ . Проведенный анализ выбросов АЭС Рингхальс за этот период показал, что с 2002 года в выбросах начал измеряться С-14. Рассчитанный критерий Шапиро-Уилка для АЭС Рингхальс, соответствующий

**Табл.1.** Число АЭС, для которых справедлива гипотеза о нормальном распределении.

Реакторная установка (РУ)	Число АЭС с данной РУ	Число АЭС с подтвержденной гипотезой о нормальном распределении	
		$\alpha = 0,05$	$\alpha = 0,01$
WWER	7	6	1
PWR	41	33	26
BWR	11	3	3



**Рис. 1.** Зависимость отношений  $D_{\Sigma i} / D_{\Sigma cp}$  во времени для АЭС Рингхальс-1.

уменьшенному объему выборки в соответствии с периодом наблюдения с 2002 по 2017 год, показывает, что выборка соответствует нормальному распределению как на уровне значимости  $\alpha = 0,05$ , так и на уровне значимости  $\alpha = 0,01$ .

Аналогичные результаты получены для АЭС Альмарас и Аско, где измерения С-14 начались в 2007 году.

На АЭС Вандельос и Конфентес С-14 измеряют также с 2007 года, но гипотеза о нормальном распределении подтверждается только при уровне значимости  $\alpha = 0,05$ .

В случае получения отрицательного результата рекомендуется изменить выборку (период наблюдения) и повторно проверить гипотезу о нормальном распределении. Так как минимальный размер выборки, к которой может применяться критерий Шапиро-Уилка, составляет 8 значений, то для каждой станции были созданы новые выборки, состоящие из доз, сформированных выбросами данных АЭС за последние 8 лет нормальной эксплуатации.

Проведенные расчеты с уменьшенными выборками подтвердили справедливость гипотезы о нормальном распределении в выборках для АЭС Трильо (для периода наблюдения 2010–2017 гг.), АЭС Каттенон (для периода наблюдения 2009–2016 гг.), АЭС Крюммель (для периода наблюдения 2004–2011 гг.),

АЭС Филиппсбург-1 (для периода наблюдения 2004–2011 гг.), АЭС Изар-1 (для периода наблюдения 2004–2011 гг.), АЭС Оскархамн (для периода наблюдения 2010–2017 гг.) и АЭС Рингхальс-1 (для периода наблюдения 2010–2017 гг.) на уровнях значимости  $\alpha = 0,01$  и  $\alpha = 0,05$ ; для АЭС Богунце (для периода наблюдения 2009–2016 гг.), АЭС Сиво (для периода наблюдения 2009–2016 гг.) и АЭС Барсебек (для периода наблюдения 1998–2005 гг.) только на уровне значимости  $\alpha = 0,05$ . Расширив период наблюдения до 2018 года (сведений о более поздних наблюдениях за выбросами АЭС [2] на момент обращения не содержит) и выбрав данные о последних 8 годах нормальной эксплуатации, удалось доказать гипотезу о нормальном распределении в выборке для АЭС Бельвиль (для периода эксплуатации).

Гипотезу о нормальном распределении выборок не удалось доказать для двух АЭС, которые в настоящее время выведены из эксплуатации: Унтервезер и Хосе Кабрера.

Отношения годовых суммарных доз  $D_j$  к среднегодовой суммарной дозе за рассматриваемый период нормальной эксплуатации  $D_{av}$  для АЭС Унтервезер и Хосе Кабрера проиллюстрированы на рис.2 и 3.

В соответствии с рис.2 можно предположить, что для АЭС Унтервезер значения выборки будут соответствовать нормальному распределению, если рассматривать период нормальной эксплуатации с 1995 по 2004 год.

### Использование свойств нормального распределения

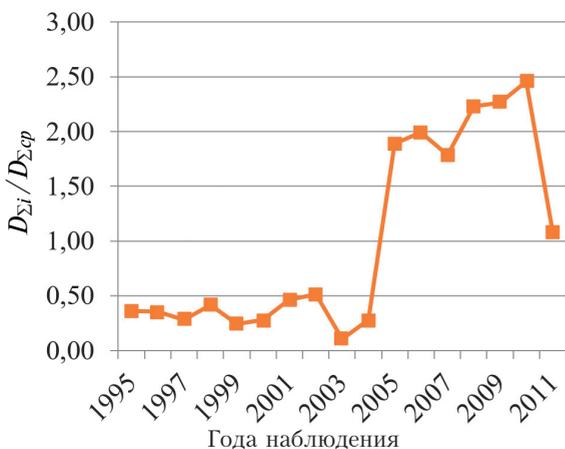
Для 93,2% рассмотренных АЭС гипотеза о нормальном распределении выборок, составленных из доз, создаваемых атмосферными выбросами данных АЭС, подтвердилась, что означает возможность использовать свойства нормального распределения применительно к данным выборкам.

В частности, одним из свойств нормального распределения [6,7] является правило трех сигм, утверждающее, что вероятность того, что случайная величина отклонится от своего математического ожидания более чем на три среднеквадратических отклонения, стремится к нулю. Иными словами, дозы рассмотренных АЭС с доказанным нормальным распределением выборок с вероятностью 99,7% находятся в диапазоне  $[\bar{x} \pm 3\sigma]$ , с вероятностью более 95% – в диапазоне  $[\bar{x} \pm 2\sigma]$  и с вероятностью более 68,2% – в диапазоне  $[\bar{x} \pm \sigma]$  где  $\bar{x}$  – среднее арифметическое значение выборки, а  $\sigma$  – среднее квадратическое отклонение, вычисляемое по формуле:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n}}, \quad (4)$$

где  $x_i$  – суммарная годовая доза за  $i$  год наблюдения;  $n$  – число лет наблюдения;  $\bar{x}$  – суммарная годовая доза, усредненная по годам наблюдения.

Стабильность прямо связана со среднеквадратичным отклонением. В идеальном случае стабильность означает выполнение условия  $\sigma = 0$ . Но идеальных условий на практике не бывает, поэтому в предлагаемой статье критерием стабильности является выполнение условия  $\bar{x} + \sigma \leq 2\bar{x}$ .



**Рис.2.** Зависимость отношений  $D_{\Sigma i} / D_{\Sigma cp}$  во времени для АЭС Унтервезер.

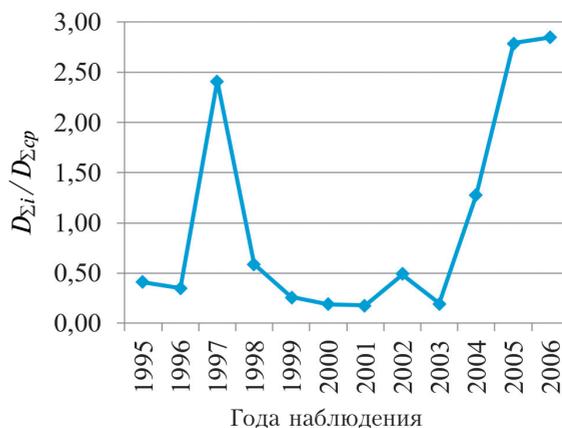
В табл.2 представлены расчетные среднегодовые дозы (без учета атмосферного разбавления) и их средние квадратические отклонения за период наблюдения при нормальной эксплуатации рассматриваемых АЭС.

Из табл.2 видно, что  $\bar{x} + \sigma \leq 2\bar{x}$  с учетом консервативности оценки для всех рассмотренных АЭС.

Отсюда следует, что если в качестве критерия стабильности выбросов принять требование того, что суммарная годовая доза для конкретного года не превышает усредненную по годам суммарную годовую дозу не более чем в 2 раза, то выбросы всех рассмотренных АЭС считаются стабильными.

### Оценка параметров генеральной совокупности

Так как доказательство стабильности характеристик атмосферных выбросов АЭС является одной из основ для их нормирования, то необходимо убедиться в том, что стабильность характеристик выбросов при неизменности условий выбросов будет сохраняться не только в течение рассмотренных периодов наблюдения, которые являются прошлым, но и в будущем, в течение периода нормальной эксплуатации. Соответственно, от рассмотрения отдельных



**Рис.3.** Зависимость отношений  $D_{\Sigma i} / D_{\Sigma cp}$  во времени для АЭС Хосе Кабрера.

**Табл.2.** Расчетные среднегодовые дозы и их средние квадратические отклонения за период наблюдения при нормальной эксплуатации рассматриваемых АЭС, в течение которого доказана гипотеза о стабильности выбросов на уровне значимости  $\alpha = 0,01$ .

Название АЭС	Период наблюдения, гг.	Среднегодовая доза, Зв/год	С.К.О. ( $\sigma$ ), Зв/год
Ловиниса	1995–2017	$2,27 \cdot 10^{-5}$	$5,99 \cdot 10^{-6}$
Моховце	2004–2016	$4,46 \cdot 10^{-5}$	$1,78 \cdot 10^{-5}$
Богунце	2009–2016	$2,42 \cdot 10^{-5}$	$1,64 \cdot 10^{-5}$
Пакш	2004–2016	$8,15 \cdot 10^{-6}$	$2,87 \cdot 10^{-6}$
Дукованы	2004–2017	$3,97 \cdot 10^{-5}$	$8,79 \cdot 10^{-6}$
Темелин	2004–2017	$3,21 \cdot 10^{-5}$	$1,60 \cdot 10^{-5}$
Козлодуй	2007–2016	$6,50 \cdot 10^{-5}$	$4,82 \cdot 10^{-5}$
Каттеном	2009–2016	$4,64 \cdot 10^{-5}$	$1,09 \cdot 10^{-5}$
Крюа	2002–2016	$6,22 \cdot 10^{-2}$	$2,10 \cdot 10^{-5}$
Бюже	2002–2016	$7,31 \cdot 10^{-5}$	$2,24 \cdot 10^{-5}$
Блайе	2002–2016	$7,91 \cdot 10^{-5}$	$2,21 \cdot 10^{-5}$
Сен-Лоран-дез-О	2000–2016	$8,59 \cdot 10^{-5}$	$3,52 \cdot 10^{-5}$
Сент-Альбан	2002–2016	$3,92 \cdot 10^{-5}$	$1,13 \cdot 10^{-5}$
Пенли	2002–2016	$4,49 \cdot 10^{-5}$	$2,06 \cdot 10^{-5}$
Палюэль	2001–2016	$5,31 \cdot 10^{-5}$	$1,67 \cdot 10^{-5}$
Ножан	2002–2016	$4,48 \cdot 10^{-5}$	$2,61 \cdot 10^{-5}$
Гравлин	2002–2016	$3,82 \cdot 10^{-5}$	$1,70 \cdot 10^{-5}$
Гольфеш	2002–2016	$5,29 \cdot 10^{-5}$	$1,45 \cdot 10^{-5}$
Шинон	2002–2016	$6,32 \cdot 10^{-5}$	$1,59 \cdot 10^{-5}$
Сиво	2009–2016	$4,52 \cdot 10^{-5}$	$9,02 \cdot 10^{-6}$
Фламанвиль	2001–2016	$4,80 \cdot 10^{-5}$	$1,82 \cdot 10^{-5}$
Фессенхайм	2002–2016	$7,35 \cdot 10^{-5}$	$1,97 \cdot 10^{-5}$
Дампьер	2002–2016	$3,99 \cdot 10^{-5}$	$1,76 \cdot 10^{-5}$
Трикастен	2002–2016	$4,58 \cdot 10^{-5}$	$2,53 \cdot 10^{-5}$
Сайзвел	1995–2016	$1,52 \cdot 10^{-5}$	$9,26 \cdot 10^{-6}$
Борселе	1995–2017	$2,85 \cdot 10^{-5}$	$2,22 \cdot 10^{-5}$
Кршко	2004–2017	$7,40 \cdot 10^{-6}$	$4,42 \cdot 10^{-6}$
Рингхальс	1995–2017	$3,91 \cdot 10^{-5}$	$3,06 \cdot 10^{-5}$
Рингхальс	2002–2017	$5,52 \cdot 10^{-5}$	$2,16 \cdot 10^{-5}$
Библис А	1995–2017	$3,91 \cdot 10^{-5}$	$3,02 \cdot 10^{-5}$
Библис Б	1995–2017	$6,63 \cdot 10^{-5}$	$4,57 \cdot 10^{-5}$
Брокдорф	1995–2016	$8,74 \cdot 10^{-5}$	$4,58 \cdot 10^{-5}$
Эмсланд	1995–2016	$5,39 \cdot 10^{-5}$	$1,60 \cdot 10^{-5}$
Графенрайнфельд	1995–2017	$9,85 \cdot 10^{-5}$	$5,92 \cdot 10^{-5}$

Название АЭС	Период наблюдения, гг.	Среднегодовая доза, Зв/год	С.К.О. ( $\sigma$ ), Зв/год
Гронде	1995–2017	$7,41 \cdot 10^{-5}$	$5,62 \cdot 10^{-5}$
Изар 2	1995–2017	$1,07 \cdot 10^{-4}$	$2,60 \cdot 10^{-5}$
Неккарвестхайм 1	1995–2011	$5,91 \cdot 10^{-5}$	$3,15 \cdot 10^{-5}$
Неккарвестхайм 2	1995–2017	$1,01 \cdot 10^{-4}$	$4,11 \cdot 10^{-5}$
Обригхайм	1995–2005	$5,90 \cdot 10^{-5}$	$1,29 \cdot 10^{-5}$
Штаде	1995–2003	$1,68 \cdot 10^{-5}$	$6,23 \cdot 10^{-6}$
Филиппсбург 2	1995–2017	$3,99 \cdot 10^{-5}$	$2,26 \cdot 10^{-5}$
Грайфсвальд	1995–2017	$9,85 \cdot 10^{-5}$	$5,92 \cdot 10^{-5}$
Альмарас	2007–2017	$9,36 \cdot 10^{-6}$	$5,44 \cdot 10^{-6}$
Аско	1995–2017	$7,41 \cdot 10^{-5}$	$2,36 \cdot 10^{-5}$
Аско	2007–2017	$8,43 \cdot 10^{-5}$	$2,84 \cdot 10^{-5}$
Трильо	2010–2017	$5,36 \cdot 10^{-5}$	$2,14 \cdot 10^{-5}$
Вандельос	2007–2017	$7,93 \cdot 10^{-5}$	$7,81 \cdot 10^{-5}$
Брунсбюгтель	1995–2017	$3,36 \cdot 10^{-5}$	$2,23 \cdot 10^{-5}$
Гундремминген В+С	1995–2016	$8,31 \cdot 10^{-5}$	$4,61 \cdot 10^{-5}$
Изар1	2004–2011	$6,10 \cdot 10^{-5}$	$2,53 \cdot 10^{-5}$
Крюммель	2004–2011	$3,08 \cdot 10^{-4}$	$1,23 \cdot 10^{-4}$
Филиппсбург 1	2004–2011	$1,02 \cdot 10^{-4}$	$3,96 \cdot 10^{-5}$
Кофрентес	2007–2017	$1,22 \cdot 10^{-5}$	$5,49 \cdot 10^{-6}$
Барсебек	1998–2005	$4,71 \cdot 10^{-5}$	$2,05 \cdot 10^{-5}$
Форсмарк	1995–2017	$3,89 \cdot 10^{-5}$	$3,12 \cdot 10^{-5}$
Оскарсхамн	2010–2017	$8,88 \cdot 10^{-5}$	$3,67 \cdot 10^{-5}$
Рингхальс-1	2010–2017	$5,57 \cdot 10^{-5}$	$2,17 \cdot 10^{-5}$

выборки, составленных из доз, создаваемых выбросами отдельных АЭС за последовательные года, необходимо перейти к рассмотрению генеральных совокупностей, предполагающих расширение периода наблюдения до времени с начала нормальной эксплуатации АЭС до момента ее окончания. После этого необходимо проверить выполнение введенного критерия стабильности.

Согласно теории,  $\sigma$  является точечной смещенной оценкой генеральной совокупности, соответственно, при увеличении объема выборки, т. е. при расширении периода наблюдения данная оценка окажется несостоятельной.

Для реалистичной оценки параметров генеральной совокупности найдем несмещенную точечную и интервальную оценки.

Для нахождения точечной несмещенной оценки  $\sigma_{ген}$  генеральной совокупности была использована следующая формула [6]:

$$\sigma_{ген} = \frac{n}{n-1} \cdot \sigma, \quad (5)$$

Интервальная оценка проводится путем нахождения доверительных границ, в которых располагается математическое ожидание  $\mu$  генеральной совокупности. Для расчетов была использована формула [7]:

$$\bar{x} - \frac{\sigma_{ген}}{\sqrt{n}} \cdot t_{\alpha, f} \leq \mu \leq \bar{x} + \frac{\sigma_{ген}}{\sqrt{n}} \cdot t_{\alpha, f}, \quad (6)$$

где  $t_{\alpha, f}$  – величина нормированного отклонения, определяемая по таблицам распределения Стьюдента [7]. Величина  $t_{\alpha, f}$  определяется вероятностью попадания генерального параметра в указанный интервал и числом степеней свободы  $f = n - 1$ , где  $n$  – объем выборки.

Для расчетов был выбран уровень значимости  $\alpha = 0,05$  и период наблюдения, для которого было доказано нормальное распределение выборки. Так как для задачи нормирования наиболее значимой является верхняя граница уровня дозы, создаваемой выбросами АЭС, то далее была проведена оценка отношения верхней границы генеральной совокупности  $x_{max}^{ген}$  к среднегодовой дозе  $\bar{x}$ . После усреднения полученных значений по  $L$  рассматриваемым станциям было получено, что среднее значение отношения вычисленной верхней границы к среднему значению для точечной несмещенной оценки равно:

$$\frac{\overline{x_{max}^{ген}}}{L} = \frac{\sum_{l=1}^L x_{max}^{l, ген}}{L} = \frac{\sum_{l=1}^L (\bar{x}^l + 2\sigma_{ген}^l)}{L} = 1,86,$$

для интервальной оценки:

$$\frac{\overline{x_{max}^{ген}}}{L} = \frac{\sum_{l=1}^L x_{max}^{l, ген}}{L} = \frac{\sum_{l=1}^L (\bar{x}^l + \frac{\sigma_{ген}^l}{\sqrt{n}} \cdot t_{0,95, f})}{L} = 1,29.$$

Максимальное значение отношения вычисленной верхней границы к среднему значению дозы для точечной оценки составляет 2,88; для интервальной оценки – 1,71.

Целевым пределом отношения вычисленной верхней границы к среднему значению дозы, установленным авторами, является 2,0. Нахождение данного отношения в диапазоне от 1,0 до 2,0 означает, что значения среднегодовых доз для рассматриваемых АЭС отличаются от значений годовых доз, составляющих генеральные совокупности, не более чем в 2 раза.

В свою очередь, данный вывод означает, что выбросы отдельных АЭС и АЭС, входящих в генеральные совокупности, являются стабильными в рамках принятого целевого предела.

## Неопределенности величин

В вышеизложенном методе все расчеты основывались на ранее полученных результатах вычислений годовых доз по годовым активностям выбросов [4]. Однако активность выброса является измеряемой величиной, а любые измерения неизбежно сопровождаются неопределенностью измерений. Так как дозы находятся в прямой зависимости от активностей, то справедливо будет заменить оценку неопределенностей измерений активности на оценку неопределенностей доз.

В [8] выделяется 3 типа неопределенности измерений: стандартная неопределенность, суммарная стандартная неопределенность и расширенная неопределенность. В соответствии с [9] стандартная неопределенность – неопределенность измерений, выраженная в виде среднеквадратического (стандартного) отклонения; суммарная стандартная неопределенность – стандартная неопределенность измерений, которую получают суммированием отдельных стандартных неопределенностей измерений, связанных с входными величинами в модели измерений; расширенная неопределенность – это произведение суммарной стандартной неопределенности и коэффициента охвата. Источниками перечисленных типов неопределенности могут быть неисключенные систематическая (инструментальная) и случайная погрешности.

При проведении многократных измерений [8] рекомендует провести оценку интервала значений, в котором с доверительной вероятностью  $p = 95\%$  находится «истинное» значение измерения. Для этого вычисления проводятся в несколько этапов:

1. По заранее известным из паспорта измерительного прибора границам неисключенной систематической погрешности определяются границы неисключенной систематической погрешности  $\theta_x$  среднего арифметического значения выборки. Т. к. [2] не предоставляет

характеристики приборов, использованных для измерения активности выброса, то используем консервативное предположение о систематической погрешности измерения, равной 50%. Соответственно, расчет  $\theta_x$  производится по формуле:

$$\theta_x = 0,5 \cdot \bar{x}.$$

2. Доверительные границы суммарной неисключенной систематической составляющей погрешности результата измерений  $\theta(0,95)$  при доверительной вероятности  $p = 95\%$  оцениваются по формуле:

$$\theta(0,95) = 1,1 \cdot \sqrt{\theta_x^2}.$$

3. Производят оценку стандартной неопределенности  $u_a$ , обусловленную источниками неопределенности, имеющими случайный характер, по формуле:

$$u_a = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}}.$$

4. Производят оценку стандартной неопределенности  $u_b$ , обусловленную источниками неопределенности, имеющими систематический характер, по формуле:

$$u_b = \frac{\theta(0,95)}{k\sqrt{3}},$$

где  $k = 1,1$  при  $p = 95\%$ .

5. Оценку суммарной стандартной неопределенности  $u_c$  производят по формуле:

$$u_c = \sqrt{u_a^2 + u_b^2}.$$

6. Оценку расширенной неопределенности  $u_{0,95}$  производят по формуле:

$$u_{0,95} = t_{\alpha,f} \cdot u_c,$$

где  $t_{\alpha,f}$  – квантиль распределения Стьюдента с эффективным числом степеней свободы  $f$  и доверительной вероятностью (уровнем доверия)  $p = 95\%$  ( $\alpha = 0,05$ ).

Интервал значений, в котором с доверительной вероятностью  $p = 95\%$  находится «истинное» значение измерения (истинное среднегодовое значение дозы для выбранной АЭС), оценивается как  $\bar{x} \pm u_{0,95}$ .

Проведя оценку отношения верхней границы генеральной совокупности  $\overline{x_{max}^{gen}} = \bar{x} + u_{0,95}$  к среднегодовой дозе  $\bar{x}$  для каждой рассматриваемой АЭС и усреднив полученные значения по количеству изучаемых АЭС, получим:

$$\overline{x_{max}^{gen}} = \frac{\sum_{l=1}^L (\bar{x} + u_{0,95})}{L} = \frac{\sum_{l=1}^L (\bar{x}^l + u_{0,95}^l)}{L} = 1,69.$$

Максимальное значение отношения вычисленной верхней границы к среднему значению дозы составляет 1,92.

### Заключение

Целью данной статьи была проверка гипотезы о стабильности характеристик атмосферных выбросов АЭС и, соответственно, стабильности суммарной дозы, создаваемой активностью рассматриваемых выбросов.

Для достижения поставленной цели была сформирована дополнительная гипотеза: о нормальном распределении выборок, составленных из доз, создаваемых активностями атмосферных выбросов, рассматриваемых АЭС. Для проверки этой гипотезы для каждой выборки были рассчитаны критерии Шапиро-Уилка.

Для 93,2% рассмотренных АЭС гипотеза о нормальном распределении выборок, составленных из доз, создаваемых атмосферными выбросами данных АЭС, подтвердилась.

В работе проведен анализ случаев, в которых гипотеза о нормальном распределении выборок не подтвердилась. В результате анализа выявлена зависимость между выбранным периодом нормальной эксплуатации рассматриваемой АЭС и, соответственно, объемом и составом выборки, и результатами проверки гипотезы. Гипотеза о нормальном распределении выборки отвергалась на основании критерия Шапиро-Уилка в случае, если в течение периода наблюдения существенно менялся определяемый состав выброса. Причина данного изменения, которая могла заключаться в установке нового дозиметрического оборудо-

вания на АЭС или изменении методики контроля выбросов, не имеет значения в данном исследовании.

По результатам анализа внесены изменения в объем и состав выборки «отвергнутых» АЭС, проведена новая проверка гипотезы для них и установлено, что гипотеза о нормальном распределении выборок доказана для всех рассмотренных АЭС, кроме АЭС Унтервезер и АЭС Хосе Кабрера.

Доказательство гипотезы о нормальном распределении выборок открывает возможность пользоваться всеми свойствами нормального распределения.

Стабильность прямо связана со среднеквадратичным отклонением  $\sigma$ . В идеальном случае стабильность означает выполнение условия  $\sigma = 0$ . Но идеальных условий на практике не бывает, поэтому в данной статье предложено критерием стабильности считать выполнение условия  $\bar{x} + \sigma \leq 2\bar{x}$ .

Для всех АЭС, нормальное распределение выборок которых было доказано, были вычислены несмещенная точечная и интервальная оценки генеральных совокупностей. Оценены верхние границы распределения доз в генеральных совокупностях. Установлено,

что в среднем отношения вычисленной верхней границы к среднему значению дозы для рассмотренных АЭС меньше 2,0, что удовлетворяет целевому пределу, установленному авторами статьи.

Изучен вопрос неопределенностей при изменении активностей выбросов, рассматриваемых АЭС. В соответствии с [9] для всех выбранных АЭС выполнены оценки расширенной неопределенности.

Установлено, что даже при учете консервативного предположения о 50% инструментальной погрешности измерительных приборов, использованных на рассматриваемых АЭС для измерения активности выброса, среднее отношение верхней границы интервала значений, в котором с вероятностью  $p = 95\%$  находится среднегодовая доза, создаваемая выбросом изучаемой АЭС, к среднегодовой дозе меньше целевого предела 2,0.

На основе использованных статистических критериев было показано, что средние характеристики выброса при нормальной эксплуатации АЭС, ответственные за формирование дозы, являются стабильными и могут быть использованы для установления нормативов выбросов.

## Литература

1. Распоряжение Правительства РФ от 08.07.2015 № 1316-р (ред. от 10.05.2019) «Об утверждении перечня загрязняющих веществ, в отношении которых применяются меры государственного регулирования в области охраны окружающей среды».
2. European Commission Radioactive Discharges Database for collecting, storing, exchanging and dissemination of information on radioactive discharges (RADD). URL: <http://europa.eu/radd/> (дата обращения: 30.01.2021).
3. РБ-106-15. 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». Утверждено приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 11 ноября 2015 г. № 458.
4. A. Vukolova and A. Rusinkevich, «Radionuclide Composition of Airborne Discharges of European NPPs with WWER, PWR and BWR Reactor Facilities», *ASME J of Nuclear Rad Sci.*, doi: <https://doi.org/10.1115/1.4047044>, April 27, 2020.
5. ГОСТ Р ИСО 5479-2002. Статистические методы. Проверка отклонения распределения вероятностей от нормального распределения.

6. Лысенко С.Н., И.А. Дмитриева. Общая теория статистики: учебное пособие. Изд. испр. и доп. М.: НИЦ ИНФРА-М, 2014. 219 с. ISBN 978-5-9558-0115-5.
7. Фадеева Л.Н., Лебедев А.В. Теория вероятностей и математическая статистика: учебное пособие. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Эксмо, 2010. 496 с.
8. МИ 2453-2015. Рекомендация. ГСИ. Методики радиационного контроля. Общие требования.
9. РМГ 29-2013 ГСИ. Метрология. Основные термины и определения.
10. IAEA Safety Standards Series no. GSR part 3. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. General Safety Requirements. IAEA, Vienna, 2011.

## The Stability of Radionuclide Discharges of NPPs Under Normal Operation

Vukolova Angelina-Nataliya<sup>1</sup>, Dolgikh Alexander<sup>2</sup>

<sup>1</sup>NRC «Kurchatov institute», Moscow, Russia

<sup>2</sup>Technological branch of Rosenergoatom Concern JSC, Moscow, Russia

**Abstract.** The issue of stability of radionuclide discharges of nuclear power plants under normal operation is discussed in the article. A hypothesis about the stability of the characteristics of atmospheric emissions from nuclear power plants and the stability of the total dose created by the activity of the emissions under consideration has been proposed and tested. It is shown that the average characteristics of the discharges of nuclear power plants under normal operation are stable and can be used to establish discharge standards.

**Key words:** NPP, effective dose, activity, radioactive materials, radionuclides, low measurement limit, airborne discharges, environment.

А.-Н.В.Вуколова (н.с.)<sup>1</sup>, А.П.Долгих (к.ф.-м.н., гл. спец.)<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Научный Исследовательский Центр «Курчатовский институт», г. Москва.

<sup>2</sup> Технологический филиал АО «Концерн Росэнергоатом», г. Москва.

Контакты: тел. +7 (499) 196-73-92; e-mail: Vukolova\_av@nrcki.ru.