ПРИМЕНЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ОБЪЕМОВ ОБРАЗОВАНИЯ РАО ПРИ НОРМАЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ АЭС РОССИИ

А. А. Екидин, К. Л. Антонов

Институт промышленной экологии УрО РАН, Екатеринбург

Статья поступила в редакцию 6 апреля 2020 г.

Образование радиоактивных отходов (РАО) является одной из наиболее актуальных проблем радиационной безопасности при нормальной эксплуатации атомных электростанций. В работе демонстрируется возможность применения удельного показателя образования РАО на единицу выработанной электроэнергии ($\text{м}^3/\text{ГВт}\cdot\text{ч}$) для ретроспективной оценки и прогнозирования объемов образования РАО на АЭС России. По опубликованным экологическим отчетам АО «Концерн Росэнергоатом» за период с 2008 по 2018 год получены средние и медианные значения ежегодных удельных показателей образования РАО для каждой АЭС. Показано преимущество медианных значений для ретроспективной и прогнозной оценок. Медианы для твердых радиоактивных отходов категорий ОНРАО, НАО, САО и ВАО равны $1,5\cdot 10^{-2}$, $3,3\cdot 10^{-2}$, $3,3\cdot 10^{-3}$ и $2,8\cdot 10^{-4}$ $\text{м}^3/\text{ГВт}\cdot\text{ч}$ соответственно; для жидких радиоактивных отходов категорий НАО и САО – $1,4\cdot 10^{-3}$ $\text{м}^3/\text{ГВт}\cdot\text{ч}$ и $2,5\cdot 10^{-3}$ $\text{м}^3/\text{ГВт}\cdot\text{ч}$ соответственно. АЭС с реакторными установками РБМК характеризуются наибольшими средними и медианными значениями удельных показателей образования всех категорий РАО. Учет специфики удельных показателей на станциях с различным типом реакторных установок повышает ретроспективную оценку общего объема жидких РАО на 8%, твердых РАО – на 12%. Прогноз по медианам удельных показателей на основе планов увеличения производства электроэнергии на АЭС России указывает на вероятное увеличение объемов образования РАО на 0,8–7,1% (в зависимости от категории отходов) в период с 2020 по 2027 год.

Ключевые слова: радиоактивные отходы, удельный показатель, реакторная установка, атомная электростанция.

Введение

Радиоактивные отходы (РАО) являются одним из наиболее значимых экологических факторов деятельности любой атомной электростанции (АЭС). Реализация принципа оптимизации в контексте обращения с РАО предусматривает различные варианты деятельности [1], включая снижение количества и активности вновь образующихся РАО; обязательное кондиционирование с целью захоронения всех удаляемых РАО, накопленных ранее при эксплуатации АЭС; а также обязательное кондиционирование с целью захоронения вновь образованных РАО.

Планирование такой деятельности должно основываться на данных о ежегодном образовании РАО каждой категории. Наиболее сложный вопрос связан с определением радионуклидного состава отходов [2–4], но не менее важными являются оценка и прогноз объемов образования РАО при нормальной эксплуатации АЭС. Это необходимо для адекватного планирования долгосрочного обращения с радиоактивными отходами [5], поскольку объем передаваемых на захоронение РАО во многом определяет инфраструктуру объектов их захоронения.

За все время эксплуатации АЭС в России в специализированных хранилищах, расположенных на территории станций, накоплен значимый объем РАО. Специалистами АЭС ведется регистрация накопленных и вновь образующихся РАО [6–8]. Часть сведений об объемах ежегодного образования РАО ($\text{м}^3/\text{год}$) при нормальной эксплуатации АЭС опубликованы в ежегодных отчетах по экологической безопасности за период 2008–2018 гг., представленных на сайте АО «Концерн Росэнергоатом» [9]. Структура и содержание экологических отчетов атомных электростанций предполагает демонстрацию количественных и качественных характеристик всех факторов воздействия на население и окружающую среду при нормальной эксплуатации АЭС, включая данные по обращению с РАО.

За рассматриваемый 11-летний период отчеты 10 атомных станций России должны были содержать данные о ежегодном образовании РАО в виде набора матриц 11×10 для каждой категории отходов. Однако для этой генеральной совокупности характерно большое число пропусков: в 33% экологических отчетов отсутствуют данные по ежегодному образованию РАО. Ряд отчетов не доступен на указанном интернет-ресурсе: по Ленинградской АЭС — за 2008 год, по Кольской, Нововоронежской, Смоленской АЭС — за 2009 год. В отдельных отчетах сведения по ежегодному образованию РАО представлены в виде диаграмм, не содержащих точные значения объема каждой категории РАО. Таким образом, опубликованная информация представляет собой ограниченную выборочную совокупность, репрезентативность которой обусловлена преимущественно случайным характером пропущенных данных. Маловероятно, что при подготовке экологических отчетов АЭС России имеет место целенаправленный (систематический) отбор нужных значений. В предположении репрезентативности возможно ретроспективное воспроизведение пропущенных данных для оценки суммарного количества образования каждой категории РАО за рассмотренный период на основе сведений о ежегодном производстве электроэнергии при нормальной эксплуатации АЭС [10]. Ключевым элементом для таких оценок является удельный показатель образования каждой категории РАО на каждый ГВт·ч произведенной электроэнергии. Численные значения удельного показателя позволяют сравнивать объемы образования РАО на различных станциях во времени независимо от типа и мощности применяемых реакторных установок, а также получать оценки образования каждой категории РАО в перспективе на основе планов

производства электроэнергии. Размерность удельного показателя — $\text{м}^3/\text{ГВт} \cdot \text{ч}$ для жидких (ЖРО) и твердых (ТРО) радиоактивных отходов — наглядно демонстрирует масштаб их ежегодного образования на фоне годового производства электроэнергии и позволяет делать выводы об экологической эффективности в сфере обращения с РАО на АЭС России.

В данной работе на основе опубликованной экологической отчетности АО «Концерн Росэнергоатом» за 2008–2018 гг. продемонстрирована возможность ретроспективного восстановления отсутствующих сведений об объемах образования РАО за выбранный интервал времени как для всех АЭС в целом, так и для АЭС с заданным типом реакторных установок. Также с использованием удельных показателей даны прогнозные оценки образования РАО с учетом плана производства электроэнергии на атомных электростанциях России. Эти оценки могут рассматриваться как целевые показатели образования каждой категории радиоактивных отходов.

Характеристика исходных данных

За период 2008–2018 гг. производство электроэнергии на АЭС России возросло на 25,8%. В 2018 году было произведено 191 340 ГВт·ч, а в 2008 году — 152 058 ГВт·ч, суммарное приращение составило 39 282 ГВт·ч (рис. 1). Основной вклад в увеличение производства электроэнергии внесли АЭС с реакторными установками ВВЭР — 34 331 ГВт·ч (87,4%). Вклад АЭС с реакторными установками БН и РБМК в рост производства электроэнергии составил 4437 ГВт·ч (11,3%) и 513 ГВт·ч (1,3%) соответственно. Общий объем электрогенерации за рассматриваемый период равен 1 871 524 ГВт·ч [10].

Рис. 1. Динамика производства электроэнергии на АЭС России с 2008 по 2018 год [10]

Рис. 2. Наполненность (в %) экологических отчетов АЭС России данными о ежегодном образовании РАО за период 2008–2018 гг. в разрезе категорий РАО (а) и каждой станции суммарно по категориям РАО (б) [9].

Принятые сокращения категорий отходов: ВАО – высокоактивные, CAO – среднеактивные, НАО – низкоактивные, ОНРАО – очень низкорadioактивные отходы

Непрерывный рост производства электроэнергии, за исключением 2013 года, вероятно, может сопровождаться увеличением ежегодного объема образования отходов. Предположение о сопоставимом увеличении объемов образования РАО всех категорий невозможно опровергнуть или подтвердить на основе фрагментарных ежегодных данных, опубликованных в экологических отчетах АЭС [9]. Так, в разрезе категорий РАО суммарно по всем станциям за период 2008–2018 гг. количество представленных в отчетах значений составляет от 6 % для ТРО ОНРАО до 67 % для ТРО НАО от соответствующих генеральных совокупностей, включающих по 110 значений для каждой категории РАО (рис. 2а). Для отдельно взятой атомной электростанции полные данные суммарно по семи категориям РАО должны содержать 77 значений за рассмотренный период. Фактическая наполненность отчетов составляет от 19 % для Белоярской АЭС до 86 % для Смоленской АЭС (рис. 2б).

На рис. 3 приведена структура категорий твердых РАО по суммарному объему образованных на АЭС России отходов согласно доступным в экологических отчетах данным за весь период исследования. Для твердых РАО вклад каждой категории ранжируется следующим образом: НАО > CAO > ОНРАО > ВАО с многократным преобладанием низкоактивных отходов.

По суммарному объему жидких РАО наблюдается небольшое преобладание среднеактивных

отходов (53 %) над низкоактивными (47 %). В рассмотренных экологических отчетах отсутствуют сведения об образовании жидких отходов категории ОНРАО; сведения об образовании категории ВАО жидких отходов или отсутствуют, или указывают на нулевые значения ежегодного образования.

С учетом большой фрагментарности исходной информации, приведенные соотношения объемов ЖРО и ТРО справедливы только для выборочных данных и могут значительно отличаться от истинных соотношений между категориями твердых и жидких РАО. Пропуски в отчетных данных являются также причиной сильных диспропорций в оценках образования РАО на АЭС с различными типами реакторных установок, которые сопоставимы по количеству произведенной энергии. Так, основной объем генерации приходится на АЭС с реакторными установками ВВЭР (56 %) и РБМК (с учетом ЭГП) (41 %). На АЭС с реакторными установками БН приходится только 3 % от суммарного количества произведенной электроэнергии [10], поэтому для реакторов ВВЭР и РБМК можно ожидать сопоставимый вклад в ежегодное образование РАО при отсутствии кардинальных отличий в применяемых технологиях радиационной и экологической безопасности. Однако данные экологических отчетов свидетельствуют об обратном: вклад РБМК кратно превышает вклад ВВЭР для всех категорий РАО (рис. 4).

Получение более корректных оценок объемов ежегодного образования жидких и твердых РАО и их соотношений по категориям возможно при ретроспективном воспроизведении (интерполяции) отсутствующих в экологических отчетах значений. С этой целью в данном исследовании рассчитаны удельные показатели образования РАО, характерные для АЭС с однотипными реакторными установками.

Рис. 3. Структура категорий твердых РАО по объему образованных отходов на всех АЭС России за период 2008–2018 гг. по данным экологических отчетов [9]

Рис. 4. Вклад АЭС с реакторными установками различного типа в образование РАО по данным экологических отчетов [9]

Расчет удельных показателей и ретроспективная оценка объемов образования РАО на АЭС России

Ретроспективная оценка годового образования РАО может быть выполнена по результатам статистической обработки данных об объемах ежегодного образования каждой категории РАО (м³/год), не приведенных к производству электроэнергии. Основным недостатком такого подхода — игнорирование важных характеристик реакторных установок, таких как мощность и коэффициент использования. Применение удельных показателей исключает указанный недостаток. Нормирование годового объема образования каждой категории РАО на единицу произведенной электроэнергии позволяет корректно проводить объединение или сравнение подвыборок данных по АЭС с реакторными установками различной мощности. Для расчета удельных показателей образования РАО на АЭС России последовательно выполнены следующие действия:

- сформирована выборка данных производства электроэнергии (ГВт·ч) для каждой АЭС за каждый год в период 2008—2018 гг. как сумма электроэнергии, произведенной каждым энергоблоком АЭС, согласно базе данных PRIS (МАГАТЭ) [10];
- сформированы подвыборки доступных данных ежегодного образования ЖРО и ТРО (м³) каждой категории РАО по материалам опубликованных экологических отчетов АЭС [9];

- для каждой АЭС сформированы подвыборки отношений годового объема каждой категории РАО к годовому производству электроэнергии (м³/ГВт·ч) за каждый год рассматриваемого периода;
- рассмотрены тенденции изменения во времени полученных удельных показателей образования РАО для подвыборок, сформированных из доступных данных по АЭС с реакторными установками РБМК, ВВЭР и БН.

Для формализации расчетов и анализа полученных данных вводятся следующие условные обозначения: W — объем ежегодного образования РАО, м³; E — годовое производство электроэнергии, ГВт·ч; S — удельный показатель образования каждой категории РАО, м³/ГВт·ч. Расчет искомой величины S_{ijk} для i -й АЭС выполняется по всем доступным данным j -й категории РАО за k -й год наблюдения (1):

$$S_{ijk} = W_{ijk} / E_{ik} \quad (1)$$

Каждое отдельное значение S_{ijk} специфично и характеризует объем образования конкретной категории РАО в конкретный год на конкретной АЭС на каждый ГВт·ч произведенной электроэнергии. Совокупность значений $\{S_{ijk}\}$ описывает все возможные варианты величин удельных показателей в целом, без учета типа и мощности реакторных установок. Основные статистические характеристики удельных показателей объема образования РАО на АЭС России, вычисленные по всей доступной совокупности данных за период 2008—2018 гг., представлены в табл. 1. Средние значения $\bar{S}_j$ удельных показателей всех категорий РАО превышают соответствующие медианные значения $\langle S_j \rangle$, что указывает на асимметрию частотных распределений исследуемых величин, поэтому для ретроспективной и прогнозной оценок образования РАО корректней использовать медианы как показатели, более устойчивые к статистическим выбросам в анализируемых выборочных данных.

Полученные медианы удельных показателей $\langle S_j \rangle$ (табл. 1) позволяют выполнить ретроспективную оценку объемов $\langle W_{jik} \rangle$ образования четырех категорий ТРО и двух категорий ЖРО для каждой АЭС за любой год в исследованном интервале 2008—2018 гг. следующим образом (2):

$$\langle W_{jik} \rangle = E_{ik} \cdot \langle S_j \rangle \quad (2)$$

В действительности такая оценка не применима к конкретной АЭС, а относится в равной степени ко всем функционирующим АЭС России. Это значит, что расчетные значения $\langle W_{jik} \rangle$ не воспроизводят адекватно объем РАО на конкретной станции, а используются только для

Таблица 1. Описательная статистика годовых удельных показателей образования РАО по категориям отходов на АЭС России за период 2008–2018 гг.

Категории РАО	Количество значений	$\bar{S}_j$, м ³ /ГВт·ч	Стандартное отклонение	$\langle S_j \rangle$, м ³ /ГВт·ч	Min, м ³ /ГВт·ч	Max, м ³ /ГВт·ч	$\bar{S}_j / \langle S_j \rangle$
ЖРО							
HAO	19	$7,4 \cdot 10^{-2}$	$1,3 \cdot 10^{-1}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$	0	1,23	52,2
CAO	49	$5,2 \cdot 10^{-2}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	$2,5 \cdot 10^{-2}$	$1,1 \cdot 10^{-2}$	$6,5 \cdot 10^{-1}$	2,1
BAO	16	0	0	0	0	0	–
ТРО							
ОНРАО	7	$2,8 \cdot 10^{-2}$	$1,7 \cdot 10^{-2}$	$1,5 \cdot 10^{-2}$	$8,1 \cdot 10^{-3}$	$5,6 \cdot 10^{-2}$	1,9
HAO	74	$8,4 \cdot 10^{-2}$	$9,3 \cdot 10^{-2}$	$3,3 \cdot 10^{-2}$	0	1,05	2,5
CAO	58	$7,9 \cdot 10^{-3}$	$7,5 \cdot 10^{-3}$	$3,3 \cdot 10^{-3}$	0	$5,5 \cdot 10^{-2}$	2,4
BAO	53	$3,3 \cdot 10^{-3}$	$5,2 \cdot 10^{-3}$	$2,8 \cdot 10^{-4}$	$1,6 \cdot 10^{-6}$	$1,1 \cdot 10^{-1}$	11,9

оценки суммарного объема каждой категории РАО по всем АЭС за отдельный год $\langle W_{jk} \rangle$ и за весь рассматриваемый период $\langle W_j \rangle$ (3) и (4):

$$\langle W_{jk} \rangle = \sum_i \langle W_{jik} \rangle, \quad (3)$$

$$\langle W_j \rangle = \sum_k \langle W_{jk} \rangle. \quad (4)$$

Результаты ретроспективной оценки как пропущенных, так и зарегистрированных в экологической отчетности значений ежегодных объемов образования каждой категории РАО за рассматриваемый период ожидаемо показали рост на 25,8%, пропорционально росту производства электроэнергии. При этом структура ЖРО и ТРО отличается от той, которая была получена по доступным данным публичной отчетности (см. рис. 3). В общем объеме ЖРО доля CAO составила 95%, что на 42% больше, чем дает анализ опубликованных данных. Вклад каждой категории отходов в общий объем ТРО изменился разнонаправленно: увеличился на 23% для ОНРАО, уменьшился на 19% для HAO, практически не изменился для CAO и уменьшился почти на 4% для BAO (рис. 5).

Значения медиан $\langle S_j \rangle$ в табл. 1 получены по всем доступным данным, но без учета возможной специфики образования РАО на АЭС с различным типом реакторных установок. Указанную специфику можно игнорировать только в условиях сохранения доли каждой станции в общем объеме электрогенерации на АЭС. Однако за период 2008–2018 гг. рост производства

электроэнергии составил менее 1% на реакторах РБМК, 42% — на ВВЭР и 117% — на БН, поэтому для ретроспективной оценки необходимо учитывать специфические значения удельного показателя образования РАО на АЭС с одним типом реакторов. Несмотря на ограниченную совокупность исходных данных (рис. 2а, б), сформированы подгруппы значений удельных показателей по типам реакторных установок и получены их медианные значения $\langle S_j \rangle_{type}$ (табл. 2).

Данные табл. 2 наглядно показывают, что на АЭС с реакторными установками РБМК при выработке электроэнергии образуется многократно больше РАО всех категорий, чем при производстве такого же количества электроэнергии на АЭС с реакторными установками ВВЭР и БН. Ретроспективная оценка объемов образования РАО с учетом типа реакторной установки $\langle W_{jk} \rangle_{type}$ может быть получена по формуле (2) с использованием $\langle S_j \rangle_{type}$ вместо $\langle S_j \rangle$. Суммарные объемы каждой категории РАО по всем АЭС с одним типом реакторных установок за отдельный год $\langle W_{jk} \rangle_{type}$ и за весь период 2008–2018 гг. $\langle W_j \rangle_{type}$ рассчитываются по формулам (3) и (4) соответственно.

Учет специфики медианных значений $\langle S_j \rangle_{type}$ приводит к разнонаправленному изменению как общего объема РАО, так и доли каждой категории в объеме ЖРО и ТРО. Так, общий объем ЖРО $\langle W_j \rangle_{type}$ выше на 8%, но при этом объем HAO ЖРО меньше на 38% в сравнении с

Рис. 5. Ретроспективная оценка структуры категорий твердых РАО по объему образованных отходов на всех АЭС России за период 2008–2018 гг. без учета типа реакторной установки

Таблица 2. Медианные значения удельных показателей образования РАО для АЭС с различным типом реакторной установки $\langle S_j \rangle_{type}$, м³/ГВт·ч

Тип реакторной установки АЭС	ЖРО		ТРО			
	HAO	CAO	ОНРАО	HAO	CAO	BAO
РБМК	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$4,1 \cdot 10^{-2}$	$4,4 \cdot 10^{-2}$	$5,7 \cdot 10^{-2}$	$5,0 \cdot 10^{-3}$	$8,3 \cdot 10^{-4}$
ВВЭР	$5,0 \cdot 10^{-4}$	$1,8 \cdot 10^{-2}$	$1,4 \cdot 10^{-2}$	$9,0 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$2,3 \cdot 10^{-5}$
БН	–	$2,7 \cdot 10^{-2}$	–	$7,7 \cdot 10^{-3}$	–	$7,2 \cdot 10^{-5}$

Таблица 3. Ретроспективная оценка объема каждой категории ЖРО, образованных на всех АЭС России за период 2008–2018 гг.

Способ оценки	Объем ЖРО, м ³		
	НАО	САО	Сумма ЖРО
Без учета типа реакторной установки $\langle W_j \rangle$	$2,67 \cdot 10^3$	$4,73 \cdot 10^4$	$5,00 \cdot 10^4$
С учетом типа реакторной установки $\langle W_j \rangle_{type}$	$1,65 \cdot 10^3$	$5,22 \cdot 10^4$	$5,38 \cdot 10^4$
Отношение	0,62	1,10	1,08

Таблица 4. Ретроспективная оценка объема каждой категории ТРО, образованных на всех АЭС России за период 2008–2018 гг.

Способ оценки	Объем ТРО, м ³				
	ОНРАО	НАО	САО	ВАО	Сумма ТРО
Без учета типа реакторной установки $\langle W_j \rangle$	$2,76 \cdot 10^4$	$6,27 \cdot 10^4$	$6,18 \cdot 10^3$	$5,15 \cdot 10^2$	$9,69 \cdot 10^4$
С учетом типа реакторной установки $\langle W_j \rangle_{type}$	$4,91 \cdot 10^4$	$5,34 \cdot 10^4$	$5,26 \cdot 10^3$	$6,65 \cdot 10^2$	$1,08 \cdot 10^5$
Отношение	1,78	0,85	0,85	1,29	1,12

ретроспективной оценкой без учета специфики удельных показателей образования РАО (табл. 3). Для ТРО суммарный объем $\langle W_j \rangle_{type}$ выше на 12 % в сравнении с ретроспективной оценкой $\langle W_j \rangle$, даже несмотря на снижение объемов категорий НАО и САО на 15 % (табл. 4). Отмечается увеличение в оценке объема ТРО категории ВАО на 29 % и категории ОНРАО — на 78 %.

Несмотря на существенный рост производства электроэнергии на реакторных установках типа ВВЭР (42 %) и БН (117 %) за период 2008–2018 гг., основной объем РАО каждой категории, сформированный в этот период, приходится на АЭС с установками РБМК (табл. 5). Поскольку рост электрогенерации на реакторах РБМК за это время составлял менее 1 %, можно ожидать, что увеличение суммарных объемов РАО всех АЭС, вычисленное ретроспективно с учетом

Таблица 5. Доля РАО на АЭС с заданным типом реакторной установки в общем объеме для каждой категории РАО, %

Тип реакторной установки	ЖРО		ТРО			
	НАО	САО	ОНРАО	НАО	САО	ВАО
РБМК	68,0	60,8	69,4	81,5	73,3	95,7
ВВЭР	32,0	36,3	30,6	17,7	26,7	3,6
БН	–	3,0	–	0,8	–	0,6

специфики удельных показателей для разных типов реакторов, не будет пропорционально росту производства электроэнергии (25,8 %). В частности, наши расчеты показали, что объемы РАО увеличились с 2008 по 2018 год следующим образом: ЖРО НАО — на 13,0 %; ЖРО САО — на 17,6 %; ТРО ОНРАО — на 12,5 %; ТРО НАО — на 8,2 %; ТРО САО — на 10,9 %; ТРО ВАО — на 2,7 %. В перспективе замещение реакторных установок РБМК на ВВЭР будет сопровождаться снижением объемов РАО при сохранении достигнутого уровня производства электроэнергии.

Прогноз объемов образования РАО на период с 2020 по 2027 год

Согласно планам развития атомного энергопромышленного комплекса РФ объем выработки электрической энергии атомными электростанциями, расположенными на территории России, в 2020 году составит не менее 207,2 млрд кВт·ч в год, а в 2027 году — не менее 228,5 млрд кВт·ч в год [11]. Таким образом, производство электроэнергии вырастет на 10,3 %.

При использовании медианных значений $\langle S_j \rangle$ удельных показателей образования РАО без учета типа реакторной установки (табл. 1), прогнозная оценка объемов отходов в 2020 году составит $5,5 \cdot 10^3$ и $1,1 \cdot 10^4$ м³ для ЖРО и ТРО соответственно. К 2027 г. объем каждой категории РАО вырастет пропорционально росту производства электроэнергии на 10,3 % (табл. 6).

Таблица 6. Прогнозная оценка объемов каждой категории РАО $\langle W_j \rangle$ на всех АЭС России в 2020 и 2027 годах

Год	Объем ЖРО, м ³		Объем ТРО, м ³			
	НАО	САО	ОНРАО	НАО	САО	ВАО
2020	$2,95 \cdot 10^2$	$5,24 \cdot 10^3$	$3,05 \cdot 10^3$	$6,94 \cdot 10^3$	$6,85 \cdot 10^2$	$5,70 \cdot 10^1$
2027	$3,25 \cdot 10^2$	$5,77 \cdot 10^3$	$3,37 \cdot 10^3$	$7,65 \cdot 10^3$	$7,55 \cdot 10^2$	$6,29 \cdot 10^1$

Для прогнозирования объемов образования РАО с учетом специфичных для каждого типа реакторов медианных значений удельных показателей $\langle S_j \rangle_{type}$ (табл. 2) принимается, что весь рост производства электроэнергии произойдет на АЭС с реакторами ВВЭР, а выработка электроэнергии на РБМК и БН останется неизменной — 70 млрд кВт·ч и 8,5 млрд кВт·ч в год соответственно [11]. Тогда прогнозная оценка объемов отходов в 2020 году составит $5,61 \cdot 10^3$ и $1,07 \cdot 10^4$ м³ для ЖРО и ТРО соответственно. К 2027 году объемы увеличатся на 0,8–7,1 % в зависимости от категории РАО (табл. 7).

Таблица 7. Прогнозная оценка объемов каждой категории РАО $\langle W_j \rangle_{type}$ на всех АЭС России в 2020 и 2027 годах

Год	Объем ЖРО, м ³		Объем ТРО, м ³			
	НАО	САО	ОНРАО	НАО	САО	ВАО
2020	$1,67 \cdot 10^2$	$5,45 \cdot 10^3$	$4,95 \cdot 10^3$	$5,20 \cdot 10^3$	$5,25 \cdot 10^2$	$6,17 \cdot 10^1$
2027	$1,78 \cdot 10^2$	$5,83 \cdot 10^3$	$5,26 \cdot 10^3$	$5,39 \cdot 10^3$	$5,53 \cdot 10^2$	$6,22 \cdot 10^1$
Увеличение объема	6,4 %	7,1 %	6,2 %	3,7 %	5,4 %	0,8 %

В целом оба подхода дают приблизительно одинаковый результат прогноза по общему объему РАО в 2027 году:

- ЖРО без учета типа реактора — $6,10 \cdot 10^3$ м³, с учетом — $6,01 \cdot 10^3$ м³;
- ТРО без учета типа реактора — $1,18 \cdot 10^4$ м³, с учетом — $1,13 \cdot 10^4$ м³.

Несмотря на ожидаемый существенный рост производства электроэнергии на АЭС ВВЭР, основная часть любой категории РАО в общем объеме отходов будет формироваться на установках типа РБМК вплоть до 2027 года (табл. 8 и 9).

Таблица 8. Прогноз вклада (%) в общий объем для каждой категории РАО на АЭС с заданным типом реакторной установки в 2020 году

Тип реакторной установки	ЖРО		ТРО			
	НАО	САО	ОНРАО	НАО	САО	ВАО
РБМК	61,3	53,1	62,7	76,4	67,1	94,2
ВВЭР	38,7	42,7	37,3	22,4	32,9	4,8
БН	–	4,2	–	1,3	–	1,0

Таблица 9. Прогноз вклада (%) в общий объем для каждой категории РАО на АЭС с заданным типом реакторной установки в 2027 году

Тип реакторной установки	ЖРО		ТРО			
	НАО	САО	ОНРАО	НАО	САО	ВАО
РБМК	57,6	49,6	59,1	73,7	63,7	93,4
ВВЭР	42,4	46,4	40,9	25,1	36,3	5,6
БН	–	3,9	–	1,2	–	1,0

Рис. 6. Прогнозная оценка структуры категорий твердых РАО по объему образованных отходов на всех АЭС России в 2027 году

В 2027 году объем ЖРО на 97 % будет состоять из категории САО. Ожидаемая в 2027 году структура ТРО по категориям РАО представлена на рис. 6.

Практически 95 % прогнозируемого объема ТРО в сумме по всем АЭС будет относиться к категории ОНРАО и НАО.

Заключение

Сведения об объемах ежегодного образования РАО на АЭС России, представленные в публичных экологических отчетах АО «Концерн Росэнергоатом» за период 2008—2018 гг., носят фрагментарный характер. Это не позволяет адекватно оценить структуру РАО по категориям и сделать однозначный вывод об увеличении или снижении объемов их образования с учетом существенного роста (на 25,8%) производства электроэнергии. Вместе с тем, доступные данные позволяют получить средние и медианные значения удельных показателей образования двух категорий ЖРО и четырех категорий ТРО для каждой АЭС.

При постоянстве вклада каждой АЭС в общее количество произведенной электроэнергии ретроспективная и прогнозная оценки объема образования РАО могут выполняться без учета типа реакторной установки с использованием медианных значений всей сформированной выборки. В этом случае оценка изменения объема любой категории РАО будет точно соответствовать изменению производства электроэнергии. Однако с учетом тенденции к значительному росту производства электроэнергии на реакторных установках ВВЭР и практически фиксированному ежегодному производству на РБМК и БН, целесообразно применять медианные значения удельного показателя образования РАО, специфичного для каждого типа реакторной установки, тем более что анализ показал многократное превышение удельного показателя образования любой категории РАО на АЭС с реакторами РБМК по сравнению с ВВЭР и БН. Применение специфичного для каждого типа реакторной установки удельного показателя образования РАО приводит к повышенной ретроспективной оценке объема ЖРО и ТРО за период 2008—2018 гг. и сопоставимой прогнозной оценке на 2027 год в сравнении с использованием удельного показателя без учета типа реакторной установки. Как за прошедший период, так и в перспективе до 2027 года основной объем всех категорий ЖРО и ТРО формируется на АЭС с реакторами РБМК. В перспективе замещение установок РБМК на ВВЭР будет сопровождаться снижением объемов РАО при сохранении достигнутого уровня производства электроэнергии.

Благодарность

Авторы выражают благодарность Жаргаловой Сэндэме Владимировне за скрупулезную работу по сбору и систематизации исходной информации для проведения анализа и подготовки материала публикации.

Литература

1. Стратегия обращения с радиоактивными отходами АО «Концерн Росэнергоатом»: Утв. Госкорпорацией «Росатом» 06.12.2013; введена в действие приказом Концерна от 19.03.2014 № 9/2790-П.
2. Александрова Т. А., Блохин П. А., Самойлов А. А., Курындин А. В. Анализ данных по радионуклидному составу РАО в контексте оценки долговременной безопасности их захоронения // Радиоактивные отходы. 2018. № 2 (3). С. 44–51.
3. Васильев А. В., Екидин А. А., Юсупов Р. И., Пудовкин А. В. Нормативно-методическое обеспечение для подтверждения критериев приемлемости радиоактивных отходов АЭС для захоронения // АНРИ. 2017. № 4 (91). С. 23–30.
4. Варлаков А. П., Сергеева Я. В., Ивлиев М. В., Германов А. В. О разработке требований к измерениям радиационных характеристик ТРО, образующихся при ВЭ ЯРОО // Радиоактивные отходы. 2018. № 4 (5). С. 76–82.
5. Status and Trends in Spent Fuel and Radioactive Waste Management. Nuclear Energy Series. No. NW-T-1.14. IAEA. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, VIENNA, 2018, p.74.
6. Качан П. П., Краснов И. М., Стахив М. Р. Опыт эксплуатации комплекса переработки радиоактивных отходов на Смоленской АЭС // Радиоактивные отходы. 2018. № 1 (2). С. 34–41.
7. Аvezниязов С. Р., Стахив М. Р. Опыт работы по обращению с ЖРО на Кольской АЭС // Радиоактивные отходы. 2018. № 4 (5). С. 49–54.
8. Волков А. С., Наливайко Е. М. Обращение с радиоактивными отходами на блоке № 1 Нововоронежской АЭС-2 проекта АЭС-2006 // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2017. № 3. С. 183–194.
9. Экологические отчеты АО «Концерн Росэнергоатом». URL: https://www.rosenergoatom.ru/safety_environment/vozdeystvie-na-okruzhayushchuyu-sredu/ekologicheskie-otchety-ao-kontsern-rosenergoatom/ (02.03.2020).
10. Power Reactor Information System (PRIS). IAEA. URL: <https://pris.iaea.org/PRIS/CountryStatistics/CountryDetails.aspx?current=RU> (25.08.2019).
11. Постановление Правительства РФ от 2 июня 2014 г. № 506-12 «Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Развитие атомного энергопромышленного комплекса», Москва.

Информация об авторах

Екидин Алексей Акимович, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт промышленной экологии УрО РАН (620137, г. Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 20), e-mail: ekidin@mail.ru.

Антонов Константин Леонидович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт промышленной экологии УрО РАН (620137, г. Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 20), e-mail: antonov@ecko.uran.ru.

Библиографическое описание статьи

Екидин А. А., Антонов К. Л. Применение удельного показателя для оценки объемов образования РАО при нормальной эксплуатации АЭС России // Радиоактивные отходы. 2020. № 2 (11). С. 66–74. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-2-66-74.

APPLICATION OF A SPECIFIC INDICATOR FOR THE ESTIMATION OF RADIOACTIVE WASTES GENERATION VOLUMES DURING NORMAL OPERATION OF NUCLEAR POWER PLANTS IN RUSSIA

Ekidin A. A., Antonov K. L.

Institute of Industrial Ecology, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia

Article received on April 6, 2020

Generation of radioactive wastes (RW) is viewed a most urgent problem of radiation safety under normal operation of nuclear power plants (NPP). The paper demonstrates the application of a specific indicator (rate) of RW generation per unit of generated power ($m^3/GW \cdot h$) for a retrospective assessment and forecasting of RW generation volumes at Russian NPPs. Mean and median values of annual specific RW generation rates were calculated for each NPP based on published environmental reports of JSC Rosenergoatom Concern for the period of 2008–2018. Advantage of applying median values in retrospective and forecast assessments was shown. Medians for solid very low-level,

low-level, intermediate-level and high-level radioactive waste amounted to $1.5 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3/\text{GW} \cdot \text{h}$, $3.3 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3/\text{GW} \cdot \text{h}$, $3.3 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{GW} \cdot \text{h}$ and $2.8 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{GW} \cdot \text{h}$, respectively; for liquid low-level and intermediate-level waste these values accounted for $1.4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{GW} \cdot \text{h}$, $2.5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{GW} \cdot \text{h}$, respectively. NPPs with RBMK reactor units are characterized by the highest mean and median values of specific RW generation rates for all RW categories. Given various types of reactor facilities and their characteristic specific rates, retrospective estimates for the total volume of liquid RW was increased by 8% and for solid RW – by 12%. The forecast estimates based on specific rate medians, as well as on increased power generation planned for Russian NPPs indicates probable increase in RW generation volumes by 0.8–7.1% (depending on waste category) from 2020 to 2027.

Keywords: radioactive waste, specific indicator, reactor facility, nuclear power plant.

Acknowledgment

Authors would like to express their greatest appreciation to Zhargalova Sendame Vladimirovna for her meticulous work in collecting and systematizing the source information for the analysis and preparation of the publication material.

References

1. Strategiya obrasheniya s radioaktivnymi othodami AO "Koncern Rosenergoatom": Utv. Goskorporatsiei "Rosatom" 06.12.2013: vvedena v deystvie prikazom Koncerna ot 19.03.2014 № 9/2790-P. (In Russian).
2. Aleksandrova T. A., Blohin P. A., Samojlov A. A., Kuryndin A. V. Analiz dannyh po radionuklidnomu sostavu RAO v kontekste ocenki dolgovremennoj bezopasnosti ih zahoroneniya [Analysis of the RW Radionuclide Composition in the Context of Long-Term Safety of Its Disposal]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste*, 2018, no. 2 (3), pp. 44–51.
3. Vasil'ev A. V., Ekin A. A., Yusupov R. I., Pudovkin A. V. Normativno-metodicheskoe obespechenie dlya podtverzhdeniya kriteriev priemlemosti radioaktivnyh othodov AES dlya zahoroneniya [Procedures for Confirmation of Acceptance Criteria for Geological Disposal of NPPs Radioactive Waste]. *ANRI — ANRI*, 2017, no. 4 (91), pp. 23–30.
4. Varlakov A. P., Sergeicheva Ya. V., Ivliev M. V., Germanov A. V. O razrabotke trebovanij k izmereniyam radiacionnyh harakteristik TRO, obrazuyushchih pri VE YAROO [On the Development of Requirements for Measurement of Radiation Characteristics of solid radioactive waste generated during decommissioning]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste*, 2018, no. 4 (5), pp. 76–82.
5. Status and Trends in Spent Fuel and Radioactive Waste Management. Nuclear Energy Series. No. NW-T-1.14. IAEA. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, VIENNA, 2018, p. 74.
6. Kachan P. P., Krasnov I. M., Stahiv M. R. Opyt ekspluatatsii kompleksa pererabotki radioaktivnyh othodov na Smolenskoj AES [Experience of exploiting the radioactive waste recycling complex at the Smolensk NPP]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste*, 2018, no. 1 (2), pp. 34–41.
7. Avezniyazov S. R., Stahiv M. R. Opyt raboty po obrashcheniyu s ZHRO na Kol'skoj AES [Experience of Recycling the Liquid Radioactive Waste at the Kola NPP]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste*, 2018, no. 4 (5), pp. 49–54.
8. Volkov A. S., Nalivajko E. M. Obrashchenie s radioaktivnymi othodami na bloke № 1 Novovoronezhskoj AES-2 proekta AES-2006 [Radioactive waste management at the Novovoronezh NPP II-1 (NPP-2006 design)]. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika — Nuclear Energy and Technology*, 2017, no. 3, pp. 183–194.
9. Ekologicheskie otchety AO "Koncern Rosenergoatom" [Environmental reports of JSC "Concern Rosenergoatom"]. URL: https://www.rosenergoatom.ru/safety_environment/vozdeystvie-na-okruzhayushchuyu-sredu/ekologicheskie-otchety-ao-kontsern-rosenergoatom/ (02.03.2020).
10. Power Reactor Information System (PRIS). IAEA. URL: <https://pris.iaea.org/PRIS/CountryStatistics/CountryDetails.aspx?current=RU> (25.08.2019).
11. Decree of the Government of the Russian Federation of 2 June 2014, no. 506-12 "On approval of the state program of the Russian Federation "Development of the nuclear power industry complex" (In Russian).

Information about the authors

Ekin Alexey Akimovich, PhD, Leading researcher, Institute of Industrial Ecology, Ural Branch, Russian Academy of Sciences (20, S. Kovalevskaya st., Yekaterinburg, 620137, Russia), e-mail: ekidin@mail.ru.

Antonov Konstantin Leonidovich, PhD, Senior research associate, Institute of Industrial Ecology, Ural Branch, Russian Academy of Sciences (20, S. Kovalevskaya st., Yekaterinburg, 620137, Russia), e-mail: antonov@ecko.uran.ru.

Bibliographic description

Ekin A. A., Antonov K. L. Application of a Specific Indicator for the Estimation of Radioactive Wastes Generation Volumes During Normal Operation of Nuclear Power Plants in Russia. *Radioactive Waste*, 2020, no. 2 (11), pp. 66–74. (In Russian). DOI: 10.25283/2587-9707-2020-2-66-74.