

УДЕЛЬНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ОБРАЗОВАНИЯ ТВЕРДЫХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ НА АТОМНЫХ СТАНЦИЯХ PWR И BWR

Д. Д. Десятов¹, Д. А. Терентьев², А. С. Фадеева², А. А. Екидин¹, М. Д. Пышкина¹

¹ *Институт промышленной экологии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия*

² *Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина г. Екатеринбург, Россия*

В статье показаны различия удельных показателей образования радиоактивных отходов при производстве электроэнергии на АЭС двух наиболее распространенных в мире типов реакторных установок PWR и BWR. Удельный показатель специфичен для каждой АЭС и демонстрирует образование каждой категории радиоактивных отходов при производстве электроэнергии в единицах активности и/или объема радиоактивных отходов на единицу выработанной электроэнергии (ГБк/ГВт·ч) и ($\text{м}^3/\text{ГВт}\cdot\text{ч}$). Из опубликованных данных об образовании радиоактивных отходов АЭС США за период 2005–2020 гг. получены средние и медианные значения годовых удельных показателей образования радиоактивных отходов для каждой АЭС с учетом типа реакторных установок. Наибольшие значения удельных показателей практически для всех категорий РАО оказались характерны для АЭС с реакторными установками BWR. Медианы удельных показателей твердых РАО на АЭС PWR и BWR по принятым в США классам a, b, c, d равны $6,00\cdot 10^{-1}$ ($1,80\cdot 10^{-3}$), $4,82\cdot 10^{-3}$ ($2,13\cdot 10^{-2}$), $1,70\cdot 10^0$ ($1,05\cdot 10^{-4}$), $2,30\cdot 10^{-4}$ ($1,80\cdot 10^{-3}$) ГБк/ГВт·ч ($\text{м}^3/\text{ГВт}\cdot\text{ч}$). АЭС с реакторными установками типа BWR характеризуются большим значением удельных показателей (ГБк/ГВт·ч) и ($\text{м}^3/\text{ГВт}\cdot\text{ч}$).

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

1. Введение

Решение задачи безопасного обращения с накопленными ранее и образующимися в настоящее время РАО во многом определяет масштаб и интенсивность развития радиационных и ядерных технологий в каждой стране. Минимизация образования радиоактивных отходов на всех стадиях эксплуатации АЭС является актуальной задачей для любого государства, в котором строятся и/или эксплуатируются атомные электростанции. Обмен информацией, объединение усилий различных стран позволяют повышать эффективность и результативность мер обеспечения безопасности при обращении с РАО. Объединенная конвенция МАГАТЭ о безопасности обращения с отработавшим топливом и с радиоактивными отходами в числе приоритетных целей мирового сообщества предусматривает достижение и поддержку высокого уровня безопасности на всех этапах обращения с РАО на основе не только национальных мер, но и укрепления международного сотрудничества [1]. Объединенная конвенция рекомендует государствам стремиться к минимизации образования радиоактивных отходов, это основной элемент национальной политики в области обращения с радиоактивными отходами [1]. Мероприятия по минимизации образования радиоактивных отходов должны затрагивать все этапы жизненного цикла объектов использования атомной энергии [2–4].

Для оценки устойчивости национальных ядерно-энергетических систем МАГАТЭ предлагает применение методологии INPRO. Согласно базовому принципу методологии INPRO проекты новых АЭС должны быть более безопасны для персонала, населения и окружающей среды, чем сопоставимые атомные электростанции, эксплуатируемые в настоящее время [5–7]. Повышение безопасности может быть достигнуто предотвращением или уменьшением образования РАО. В контексте обращения с РАО методология INPRO предлагает реализацию требований по минимизации, классификации и категоризации РАО [7].

Понимая объективную зависимость количества образования РАО от масштаба и интенсивности применения радиоактивных и ядерных материалов, методология INPRO рекомендует сводить к минимуму прежде всего удельные характеристики образования РАО. Оценка удельных характеристик предлагает использовать количественные показатели величин РАО, такие как активность, объем, масса и т. д., отнесенные к единице продукции или вырабатываемой энергии [5, 7]. Анализ соблюдения базового принципа методологии INPRO выполняется путем сравнения удельных показателей образования РАО проектируемых электростанций с действующими АЭС. Для подтверждения базового принципа методологии INPRO необходимо, чтобы удельный показатель образования РАО проектируемых энергоблоков обоснованно не превышал этот показатель действующих в настоящее время АЭС. Такое обоснование может быть выполнено посредством анализа статистически значимого количества данных по всем образованным РАО при производстве электроэнергии на АЭС с наиболее распространенными типами реакторных установок.

На 2021 г. в мире эксплуатируется 443 энергетических реактора и примерно 82 % из них оснащены ядерными энергетическими установками (ЯЭУ) типа PWR и BWR, на долю которых приходится 89 % установленной мощности среди всех АЭС мира [8]. Наибольшее количество действующих реакторов в мире эксплуатируется в США – 93 энергоблока АЭС, из них 62 энергоблока с реакторными установками PWR и 31 энергоблок с реакторными установками BWR. Средний возраст ядерных энергоблоков США – 43 года. Существующая практика в США предполагает выдачу лицензий органом ядерного регулирования на эксплуатацию реакторов в течение 40 лет, после чего могут продлевать срок до 20 лет [9]. Большинство АЭС США уже проработали первый сорокалетний интервал времени и продлили свои лицензии на эксплуатацию. Несколько ЯЭУ к 2029 г. приблизятся к концу первого 20-летнего продления и будут стремиться продлить свои лицензии во второй раз еще на 20 лет.

Открытые отчеты Комиссии по ядерному регулированию (NRC) США за 2005–2020 гг. содержат ежегодные сведения об объемах, активности и радионуклидному составу образованных РАО на каждой АЭС. Анализ значительного количества данных за протяженный период эксплуатации АЭС с наиболее распространенными в мире реакторными установками позволяет получить представительные результаты удельных показателей образования РАО для ныне эксплуатируемых АЭС. В будущем это позволит обосновать значения удельных показателей образования РАО на проектируемых АЭС в целях соблюдения базового принципа методологии INPRO.

Несмотря на общие глобальные цели, в истории многих стран были длительные периоды монополии государств на обращение с радиоактивными и ядерными материалами, что препятствовало международному сотрудничеству в этой области [10]. Это обстоятельство до сих пор определяет различие национальных подходов к набору системных элементов, а также к взаимосвязям, установленным между этими элементами в структурах, описывающих системы

обращения с РАО в различных странах [11]. Национальная система классификации и категоризации РАО в США имеет в основе уникальные принципы отнесения материалов к радиоактивным отходам, но опирается на систему, основанную на источниках их образования [12]. Это обстоятельство не позволяет однозначно сопоставить количественные данные об образовании РАО на АЭС США с классами и категориями, рекомендуемыми МАГАТЭ [13]. С другой стороны, детальная информация об активности и радионуклидном составе РАО по каждому пути образования РАО при нормальной эксплуатации АЭС сама по себе представляет ценность, которая не может быть получена из обобщенных отчетных данных годового образования РАО в других странах, реализующих рекомендации МАГАТЭ по классификации и категоризации РАО.

2. Материалы и методы

Выбор численных значений ежегодного образования РАО при нормальной эксплуатации АЭС для фиксирования достигнутых уровней в действующих АЭС выполнен на основе сформированной электронной базы данных открытых ежегодных отчетов за период 2005–2020 гг. по обращению с РАО на 65 АЭС США. Анализировались данные по объему и суммарной активности РАО за каждый год в рассматриваемый 16-летний период. Для каждой в отдельности АЭС сформированы подвыборки отношений годового объема каждого класса РАО к годовому производству электроэнергии ($\text{м}^3/\text{ГВт}\cdot\text{ч}$) и подвыборки отношений годовой суммарной активности каждого класса РАО к годовому производству электроэнергии ($\text{ГБк}/\text{ГВт}\cdot\text{ч}$). Данные о производстве электроэнергии каждой АЭС за каждый год в период 2005 – 2020 гг. как сумма электроэнергии, произведенной каждой АЭС, получены из информационной системы по энергетическим реакторам МАГАТЭ (PRIS) [8].

Официальные ежегодные отчеты всех действующих АЭС США, размещенные в открытом доступе, содержат сведения о четырех классах твердых РАО [14]:

- a. отходы жидкостных систем – отработавшие ионообменные смолы, кубовые остатки от упаривания или электрохимической очистки низкоактивных вод;
- b. сухие твердые отходы – сухие прессуемые отходы, радиоактивно загрязненное оборудование;
- c. сухие твердые отходы – элементы конструкций с наведенной активностью, управляющие стержни;
- d. прочие сухие твердые отходы – промасленные материалы, шлам сточных вод, фильтры, почва.

Представленные четыре класса твердых радиоактивных отходов (ТРО) по действующей в США системе классификации РАО относятся к низкоактивным отходам (low-level waste – LLW). Указанные четыре класса РАО рассматриваются отдельно от:

- высокоактивных отходов и отходов переработки облученного топлива, содержащих продукты деления (high-level waste – HLW);
- отработанного ядерного топлива (spent nuclear fuel – SNF);
- трансурановых отходов, не входящих в класс HLW, но содержащих материалы с трансурановыми элементами (атомный номер выше 92) концентрацией свыше 10 нКи/г или содержащие альфа-излучающие трансурановые элементы с периодом полураспада свыше 20 лет и с концентрацией свыше 100 нКи/г (transuranic waste – TRU) [11].

Сформированная выборка содержит 4 592 записи данных о годовых объемах ($\text{м}^3/\text{год}$) и активности РАО ($\text{Бк}/\text{год}$) для всех атомных станций США, образующихся при

штатной работе АЭС. При формировании выборки не учитывались данные о РАО от выведенных после 2005 г. из эксплуатации АЭС. Ежегодные данные по отдельным классам РАО за некоторые периоды представлены в ежегодных отчетах фрагментарно. Генеральная совокупность данных по 65 атомным станциям за 16 лет по каждому классу РАО должна содержать 1 040 записей об объемах и столько же об активности образованных отходов. В контексте классов РАО табл. 1 содержит характеристику полноты данных соответствующих генеральных совокупностей, представленных в открытых отчетах 65 АЭС США.

Таблица 1. Полнота генеральных совокупностей данных о РАО АЭС США [14]

Класс РАО	Данные о ежегодном объеме	Данные о ежегодной активности
a	93,8 %	95,3%
b	98,2 %	98,3%
c	14,6 %	14,1%
d	49,0 %	51,4%

Максимальное количество записей относится к классу b и классу a. Минимальное наполнение генеральной совокупности данных об объеме и активности представлено по облученным компонентам, управляющим стержням (класса c) и РАО в виде промасленных материалов, шламов сточных вод, фильтров, почвы (класса d), что, вероятно, связано с периодичным характером их образования.

На основе данных МАГАТЭ (PRIS) [8] сформирована выборка, содержащая 1 040 записей данных о годовом производстве электроэнергии каждой рассматриваемой АЭС за период 2005–2020 гг. Общее количество произведенной электроэнергии за наблюдаемый период составило 12 752 932 ГВт·ч. Ежегодное производство электроэнергии на АЭС США меняется год к году (рис.1).

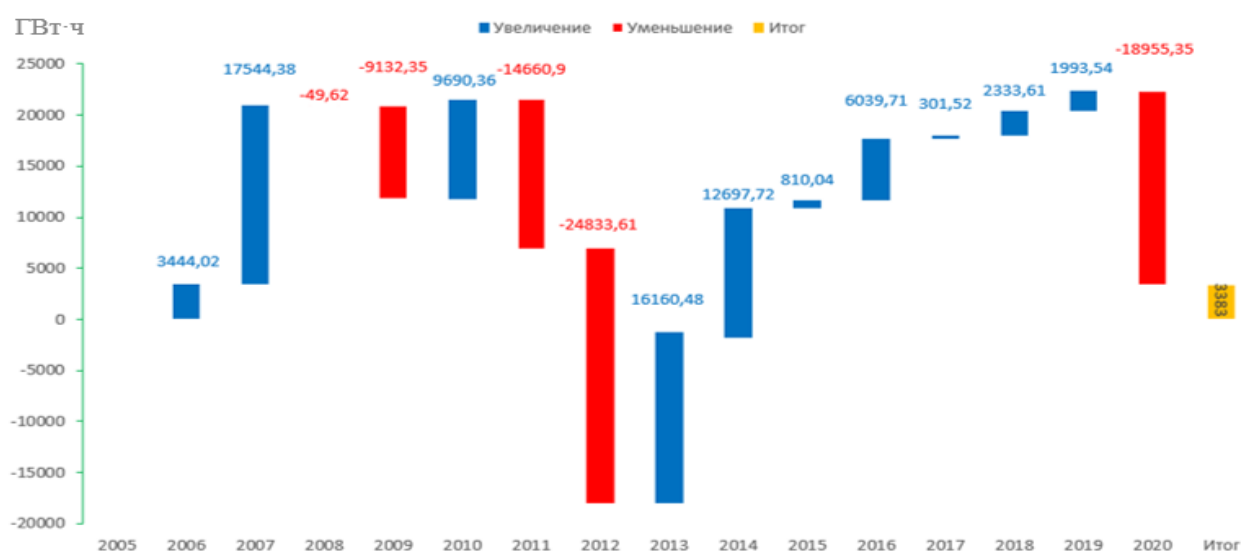


Рис. 1. Динамика производства электроэнергии на АЭС США за 2005–2020 гг. [8]

За рассмотренный период произошло два цикла снижения и увеличения годового производства электрической энергии на АЭС США. За 16 лет прирост электроэнергии составил меньше 0,5 % (рис.1). В рассмотренный период доля выработки электроэнергии на АЭС в сравнении с другими источниками производства электроэнергии в США оставалась практически одинаковой, около 19 % [8].

Для реализации базового принципа методологии INPRO в контексте минимизации отходов необходимо определить в проектах новых АЭС реально достижимые численные критерии образования РАО, не превышающие достигнутые аналогичные значения современных эксплуатируемых атомных станций. Устанавливать такие значения в формате абсолютных величин объема и активности РАО не корректно, т. к. не будут учтены важные параметры каждого энергоблока, влияющие на образование РАО: выработка электрической энергии, продолжительность остановки реакторной установки, тепловая и электрическая мощность энергоблока и т. д. Удобным критерием для сравнения существующих практик являются удельные показатели образования РАО, а именно удельный показатель объема и удельный показатель активности конкретной АЭС, приведенные к годовому производству электроэнергии рассматриваемой электростанции. Для формализации расчетов и анализа полученных данных вводятся следующие условные обозначения:

V_{ijk} – объем ежегодного образования РАО i -й АЭС, j -го класса РАО за k -й год наблюдения, м³;

A_{ijk} – активность ежегодного образования РАО i -й АЭС, j -го класса РАО за k -й год наблюдения, Гбк;

E_{ik} – годовое производство электроэнергии i -й АЭС за k -й год наблюдения, ГВт·ч;

S_{ijk} – удельный показатель годового объема РАО i -й АЭС, j -го класса РАО за k -й год наблюдения, м³/ГВт·ч;

Z_{ijk} – удельный показатель годовой активности РАО i -й АЭС, j -го класса РАО за k -й год наблюдения, Гбк/ГВт·ч;

Ежегодные значения V_{ijk} , A_{ijk} и E_{ik} – исходные данные для анализа и расчета средних и медианных значений, а также искомым величин S_{ijk} и Z_{ijk} .

Расчет искомой величины S_{ijk} для i -й АЭС выполняется по всем доступным данным j -го класса РАО за k -й год наблюдения (1):

$$S_{ijk} = \frac{V_{ijk}}{E_{ik}} \quad (1)$$

Расчет искомой величины Z_{ijk} для i -й АЭС выполняется по всем доступным данным j -го класса РАО за k -й год наблюдения (2):

$$Z_{ijk} = \frac{A_{ijk}}{E_{ik}} \quad (2)$$

Каждое отдельное значение S_{ijk} и Z_{ijk} специфично и характеризует объем и активность образования РАО на конкретной АЭС, конкретного класса в конкретный год на каждый ГВт·ч произведенной электроэнергии. По генеральной совокупности всех значений S_{ijk} в целом без учета типа реакторных установок $\{S_{ijk}\}$ определяются средние значения \bar{S}_j и медианное значение $\langle S_j \rangle$ удельных показателей объема для j -го класса РАО. Аналогично по генеральной совокупности всех значений Z_{ijk} в целом без учета типа реакторных установок $\{Z_{ijk}\}$ определяются средние значения \bar{Z}_j и медианное значение $\langle Z_j \rangle$ удельных показателей активности для j -го класса РАО.

Из всей совокупности значений $\{S_{ijk}\}$ и $\{Z_{ijk}\}$ сформированы подвыборки по типу реакторной установки – $\{S_{ijk}\}_{PWR}$ и $\{Z_{ijk}\}_{PWR}$ для АЭС с реакторными установками типа PWR и $\{S_{ijk}\}_{BWR}$ и $\{Z_{ijk}\}_{BWR}$ для АЭС с реакторными установками типа BWR. Для каждой подвыборки и всей совокупности получены оценки медиан годовых удельных показателей образования РАО $\langle S_j \rangle$, $\langle S_j \rangle_{PWR}$, $\langle S_j \rangle_{BWR}$ и $\langle Z_j \rangle$, $\langle Z_j \rangle_{PWR}$, $\langle Z_j \rangle_{BWR}$.

3. Результаты

Анализ исходных данных показал, что суммарный объем ежегодного образования РАО четырех рассматриваемых классов не остается постоянным год к году и характеризуется разнонаправленной динамикой. На рис. 2 приводится изменение объема РАО год к году в сравнении с объемом образованных РАО на всех АЭС США в 2005 г.

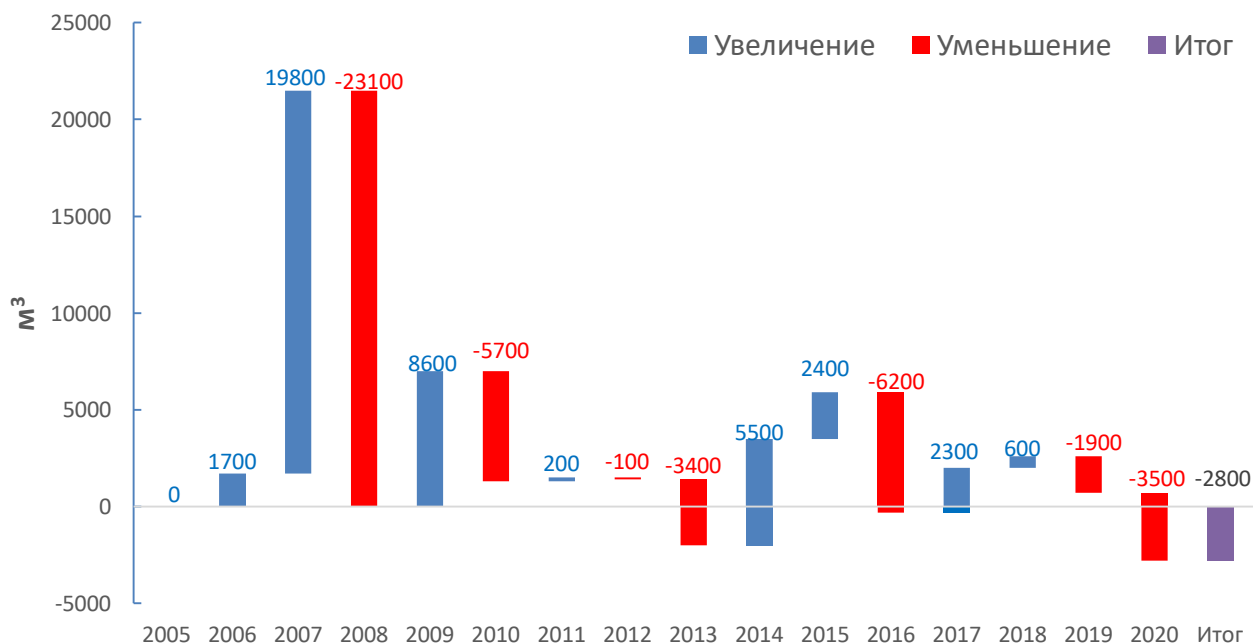


Рис. 2. Динамика объема образования РАО год к году на АЭС США с 2005 по 2020 г.

За рассмотренный период 2005–2020 гг. выделяется один год (2007 г.) по резкому увеличению объема сформированных РАО. Динамика ежегодной активности по сумме всех классов РАО, сформированных на всех АЭС, в сравнении с объемом образованных РАО на всех АЭС в 2005 г. представлена на рис. 3.

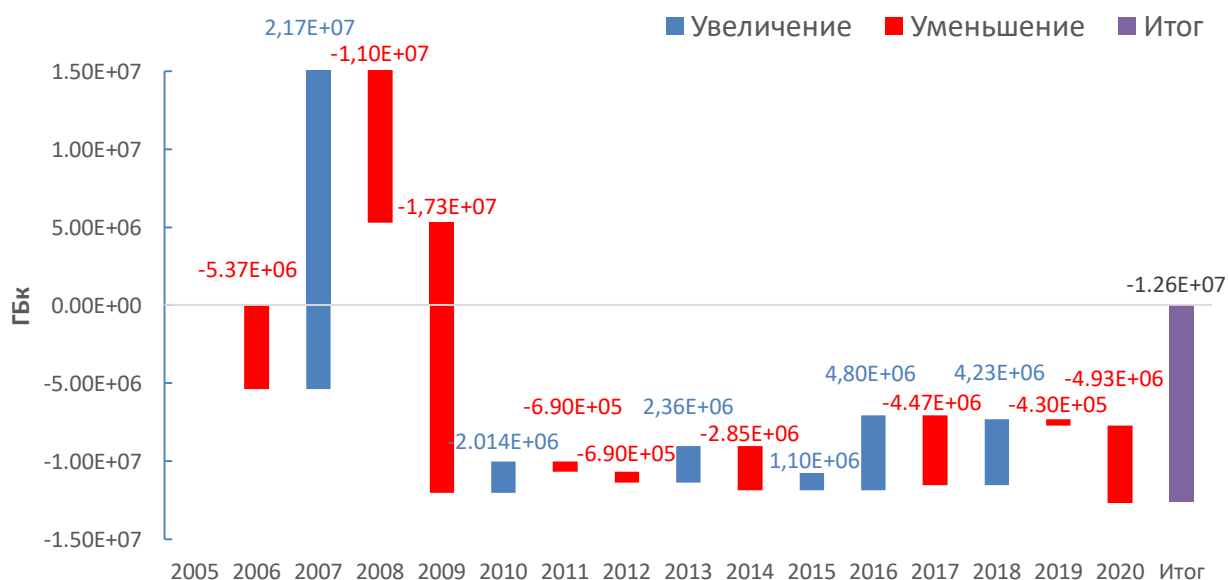


Рис. 3. Динамика активности РАО год к году на АЭС США с 2005 по 2020 г.

Суммарная активность РАО за каждый отдельный год всех АЭС год к году изменяется разнонаправленно и часто несинхронно с динамикой образованного объема РАО. Следует отметить резкое увеличение суммарной активности РАО в 2007 г., синхронно с резким ростом суммарного объема РАО. За рассматриваемый шестнадцатилетний период в различные годы 8 раз наблюдался рост объема и 6 раз рост активности ежегодного образования РАО всеми АЭС США. Только за три года (2007, 2015 и 2018) увеличение объема ежегодного образования РАО сопровождалось ростом суммарной активности отходов. За десять различных лет снижения суммарной активности по всем классам РАО синхронное изменение годового объема и активности происходило лишь в половине случаев. Такие наблюдения позволяют сделать предположение об отсутствии прямой зависимости между суммарной активностью и суммарным объемом ежегодно образующихся всех классов РАО.

Вклад в суммарный объем и суммарную активность твердых РАО специфичен для каждого рассматриваемого класса отходов. Структура ТРО по объему и активности образованных отходов на всех АЭС США за период 2005–2020 гг. представлена в табл. 2.

Таблица 2. Структура твердых отходов по классам РАО образованных отходов на всех АЭС США за период 2005–2020 гг.

Класс РАО	Объем РАО, м ³	Доля в суммарном объеме	Активность ТРО, ГБк	Доля в суммарной активности
<i>a</i>	39 000	9,3 %	$1,51 \cdot 10^7$	14,7 %
<i>b</i>	347 000	82,3 %	$4,19 \cdot 10^5$	0,4 %
<i>c</i>	2 140	0,5 %	$8,65 \cdot 10^7$	84,0 %
<i>d</i>	33 300	7,9 %	$9,98 \cdot 10^5$	1,0 %

Вклад каждого класса в суммарный объем образованных РАО распределен следующим образом: $b > a > d > c$. В суммарном объеме твердых РАО сухие прессуемые отходы и радиоактивно загрязненное оборудование (класс *b*) занимают подавляющее большинство. Вклад каждой категории в суммарную активность образованных РАО распределен следующим образом: $c > a > d > b$. Несмотря на то, что не менее 99,5 % объема РАО от АЭС США приходится на классы *a*, *b* и *d*, вклад в суммарную активность этих классов не превышает 17 %. Облученные компоненты и управляющие стержни (класс *c*) вносят наибольший вклад в суммарную активность РАО, но доля в суммарном объеме данного класса составляет не более 0,5 %.

За период 2005–2020 гг. АЭС с реакторными установками (далее РУ) PWR произвели 8 414 385 ГВт·ч (66 %) электроэнергии, а АЭС с РУ BWR – 4 338 548 ГВт·ч (34 %) электроэнергии. Ожидание вклада АЭС с различным типом РУ в суммарный объем ТРО (м³) пропорционально произведенной электроэнергии не оправдался. Анализ данных сформированной выборки показывает обратную ситуацию (рис. 4). Вклад АЭС с РУ типа BWR в общий объем РАО (м³) всех классов, за исключением сухих прессуемых отходов и радиоактивно загрязненного оборудования (класс *b*), превышает вклад АЭС с РУ типа PWR.

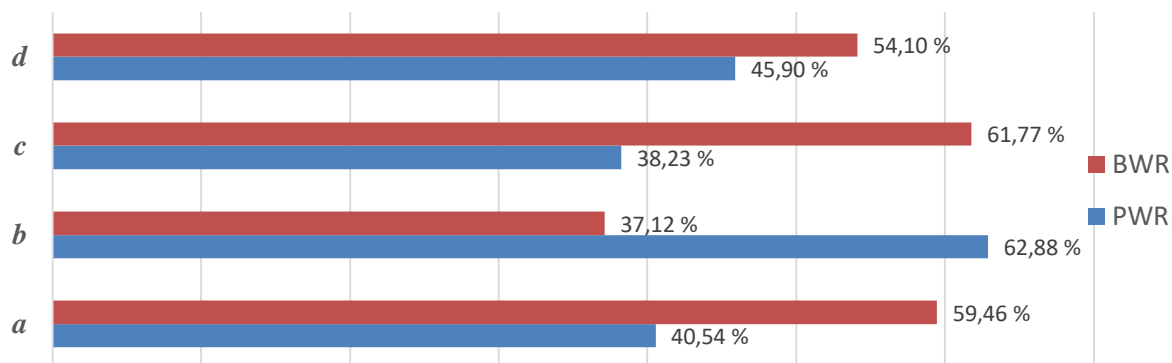


Рис. 4. Вклад АЭС с РУ различного типа в объем каждого класса РАО за период 2005–2020 гг.

Анализ данных по суммарной активности каждого класса РАО с учетом АЭС различных типов РУ показал, что вклад в суммарную активность также не пропорционален вкладу в произведенную электроэнергию (рис.5).

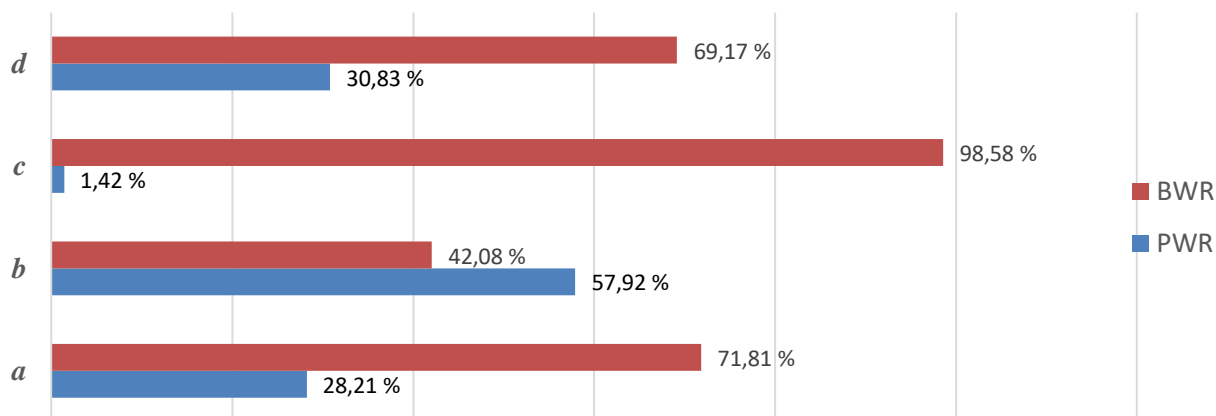


Рис. 5. Вклад АЭС с РУ различного типа в суммарную активность РАО за период 2005–2020 гг.

Вклад АЭС с РУ типа BWR в формирование сухих прессуемых РАО и радиоактивно загрязненного оборудования (класс b) меньше вклада АЭС с РУ типа PWR. По остальным классам отходов АЭС с РУ типа BWR лидирует по суммарной активности образованных РАО за рассмотренный период.

Полученные результаты ежегодных средних и медианных значений абсолютных величин активности и объема каждого класса РАО в отдельности представлены в табл. 3.

Таблица 3. Среднее и медианное значения ежегодного объема РАО АЭС США за период 2005–2020 гг.

Класс РАО	Ежегодный объем РАО, м ³		Ежегодная активность РАО, Гбк	
	Среднее значение	Медиана	Среднее значение	Медиана
a	42,6	21,6	$1,96 \cdot 10^4$	$6,96 \cdot 10^3$
b	$3,62 \cdot 10^2$	$2,38 \cdot 10^2$	$5,26 \cdot 10^2$	57,5
c	15,1	0,99	$7,59 \cdot 10^5$	$2,69 \cdot 10^4$
d	69,6	1,84	$2,40 \cdot 10^3$	1,89

Средние значения активности и объема всех классов РАО превышают соответствующие медианные значения (табл. 4), отсюда можно сделать вывод, что имеется асимметрия распределения рассматриваемых параметров.

Таблица 4. Среднее и медианное значения удельной активности РАО АЭС США за период 2005 – 2020 гг.

Класс РАО	Удельная активность РАО, ГБк/м ³	
	Среднее значение	Медиана
a	$4,60 \cdot 10^2$	$3,22 \cdot 10^2$
b	1,45	0,24
c	$5,02 \cdot 10^4$	$2,71 \cdot 10^4$
d	$3,45 \cdot 10^1$	1,03

По удельной активности РАО, рассчитанной по медианным и средним значениям, классы отходов расположились в следующей последовательности: $c > a > d > b$.

На основе исходных данных об объеме и активности образования на конкретной АЭС, конкретного класса РАО в конкретный год на каждый ГВт·ч произведенной электроэнергии по формулам (1) и (2) проведен расчет специфичных значений S_{ijk} и Z_{ijk} и сформированы совокупности $\{S_{ijk}\}$ и $\{Z_{ijk}\}$ без учета типа реакторных установок. Определены средние значения \bar{S}_j , \bar{Z}_j и медианные значения $\langle S_j \rangle$, $\langle Z_j \rangle$ удельных показателей ежегодного образования для каждого класса РАО. Оценки средних, медиан и квартильных размахов q_1 и q_3 удельных показателей образования РАО для выборок $\{S_{ijk}\}$ и $\{Z_{ijk}\}$ АЭС США всех типов реакторных установок приведены в табл. 5 и 6.

Таблица 5. Статистическое описание годовых удельных показателей объема образования РАО АЭС США за 2005–2020 гг.

Параметр	Класс РАО			
	a	b	c	d
Число наблюдений	916	958	142	478
Среднее \bar{S}_j , м ³ /ГВт·ч	$4,00 \cdot 10^{-3}$	$3,57 \cdot 10^{-2}$	$1,52 \cdot 10^{-3}$	$6,88 \cdot 10^{-3}$
Медиана $\langle S_j \rangle$, м ³ /ГВт·ч	$1,80 \cdot 10^{-3}$	$2,13 \cdot 10^{-2}$	$1,05 \cdot 10^{-4}$	$1,80 \cdot 10^{-3}$
Диапазон S_{ijk} , м ³ /ГВт·ч				
минимум	$2,56 \cdot 10^{-5}$	$8,70 \cdot 10^{-6}$	$5,88 \cdot 10^{-6}$	$2,07 \cdot 10^{-5}$
максимум	$5,44 \cdot 10^{-2}$	4,01	$6,03 \cdot 10^{-2}$	0,14
Квартиль S_{ijk} , м ³ /ГВт·ч				
нижний q1	$8,30 \cdot 10^{-4}$	$7,22 \cdot 10^{-3}$	$3,19 \cdot 10^{-5}$	$5,24 \cdot 10^{-4}$
верхний q3	$5,31 \cdot 10^{-3}$	$4,33 \cdot 10^{-2}$	$4,36 \cdot 10^{-4}$	$5,65 \cdot 10^{-3}$

Результаты, представленные в табл. 5 и 6, не учитывают тип реакторных установок.

Таблица 6. Статистическое описание годовых удельных показателей активности РАО АЭС США за 2005 – 2020 гг.

Параметр	Класс РАО			
	a	b	c	d
Число наблюдений	772	796	114	416
Среднее \bar{Z}_j , ГБк/ГВт·ч	1,78	$5,51 \cdot 10^{-2}$	67,6	0,23
Медиана $\langle Z_j \rangle$, ГБк/ГВт·ч	0,60	$4,82 \cdot 10^{-3}$	1,70	$2,30 \cdot 10^{-4}$
Диапазон Z_{ijk} , ГБк/ГВт·ч				
минимум	$2,32 \cdot 10^{-9}$	$6,34 \cdot 10^{-5}$	$2,66 \cdot 10^{-7}$	$1,41 \cdot 10^{-10}$
максимум	$1,98 \cdot 10^2$	7,88	$5,41 \cdot 10^2$	2,06
Квартиль Z_{ijk} , ГБк/ГВт·ч				
нижний q1	0,20	$1,88 \cdot 10^{-3}$	$4,41 \cdot 10^{-3}$	$1,09 \cdot 10^{-5}$
верхний q3	1,44	$1,51 \cdot 10^{-2}$	$1,11 \cdot 10^2$	$1,71 \cdot 10^{-2}$

Анализ совокупностей $\{S_{ijk}\}$ и $\{Z_{ijk}\}$ показал существенное превышение средних значений удельных показателей образования РАО \bar{S}_j и \bar{Z}_j над соответствующими медианными значениями $\langle S_j \rangle$, и $\langle Z_j \rangle$. Гипотеза о нормальном распределении удельных показателей образования РАО отклонена по критериям Шапиро – Уилка и Колмогорова – Смирнова [15, 16]. Поэтому для дальнейшего анализа в качестве основных количественных мер удельных показателей образования РАО использовались медианы $\langle S_j \rangle$ и $\langle Z_j \rangle$ как более устойчивые к статистическим выбросам характеристик выборочных данных. Анализ сформированных из генеральных совокупностей $\{S_{ijk}\}$ и $\{Z_{ijk}\}$ двух пар подвыборки, $\{S_{ijk}\}_{PWR}$, $\{Z_{ijk}\}_{PWR}$ для АЭС PWR и $\{S_{ijk}\}_{BWR}$, $\{Z_{ijk}\}_{BWR}$ для АЭС BWR, позволил получить оценки медиан годовых удельных показателей образования РАО $\langle S_j \rangle_{PWR}$, $\langle S_j \rangle_{BWR}$ и $\langle Z_j \rangle_{PWR}$, $\langle Z_j \rangle_{BWR}$ (табл. 7).

Таблица 7. Медианы удельных показателей активности РАО по 65 АЭС США в зависимости от типа РУ

Класс РАО	Медиана удельных показателей объема РАО для типа РУ, м ³ /ГВт·ч		Медиана удельных показателей активности РАО для от типа РУ, ГБк/ГВт·ч	
	PWR	BWR	PWR	BWR
a	$1,19 \cdot 10^{-3}$	$5,14 \cdot 10^{-3}$	0,38	1,14
b	$2,09 \cdot 10^{-2}$	$2,32 \cdot 10^{-2}$	$2,95 \cdot 10^{-3}$	$9,39 \cdot 10^{-3}$
c	$4,78 \cdot 10^{-5}$	$1,56 \cdot 10^{-4}$	$3,36 \cdot 10^{-3}$	79,9
d	$1,38 \cdot 10^{-3}$	$2,70 \cdot 10^{-3}$	$1,00 \cdot 10^{-4}$	$5,44 \cdot 10^{-4}$

Медианные значения удельных показателей активности и объема для всех категорий ТРО для РУ типа BWR превышают соответствующие значения для РУ типа PWR. При производстве равного количества электроэнергии АЭС BWR превосходят АЭС PWR по объему образования РАО:

- в 4,3 раза по отработавшим ионообменным смолам, кубовым остаткам от упаривания или электрохимической очистки низкоактивных вод;
- на 10 % по сухим прессуемым отходам и радиоактивно загрязненному оборудованию;
- в 3,3 раза по элементам конструкций с наведенной активностью и управляющим стержням;
- в 2 раза по промасленным материалам, шламам сточных вод, фильтрам, почве.
- По активности отходов при производстве равного количества электроэнергии АЭС BWR превосходят АЭС PWR:
- в 3 раза по отработавшим ионообменным смолам, кубовым остаткам от упаривания или электрохимической очистки низкоактивных вод;
- в 3,2 раза по сухим прессуемым отходам и радиоактивно загрязненному оборудованию;
- почти в 24 000 раз по элементам конструкций с наведенной активностью и управляющим стержням;
- в 5,4 раза по промасленным материалам, шламам сточных вод, фильтрам, почве.

4. Обсуждение

Данное исследование имеет перспективу дальнейшего применения вычисленных удельных показателей. Полученные результаты позволят в дальнейшем рассмотреть тенденции изменения во времени удельных показателей образования РАО и получить статистические характеристики для всех подвыборок. Результаты анализа позволят установить численные значения удельных показателей для ранжирования практик обращения с РАО по категориям «налучших», «устойчивых» и «наихудших», в свою очередь ранжирование позволит сделать первый шаг к практической реализации методологии INPRO. Для целей соблюдения базового принципа методологии INPRO проекты новых РУ АЭС должны будут иметь удельные показатели активности и объема РАО не хуже, чем медианные значения квартильных размахов «наилучших практик».

5. Выводы

Открытые данные по представительному количеству энергоблоков с двумя самыми распространенными в мире типами реакторных установок (PWR и BWR), находящихся длительный период в эксплуатации, позволили сформировать уникальную базу данных для анализа сложившейся практики и прогноза результативности обращения с РАО, образующимися при нормальной эксплуатации АЭС. Специфика национальной классификации РАО в США, ориентированная на источники формирования РАО, делает возможным определение главных факторов, определяющих объем и активность РАО АЭС.

Анализ данных показал, что вклад в суммарный объем и суммарную активность твердых РАО специфичен для каждого источника образования РАО. Наибольший вклад, не менее 82 %, в суммарный объем РАО всех эксплуатируемых АЭС формируют сухие прессуемые отходы и радиоактивно (поверхностно) загрязненное оборудование (класс b). При этом вклад в суммарную активность РАО этого класса составляет менее 0,5 %. Наибольший вклад, не менее 84%, в суммарную активность РАО формируют элементы конструкций с наведенной активностью и управляющие стержни (класс c). В то же время вклад в суммарный объем РАО этого класса составляет не более 0,5 %. С помощью полученных данных были вычислены средние значения и медианы удельной активности по рассмотренным четырем классам РАО. Наибольшая удельная активность характерна для сухих прессуемых отходов радиоактивно загрязненного оборудования.

Медианные значения удельных показателей активности и объема для всех категорий ТРО для РУ типа BWR превышают соответствующие значения для РУ типа PWR. Вклад АЭС BWR в суммарную активность и суммарный объем РАО за рассмотренный период непропорционально высок для всех классов РАО, за исключением сухих прессуемых отходов и радиоактивно (поверхностно) загрязненного оборудования. Важно отметить, что при производстве около 1/3 электроэнергии в США на АЭС BWR при эксплуатации ядерных установок этого типа формируется почти 2/3 объема и почти 99 % активности отходов класса c.

6. Список литературы

1. Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management, INFCIRC/546, IAEA, Vienna (1997); see Second Review Meeting, <http://www-ns.iaea.org/conventions/waste-jointconvention.htm> (дата обращения: 01.09.2022 г.)
2. Политика и стратегии обращения с радиоактивными отходами, № NW-G-1.1, МАГАТЭ, 2012.
3. Predisposal Management of Radioactive Waste from Nuclear Power Plants and Research Reactors, No. SSG-40, МАГАТЭ, 2016.

4. Waste from Innovative Types of Reactors and Fuel Cycles, No. NW-T-1.7, МАГАТЭ, 2019.
5. Guidance for the Application of an Assessment Methodology for Innovative Nuclear Energy Systems. INPRO Manual. V. 1–9. IAEA-TECDOC-1575/Rev.1. Vienna: IAEA, 2008.
6. INPRO Methodology for Sustainability Assessment of Nuclear Energy Systems: Environmental Impact of Stressors. IAEA Nuclear Energy Ser. No. NG-T-3.15, Vienna: IAEA, 2016.
7. INPRO Methodology for Sustainability Assessment of Nuclear Energy Systems: Safety of Nuclear Reactors. INPRO Manual. IAEA-TECDOC-1902. Vienna: IAEA, 2020.
8. OPEX_2021 [Электронный ресурс] // Официальный сайт Международного Агентства по Атомной Энергии. URL: <https://www.iaea.org/PRIS> (дата обращения: 01.10.2021.)
9. PRIS Report. URL: cnpp.iaea.org/countryprofiles/UnitedStatesofAmerica/UnitedStatesofAmerica.htm (дата обращения: 01.09.2022 г.).
10. Новиков, Г. А. Обеспечение безопасности в области использования атомной энергии : учеб. / Г. А. Новиков, О. Л. Ташлыков, С. Е. Щеклеин ; под общей редакцией профессора, доктора технических наук Г. А. Новикова ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина. – Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2017. – Серия «Учебник УрФУ». – 552 с. – ISBN 978-5-7996-2125-4
11. КЛАССИФИКАЦИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ В РФ И США / Д. Д. Десятов, И. С. Батаков, Д. А. Терентьев, А. А. Екидин // Ядерная физика и инжиниринг. – 2020. – 11(5). – С. 251–259. – DOI 10.1134/S2079562920040053
12. Djokić, D. A. Characteristics Based Approach to Radioactive Waste Classification in Advanced Nuclear Fuel Cycles. Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy. University of California. Berkeley, 2013.
13. International Atomic Energy Agency, General Safety Guide No. GSG1, Classification of Radioactive Waste, Vienna, 2009.
14. [Электронный ресурс] // Официальный сайт комиссии по лицензированию и выработке стандартов в области ядерной энергии США. – URL: <https://www.nrc.gov/reactors/operating/ops-experience/tritium/plant-info.html> (Дата обращения: 01.09.2022 г.).
15. Критерий согласия: критерий Колмагорова [Электронный ресурс]. URL: <https://nsu.ru/mmftvims/chernova/ms/lec/node45.html> (дата обращения: 20.05.2022).
16. Shapiro, S.S. An analysis of variance test for normality (complete samples) / S.S. Shapiro, M.B. Wilk. – Biometrika. – 1965. Vol. 52, № ¾ – P. 591– 611.

Сведения об авторах:

Десятов Денис Дмитриевич, инженер-исследователь Института промышленной экологии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия. Эл. почта: desyatovdenis1995@gmail.com.

Терентьев Данила Андреевич, аспирант Уральского Федерального Университета, г. Екатеринбург, Россия.

Фадеева Анастасия Сергеевна, студент Уральского Федерального Университета, г. Екатеринбург, Россия.

Екидин Алексей Акимович, канд. физ.-мат. н., доцент, ведущий научный сотрудник Института промышленной экологии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия.

Пышкина Мария Дмитриевна, канд. тех. н., научный сотрудник Института промышленной экологии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия.

SPECIFIC RADIOACTIVE WASTE RATES AT PWR AND BWR NUCLEAR POWER PLANTS

D. D. Desyatov¹, D. A. Terentiev², A. C. Fadeeva², A. A. Ekinin¹, M. D. Pyshkina¹

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

² Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

The article shows the differences in the specific waste rate generation during the electricity production at NPPs of the two most common types of reactor facilities PWR and BWR in the world. The specific waste rate is special for each NPP and shows the generation of each radioactive waste category during electricity generation in units of activity and/or volume of radioactive waste per unit of electricity generated (GBq/GW·h) and (m³/GW·h). According to published data on the radioactive waste generation from US NPPs for the period 2005-2020 the average and median values of the annual specific waste rates generation for each NPP, taking into account the type of reactor installations, were obtained. The highest values of specific waste rates for almost all categories of radioactive waste were typical for NPPs with BWR reactor installations. The medians of the specific waste rate of solid waste at the BWR NPP according to the classes a, b, c, d adopted in the USA are equal 6,00·10⁻¹ (1,80·10⁻³), 4,82·10⁻³ (2,13·10⁻²), 1,70·10⁰ (1,05·10⁻⁴), 2,30·10⁻⁴ (1,80·10⁻³) GBk/Gwh (m³/Gwh). NPPs with BWR-type reactor plants are characterized by a high value of specific waste rates (GBk/GWh) and (m³/Gwh).

Key words: radioactive waste; specific waste rate; nuclear power plant; reactor facility.

References

1. Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management, INFCIRC/546, IAEA, Vienna (1997); see Second Review Meeting, <http://www-ns.iaea.org/conventions/waste-jointconvention.htm> (Accessed: 01.09.2022 г.)
2. Policies and Strategies for Radioactive Waste Management, № NW-G-1.1, IAEA, 2012.
3. Predisposal Management of Radioactive Waste from Nuclear Power Plants and Research Reactors, No. SSG-40, МАГАТЭ, 2016.
4. Waste from Innovative Types of Reactors and Fuel Cycles, No. NW-T-1.7, МАГАТЭ, 2019.
5. Guidance for the Application of an Assessment Methodology for Innovative Nuclear Energy Systems. INPRO Manual. V. 1–9. IAEA-TECDOC-1575/Rev.1. Vienna: IAEA, 2008.
6. INPRO Methodology for Sustainability Assessment of Nuclear Energy Systems: Environmental Impact of Stressors. IAEA Nuclear Energy Ser. No. NG-T-3.15, Vienna: IAEA, 2016.
7. INPRO Methodology for Sustainability Assessment of Nuclear Energy Systems: Safety of Nuclear Reactors. INPRO Manual. IAEA-TECDOC-1902. Vienna: IAEA, 2020.
8. OPEX_2021 [Electronic resource] // Official site of International Atomic Energy Agency. Available at: <https://www.iaea.org/PRIS> (accessed: 01.10.2021.)
9. PRISReport: cnpp.iaea.org/countryprofiles/UnitedStatesofAmerica/UnitedStatesofAmerica.htm (Accessed: 01.09.2022 г.).

10. G. A. Novikov, O. L. Tashlykov, and S. E. Scheklein, Ensuring Safety in the Field of Atomic Energy Use, The School-Book (YuUrGU, Yekaterinburg, 2017) [in Russian].
11. RADIOACTIVE WASTE CLASSIFICATION IN THE RUSSIAN FEDERATION AND THE USA / D. D. Desyatov, I. S. Batakov, D. A. Terentiev, A. A. Ekidin // Nucl. Physics and engineering. – 2020. Vol. 11(5). – P. 251–259. – DOI 10.1134/S2079562920040053
12. Djokić, D. A. Characteristics Based Approach to Radioactive Waste Classification in Advanced Nuclear Fuel Cycles. Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy. University of California. Berkeley, 2013.
13. International Atomic Energy Agency, General Safety Guide No. GSG1, Classification of Radioactive Waste, Vienna, 2009.
14. [Electronic resource] // Official site of the United States Nuclear Regulatory Commission. Available at: <https://www.nrc.gov/reactors/operating/ops-experience/tritium/plant-info.html> (Accessed: 01.09.2022 г.).
15. Kriterij soglasiya: kriterij Kolmagorova [Criterion of consent: Kolmogorov criterion]. Available at: <https://nsu.ru/mmftvims/chernova/ms/lec/node45.html> (Accessed: 20.05.2022) (in Russian).
16. Shapiro, S.S. An analysis of variance test for normality (complete samples) / S.S. Shapiro, M.B. Wilk. – Biometrika. – 1965. Vol. 52, № ¾ – P. 591– 611.