

УДК 621.039

**ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА КОЛИЧЕСТВА  
ВЫСОКОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ, ВОЗВРАЩАЕМЫХ УКРАИНЕ ПОСЛЕ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ХРАНЕНИЯ И ПЕРЕРАБОТКИ ПАРТИИ ОТВС  
ВВЭР-440**

*Л.В. Близнюкова<sup>1</sup>, Л.Л. Литвинский<sup>2</sup>, А.Н. Масько<sup>2</sup>, П.М. Русинко<sup>2</sup>, Е.В. Яковенко<sup>1</sup>  
(<sup>1</sup>НАЭК «Энергоатом», г. Киев; <sup>2</sup>ДНІЦ СКАР, г. Киев)*

В данной статье представлены основные положения нормативного документа Минтопэнерго Украины "СОУ-Н ЯЭК 1.027:2010 Методика расчета количества высокоактивных отходов, возвращаемых Украине после технологического хранения и переработки партии ОТВС ВВЭР-440".

**ВВЕДЕНИЕ**

Начиная с 1993 года и по настоящее время, отработавшее ядерное топливо (далее ОЯТ) реакторов ВВЭР-440 Ровенской АЭС вывозится в Российскую Федерацию на ФГУП «ПО «МАЯК» с целью технологического хранения и последующей переработки. Вывоз ОЯТ осуществляется в рамках Соглашения между Правительством Российской Федерации и Правительством Украины о научно-техническом и экономическом сотрудничестве в области атомной энергетики от 14 января 1993 года. Соглашение и соответствующие контракты ФГУП «ПО «МАЯК» с государственным предприятием Национальной атомной энергогенерирующей компанией «Энергоатом» предусматривают возврат радиоактивных отходов от переработки ОЯТ в Украину.

Контрактами определено, что количество радиоактивных отходов (далее РАО) от переработки ОЯТ, подлежащих возврату государству поставщику, определяется по согласованным сторонами методикам. Количество РАО рассчитывается исходя из условия радиационной эквивалентности активности ввезённых ранее с целью переработки облучённых сборок и активности возвращаемых продуктов переработки, с учетом естественного распада радионуклидов при технологическом хранении облученных сборок и продуктов переработки, а также в ходе переработки облученных сборок.

Согласно технологии переработки облученных тепловыделяющих сборок (далее ОТВС) ВВЭР-440 на заводе РТ-1 ФГУП «ПО «МАЯК» [1, 2] жидкие технологические РАО от переработки нескольких партий ОТВС перед их кондиционированием накапливаются и временно хранятся. Кроме того, возможно также частичное смешивание РАО, образующихся при переработке нескольких партий ОТВС, принадлежащих различным поставщикам ОЯТ. Поэтому, получить кондиционированные РАО, по относительному радионуклидному составу и полному содержанию радионуклидов в точности соответствующие конкретной партии переработанных ОТВС (с учетом долговременной выдержки ОТВС перед переработкой) невозможно. Соответственно, активности продуктов деления и актиноидов в кондиционированных РАО могут отличаться от активностей радионуклидов в партии ОТВС поступившей на переработку.

Для радиоактивных отходов с различным радионуклидным составом и другими физико-химическими характеристиками в мире на сегодняшний день отсутствует общепринятый подход для установления эквивалентности отходов. Наиболее общим из используемых методов является метод мульти-факторного

анализа, в котором с различными весовыми коэффициентами задающими важность каждого из факторов учитываются как радиологические, так и ценовые факторы. Однако, данный метод требует целого ряда допущений о характеристиках хранилищ для захоронения РАО, о сценариях выхода радионуклидов, а также о важности каждого из используемых радиологических и ценовых факторов. Результат анализа существенно зависит от принятых допущений. Для определения эквивалентности отходов с близкими радиационными характеристиками используют более простые критерии с учетом границ их применимости.

Для обеспечения реализации процедуры приемки-передачи ВАО переработки ОЯТ украинских АЭС в Российской Федерации разработан нормативный документ Минтопэнерго Украины “СОУ-Н ЯЭК 1.027:2010 Методика расчета количества высокоактивных отходов, возвращаемых Украине после технологического хранения и переработки партии ОТВС ВВЭР-440” [3] (далее Методика). Нормативный документ СОУ-Н ЯЭК 1.027:201 устанавливает порядок выполнения расчета количества остеклованных высокоактивных отходов переработки ОТВС ВВЭР-440, подлежащих возврату в Украину из Российской Федерации. Данный документ согласован как Украинской, так и Российской стороной. Основные положения Методики расчета количества высокоактивных отходов, возвращаемых Украине после технологического хранения и переработки партии ОТВС ВВЭР-440, представлены в данной статье.

### **КРИТЕРИЙ ЭКВИВАЛЕНТНОСТИ ОТВС И ВАО ОТ ПЕРЕРАБОТКИ ОТВС**

На сегодняшний день не существует общепринятого критерия эквивалентности РАО с различным радионуклидным составом. В общем случае радиоактивные отходы с различным радионуклидным составом можно считать эквивалентными, если воздействие данных отходов на человека будет одинаковым на всех этапах последующего обращения с ними.

Обращение с остеклованными ВАО переработки ОТВС ВВЭР-440 в Украине будет включать следующие основные мероприятия:

- транспортировка и долгосрочное хранение до захоронения;
- захоронение в геологическом хранилище.

В общем случае эквивалентность ВАО, полученных от переработки украинского ОЯТ, и смешанных ВАО, возвращаемых в Украину, должна определяться на основе сравнения оценок (данных) воздействия радионуклидов на человека при вышеупомянутых мероприятиях. При этом необходимо рассматривать и сравнивать:

- текущее облучение (нормальная деятельность);
- потенциальное облучение (аварийные события).

В рамках Методики в качестве критерия эквивалентности выбран суммарный эквивалент активности радионуклидов – сумма произведений активности радионуклидов на безразмерные коэффициенты воздействия, учитывающие степень воздействия данных радионуклидов на человека. Коэффициенты воздействия выбраны равными значениям дозовых коэффициентов радионуклидов для перорального поступления [4]. Выбранный критерий учитывает относительную радиотоксичность радионуклидов в ВАО. При данном подходе долгоживущие актиноиды вносят существенный вклад в суммарный эквивалент активности, что позволяет лучше учитывать воздействие отходов не только на момент передачи, но и на последующих этапах обращения с ВАО.

В рамках Методики условием эквивалентности партий ОТВС, отправленных на переработку и ВАО, возвращаемых в Украину выбрано равенство суммарных эквивалентов активности радионуклидов на момент возврата. Дополнительным условием является не превышение суммарного эквивалента активности актиноидов в ВАО суммарного эквивалента активности актиноидов в ОТВС с учетом погрешности определения.

При разработке Методики было показано, что с учетом ряда дополнительных требований к ВАО, зафиксированных в основных положениях Методики, а именно:

- радионуклидный состав ВАО, возвращаемых в Украину, определяется радионуклидным составом перерабатываемых ОТВС реакторов ВВЭР-440;
- удельная суммарная активность возвращаемых ВАО должна составлять  $150 \pm 20$  Ки/кг, при этом тепловыделение ВАО не должно превышать 2 кВт/м<sup>3</sup>;
- масса остеклованных ВАО в бидоне не должна превышать 500 кг,

данные условия позволяют обеспечить эквивалентность с учетом погрешности расчетов возвращаемых ВАО высокоактивным отходам, полученным при переработке партии украинских ОТВС по технологии ПО «Маяк» как при транспортировке и долгосрочном хранении до захоронения, так и при захоронении в геологическом хранилище. При этом эквивалентность соблюдается как для нормальной деятельности, так и при аварийных событиях.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАДИОНУКЛИДНОГО ВЕКТОРА ВАО

В ходе облучения в реакторе в тепловыделяющей сборке образуется в процессе ядерных реакций большое количество различных радионуклидов. Однако, существенная часть радионуклидов – короткоживущие радионуклиды распадаются до стабильных изотопов за время технологической выдержки. Для целей Методики необходимо было выбрать радионуклиды, которые могут существенно влиять на человека и окружающую среду при транспортировке ВАО в Украину, а также при долговременном хранении и захоронении отходов. Так как активность конструкционных материалов существенно ниже активности топлива в ОТВС, то в рамках Методики она не учитывается при расчете эквивалента активности партии ОТВС.

Для определения значимых радионуклидов анализировались активность, пероральный эквивалент активности, ингаляционный эквивалент активности (сумма произведений активностей р/н на дозовые коэффициенты пероральные и ингаляционные, соответственно), фактор токсичности (сумма отношений активностей радионуклидов к их уровню освобождения) и вклад данного радионуклида как в суммарное значение анализируемых показателей продуктов деления и актиноидов по отдельности, так и в общее суммарное значение анализируемых показателей в период времени от 23 до 108 лет. Исходные значения активности рассчитывались на основе базы данных по начальным концентрациям радионуклидов (22 продуктов деления и 20 актиноидов) в ОТВС, в зависимости от выгорания, рассчитанных по программе ТВС-М. Дополнительно использовались данные справочника [5]. Значимыми для целей Методики принимались радионуклиды, вклад которых в суммарное значение анализируемых показателей для ВАО от переработки ОЯТ в любой из моментов времени превышал 1%. Высокомобильные радионуклиды, такие как Se-79, Tc-99, Sn-126 и I-129 рассматривались отдельно, и были исключены из значимых для целей Методики на основе информации о технологической схеме переработки ОТВС на ПО «Маяк». Короткоживущие дочерние радионуклиды, активность которых полностью

определяется активностью родительского ядра, также были исключены из числа значимых, а их влияние учтено в коэффициенте воздействия родительского ядра.

В результате проведенного анализа по оценке эквивалента активности ОТВС и ВАО ОЯТ показано, что необходимо и достаточно учитывать продукты деления, представленные в таблице 1, и актиноиды, представленные в таблице 2.

Таблица 1. Продукты деления

№ п/п	Радионуклид	Тип распада	Период полураспада $T_{1/2}$ , лет	Постоянная распада $\lambda$ , $c^{-1}$	Коэффициент воздействия
1	Sr-90*	$\beta$	29,1	7,548E-10	3,07E-08
2	Cs-137*	$\beta$	30,0	7,322E-10	1,3 E-08

\*) – Вклад короткоживущих дочерних радионуклидов учтен в коэффициенте воздействия родительского ядра

Таблица 2. Актиноиды

№ п/п	Радионуклид	Тип Распада	Период полураспада $T_{1/2}$ , лет	Постоянная распада $\lambda$ , $c^{-1}$	Коэффициент воздействия
1	Cm-244	$\alpha$	18,1	1,214E-09	1,2 E-07
2	Pu-240	$\alpha$	6,54 E+03	3,358E-12	2,5 E-07
3	Am-243*	$\alpha$	7,38 E+03	2,976E-12	2,01 E-07
4	Pu-239	$\alpha$	2,41 E+04	9,114E-13	2,5 E-07
5	Pu-241	$\beta$	14,4	1,525E-09	4,8 E-09
6	Am-241	$\alpha$	4,32 E+02	5,084E-11	2,0 E-07
7	Pu-238	$\alpha$	87,7	2,505E-10	2,3 E-07

\*) – Вклад короткоживущих дочерних радионуклидов учтен в коэффициенте воздействия родительского ядра

## ПОРЯДОК ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЛИЧЕСТВА ВАО ОЯТ

### Общая схема расчета

Для выполнения расчетов в качестве даты возврата ВАО в Украину принята дата, на 20 лет отстоящая от момента поступления железнодорожного состава с партией ОТВС на ФГУП «ПО «МАЯК». Количество ВАО ОЯТ, подлежащих возврату в Украину, определяют отдельно для каждой партии ОТВС, отправленной на переработку.

Для определения количества ВАО ОЯТ подлежащей возврату по паспортным данным ОТВС в партии рассчитывают суммарный эквивалент активности радионуклидов в партии ОТВС, эквивалент активности актиноидов, и погрешность эквивалента активности актиноидов в партии ОТВС на дату возврата ВАО. Данные необходимые для расчетов включены в текст Методики. Более подробно вопросы расчета эквивалента активности партии ОТВС рассмотрены в п.р. 4.2.

Суммарные эквиваленты активности и эквиваленты активности актиноидов для каждой упаковки ВАО также рассчитываются на дату возврата по паспортным данным. Более подробно вопросы расчета эквивалента активности упаковок ВАО рассмотрены в п.р. 4.3.

Партия остеклованных ВАО подлежащая возврату как эквивалент отходов от переработки партии ОТВС формируется так, чтобы суммарный эквивалент активности упаковок ВАО не превышал суммарный эквивалент активности партии ОТВС. Разница между эквивалентами активности партии ОТВС отправленной на

переработку и партии возвращаемых упаковок ВАО учитывается с соответствующим знаком при определении количества ВАО от переработки следующей партии ОТВС. После чего выполняется проверка равенства, с учетом погрешности, эквивалента активности актиноидов партии ОТВС и возвращаемых ВАО. Если равенство не выполняется, партия упаковок ВАО должна быть переформирована. Более подробно вопросы формирования партии упаковок ВАО, подлежащих возврату в Украину рассмотрены в п.п. 4.4.

Общая схема расчета количества подлежащих возврату ВАО для переработанной партии ОТВС приведена на рис. 1.

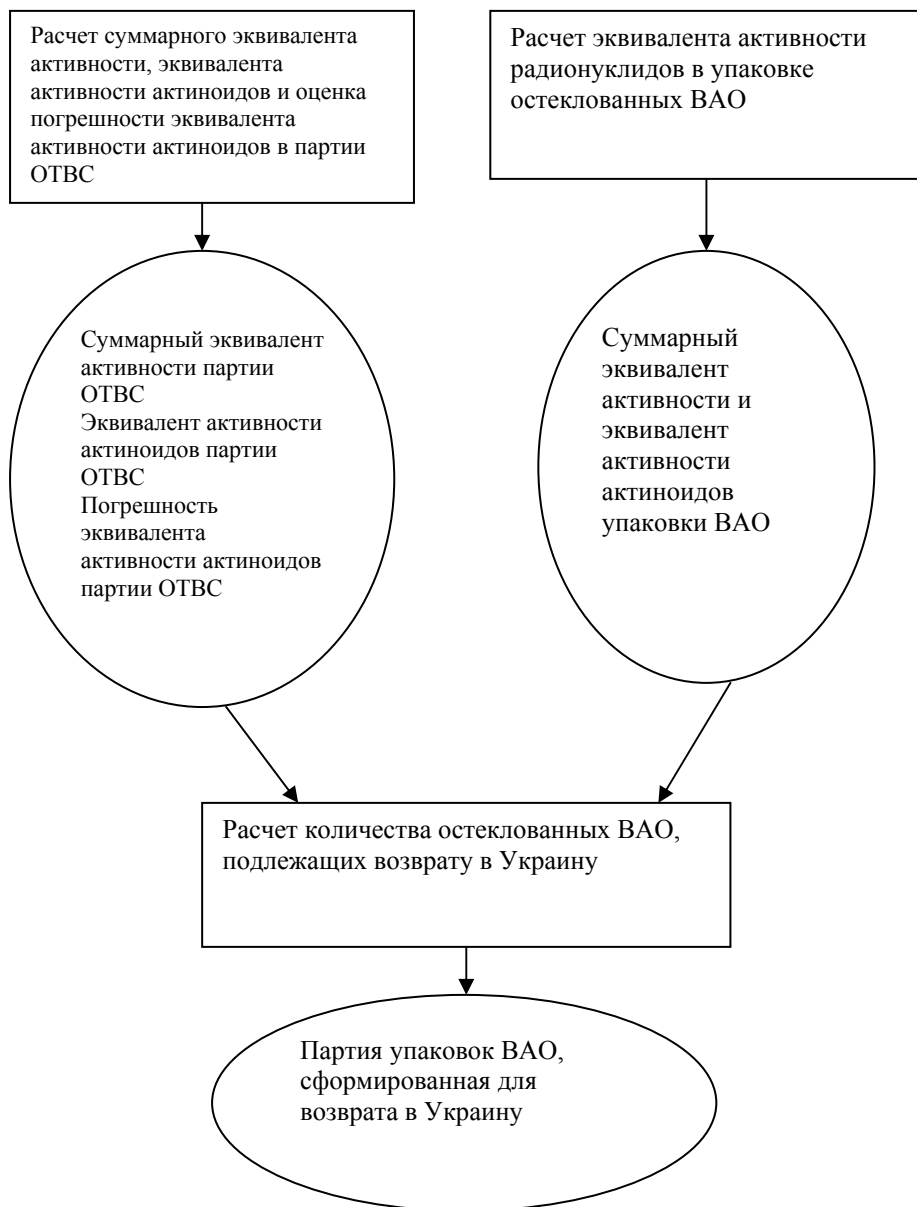


Рис. 1. Общая схема расчетной оценки количества ВАО, возвращаемых Украине

### Расчет эквивалента активности радионуклидов в партии ОТВС

Схема расчета эквивалента активности радионуклидов (далее р/н) в партии ОТВС приведена на рисунке 2.

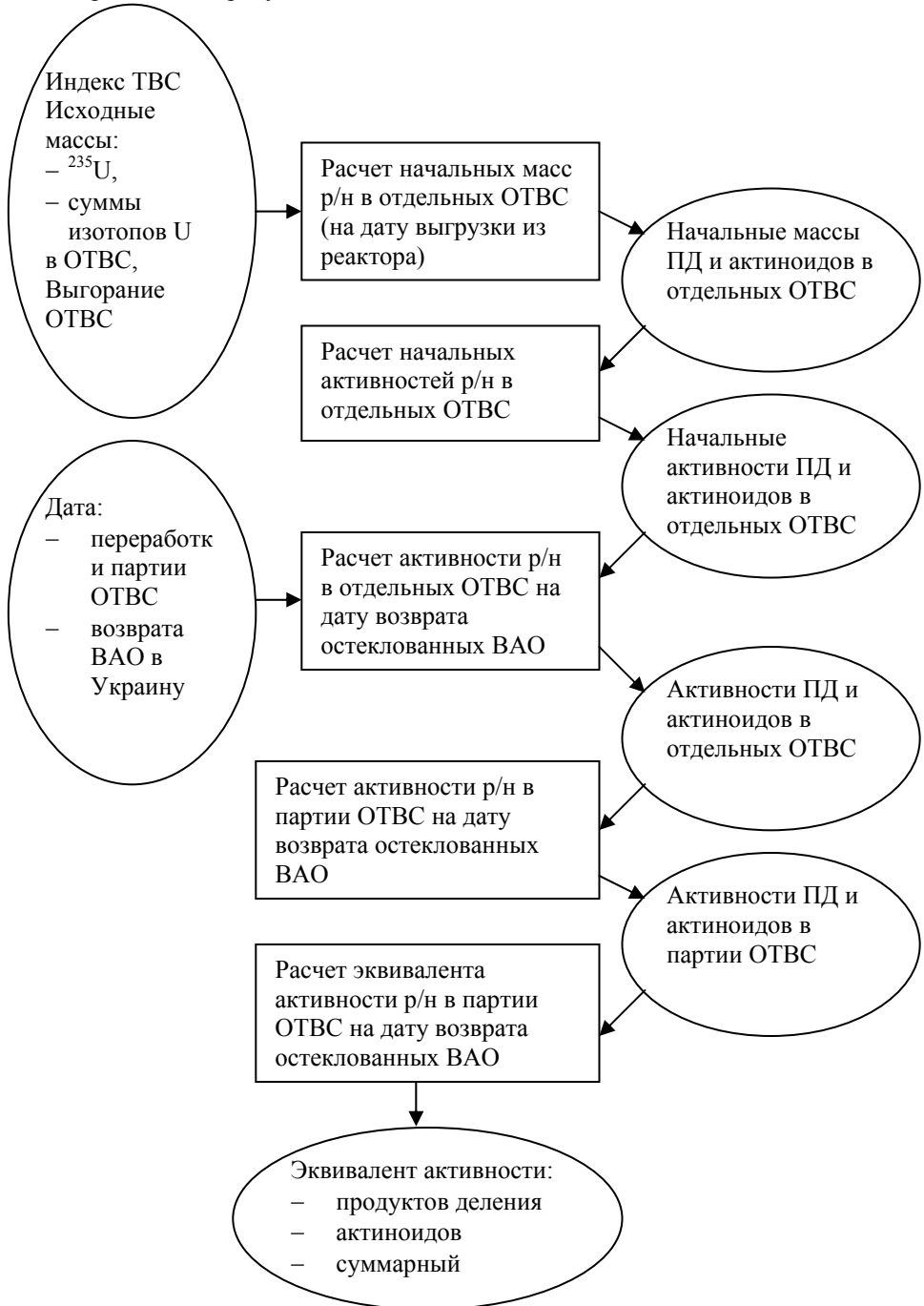


Рис. 2. Схема расчета эквивалента активности радионуклидов в партии ОТВС

Расчет эквивалента активности радионуклидов в партии ОТВС выполняется на дату возврата ВАО в Украину согласно разделу 6 Методики. Исходными данными для расчетов являются паспортные данные ТВС:

- Индекс ТВС,
- Исходные массы  $^{235}\text{U}$  и суммы изотопов U в ОТВС,
- Выгорание ОТВС,

а также даты переработки партии ОТВС и возврата ВАО ОЯТ в Украину.

Для каждой ОТВС, входящей в партию, на основе паспортных данных определяется начальное обогащение, после чего с учетом выгорания выполняется расчет масс радионуклидов, приведенных в таблицах 1 и 2, в данной ОТВС. Расчет выполняется методом линейной интерполяции данных о концентрациях радионуклидов в ОТВС в зависимости от начального обогащения и выгорания, рассчитанных при помощи программы ТВС-М и включенных в состав Методики. На основе полученных масс рассчитываются начальные активности радионуклидов в ОТВС на момент выгрузки из реактора.

Далее для учета естественного радиоактивного распада начальные активности радионуклидов в ОТВС пересчитываются на момент переработки ОТВС. Алгоритм расчета изменения активности радионуклидов за счет радиоактивного распада учитывает распад некоторых учитываемых актиноидов по цепочкам и приведен в Приложении Г Методики. Так как изотопы Pu, представленные в таблице 2, являются целевыми продуктами переработки и извлекаются, то при расчете эквивалента активности партии ОТВС учитывается доля Pu, неизвлеченная при переработке ОТВС и попадающая в ВАО, которая составляет 0,14 % от их исходного содержания в ОТВС на момент переработки [6]. Соответственно активности изотопов Pu умножаются на коэффициент 0,0014, после чего выполняется пересчет активностей всех радионуклидов, приведенных в таблицах 1 и 2 на дату возврата ВАО в Украину.

Расчитанные на предыдущих этапах активности радионуклидов суммируются по всем ОТВС, входящим в партию. Эквиваленты активности продуктов деления, актиноидов и суммарный эквивалент активности рассчитываются как сумма активностей радионуклидов, умноженных на соответствующие коэффициенты воздействия.

Расчет погрешности эквивалента активности актиноидов партии ОТВС выполняется согласно подразделу 6.6 Методики. Для расчета погрешности используются те же данные, что и для расчета эквивалента активности, а также данные о паспортных погрешностях программ ТВС-М для начальных концентраций радионуклидов в ОТВС и программы БИПР-7 для выгорания ОТВС, которые приведены в Методике.

Результатами расчетов являются: суммарный эквивалент активности, эквивалент активности продуктов деления, эквивалент активности актиноидов и погрешность эквивалента активности актиноидов партии ОТВС на дату возврата ВАО ОЯТ в Украину, которые используются на последующих этапах расчетов.

### **Расчет эквивалента активности радионуклидов в упаковках остеклованных ВАО**

Схема расчета эквивалента активности радионуклидов в упаковках остеклованных ВАО приведена на рисунке 3.

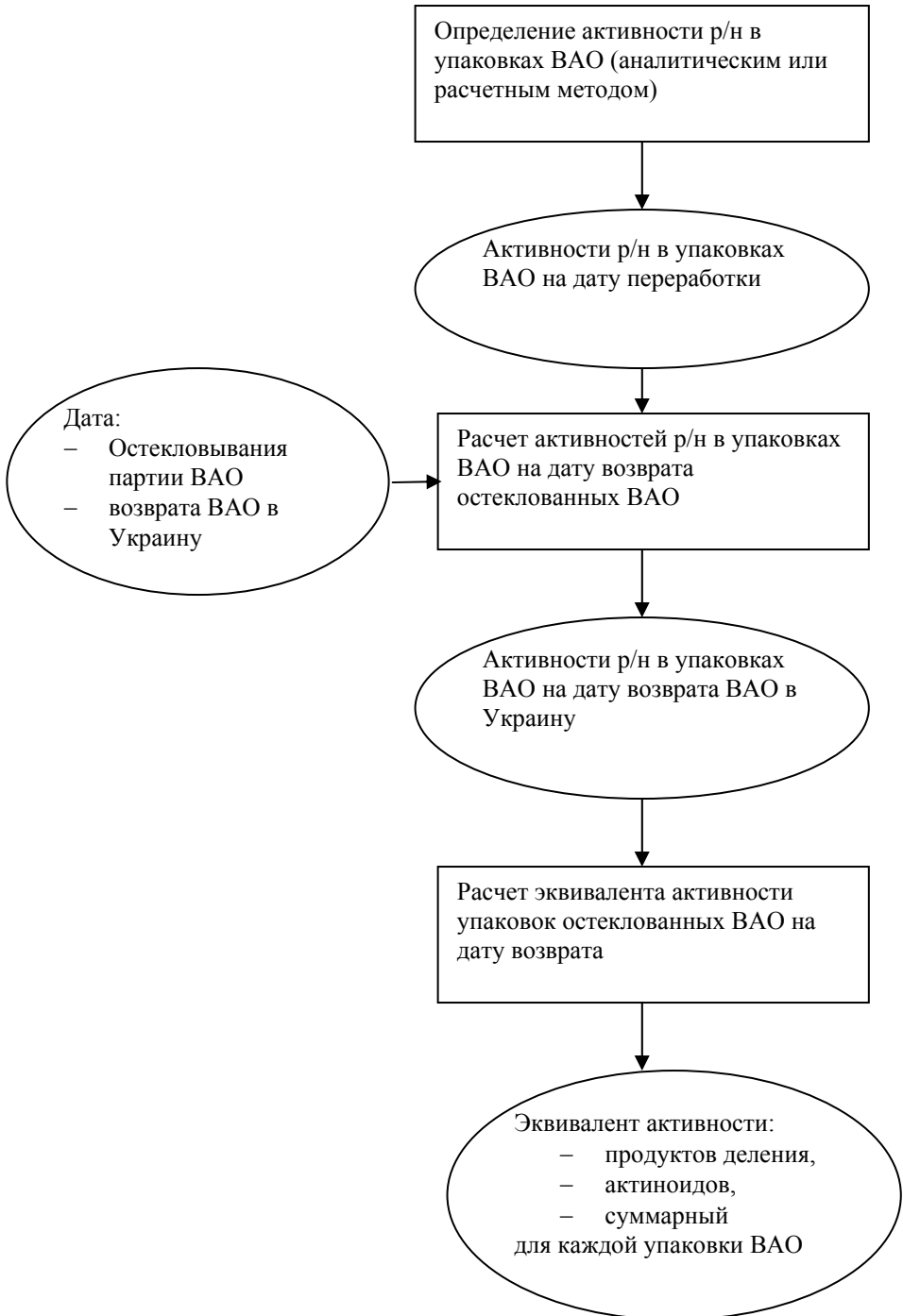


Рис. 3. Схема расчета эквивалента активности радионуклидов в упаковке остеклованных ВАО



Эквивалент активности ВАО, подлежащих возврату Украине, рассчитывается на основе паспортных данных об активности радионуклидов в упаковках ВАО для всех радионуклидов, приведенных в таблицах 1 и 2 согласно разделу 7 Методики. Активности радионуклидов определяются для каждой упаковки ВАО аналитическим или расчетным методами по методикам, согласованным ФГУП «ПО МАЯК» и ГП НАЭК «Энергоатом».

Для учета естественного радиоактивного распада, активности радионуклидов пересчитываются на дату возврата ВАО в Украину по тому же алгоритму, который используется для ОТВС. Эквиваленты активности продуктов деления, актиноидов и суммарный эквивалент активности рассчитываются как сумма активностей радионуклидов, умноженных на соответствующие коэффициенты воздействия.

Результатами расчетов являются: эквивалент активности продуктов деления, эквивалент активности актиноидов и суммарный эквивалент активности, которые определены для каждой упаковки ВАО, на дату возврата ВАО в Украину и приведены в паспорте на упаковку

#### **Расчет количества остеклованных ВАО, подлежащих возврату в Украину**

Схема расчета количества остеклованных ВАО, подлежащих возврату в Украину приведена на рисунке 4.

Разность эквивалентов активности партии ОТВС и партии ВАО, полученная для предыдущей партии ОТВС, прибавляется к эквиваленту активности текущей партии ОТВС. Для первого возврата такая разность равна нулю.

Количество упаковок ВАО, подлежащих возврату определяется из условия, что сумма эквивалентов активности упаковок ВАО в партии не превышает суммарного эквивалента активности партии ОТВС, но добавление еще одной упаковки уже приводит к превышению. Разность эквивалентов активности партии ОТВС и партии возвращаемых ВАО, учитывается при возврате следующей партии ВАО.

Для передаваемой Украине партии упаковок ВАО выполняется проверка содержания долгоживущих актиноидов, а именно равенство, в пределах погрешности эквивалента активности актиноидов в партии ОТВС, и суммы эквивалентов активностей актиноидов упаковок ВАО, входящих в сформированную партию. Если данное равенство не выполняется, то партия ВАО, подлежащих возврату Украине, должна быть пересформирована.

Суммарная активность партии ВАО, возвращаемых Украине, и суммарная масса ВАО в партии определяется как суммы соответствующих паспортных данных упаковок ВАО, в сформированной партии.

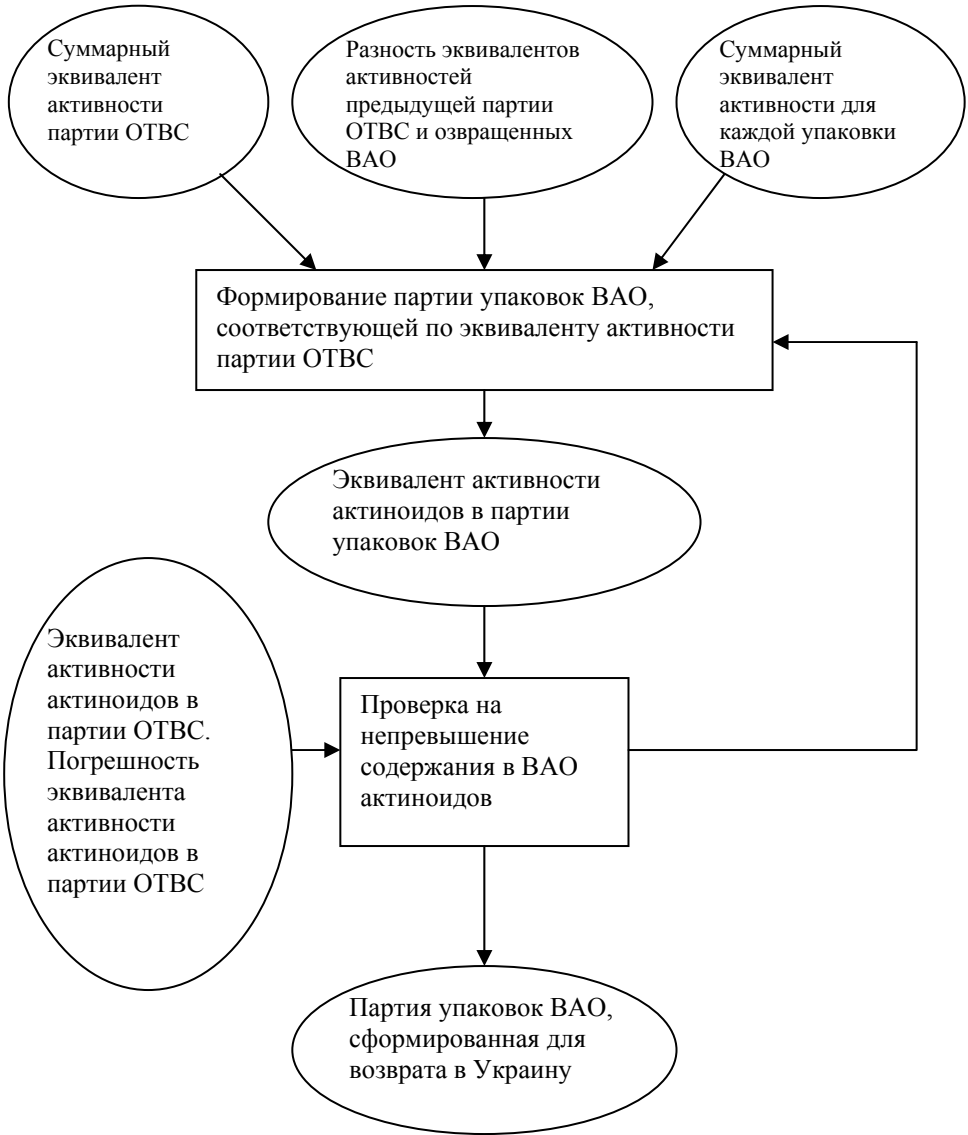


Рис. 4. Схема расчета количества остеклованных ВАО, подлежащих возврату в Украину

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Нормативный документ Минтопэнерго Украины СОУ-Н ЯЭК 1.027:2010 “Методика расчета количества высокоактивных отходов, возвращаемых Украине после технологического хранения и переработки партии ОТВС ВВЭР-440” устанавливает требования к порядку выполнения расчета количества остеклованных высокоактивных отходов переработки ОТВС ВВЭР-440, подлежащих возврату в Украину из Российской Федерации. Данный документ согласован как Украинской, так и Российской стороной.

Разработанная Методика является одним из документов необходимых для обеспечения реализации процедуры приемки-передачи ВАО, возвращаемых Украине в результате переработки ОЯТ украинских АЭС в Российской Федерации как это предусмотрено межгосударственными соглашениями и контрактами на переработку ОТВС ВВЭР-440.

## ЛИТЕРАТУРА

1. В.И. Землянухин, Е.И. Ильенко и др. Радиохимическая переработка ядерного топлива АЭС. – М.: Энергоатомиздат. – 1989.
2. А.С. Поляков, Б.С. Захаркин, В.С. Смелов и др. Состояние и перспективы технологии переработки облученного топлива. Первая ежегодная научная конференция “Ядерный топливный цикл”. Сборник докладов. – Москва, июнь, 2000 г. – с. 35.
3. СОУ-Н ЯЭК 1.027:2010 “Методика расчета количества высокоактивных отходов, возвращаемых Украине после технологического хранения и переработки партии ОТВС ВВЭР-440”.
4. SAFETY SERIES No. 115 International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiations and for the Safety of Radiation Sources CD-ROM Edition, 2003.
5. В.М. Колобашкин, П.М. Рубцов, П.А. Ружанский, В.Д. Сидоренко. Радиационные характеристики облученного ядерного топлива. Справочник. М., Энергоатомиздат, 1983.
6. Письмо Дирекции по ядерной и радиационной безопасности Госкорпорации «Росатом», № 1-2.5/3362 от 08.07.2010 “О направлении материалов”.