

ВОЛОКСИДАЦИЯ СМЕШАННОГО НИТРИДНОГО УРАН-ПЛУТОНИЕВОВОГО ОТРАБОТАВШЕГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА

© 2023 г. В. Н. Момотов^{а, *}, А. О. Макаров^а, А. Ю. Волков^а,
П. В. Лакеев^а, Д. Е. Тихонова^а, К. Н. Двоеглазов^{б, **}

^а Научно-исследовательский институт атомных реакторов,
433510, Димитровград Ульяновской обл., Западное шоссе, д. 9

^бАО «Прорыв», 107140, Москва, ул. Малая Красносельская, д. 2/8

e-mail: * momotov@niiar.ru, ** dkn@proryv2020.ru

Поступила в редакцию 26.12.2022, после доработки 26.01.2023, принята к публикации 27.01.2023

Проведена оценка эффективности волоксации смешанного нитридного уран-плутониевого отработавшего ядерного топлива (СНУП ОЯТ) для отделения топливной композиции от оболочек твэлов и удаления ^3H и ^{14}C . Показано, что полнота отделения ОЯТ от оболочек твэлов в оптимальных условиях находится на уровне 98–99%. Остаточное содержание трития в волоксидированном топливе не превышает 0.2% от его содержания в исходном образце ОЯТ, радиоуглерод удаляется на 98%.

Ключевые слова: волоксация ОЯТ, смешанное нитридное уран-плутониевое топливо, продукты деления, радиохимический анализ, тритий, радиоуглерод.

DOI: 10.31857/S0033831123020041, **EDN:** XDJFOW

ВВЕДЕНИЕ

Одним из перспективных вариантов переработки СНУП ОЯТ реактора БРЕСТ-ОД-300 на модуле переработки опытно-демонстрационного энергетического комплекса (МП ОДЭК) является комбинированная технологическая схема, включающая на первой стадии пирохимическую переработку для удаления основных продуктов деления и снижения удельной активности ОЯТ, на второй стадии предусмотрена гидрометаллургическая переработка ОЯТ [1–4].

В качестве одной из головных операций переработки СНУП ОЯТ на МП ОДЭК рассматривается объемное окисление (волоксация) отработавшего ядерного топлива [5, 6]. Операция предназначена для отделения топливной композиции от оболочек твэлов и удаления из топлива части летучих продуктов деления.

В результате окисления нитридов урана и плутония происходит перестройка кристаллической решетки основных компонентов ОЯТ, что приводит

к рассыпанию топливных таблеток и отделению топливной композиции от оболочек твэлов. Дополнительно волоксация позволит отделить от топливной композиции тритий и радиоуглерод для их локализации на начальной стадии переработки ОЯТ [7–9].

Процесс отделения топлива от оболочки в результате окисления топливной композиции известен и апробирован на модельных системах и на реальных образцах оксидного ОЯТ [7, 10–18]. Получены данные по закономерностям окисления и растворения волоксидированного модельного СНУП топлива [9, 19].

Целью данной работы является оценка эффективности волоксации СНУП ОЯТ для отделения топливной композиции от оболочек и удаления летучих продуктов деления.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Исследования проводили со СНУП топливом, отработавшим в реакторе БН-600 в составе комби-

Таблица 1. Характеристики сформированных партий фрагментов твэлов

№ эксперимента	Образец СНУП ОЯТ	Величина выгорания, % т.а.	Наружный диаметр и толщина стенки оболочки, мм	Длина фрагментов твэлов, мм	Масса, фрагментов твэлов, г
1	КЭТВС-1	5.45 [20]	6.9×0.4 [21]	15–38	66.2
2					27.0
3					45.1
4				5–20	59.0
5					55.7
6					57.6
7	КЭТВС-7	6.84 [20]	6.9×0.4 [22]	10–20	180.3
8	ЭТВС-10	6.0 [23]	9.3×0.5 [22]		135.9

нированных экспериментальных ТВС (КЭТВС-1, 7) и экспериментальной тепловыделяющей сборки ЭТВС-10.

Для проведения экспериментальных исследований твэлы фрагментировали механическим способом, из полученных фрагментов сформированы 8 партий, каждую из которых взвешивали. При резке фрагментов твэлов локального возгорания СНУП ОЯТ или искрообразования не зафиксировано.

Основные характеристики отработавшего топлива и сформированных партий фрагментов твэлов представлены в табл. 1.

Волоксидацию подготовленных партий ОЯТ проводили с применением экспериментального аппарата, схема которого представлена на рис. 1.

В основе аппарата печь сопротивления с диапазоном рабочих температур до 900°C. В печи размещен реактор из жаропрочной нержавеющей стали, снабженный входным и выходным патрубками для подачи газов и отвода летучих продуктов деления (ЛПД). Для обеспечения окисления ОЯТ в токе влажного воздуха входной патрубков реактора соединен с емкостью из нержавеющей стали, заполненной дистиллированной водой, нагретой до температуры 40–50°C. Подаваемый в зону окисления ОЯТ воздух вначале проходит через слой подогретой воды, затем поступает в зону окисления ОЯТ.

Для контроля температуры процесса в корпусе реактора размещена термопара хромель–алюмель. Внутри корпуса реактора на подвесе находится ке-

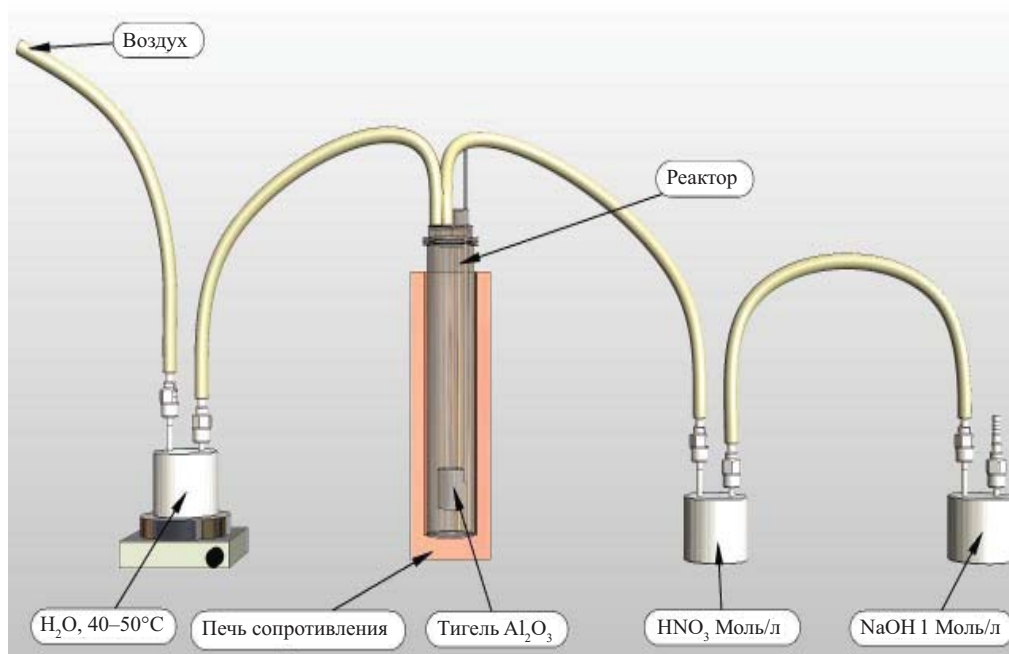
**Рис. 1.** Экспериментальный аппарат волоксации СНУП ОЯТ

Таблица 2. Экспериментальные условия проведения волоксации

№ эксперимента (см. табл. 1)	T , °С	Расход воздуха, мл/мин	Время выдержки в изотермическом режиме, ч
1	350	150	4
2	350	150	8
3	350	300	8
4	450	300	8
5	450	150	8
6	550	150	8
7	450	150	8
8	450	150	8

рамический тигель из оксида алюминия для размещения фрагментов твэлов. В нижней трети керамического тигля расположена сетка из жаропрочной нержавеющей стали с размером ячейки 1 мм, предназначенная для отделения волокцированного ОЯТ от оболочек твэла.

В корпусе реактора расположена газоотводящая трубка, соединенная с входным патрубком аппарата волоксации. Нижний конец газоподводящей трубки расположен ниже уровня тигля. Подаваемый в реактор воздух вначале поступает в нижнюю часть реактора, а затем поднимается вверх. Такое решение позволяет избежать застойных зон в области протекания реакции и повысить эффективность окисления ОЯТ.

Сверху реактор герметично закрыт крышкой из нержавеющей жаропрочной стали. Выходной патрубком аппарата волоксации соединен с барботерами для улавливания ЛПД.

Волоксацию СНУП ОЯТ проводили в соответствии со следующим алгоритмом. Предварительно взвешенную партию фрагментов твэлов со СНУП ОЯТ в керамическом тигле помещали в реакционную камеру аппарата волоксации. Герметично соединяли все детали экспериментальной установки. Нагрев аппарата волоксации осуществляли со скоростью 10°С/мин при непрерывной подаче аргона со скоростью 150 мл/мин. После выхода на заданный температурный режим отключали подачу инертного газа и с заданной скоростью подавали воздух. Выдерживали изотермический режим в течение заданного промежутка времени, после чего отключали нагрев, прекращали подачу воздуха и подавали во внутренний объем аппарата волоксации

аргон со скоростью 150 мл/мин в течение 1 ч. После этого отсоединяли барботеры с растворами азотной кислоты и гидроксида натрия, выключали продувку аргоном и охлаждали аппарат волоксации при температуре окружающей среды. Основные экспериментальные условия проведения волоксации представлены в табл. 2.

После завершения процесса проводили взвешивание порошка волокцированного ОЯТ и фрагментов твэлов. Порошки окисленного топлива, отработавшего в составе КЭТВС-1, фракционировали при встряхивании на контрольных лабораторных ситах из нержавеющей стали с плетеной проволоочной сеткой с размером ячеек 400, 200, 100 и 50 мкм. Массу фракции определяли по разнице масс лабораторных сит до и после фракционирования. Взвешивание проводили на лабораторных весах с точностью ± 0.1 г.

Навеску усредненного порошка волокцированного ОЯТ передавали для проведения радиохимического анализа. Полученные данные сравнивали с содержанием ЛПД в образце СНУП ОЯТ до волоксации. Исходное содержание ЛПД в СНУП ОЯТ определяли по результатам разрушающего радиохимического анализа топлива, отработавшего в составе КЭТВС-1 и КЭТВС-7. Процедура проведения и результаты разрушающего радиохимического анализа подробно описаны в работах [20, 24–26].

Полноту отделения ОЯТ от оболочек определяли расчетным и экспериментальными методами. Если после завершения волоксации во фрагментах твэлов наблюдали остатки ОЯТ по отсутствию просвета в твэльных трубках, степень отделения то-

Таблица 3. Полнота отделения СНУП топлива, отработавшего в составе КЭТВС-1, от оболочек твэла в зависимости от экспериментальных условий

№ эксперимента (см. табл. 1, 2)	Остаточная масса ОЯТ на оболочках (m_4), г	Масса отделенного порошка ОЯТ (m_3), г	Полнота отделения ОЯТ, %
1	34.4	22.8	39.9
2	9.7	13.6	58.4
3	9.1	30.1	76.8
4	0.7	50.2	98.6
5	0.5	47.8	99.0
6	0.5	49.3	99.0

плива от оболочки оценивали расчетным методом, определяя следующие величины:

– массу фрагментов твэлов с остатками ОЯТ после завершения волоксидации, г (m_1);

– линейную массу необлученной твэльной трубки, изготовленной из сплава ЧС 68-ИД, того же, что и в твэлах со СНУП топливом, отработавших в составе КЭТВС-1 и КЭТВС-7, г/мм (m_2);

– длину фрагментов твэлов, взятых для проведения исследований, мм (L);

– массу отделенного порошка ОЯТ, г (m_3).

Массу ОЯТ, оставшуюся на оболочках фрагментов твэлов (m_4), рассчитывали в соответствии с выражением (1):

$$m_4 = m_1 - m_2 L. \quad (1)$$

Полноту отделения ОЯТ от оболочки рассчитывали как массовую долю отделенного порошка ОЯТ в соответствии с выражением (2):

$$\omega = \frac{m_3}{m_3 + m_4} \times 100. \quad (2)$$

Применение расчетного метода связано с рядом допущений по изменению линейной массы твэльной трубки в процессе облучения и окисления СНУП ОЯТ. Полученные расчетным методом значения следует рассматривать как оценку.

В том случае, когда фрагменты твэлов визуально не содержали остатков ОЯТ, определение ядерных материалов проводили экспериментальным методом. Фрагменты твэлов подвергали двухстадийной отмывке: на первой стадии в азотной кислоте с концентрацией 10 моль·л⁻¹, на второй – в растворе 10 моль·л⁻¹ HNO₃, содержащем 0.02 моль·л⁻¹ NaF.

Температура растворителя составляла 95 ± 5°С, время растворения – 6 ч на каждой стадии процесса.

Для подтверждения полноты перевода в раствор волоксидационного топлива после завершения двухстадийного растворения проводили контрольную отмывку оболочек в растворе азотной кислоты с концентрацией 10 моль·л⁻¹, содержащем 0.1 моль·л⁻¹ HF, при температуре 95 ± 5°С в течение 6 ч.

Растворы, полученные на каждой стадии растворения, анализировали на содержание ядерных материалов и продуктов деления. Количество ОЯТ, обнаруженное в растворах после завершения растворения, приравнивали к количеству топлива, не отделенного в результате волоксидации.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На первом этапе исследований проведена серия из шести экспериментов для установления оптимальных условий проведения волоксидации СНУП ОЯТ. Данные по эффективности отделения топливной композиции от оболочек твэлов в зависимости от экспериментальных условий представлены в табл. 3.

Масса ОЯТ на оболочках твэлов в экспериментах 1–3 оценена расчетным методом, в экспериментах 4–6 – определена экспериментальным методом.

Видно, что полнота отделения топливной композиции от оболочек твэла увеличивается с ростом температуры процесса до 450°С. При дальнейшем увеличении температуры доля отделенного порошка ОЯТ остается практически неизменной. В экспериментах 3 и 4 при увеличении температуры с 350 до 450°С полнота отделения ОЯТ от оболочек

Таблица 4. Фракционный состав окисленного СНУП ОЯТ

№ эксперимента (см. табл. 1, 2)	Фракционный состав, мас%				
	<50 мкм	+50 мкм	+100 мкм	+200 мкм	+400 мкм
1	18.6	30.0	34.0	13.9	3.5
2	24.6	30.7	27.5	7.7	9.5
3	13.1	28.7	29.3	20.7	8.2
4	21.4	55.2	7.6	6.8	9.0
6	18.5	23.3	40.1	15.6	2.5

Таблица 5. Содержание ^3H , ^{14}C , ^{106}Ru в образцах волоксидированного СНУП ОЯТ

Нуклид	Входной анализ, Бк/г	№ эксперимента (см. табл. 1, 2)					
		1	2	3	4	5	6
		Доля от найденного при входном анализе, %					
^3H	$(2.6 \pm 0.4) \times 10^6$	0.9	0.5	<0.2	<0.2	<0.20	<0.20
^{14}C	$(1.2 \pm 0.3) \times 10^7$	5.7	4.0	2.4	2.0	2.0	2.0
^{106}Ru	$(4.0 \pm 0.4) \times 10^9$	95.2	95.3	94.7	84.2	85.9	76.3

возросла с 76.8 до 98.6%. В экспериментах 5 и 6 с повышением температуры с 450 до 550°C эффективность отделения ОЯТ от оболочки остается неизменной.

Низкая полнота отделения при температуре 350°C подтверждает наблюдения, сделанные в работе [9], где было обнаружено, что нитрид урана начинает интенсивно окисляться при температуре выше 300°C.

Повышение скорости продувки воздуха через объем аппарата также приводит к росту доли отделенного от оболочек ОЯТ только в определенном диапазоне температур. В экспериментах 2 и 3, проведенных при температуре 350°C, с увеличением скорости подачи воздуха в реакционное пространство полнота отделения ОЯТ от оболочек увеличилась с 58.4 до 76.8%. В экспериментах 4 и 5, проведенных при температуре 450°C, двукратное изменение скорости подачи воздуха в объем аппарата волоксидации практически не сказывается на доле отделенного порошка ОЯТ. Наблюдаемые закономерности процесса окисления СНУП ОЯТ, вероятно, обусловлены изменением лимитирующей стадии гетерогенной реакции из кинетической области в интервале температур 350–450°C к диффузионной при температурах 450–550°C. Отсутствие значимого влияния скорости подачи воздуха в зону окисления СНУП ОЯТ свидетельствует о внутридиффузионном лимитировании процесса. Вместе с тем, полученные в работе экспериментальные ре-

зультаты недостаточны для однозначного формулирования кинетических закономерностей волоксидации СНУП ОЯТ.

Установленные экспериментальные факты согласуются с данными работы [27], авторами которой показано, что скорость окисления брикетов моноксидного уран-плутониевого топлива возрастает с ростом температуры и достигает максимального значения, равного 160 мг/мин, при температуре 400°C.

Полученные экспериментальные результаты свидетельствуют о том, что оптимальными для отделения СНУП ОЯТ от оболочек твэла являются условия экспериментов 4–6, в которых полнота отделения топлива находится на уровне 99%.

Результаты определения фракционного состава волоксидированного СНУП ОЯТ представлены в табл. 4.

Во всех исследованных режимах окисления более 40% частиц имеют размер, не превышающий 100 мкм, а доля частиц с размером более 400 мкм не превышает 10%. Установлено, что в изученном диапазоне экспериментальных условий фракционный состав окисленного ОЯТ не зависит от температуры и скорости подачи воздуха в зону окисления.

Представленные результаты являются косвенным доказательством отсутствия значимого спекания топлива в процессе волоксидации. Возможность локального спекания топливной композиции

Таблица 6. Полнота отделения СНУП ОЯТ от оболочек твэла

№ эксперимента (см. табл. 1, 2)	Масса ОЯТ на оболочках (m_4), г	Масса отделенного порошка ОЯТ (m_3), г	Полнота отделения ОЯТ, %
7	3.2	141.4	97.8
8	1.1	112.5	99.0

в процессе волоксации установлена авторами работы [14] при изучении закономерностей окисления уранового оксидного топлива. В частности, показано, что с понижением температуры волоксации ниже 480°C степень измельчения топливной композиции возрастает. В изученном нами диапазоне температур волоксации СНУП ОЯТ указанной закономерности не выявлено.

Данные по остаточному содержанию некоторых летучих компонентов ОЯТ в образцах волоксорированного топлива представлены в табл. 5.

Данные, представленные в табл. 5, свидетельствуют о том, что во всем исследованном диапазоне экспериментальных условий наблюдается высокая эффективность удаления из топливной композиции ^3H . В экспериментах 3–6 содержание трития в волоксорированном образце ОЯТ ниже пределов обнаружения применяемой методики анализа и составляет менее 0.2% от его содержания в образце ОЯТ до волоксации. Аналогичный показатель для ^{14}C при проведении волоксации в диапазоне температур 450–550°C составляет 2%. Количество рутения в образцах волоксорированного ОЯТ уменьшается с ростом температуры процесса волоксации. Данный экспериментальный факт, вероятно, обусловлен летучестью оксида рутения(VIII). Подчеркнем, что в экспериментах 1–3 после завершения волоксации удельную активность ^3H , ^{14}C и ^{106}Ru определяли только в отделенном порошке СНУП ОЯТ. Содержание ^3H , ^{14}C и ^{106}Ru в топливе, оставшемся после волоксации на оболочках твэла, не оценивали. Поэтому удельная активность перечисленных радионуклидов в неотделенной части топливной композиции может превышать полученные значения.

Представленные данные по полноте удаления трития согласуются с результатами, полученными при волоксации уранового и уран-плутониевого оксидного топлива, опубликованными в работах [28–31]. Авторы отмечают, что при проведении волоксации в диапазоне температур 420–500°C

в течение 6–8 ч степень извлечения трития из топливной композиции составляет от 99.4 до 99.9%. Большинство авторов отмечают, что при температуре процесса, превышающей 650–700°C, выход газообразных продуктов деления снижается из-за спекания топливной композиции.

На основании данных по отделению топливной композиции от оболочек и удаления летучих продуктов оптимальными для проведения волоксации СНУП ОЯТ являются условия эксперимента 5, обеспечивающие эффективность процесса при минимально необходимых температуре и скорости подачи воздуха.

На втором этапе исследований проведены эксперименты с укрупненными партиями СНУП ОЯТ, отработавшего в составе КЭТВС-7 и ЭТВС-10, для проверки эффективности волоксации в выбранных оптимальных условиях. Волоксорацию проводили в условиях эксперимента 5. Результаты полноты отделения топливной композиции от оболочек твэла представлены в табл. 6. Данные по эффективности удаления из ОЯТ ^3H , ^{14}C , ^{106}Ru приведены в табл. 7.

Представленные результаты в целом согласуются с данными, полученными в серии экспериментов по установлению оптимальных условий волоксации СНУП ОЯТ.

Меньшая доля отделенного ОЯТ в эксперименте 7, вероятно, обусловлена меньшим диаметром твэлов КЭТВС-7 в сравнении с твэлами ЭТВС-10 и большей величиной выгорания ОЯТ, облученного в **Таблица 7.** Содержание ^3H , ^{14}C , ^{106}Ru в образцах волоксорированного ОЯТ, отработавшего в составе КЭТВС-7, эксперимент 7

Нуклид	Входной анализ, Бк/г ОЯТ	Содержание в ОЯТ после волоксации, % от найденного при входном анализе
^3H	$(1.8 \pm 0.3) \times 10^6$	<0.20
^{14}C	$(1.5 \pm 0.3) \times 10^7$	1.8
^{106}Ru	$(6.1 \pm 0.6) \times 10^9$	80.4

составе КЭТВС-7. Полученные в рамках настоящей работы данные по полноте отделения топливной композиции от оболочек твэлов расходятся с результатами экспериментов, полученными ранее при волоксации СНУП ОЯТ, в которых установлено, что остаточное содержания ядерных материалов на оболочке твэла после завершения волоксации не превышает 0.1% [32]. Данное расхождение, вероятно, обусловлено снижением эффективности гетерогенной реакции окисления за счет увеличения массы окисляемого ОЯТ, что приводит к увеличению толщины слоя фрагментов твэлов в тигле аппарата волоксации и ухудшению подвода воздуха к ОЯТ. Для устранения влияния данного фактора в аппаратах волоксации необходимо предусмотреть возможность перемешивания подготовленных фрагментов твэлов в процессе их окисления.

Остаточное содержание трития в волоксанном СНУП ОЯТ составляет менее 0.2% от его исходного содержания в топливной композиции. Доля удаленного в результате волоксации ^{14}C превышает 98%, а остаточное содержание ^{106}Ru в ОЯТ составляет 80.4%.

Таким образом, эксперименты с укрупненными партиями СНУП ОЯТ подтвердили эффективность волоксации в выбранных оптимальных условиях для отделения ОЯТ от оболочек твэла и удаления трития и радиоуглерода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оптимальными условиями проведения волоксации СНУП ОЯТ являются температура 450°C и скорость подачи воздуха, равная 150 мл/мин. Полнота отделения топливной композиции от оболочек твэла при проведении волоксации СНУП ОЯТ в оптимальных условиях составляет 98–99%. Оставшиеся после волоксации оболочки твэлов содержат на своей поверхности значимое количество ОЯТ. Для уменьшения потери ядерных материалов и вовлечения их в топливный цикл требуется включение в технологическую цепочку переработки СНУП ОЯТ процедуры отмычки оболочек.

Волоксация СНУП ОЯТ позволяет более чем на 99.8% удалить из топливной композиции тритий, снизить остаточное содержание ^{14}C в ОЯТ до 2% от его исходного количества и предотвратить

распространение данных радионуклидов по всему водно-экстракционному каскаду при переработке ОЯТ.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шадрин А.Ю., Кащеев В.А., Двоеглазов К.Н., Масленников А.Г., Мочалов Ю.С., Жеребцов А.А., Жданова О.В., Волк В.И., Устинов О.А., Дмитриев С.А. // *Вопр. атом. науки и техники. Сер.: Материаловедение и новые материалы*. 2016. № 4. С. 48–60.
2. Шадрин А.Ю., Двоеглазов К.Н., Масленников А.Г., Кащеев В.А., Третьякова С.Г., Шмидт О.В., Виданов В.Л., Устинов О.А., Волк В.И., Веселов С.Н., Ишунин В.С. // *Радиохимия*. 2016. Т. 58. № 3. С. 234–241.
3. Волк В.И., Шадрин А.Ю., Веселов С.Н., Двоеглазов К.Н., Жеребцов А.А., Шмидт О.В., Кузнецов А.Ю., Полуэктов П.П. // *Вестн. Рос. акад. естеств. наук*. 2012. Т. 12, № 4. С. 60–67.
4. Мясоедов Б.Ф., Калмыков С.Н., Шадрин А.Ю. // *Вестн. РАН*. 2021. Т. 9, № 5. С. 459–469.
5. Двоеглазов К.Н., Мочалов Ю.С., Суханов Л.П., Шадрин А.Ю., Герасименко М.Н., Зенченко Е.В., Маковский К.В., Селявский В.Ю., Смолкин П.А., Терентьев Н.Г., Терентьев С.Г., Ушаков О.С., Шляжско Д.С., Кащеев В.А., Зайков Ю.П. // *Сб. докл. отраслевой научно-технической конф. «Замыкание топливного цикла ядерной энергетики на базе реакторов на быстрых нейтронах»*. Сочи, 28–29 декабря 2021 г. С. 254–259.
6. Жеребцов А.А., Мочалов Ю.С., Шадрин А.Ю. // *Сб. докл. отраслевой научно-технической конф. «Замыкание топливного цикла ядерной энергетики на базе реакторов на быстрых нейтронах»*. Сочи, 28–29 декабря 2021 г. С. 274–277.
7. Меркулов И.А., Тихомиров Д.В., Жабин А.Ю., Апальков Г.А., Смирнов С.И., Аксютин П.В., Дьяченко А.С., Мальшева В.А. Патент RU 2619583. Заявл. 01.09.2016. Оpubл. 17.05.2017.
8. Кудрявцев Е.Г., Гаврилов П.М., Ревенко Ю.А., Меркулов И.А., Бондин В.В., Волк В.И., Бычков С.И., Алексеев В.Н. Патент RU 2459299. Заявл. 20.04.2011. Оpubл. 20.08.2012.

9. Двоеглазов К.Н., Шадрин А.Ю., Шудегова О.В., Павлюкевич Е.Ю., Богданов А.И., Зверев Д.В. // Вопр. атом. науки и техники. Сер.: Материаловедение и новые материалы. 2016. № 4. С. 81–90.
10. Волк В.И., Двоеглазов К.Н., Бычков С.И., Алексеенко С.Н., Панов О.Ю., Лобачев Е.А. // Седьмая Рос. конф. по радиохимии «Радиохимия-2012»: Тез. докл. Дмитровград, 15–19 октября 2012 г. С. 116.
11. Сеелев И.Н., Мацеля В.И., Васильев А.В., Курский И.А. // IX Рос. конф. с междунар. участием «Радиохимия-2018». СПб., 2018. С. 328.
12. Westphal B.R., Bateman K.J., Morgan C.D., Berg J.F., Crane P.J., Cummings D.G., Giglio J.J., Huntley M.W., Lind R.P., Sell D.A. // Nucl. Technol. 2008. Vol. 162, N 2. P. 153–157.
13. Breet N.H., Fox A.C. // J. Inorg. Nucl. Chem. 1966. Vol. 28. P. 1191–1203.
14. Безносюк В.И., Галкин Б.Я., Колядин А.Б. Криницын А.П., Любцер Р.И., Федоров Ю.С. // Радиохимия. 2007. Т. 49, №4. С. 334–338.
15. Поляков А.С., Захаркин Б.С., Смелов В.С., Волк В.И., Мухин И.В., Сафутин В.Д. Завадский М.И., Серов А.В., Бычков А.В., Зильберман Б.Я. // Атом. энергия. 2000. Т. 89. Вып. 4. С. 284–293.
16. Агеенков А.Т., Валув Е.М. // Атом. энергия. 1976. Т. 41, Вып. 2. С. 140–142.
17. Агеенков А.Т., Бибиков С.Е., Валув Е.М., Новоселов Г.П., Савельев В.Ф. // Атом. энергия. 1973. Т. 35, Вып. 5. С. 323–325.
18. Thomas L.E., Einziger R.E., Buchanan H.C. // J. Nucl. Mater. 1993. Vol. 201. P. 310–319.
19. Двоеглазов К.Н., Филимонова Е.Д., Медведев М.Н. // Вопр. атом. науки и техники. Сер.: Материаловедение и новые материалы. 2021. № 1. С. 58–67.
20. Момотов В.Н., Ерин Е.А., Волков А.Ю., Куприянов В.Н., Хамдеев М.И., Тихонова Д.Е., Шадрин А.Ю., Хомяков Ю.С. // Радиохимия. 2022. Т. 64, № 1. С. 53–59.
21. Звир Е.А., Крюков Ф.Н., Никитин О.Н., Кузьмин С.В., Мальцева Е.Б., Гильмутдинов И.Ф., Беляева А.В. // Научный годовой отчет АО «ГНЦ НИИАР». Дмитровград, 2019. С. 110–112.
22. Звир Е.А., Крюков Ф.Н., Гринь П.И., Никитин О.Н., Кузьмин С.В., Мальцева Е.Б., Гильмутдинов И.Ф., Федосеева А.Е., Бутылин А.С. // Научный годовой отчет АО «ГНЦ НИИАР». Дмитровград, 2018. С. 91–93.
23. Гринь П.И., Никитин О.Н., Беляева А.В. // Научный годовой отчет АО «ГНЦ НИИАР». Дмитровград, 2016. С. 102–105.
24. Ерин Е.А., Момотов В.Н., Волков А.Ю., Хамдеев М.И., Куприянов В.Н., Шадрин А.Ю., Двоеглазов К.Н. // Радиохимия. 2017. Т. 59. № 4. С. 325–330.
25. Момотов В.Н., Ерин Е.А., Волков А.Ю., Тихонова Д.Е., Куприянов А.С., Шадрин А.Ю. // Радиохимия. 2021. Т. 63, № 3. С. 276–280.
26. Момотов В.Н., Ерин Е.А., Волков А.Ю., Тихонова Д.Е., Куприянов А.С. // Радиохимия. 2021. Т. 63, № 1. С. 69–74.
27. Новоселов Г.П., Кучников В.В., Баронов В.А., Серебряков В.П., Степеннова Н.М. // Атом. энергия. 1982. Т. 53, Вып. 2. С. 77–80.
28. Землянухин В.И., Ильенок Е.И., Кондратьев А.Н. Радиохимическая переработка ядерного топлива АЭС. М.: Энергоатомиздат, 1989. 280 с.
29. Goode J.H., Stacy R.G. Head-end reprocessing studies with HB Robinson-2 fuel: ORNL/TM-6037. 1978. 89 p.
30. Goode J.H., Stacy R.G., Vaughen V.C.A. Head-end reprocessing studies of HB Robinson 2 fuel: II. Parametric voloxidation studies: ORNL/TM-6888. 1980. 63 p.
31. Cadieux J.R., Stone J.A. Voloxidation and dissolution of irradiated plutonium recycle fuels: DP-MS-80-10. CONF - 800943-12. 1980. 15 p.
32. Двоеглазов К.Н., Шадрин А.Ю., Медведев М.Н., Лакеев П.В., Зверев Д.В., Макаров А.О., Шудегова О.В., Павлюкевич Е.Ю., Дмитриева О.С. // IX Рос. конф. с междунар. участием «Радиохимия-2018»: Тез. докл. СПб., 17–21 сентября 2018 г. С. 274.