

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВИЙ ОКИСЛЕНИЯ UN И UC ПОД ДЕЙСТВИЕМ МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

© 2025 г. С. А. Кулюхин\*, Ю. М. Неволин, А. А. Бессонов

Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН,  
117091, Москва, Ленинский пр., д. 31, корп. 4

\*e-mail: kulyukhin@ipc.rssi.ru

Получена 20.08.2024, после доработки 14.12.2024, принята к публикации 20.12.2024

Изучен процесс окисления UN и UC в поле микроволнового излучения (МВИ) в атмосфере воздуха при атмосферном давлении. Исследовано влияние конструкционных материалов тиглей на полноту окисления UN и UC. Установлено, что при воздействии поля МВИ мощностью 800 Вт и частотой 2.45 ГГц в определенных условиях наблюдается разогрев UN и UC до ~993 К с их окислением в атмосфере воздуха до  $U_3O_8$ . Для быстрого (15–20 мин) и безопасного (без возгораний и взрывов) окисления UN и UC наиболее подходящими являются тигли из кварца и углерамики.

**Ключевые слова:** микроволновое излучение, мононитрид урана, монокарбид урана, окисление, тигли, корунд, фарфор, молибден, алунд, кварц, углерамика, октаоксид триурана

**DOI:** 10.31857/S0033831125010012

### ВВЕДЕНИЕ

С восьмидесятых годов XX в. появилось значительное количество публикаций по использованию электромагнитного излучения сверхвысоких частот (300 МГц–30 ГГц) при проведении различных физико-химических процессов. Это излучение называют еще микроволновым излучением (МВИ) [1, 2]. Преимуществами МВИ являются: высокая скорость и малая инерционность нагрева, отсутствие контакта между нагревателем и нагреваемым телом, равномерность прогрева материала по всему объему, возможность избирательного нагрева компонентов в смесях веществ и высокий коэффициент полезного действия [1]. Такие преимущества могут оказаться весьма важными при работе с радиоактивными материалами.

В радиохимических технологиях МВИ используют для синтеза стеклокерамик различных соединений и остекловывания радиохимических отходов [1, 3–5], для получения диоксидов актинидов [6–8], для переработки некондиционных керамических топливных таблеток оксидного уранового топлива [9].

В настоящее время в качестве одного из перспективных путей модификации головных операций Пурекс-процесса или комбинированного пирогидро-процесса рассматривается окислительное охрупчивание (волоскодеградация – объемное окисление) отработавшего ядерного топлива в разной атмосфере –  $O_2$ , воздух,  $O_3$ , пары  $H_2O$ , смесь воздуха и  $CO_2$  при 573–873 К [10–13]. В основном процессы волоскодеградации рассмотрены для оксидного топлива [10, 12, 14, 15]. С другой стороны, объемное окисление также может рассматриваться в качестве одного из перспективных путей модификации головных операций Пурекс-процесса при переработке нитридного

и карбидного топлива. Объемное окисление нитридного и карбидного ОЯТ позволит не только полностью удалить  $^3H$ , но и в дальнейшем при растворении продуктов волоскодеградации нитридного ОЯТ в  $HNO_3$  избежать образования труднолокализуемого гемиоксида азота  $N_2O$ , а в случае карбидного ОЯТ – образования многоосновных органических кислот, затрудняющих экстракцию плутония. В настоящее время в рамках направления “Прорыв” проводятся исследования по волоскодеградации смешанного нитридного уран-плутониевого топлива [13, 16].

В работе [17] исследовано объемное окисление UN в различных атмосферах. Показано, что окисление компактных образцов UN в условиях, характерных для волоскодеградации оксидного топлива, приводит к образованию оксидов урана. Использование кислородсодержащей атмосферы приводит к преимущественному образованию  $U_3O_8$ , а паров воды – к образованию  $UO_2$ . Поскольку одной из проблем при обращении с UN является его пирофорность [18], то для снижения тепловыделения в ходе окисления авторы работы [17] проводили процесс окисления при разрежении  $p = 0.1$  атм при температуре ~675–725 К. В таких условиях окисление протекало без горения UN, что согласовалось с данными работ [18, 19] по реакционной способности компактных образцов в атмосфере воздуха. В то же время известно, что использование МВИ позволяет значительно ускорить процесс нагрева. В работе [9] поле МВИ было успешно использовано для конверсии керамического  $UO_2$  в  $U_3O_8$ .

С учетом вышесказанного цель работы состояла в исследовании процессов окисления UN и UC под действием МВИ.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В работе использовали коммерческий таблетированный UN, поставленный ВНИИХТ, и плотный монолитный образец монокарбива урана UC, синтезированный методом дуговой плавки с нерасходуемым вольфрамовым электродом на медном охлаждаемом поде [20].

Мононитрид и монокарбид урана, используемые в работе, предварительно анализировали рентгенофазовым методом [20]. Порошковые рентгенограммы исходных UN и UC, а также продуктов их конверсии в нитрирующей атмосфере получали на дифрактометре AERIS фирмы Malvern Panalytical (Нидерланды) при следующих параметрах: излучение  $\text{Cu}K\alpha$  (длина волны 1.542 Å), Ni фильтр, 40 кВ, 15 мА. Для каждого образца порошковые рентгенограммы снимали по 3 раза при скорости сканирования  $0.27 \text{ с}^{-1}$  и шаге сканирования  $2\theta$ , равном  $0.011^\circ$ . Анализ порошковой дифрактограммы UN выявил в продукте помимо основной фазы дифракционно различимую примесь  $\text{UO}_2$ . Рентгенограммы синтезированного образца UC содержали интенсивные рефлексы основной фазы UC и малоинтенсивные примесных фаз  $\text{UC}_2$  и  $\text{UO}_x$  (совпадает с рефлексами для UO).

Для проведения экспериментов применяли микроволновую печь марки MIDEA EM720CKE (Беларусь) с выходной мощностью излучения 800 Вт и частотой 2.45 ГГц.

Для исследования процессов окисления UN и UC на воздухе при атмосферном давлении внутри печи располагали специальный керамический держатель, в котором устанавливали тигли из различных материалов. В работе использовали тигли из фарфора (Лабтех, Москва), корунда (95%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , ООО "Кармоликс", Москва), алуnda (90%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 10% Si, ООО "Термолаб", Москва), молибдена (компания AUREMO, Москва), кварца (Лабтех, Москва) и углерамики (ООО "Корунд", Москва). Для измерения температуры реакционной смеси в верхней части печи было сделано специальное отверстие. Использовали хромель-алимелевую термопару, которую вводили в реакционную массу сразу же после окончания микроволнового облучения UN или UC. Термопару вводили в специальный тонкостенный кварцевый колпачок, который предварительно

размещали в реакционном пространстве тигля. Такое размещение кварцевого колпачка обеспечивало его непосредственный контакт с реакционной массой вещества в процессе всего периода облучения МВИ. Облучение осуществляли в режиме постоянного вращения тигля при мощности МВИ 800 Вт и заданном времени экспозиции.

Физические адсорбционные характеристики порошков  $\text{U}_3\text{O}_8$  определяли на анализаторе Nova 2200 фирмы Quantachrome Instruments (США). В работе в качестве адсорбата использовался азот марки 0. Физические адсорбционные характеристики определяли при температуре жидкого азота (77.350 К). В качестве эталона использовали гранулированный  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ , для которого получена удельная поверхность, равная  $\sim 189.2 \text{ м}^2/\text{г}$  ( $260 \text{ м}^2/\text{г}$  в соответствии с техническим паспортом [21]).

Учитывая, что выбор модели расчета удельной поверхности существенным образом определяет ее конечное значение, мы проанализировали формы изотерм адсорбции. Характерные формы полученных изотерм адсорбции образцов позволили сделать вывод о том, что исследованные материалы обладают мезопористым строением. При этом полученный вид изотерм исключал из рассмотрения микропористый вариант. Основываясь на полученных результатах, для расчета удельной поверхности мы использовали классическую многоточечную модель метода Брунауэра–Эммета–Теллера (БЭТ), в котором, как правило, выбирается линейный участок на изотерме сорбции в диапазоне  $p/p_0 = 0.05\text{--}0.4$ . Для каждого образца измерения проводили по 3 раза.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В табл. 1 приведены данные по окислению UN на воздухе при атмосферном давлении в поле МВИ.

Как видно из табл. 1, разогрев UN с окислением до  $\text{U}_3\text{O}_8$  наблюдался только при использовании тиглей из фарфора, кварца и углерамики. Причем при кратковременном облучении образца UN, помещенного в фарфоровый тигель, разогрева и окисления UN не наблюдалось. Следует отметить, что во всех случаях UN разогревался до красного каления (рис. 1), однако его окисление происходило

**Таблица 1.** Данные по окислению монолитного UN на воздухе при атмосферном давлении

Номер опыта	Материал тигля	$m, \text{ мг}$		$\Delta m$		Время облучения, мин	$T_{\text{процесса}}, \text{ К}$	Конечный продукт
		исходная	конечная	мг	мас %			
1	Фарфор	500.0	500.0	0	0	2	~298	UN
2	Фарфор	487.5	538.1	50.6	10.4	20	~998	$\text{U}_3\text{O}_8$
3	Молибден	630.0	630.0	0	0	10	~363	UN
4	Кварц	389.6	430.2	40.6	10.4	15	~998	$\text{U}_3\text{O}_8$
5	Корунд	458.5	458.8	0	0	20	~298	UN
6	Углерамика	457.8	503.1	45.3	9.9	20	~998	$\text{U}_3\text{O}_8$



Рис. 1. Фотография кварцевого тигля, содержащего UN, при воздействии поля МВИ.

без образования открытого пламени и каких-либо взрывных процессов.

Очень интересными оказались результаты облучения UN, помещенного в Mo тигель. В работе [22] отмечено, что среди веществ, активно поглощающих микроволны, быстро и эффективно нагревающихся в СВЧ-поле, можно отметить углерод и металлы. С другой стороны, в работе [1] отмечено, что металлы по характеру взаимодействия с СВЧ-излучением можно отнести к первой группе, а именно к материалам, гладкая поверхность которых полностью отражает СВЧ-лучи. В результате нагрева металла

не происходит, так как потеря энергии СВЧ-излучения в его объеме практически нет. Действительно, наши опыты по оценке скорости нагревания Mo тигеля показали, что при облучении Mo тигеля массой 31 г МВИ при мощности 800 Вт и частоте 2.45 ГГц на воздухе в отсутствие UN температура тигеля через 15 мин достигла только 363 К. Аналогичного значения температура системы достигла и в присутствии UN, при этом никакого разогрева и окисления UN не наблюдалось.

На рис. 2 приведены порошковые рентгенограммы образцов, полученных в результате окисления UN, помещенного в тигли из различных материалов, в поле МВИ при атмосферном давлении. Видно, что все рентгенограммы находятся в хорошем соответствии между собой и содержат линии, теоретически рассчитанные для  $U_3O_8$  в JCPDS-ICDD по кристаллографическим данным [23].

С целью снизить энергозатраты процесса были проведены эксперименты по облучению UN в полях МВИ различной мощности. Эксперименты проводили в поле МВИ мощностью 200 и 800 Вт в течение 10 мин. Оказалось, что фазовый состав продуктов конверсии не зависел от подводимой мощности излучения. Во всех случаях продуктом окисления был слабозакристаллизованный  $U_3O_8$ , рефлексов других фаз не наблюдалось. Порошковые дифрактограммы полученных образцов  $U_3O_8$  были идентичны дифрактограммам, приведенным на рис. 2.

Поскольку порошкообразный  $U_3O_8$  в дальнейшем может быть использован для получения  $UO_2$ , пригодного для изготовления керамического ядерного

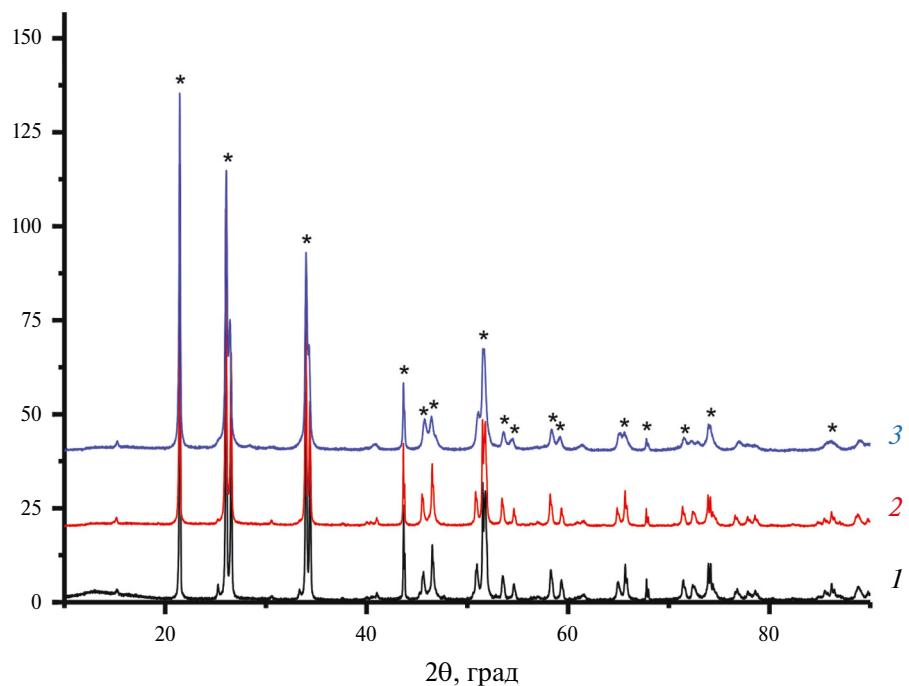


Рис. 2. Порошковые рентгенограммы образцов, полученных в результате окисления UN, помещенного в тигли из фарфора (1), кварца (2) и углекерамики (3). Условия облучения МВИ: воздух, 20 мин, 800 Вт, 2.45 ГГц. \*  $U_3O_8$  [23].

топлива, представляло интерес сравнить его физические адсорбционные характеристики с характеристиками  $\text{U}_3\text{O}_8$ , полученного другими методами. В работе [8] отмечено, что удельная поверхность  $\text{U}_3\text{O}_8$ , полученного путем окисления  $\text{UO}_2$  при 973 К в течение 2 ч на воздухе, составляет  $2.75\text{--}2.8 \text{ m}^2/\text{г}$ . В табл. 2 приведены физические адсорбционные характеристики порошков  $\text{U}_3\text{O}_8$ , полученные при воздействии поля МВИ различной мощности на UN, помещенного в кварцевый тигель. Как видно из табл. 2, полученные при разной мощности МВИ порошки  $\text{U}_3\text{O}_8$  имеют практически одинаковый диаметр пор. В то же время при облучении UN МВИ мощностью 200 Вт образующиеся порошки  $\text{U}_3\text{O}_8$  имеют более развитую удельную поверхность и больший объем пор (табл. 2). Следует отметить, что  $\text{U}_3\text{O}_8$ , полученный при данной мощности МВИ, имеет удельную поверхность, близкую к значениям, полученным в работе [8]. Исходя из полученных результатов можно предположить, что скорость окисления UN на воздухе при облучении МВИ мощностью 200 Вт была близка к скорости окисления  $\text{UO}_2$  при 973 К на воздухе в работе [8]. В то же время при облучении UN МВИ мощностью 800 Вт удельная поверхность в 2 раза меньше и составляет  $(1.3 \pm 0.1) \text{ m}^2/\text{г}$ . Данное значение значительно ближе к величине удельной поверхности порошков  $\text{U}_3\text{O}_8$ , применяемых для получения  $\text{UO}_2$  по штатной заводской технологии на МСЗ (г. Электросталь) ( $S_{\text{уд}} = 0.72 \text{ m}^2/\text{г}$ ) [24].

В табл. 3 приведены результаты экспериментов по окислению UC, помещенного в тигли из различных материалов, в поле МВИ на воздухе при атмосферном давлении.

Как видно из табл. 3, разогрев UC до красного каления с окислением до  $\text{U}_3\text{O}_8$  наблюдался во всех случаях, за исключением эксперимента с тиглем

**Таблица 2.** Физические адсорбционные характеристики порошков  $\text{U}_3\text{O}_8$ , полученные при воздействии МВИ различной мощности на UN, помещенный в кварцевый тигель

Мощность МВИ	$S_{\text{уд}}$ , $\text{m}^2/\text{г}$	$V_{\text{пор}}$ , $\text{cm}^3/\text{г}$	$D_{\text{пор}}$ , нм
200 Вт	$2.7 \pm 0.3$	$0.006 \pm 0.001$	$4.00 \pm 0.04$
800 Вт	$1.3 \pm 0.1$	$0.003 \pm 0.001$	$3.99 \pm 0.04$

**Таблица 3.** Данные по окислению монолитного UC на воздухе при атмосферном давлении

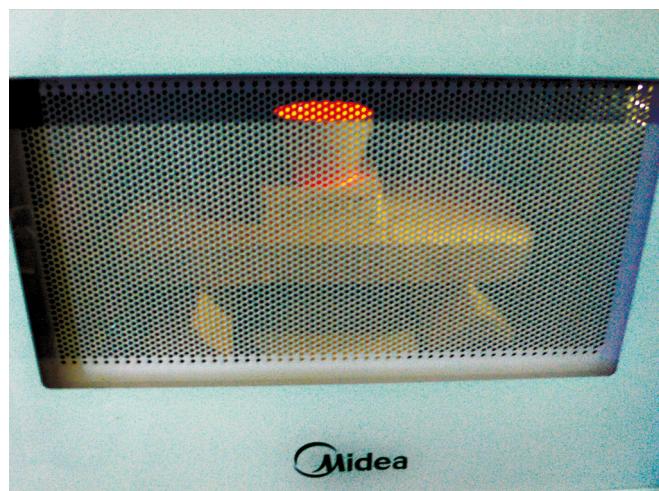
Номер опыта	Материал тигля	$m$ , мг		$\Delta m$		Время облучения, мин	$T_{\text{процесса}}$ , К	Конечный продукт
		исходная	конечная	мг	мас %			
1	Корунд	200.0	200.0	0	0	15	~473	UC
2	Фарфор	307.9	340.5	32.6	10.6	5	~998	$\text{U}_3\text{O}_8$
3	Кварц	259.5	276.0	16.5	6.4	20	~998	$\text{U}_3\text{O}_8$
4	Алунд	354.5	382.4	27.9	7.9	8	~998	$\text{U}_3\text{O}_8$
5	Углерокерамика	355.8	381.4	25.6	7.2	15	~998	$\text{U}_3\text{O}_8$

из корунда. В случае применения тигля из корунда за 5 мин его температура поднялась только до ~473 К и далее оставалась практически неизменной. При данной температуре окисление UC не протекало, как и в случае UN (табл. 1).

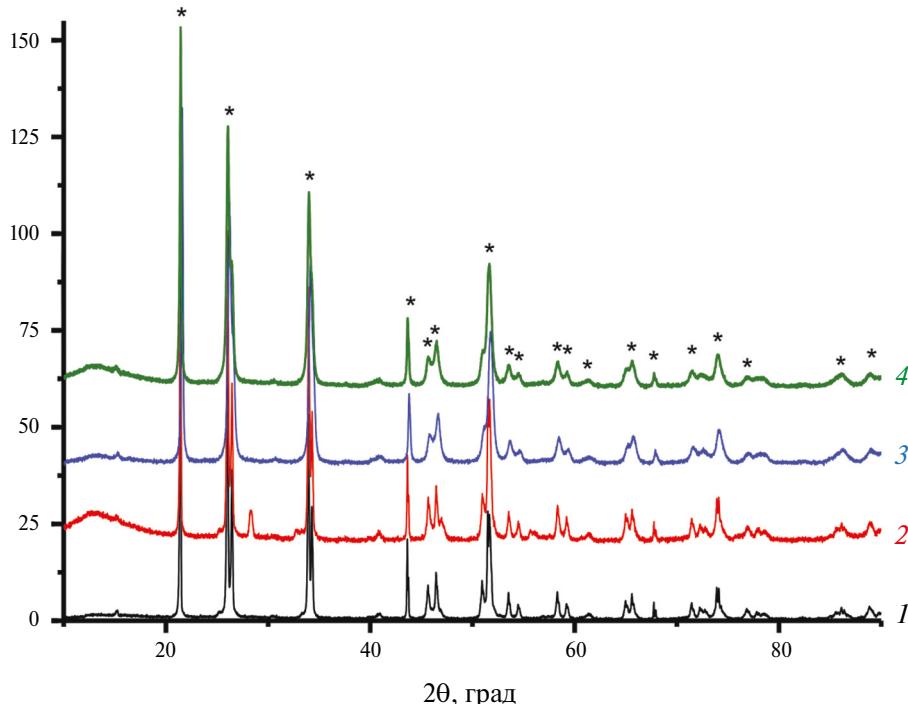
Для тиглей из фарфора и алунда температура ~998 К достигалась в течение 5–8 мин, при этом окисление UC протекало достаточно бурно с появлением открытого пламени (рис. 3). Различие в протекании окисления UC, помещенного в тигли из корунда и алунда, на воздухе может быть связано с присутствием в составе алунда 10% Si, который имеет высокую способность разогреваться при поглощении МВИ [25].

При применении тиглей из кварца и углерокерамики окисление UC протекало без образования открытого пламени и каких-либо взрывных процессов. Однако в отличие от опытов с тиглями из алунда и фарфора окисление UC протекало в более длительный период времени (15–20 мин).

На рис. 4 приведены порошковые рентгенограммы образцов, полученных в результате окисления UC, помещенного в тигли из различных материалов, в поле МВИ при атмосферном давлении. Видно, что все рентгенограммы находятся в хорошем соответствии между собой и содержат линии, теоретически рассчитанные для  $\text{U}_3\text{O}_8$  в JCPDS-ICDD по кристаллографическим данным [23].



**Рис. 3.** Фотография фарфорового тигля, содержащего UC, при воздействии поля МВИ.



**Рис. 4.** Порошковые рентгенограммы образцов, полученных в результате окисления UC, помещенного в тигли из алюнда (1), фарфора (2), кварца (3) и углекерамики (4). Условия облучения МВИ: воздух, 20 мин, 800 Вт, 2.45 ГГц. \*  $\text{U}_3\text{O}_8$  [23].

В табл. 4 приведены физические адсорбционные характеристики порошков  $\text{U}_3\text{O}_8$ , полученные при воздействии поля МВИ различной мощности на UC, помещенный в тигли из различных материалов. Как видно из табл. 4, удельная поверхность  $\text{U}_3\text{O}_8$ , полученного при окислении UC, помещенного в тигли из различного материала, под действием МВИ мощностью 800 Вт и частотой 2.45 ГГц, находится в диапазоне от 0.9 до 2.8 м<sup>2</sup>/г. При этом объем и диаметр пор, как и удельная поверхность, увеличиваются в ряду алюнд < фарфор < кварц < углекерамика. При этом только использование тиглей из алюнда позволяет получить  $\text{U}_3\text{O}_8$  при окислении UC на воздухе под действием МВИ с удельной поверхностью, близкой по величине к удельной поверхности порошков  $\text{U}_3\text{O}_8$ , применяемых для получения  $\text{UO}_2$  по штатной заводской технологии на МСЗ (г. Электросталь) [24]. В остальных случаях удельная поверхность  $\text{U}_3\text{O}_8$ , полученного при окислении UC на воздухе под действием МВИ мощностью 800 Вт и частотой 2.45 ГГц, близка к значениям, полученным при окислении

UN на воздухе под действием МВИ мощностью 200 Вт и частотой 2.45 ГГц (табл. 2).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованы процессы окисления UN и UC, помещенных в тигли из различных материалов, в атмосфере воздуха под действием МВИ мощностью 200 и 800 Вт, частотой 2.45 ГГц.

Установлено, что при использовании тиглей из фарфора, алюнда, кварца и углекерамики возможно окисление UN и UC под действием МВИ в воздушной атмосфере при нормальном давлении в течение 5–20 мин. При этом в результате окисления образуется единственный продукт – октаоксид триурана  $\text{U}_3\text{O}_8$ . В отличие от алюнда, содержащего 90%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и 10% Si, тигли из корунда (95%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) не нагреваются в поле МВИ и в них не протекает процесс окисления UN и UC.

**Таблица 4.** Физические адсорбционные характеристики порошков  $\text{U}_3\text{O}_8$ , полученные при воздействии МВИ на UC, помещенный в тигли из различных материалов. Условия облучения МВИ: воздух, 800 Вт, 2.45 ГГц

Материал тигля	Время облучения, мин	$S_{\text{уд}}$ , м <sup>2</sup> /г	$V_{\text{пор}}$ , см <sup>3</sup> /г	$D_{\text{пор}}$ , нм
Фарфор	5	$2.1 \pm 0.3$	$0.004 \pm 0.001$	$4.85 \pm 0.06$
Алюнд	8	$0.9 \pm 0.2$	$0.002 \pm 0.001$	$4.02 \pm 0.04$
Кварц	20	$2.2 \pm 0.3$	$0.006 \pm 0.001$	$4.85 \pm 0.06$
Углекерамика	15	$2.8 \pm 0.3$	$0.009 \pm 0.003$	$6.95 \pm 0.09$

Показано, что только  $\text{U}_3\text{O}_8$ , образующийся под действием МВИ мощностью 800 Вт и частотой 2.45 ГГц в атмосфере воздуха при окислении UN, помещенного в кварцевый тигель, и UC, помещенный в тигель из алюнда, имеют удельную площадь поверхности, близкую по величине к удельной поверхности порошков  $\text{U}_3\text{O}_8$ , применяемых для получения  $\text{UO}_2$  по штатной заводской технологии на МСЗ (г. Электросталь). В остальных случаях удельная поверхность порошков  $\text{U}_3\text{O}_8$ , образованных в результате окисления UN и UC на воздухе под действием поля МВИ, выше и находится в диапазоне от 2.2 до 2.8  $\text{m}^2/\text{г}$ .

Таким образом, использование МВИ позволяет интенсифицировать окисление UN и UC в атмосфере воздуха. При этом для быстрого (15–20 мин) и безопасного (без возгораний и взрывов) окисления UN и UC наиболее подходящими являются тигли из кварца и углерамики. Данный процесс может быть использован при переработке некондиционного нитридного и карбидного ядерного топлива.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Рентгенофазовый анализ на рентгеновском порошковом дифрактометре AERIS фирмы Malvern Panalytical (Нидерланды) проводили в Центре коллективного пользования физическими методами исследования в Институте физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гюльмалиев Э.А., Третьяков В.Ф., Талышинский Р.М., Борисов В.П., Мовсумзаде Э.М. // История и педагогика естествознания. 2015. Т. 2. С. 59–68.
- Vanetsev A.S., Tretyakov Y.D. // Adv. Chem. 2007. Vol. 76. N 5. P. 435–453.
- Kharissova O.V., Kharisov B.I., Ruiz Valdes J.J. // Ind. Eng. Chem. Res. 2010. Vol. 49. N 4. P. 1457–1466.
- Lu X., Chen Sh., Shu X., Hou Ch., Tan H. // Philosoph. Mag. Lett. 2018. Vol. 98. N 4. P. 155–160.  
<https://doi.org/10.1080/09500839.2018.1511068>
- Комаров В.И., Молохов М.Н., Сорокин А.А., Харитонов К.А., Балашов А.В., Борисов Г.Б. и др. // Атом. энергия. 2005. Т. 98. № 4. С. 288–293.
- Kulyako Yu.M., Trofimov T.I., Pilyushenko K.S., Vinokurov S.E., Myasoedov B.F. // Phys. At. Nuclei. 2020. Vol. 83. N 10. P. 1396–1399.  
<https://doi.org/10.1134/S1063778820100105>
- Dvoeglazov K., Kulyako Yu., Vinokurov S., Myasoedov B., Dmitriev M., Ushakov O. et al. // Energies. 2022. Vol. 15. N 18. P. 6618–6626.  
<https://doi.org/10.3390/en15186618>
- Singh G., Kumar P., Aher S., Purohit P., Khot P.M., Prakash A. et al. // J. Nucl. Mater. 2016. Vol. 479. P. 145–151.  
<https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2016.06.053>
- Kulyako Y.M., Trofimov T.I., Samsonov M.D., Vinokurov S.E., Myasoedov B.F. // Radiochemistry. 2015. Vol. 57. N 2. P. 127–130.
- Гаврилов П.М., Меркулов И.А., Друзь Д.В., Бондин В.В., Апальков Г.А., Смирнов С.И. и др. // Патент РФ 2654536. 2017.
- Hong S.-M., Jang H., Noh S., Kang H.W., Cho Y.-Z. // J. Radioanal. Nucl. Chem. 2021. Vol. 330. P. 695–705.  
<https://doi.org/10.1007/s10967-021-07972-w>
- Advances in Nuclear Fuel Chemistry / Ed. H.A. Markus. Duxford: Woodhead, 2020. 672 p.
- Momotov V.N., Makarov A.O., Volkov A.Yu., Lakeev P.V., Tikhonova D.E., Dvoeglazov K.N. // Radiochemistry. 2023. Vol. 65. N 2. P. 177–184.  
<https://doi.org/10.1134/S1066362223020042>
- Металиди М.М., Шаповалов С.В., Исмаилов Р.В., Скриплёв М.И., Безносюк В.И., Федоров Ю.С. // Радиохимия. 2015. Т. 57. № 1. С. 86–89.
- Аксютин П.В., Дьяченко А.С., Жабина А.Ю., Жерин И.И. // Изв. Томского политех. ун-та. Инжиниринг георесурсов. 2021. Т. 332. № 8. С. 18–27.
- Krivov M.P., Kireev G.A., Tenishev A.V., Davydov A.V., Skupov M.V., Solomatin I.D. et al. // J. Nucl. Mater. 2022. Vol. 567. Article 153798.  
<https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2022.153798>
- Кулюхин С.А., Неволин Ю.М., Гордеев А.В., Бессонов А.А. // Радиохимия. 2019. Т. 61. № 2. С. 108–116.
- Goncharov V.G., Liu J., van Veelen A., Kriegsman K., Benmore Ch., Sun Ch. et al. // J. Nucl. Mater. 2022. Vol. 569. Article 153904.  
<https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2022.153904>
- Sooby E.S., Brigham B.A., Robles G., White J.T., Paisner S.W., Kardoulaki E., Williams B. // J. Nucl. Mater. 2022. Vol. 560. Article 153487.  
<https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2021.153487>
- Кулюхин С.А., Гордеев А.В., Румер И.А., Кулемин В.В., Неволин Ю.М. // Атом. энергия. 2018. Т. 124. № 6. С. 344–349.
- Паспорт “Активный оксид алюминия шарик”. ТУ 2163-004-81279372-11. М.: SORBIS Group.

22. Каримов О.Х., Даминев Р.Р., Касьянова Л.З., Каримов Э.Х. // Фундаментальные исследования. 2013. № 4-4. С. 801–805.  
URL: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=31275> (дата обращения: 28.11.2024).
23. JCPDS—Int. Centre for Diffraction Data. PDF 01-074-2101,  $\alpha\text{-U}_3\text{O}_8$ .
24. Куляко Ю.М., Трофимов Т.И., Винокуров С.Е., Самсонов М.Д., Мясоедов Б.Ф. // Вопр. радиац. безопасности. 2015. № 3. С. 13–22.
25. Cao Z., Yoshikawa N., Taniguchi Sh. // Mater. Chem. Phys. 2010. Vol. 124. P. 900–903. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2010.08.004>

## Determination of Conditions for the Oxidation of UN and UC under Microwave Radiation

**S. A. Kulyukhin\*, Yu. M. Nevolin, and A. A. Bessonov**

*Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry, Russian Academy of Sciences,  
Leninskii pr. 31, korp. 4, Moscow, 119071 Russia*

*\*e-mail: kulyukhin@ipc.rssi.ru*

Received August 20, 2024; revised December 14, 2024; accepted December 20, 2024

The oxidation of UN and UC in a field of microwave radiation in air at atmospheric pressure has been studied. The influence of crucible material on the extent of oxidation of UN and UC was studied. It has been established that, under the influence of an MW field with a power of 800 W and a frequency of 2.45 GHz, under certain conditions, heating of UN and UC to ~993 K is observed with their oxidation in air to  $\text{U}_3\text{O}_8$ . For fast (15–20 min) and safe (without fires and explosions) oxidation of UN and UC, crucibles made of quartz and carbon ceramics are most suitable.

**Keywords:** microwave radiation, uranium mononitride, uranium monocarbide, oxidation, crucibles, corundum, porcelain, molybdenum, alundum, quartz, carbon ceramics, triuranium octaoxide