At a concentration of 8 wt.%, the corresponding increases were 14.0-14.3% and 12.0-12.4%, respectively. At the same time, the addition of nanoparticles was accompanied by an increase in kinematic viscosity. The most significant increase was observed for 8 wt.% Al_2O_3 and amounted to 95-97%, whereas for 8 wt.% TiO_2 it was within the range of 64-65%. The obtained results show that, under the investigated conditions, TiO_2 provides a more favorable combination of thermal conductivity enhancement and viscosity characteristics compared with Al_2O_3. The observed difference was considered in terms of interfacial layer formation, nanoparticle mobility, and the characteristics of nanoparticle aggregation in the oil medium.

Key words: *sunflower oil; nanolubricant; TiO_2; Al_2O_3; thermal conductivity; kinematic viscosity; nanoparticles.*

Сведения об авторах

Ануар Алмасбекович Бектемисов* – научный сотрудник кафедры «Техническая физика и теплоэнергетика», Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: anekin88@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0364-4632.

Михаил Вячеславович Ермоленко – кандидат технических наук, ассоциированный профессор, старший преподаватель кафедры «Техническая физика и теплоэнергетика», Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: tehfiz@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1677-8023.

Авторлар туралы мәліметтер

Ануар Алмасбекович Бектемисов* – «Техникалық физика және жылуэнергетика» кафедрасының ғылыми қызметкері, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: anekin88@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0364-4632.

Михаил Вячеславович Ермоленко – техника ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор, «Техникалық физика және жылу энергетикасы» кафедрасының аға оқытушысы, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: tehfiz@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1677-8023.

Information about the authors

Anuar Almasbekovich Bektemissov* – researcher, Department of Technical Physics and Heat Power Engineering, Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: anekin88@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0364-4632.

Mikhail Vyacheslavovich Yermolenko – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Senior Lecturer at the Department of «Technical Physics and Heat Power Engineering», Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: tehfiz@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1677-8023.

Поступила в редакцию 10.06.2026
Поступила после доработки 16.07.2026
Принята к публикации 11.09.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-76

ГРНТИ 58.91.35

CC BY 4.0
Check for updates

Е.А. Қабдылқақов*, Н.Е. Мухамедов, А.С. Сураев, С.А. Должиков, А.В. Пахниц
[1]Филиал «Институт атомной энергии»
Национального ядерного центра Республики Казахстан
180010, Республика Казахстан, область Абай, г. Курчатов, улица Бейбіт атом, 10.
*e-mail kabdylkakov@nnc.kz

ПРИМЕНЕНИЕ УСТАНОВКИ ЭШП ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ ТВЕРДЫХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ РЕАКТОРА БН-350

Аннотация: *Переработка металлических твердых радиоактивных отходов (ТРО), образующихся при выводе из эксплуатации ядерных установок, является актуальной задачей, решение которой позволяет уменьшить объем отходов, подлежащих захоронению. В работе представлены результаты исследования возможности применения электрошлакового переплава (ЭШП) для переработки металлических ТРО реактора БН-350. Эксперимент проведен на установке ЭШП, ранее апробированной при очистке стальных жаровых труб исследовательского реактора*

©А.Ж. Бекей, Ф. Вакандио, Т.В. Шакиева, Г.Е. Ергазиева, Х. Авчукир, 2026

ИВГ.1М от радиоактивного загрязнения. В качестве имитатора одного из образцов ТРО БН-350 использован фрагмент трубы из стали 12Х18Н10Т размером Ø50×5 мм. Перед экспериментом выполнены подготовка установки, позиционирование расходуемого электрода и формирование шлаковой ванны. В ходе переплава осуществлялась регистрация электрических параметров установки, что позволило проанализировать особенности протекания процесса. В результате переплавлено 2,3 кг металла и получен цилиндрический слиток диаметром около 60 мм. Анализ зарегистрированных значений тока и напряжения показал, что неустойчивость процесса на начальном этапе была связана с кратковременными короткими замыканиями между электродом и кокилем кристаллизатора. Возникновение коротких замыканий обусловлено малой величиной кольцевого зазора и недостаточным количеством флюса в нем. Установлено, что существующая конфигурация установки позволяет осуществлять переплав трубчатых металлических изделий, однако геометрические размеры перерабатываемых образцов ограничиваются параметрами кристаллизатора и величиной требуемого кольцевого зазора. Для переработки ТРО иных размеров и формы необходимо разрабатывать кристаллизаторы с соответствующими геометрическими и конструктивными параметрами.

Ключевые слова: *твердые радиоактивные отходы, БН-350, электрошлаковый переплав, кристаллизатор, кокиль.*

Введение

Обращение с радиоактивными отходами (РАО) является одним из ключевых вопросов атомной энергетики. В процессе эксплуатации и вывода из эксплуатации атомных электрических станций (АЭС) образуется большое количество твердых и жидких радиоактивных отходов.

Значительную долю твердых радиоактивных отходов (ТРО) составляют различные металлы и сплавы [1-5]. Одним из конечных этапов обращения с ТРО является их захоронение в соответствующих пунктах, тип которых определяется характеристиками отходов. Совершенствование технологий обращения с ТРО должно быть направлено не только на развитие методов их захоронения, но и на разработку методов переработки и дезактивации с целью уменьшения объема отходов, подлежащих захоронению.

Для Республики Казахстан актуальной остается задача обращения с ТРО энергетического реактора БН-350. В рамках данной задачи возникает необходимость разработки и внедрения технологий переработки металлических РАО с целью их дезактивации либо перевода в формы, пригодные для дальнейшего обращения.

Одним из подходящих методов переработки металлических радиоактивных отходов является электрошлаковый переплав (ЭШП). Процесс основан на омическом нагреве шлаковой ванны электрическим током, проходящим между расходуемым электродом и формируемым слитком [6, 7].

В филиале «Институт атомной энергии» Национального ядерного центра Республики Казахстан проводятся исследования по оценке эффективности электрошлакового переплава для очистки нержавеющих сталей от урана, трансурановых элементов и продуктов распада урана. Для проведения экспериментов используется установка ЭШП, созданная на базе аппарата электрошлаковой сварки А-550У. Проведенные ранее эксперименты [8-9] подтвердили принципиальную возможность применения данной технологии для переработки твердых металлических РАО. В этих экспериментах осуществлялся переплав и очистка от радиоактивного загрязнения стальных жаровых труб, применявшихся в конструкции экспериментальных технологических каналов исследовательского реактора ИВГ.1М.

По результатам исследований определено снижение активности U-235 в металле до минимально детектируемого уровня и снижение активности Cs-137 – на величину до двух порядков. В то же время, определено наличие U-235 и Cs-137 в шлаке, а также в фильтрующих элементах, что косвенно подтверждается увеличением мощности эквивалентной дозы от шлака и фильтрующих элементов. Активность Co-60 после переплава сохраняется практически на исходном уровне, поскольку данный радионуклид образован в нержавеющей стали вследствие нейтронной активации [8].

Установка ЭШП

Основным узлом любых установок для электрошлакового переплава является электрошлаковая печь. В электрошлаковой печи осуществляется переплав металлических элементов, используемых в качестве расходуемых электродов; их нагрев и плавление

происходят за счет омического нагрева шлаковой ванны. Расплавленный металл опускается к бассейну расплава сквозь расплавленный флюс, при этом в ходе процессов электрохимического взаимодействия металла с компонентами флюса происходит выборочное извлечение одних или внесение других элементов в состав металла (рис. 1) [8-9].

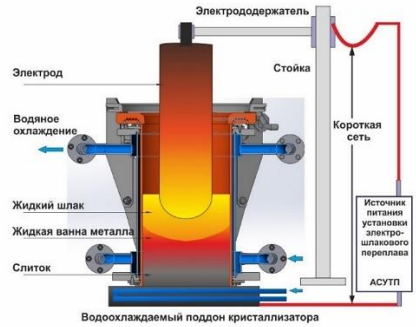


Рисунок 1 – Схема электрошлакового переплава

В начале процесса электрошлакового переплава в кристаллизаторе происходит плавление флюса и нижнего торца электрода, в результате чего образуется ванна расплава. Далее электрод непрерывно подается в ванну расплавленного флюса. За счет тепла, выделяемого во флюсе вследствие его электрического сопротивления, электрод оплавляется, а капли металла стекают вниз, образуя слиток в полости кокиля водоохлаждаемого кристаллизатора. Сама установка ЭШП филиала ИАЭ РГП НЯЦ РК состоит из следующих элементов (рис. 2):

1. лабораторная электрошлаковая печь;
2. кристаллизатор;
3. поддон;
4. трансформатор ТШС-3000;
5. система водяного охлаждения и сбора сточных вод;
6. система автономной вентиляции.



1 – электрошлаковая печь; 2 – кристаллизатор; 3 – поддон;
4 – трансформатор; 5 – система водяного охлаждения и сбора сточных вод; 6 – система автономной вентиляции

Рисунок 2 – Внешний вид установки ЭШП

Кристаллизатор и поддон установки предназначены для формирования цилиндрических слитков очищенного металла в процессе электрошлакового переплава. В кристаллизаторе происходит плавление электродного металла и рабочего флюса, а также формирование слитка в условиях принудительного охлаждения жидкого металла (рис. 3 а, б).

Кристаллизатор состоит из двух основных деталей – наружного кожуха и кокиля. Кожух кристаллизатора представляет собой отрезок трубы, к которому приварены нижний и верхний фланцы. На боковой поверхности трубы приварены патрубки подвода и отвода теплоносителя, в качестве которого используется вода. Крепление кожуха кристаллизатора к кокилю осуществляется с помощью фланцевых соединений. Диаметр внутренней полости кокиля, в котором образуется слиток – 60 мм. Поддон установки, на котором размещается кристаллизатор, также охлаждается водой.



а) кристаллизатор и поддон б) медный кокиль

Рисунок 3 – Кристаллизатор на поддоне и медный кокиль

Кристаллизатор состоит из двух основных деталей – наружного кожуха и кокиля. Кожух кристаллизатора представляет собой отрезок трубы, к которому приварены нижний и верхний фланцы. На боковой поверхности трубы приварены патрубки подвода и отвода теплоносителя, в качестве которого используется вода. Крепление кожуха кристаллизатора к кокилю осуществляется с помощью фланцевых соединений. Диаметр внутренней полости кокиля, в котором образуется слиток – 60 мм. Поддон установки, на котором размещается кристаллизатор, также охлаждается водой.

Виды ТРО реактора БН-350

В состав ТРО реактора БН-350 входят строительные материалы (например, бетонная крошка), элементы металлических конструкций и контура охлаждения, а также различные инструменты (дрели, разводные и газовые ключи) и другие изделия (рис. 4). Применение электрошлакового переплава рассматривается как способ снижения объемов металлических радиоактивных отходов, а, в перспективе – переработка, т.е. возврат в повторное использование части очищенного металла. На рисунке 4 представлены реальные образцы ТРО реактора БН-350.



Рисунок 4 – Образцы ТРО реактора БН-350

В таблице 1 представлены измеренные значения массы, удельной активности и мощности эквивалентной дозы.

Образцы ТРО различаются геометрическими параметрами, формой и материалом изготовления.

Образец под номером 11 является наиболее подходящим по форме и размерам для использования в качество электрода. Образец представляет собой металлическую трубу размером Ø47×5 мм. Для исследования возможности переплава данного вида ТРО на установке ЭШП проведен пуск с использованием его имитатора.

Таблица 1 – Результаты измерения активности и мощности эквивалентной дозы образцов ТРО

№	Наименование	Масса, кг	Удельная активность, 10^6 Бк	Мощность эквивалентной дозы, мкЗв/ч			
				Вплотную	0,1 м	0,5 м	1 м
1	Бетонная крошка	5,8	0,931	63,0	25,3	3,8	1,26
2	Бетонная крошка	8,7	0,805	66,0	26,0	3,2	0,98
3	Инструмент (газовый, рожковый ключ)	4,5	0,356	85,0	18,0	1,7	0,73
4	Инструмент (дрель со сверлом, отвертка)	3,0	1,667	170,0	39,0	3,5	1,32
5	Алюминиевый лист	0,7	2,286	280,0	30,0	1,5	0,7
6	Заглушка разжимная	4,4	0,500	110,0	28,5	2,3	0,93
7	Шланг	0,7	10,286	206,0	38,0	4,8	1,9
8	Вентиль отсечной	2,2	0,773	78,0	22,5	1,8	0,73
9	Фланец	5,1	0,118	19,3	4,0	0,89	0,4
10	Рабочее колесо насоса	2,1	0,429	37,0	10,6	1,2	0,51
11	Отрезок трубы	2,2	0,273	23,0	7,8	0,97	0,52
12	Крышка пенала Т-1	3,9	0,179	24,0	6,4	0,8	0,43
13	Фрагмент трубы с фланцем	4,0	0,038	6,1	1,7	0,42	0,2
14	Металл листовой	3,6	0,250	28,0	8,7	1,2	0,52
15	Фильтр Д-23	32	1,531	148,0	89,0	31,0	14,0

Подготовка к эксперименту с имитатором ТРО

В качестве имитатора ТРО был выбран фрагмент трубы (Ø50×5 мм), максимально приближенный по своим геометрическим размерам (Ø47×5 мм) и материальному составу (сталь 12Х18Н10Т) к одному из образцов ТРО под номером 11 (рис. 5).

Выбор имитатора ТРО в качестве образца обусловлен необходимостью отработки методики электрошлакового переплава. Проведение предварительных экспериментов позволяет определить оптимальный размер зазора между электродом и стенкой медного кокиля, обеспечить устойчивое положение электрода в процессе переплава и исключить его контакт со стенкой кокиля, что особенно важно для предотвращения радиоактивного загрязнения установки при последующей переработке реальных ТРО.

Масса имитатора составила 3,514 кг. К фрагменту трубы был приварен наконечник – стальной стержень, служащий для крепления электрода в электрододержателе установки ЭШП. Общая длина электрода (фрагмент трубы и наконечник) составила 1,2 м.



а) Измерение массы имитатора ТРО б) установка ЭШП перед пуском

Рисунок 5 – Подготовка эксперимента

Перед пуском были смонтированы элементы системы охлаждения кристаллизатора, поддона и трансформатора установки ЭШП. После установки и герметизации гибких подводящих и отводящих трубопроводов выполнено заполнение системы водой и проведена

проверка на герметичность всех соединений. Охлаждение элементов установки ЭШП осуществлялось проточной водой со сливом сточной воды в специальную канализацию. На рисунке 6 представлен вид установки ЭШП с гибкими рукавами и закрепленным в ней электродом.

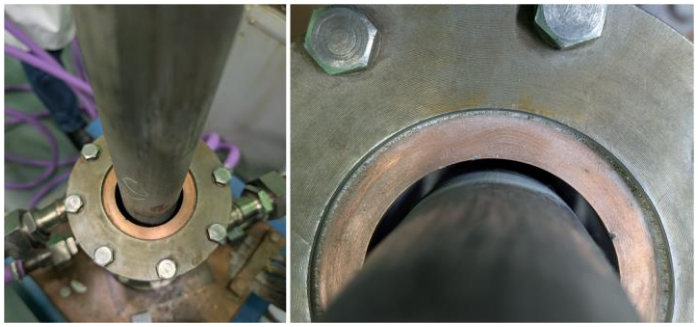


Рисунок 6 – Позиционирование электрода в кристаллизаторе

Для исключения возникновения короткого замыкания между электродом и стенкой медного кокиля кристаллизатора в процессе движения электрода при переплаве необходимо обеспечить гарантированный зазор путем точного позиционирования электрода относительно стенок кокиля. При помощи системы управления подачей электрода, работающей в ручном режиме, была проверена траектория его движения при полном вводе в кристаллизатор и последующем извлечении с контролем ширины зазора (рис. 6). После подтверждения отсутствия контакта между этими элементами во всем диапазоне движения положение электрода и кристаллизатора было зафиксировано, а установка переведена в режим дистанционного управления.

На заключительном этапе подготовки к эксперименту для осуществления переплава в режиме «твердого» старта между торцом электрода и металлической пластиной (затравкой), размещенной на водоохлаждаемом поддоне, был установлен прессованный пучок металлической стружки («жучок»). Для обеспечения электрического контакта «жучок» был плотно прижат электродом к затравке. Полость между электродом и кристаллизатором была заполнена флюсом марки АНФ-6 массой 545 г.

Результаты эксперимента

Пуск установки ЭШП начался через 45 с после включения системы регистрации параметров. Включение питающего трансформатора осуществлялось при напряжении 37 В, при этом ток в ходе этапа «твердого» старта изменялся в пределах от 600 до 1600 А, что свидетельствовало о начале процесса расплавления «жучка» и флюса и образования расплавленной шлаковой ванны. Общая длительность эксперимента составила около 300 с. Переходный процесс формирования шлаковой ванны и выхода на установившийся режим продолжался около 110 с, после чего установившийся режим переплава сохранялся в течение примерно 190 с.

Во время переходного режима работы установки и формирования расплавленной шлаковой ванны были зафиксированы кратковременные повышения тока до значений свыше 5000 А. По-видимому, они были обусловлены короткими замыканиями между электродом и стенкой кокиля через фрагменты «жучка» после его частичного расплавления. В этом случае автоматический режим работы установки предусматривает мгновенное отключение питающего трансформатора и немедленное извлечение электрода до размыкания образовавшегося контакта.

После размыкания контакта и восстановления требуемого электрического сопротивления процесс ЭШП автоматически возобновляется путем повторного ввода электрода. Этот алгоритм работы установки повторяется до полного образования расплавленной шлаковой ванны и стабилизации режима переплава. В ходе установившегося режима оператор вручную регулирует значение тока путем изменения скорости подачи электрода по показаниям амперметра.

На основании данных системы регистрации построены диаграммы изменения тока и напряжения в ходе эксперимента, приведенные на рисунке 7.

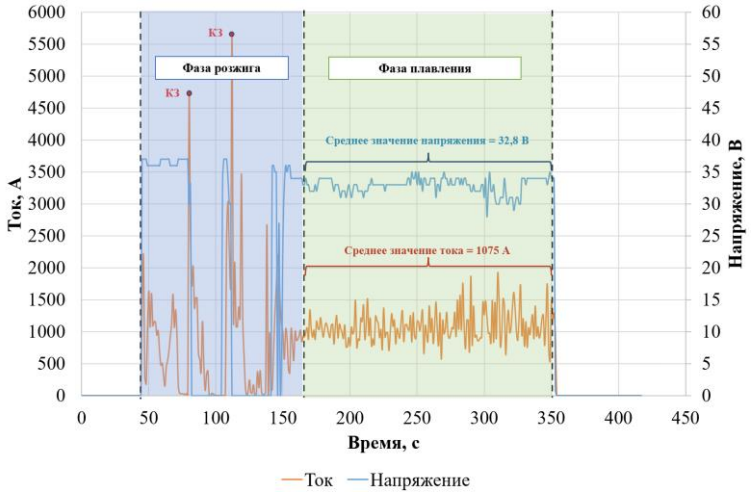


Рисунок 7 – Диаграмма изменения тока и напряжения в ходе эксперимента

На рисунке 8 представлены фрагменты различных стадий процесса электрошлакового переплава, зафиксированные системой видеонаблюдения установки.



начало плавления (160 с) | фаза плавления (160 с – 350 с) | завершение плавления (350 с)

Рисунок 8 – Процесс ЭШП

В ходе неустановившегося режима переплава были зафиксированы выбросы небольшого количества шлака, которые, вероятно, были обусловлены выходом раскаленного газа из внутренней полости трубы через расплавленную шлаковую ванну.

До плавления длина расходуемой части электрода составляла 620 мм, после переплава – 220 мм. Таким образом, во время процесса ЭШП было переплавлено 400 мм электрода, что соответствует массе 2,3 кг. В результате переплава был получен слиток, представленный на рисунке 9. Высота слитка составила около 100 мм, а диаметр – около 60 мм. Полученный слиток имеет правильную цилиндрическую форму с небольшим усечением в верхней части и практически полностью повторяет форму внутренней полости кокиля кристаллизатора.

Внешняя поверхность полученного слитка однородная и гладкая, с характерным металлическим блеском; видимые поверхностные дефекты отсутствуют. В центре верхнего торца слитка имеется углубление – усадочная раковина, характерная для процесса кристаллизации металла в кокиле (рис. 9).



Рисунок 9 – Внешний вид полученного слитка

Выводы

Результаты проведенного эксперимента показали, что установка ЭШП позволяет переплавлять трубчатые металлические изделия. Анализ зарегистрированных значений тока и напряжения позволил определить моменты прерывания процесса ЭШП. Установлено, что основной причиной прерываний являлось возникновение короткого замыкания между электродом и кристаллизатором через фрагменты разрушенного «жучка». Возникновению короткого замыкания способствовали малая величина кольцевого зазора между наружной поверхностью электрода и стенкой кокиля кристаллизатора (2-5 мм), а также недостаточное количество флюса в данном зазоре.

Таким образом, при проведении последующих экспериментов на установке ЭШП с радиоактивными образцами ТРО необходимо обеспечить поперечный размер расходуемой части электрода относительно внутреннего диаметра кокиля кристаллизатора так, чтобы величина кольцевого зазора между электродом и стенкой кокиля составляла не менее 10-15 мм. При этом габаритный диаметр электрода не должен превышать 40 мм. Одним из вариантов выполнения данного требования является смятие трубы вдоль продольной оси с последующей деформацией ее стенок. Кроме того, целесообразно предусмотреть несколько отверстий в верхней части трубы для свободного выхода перегретого газа из ее внутренней полости и предотвращения повышения давления в процессе переплава.

Вместе с тем, металлические ТРО реактора БН-350 не ограничиваются трубчатыми изделиями с наружным диаметром менее 60 мм. Они характеризуются значительным разнообразием геометрических форм и габаритных размеров и могут представлять собой различные изделия, в том числе гаечные ключи, вентили, фланцы и другие металлические элементы сложной геометрической формы. Возможность непосредственной переработки таких изделий на существующей установке ЭШП ограничена сложностью их использования в качестве расходуемых электродов и несоответствием их габаритных размеров рабочим параметрам кристаллизатора.

Следует также отметить что установка ЭШП применяется для лабораторных исследований и не предназначена для использования ее в промышленных масштабов. Однако, реультаты полученные с помощью данной установкой могут послужить основой для создания промышленных установок по электрошлаковому переплаву крупных объемов ТРО.

Также, дальнейшие исследования в области переработки ТРО реактора БН-350 с образцами, не совместимыми по масса-габаритным размерам с существующим кристаллизатором, может послужить основой для разработки новых кристаллизаторов с требуемыми техническими характеристиками, что позволит расширить экспериментальные возможности установки ЭШП.

Проектирование нового медного кокиля требует обязательной оценки его температурного поля, термических напряжений. Для решения этих задач целесообразно применение методов вычислительной гидродинамики. Разработанные ранее расчетные подходы к моделированию теплового состояния электрода и кристаллизатора установки ЭШП [10, 11] могут быть использованы для расчетного обоснования конструкции новых кристаллизаторов для их различного применения.

В расчетных методах используется программный пакет ANSYS, с помощью которого выполняется моделирование теплового состояния кристаллизатора установки ЭШП и омического нагрева электрода. Расчетные подходы позволяют оценивать температурное поле кристаллизатора и электрода, а также наблюдать динамику изменения его температуры.

Список литературы

1. Что такое радиоактивные отходы? / Ю. Амано и др. // IAEA Bulletin. – 2014. – Т. 55, № 3. – С. 3-4.
2. Radioactive Waste: A Review / D. Deng et al // Water Environment Research. – 2020. – Vol. 92, № 10. – P. 1818-1825.
3. Radioactive Waste Treatment Technology: A Review / G. Tochaikul et al // Kerntechnik. – 2022. – Vol. 87, № 2. – P. 208-225.
4. Methods of Thermal Treatment of Radioactive Waste / L. Fuks et al // Energies. – 2022. – Vol. 15, № 1, Art. 375.

5. Santana L.P. Management of Radioactive Waste: A Review / L.P. Santana // Proceedings of the International Academy of Ecology and Environmental Sciences. – 2016. – Vol. 6, № 2. – P. 38-43.
6. Walek J. Analysis of Thermophysical Properties of Electro Slag Remelting and Evaluation of Metallographic Cleanliness of Steel / J. Walek, A. Odehnalová, R. Kocich // Materials. – 2024. – Vol. 17, № 18, Art. 4613.
7. Numerical Investigation on the Electroslag Remelting of High Carbon Martensitic Stainless Steels / X. Liu et al // Metals. – 2023. – Vol. 13, № 3, Art. 482.
8. Должиков С.А. Применение электрошлакового переплава для очистки радиоактивно-загрязненного металла / С.А. Должиков, А.В. Пахниц, Н.Е. Мухамедов // Семипалатинский испытательный полигон: наследие и перспективы развития научно-технического потенциала: материалы X Международной конференции (12-14 сентября 2023 г.). – Курчатов: РГП НЯЦ РК, 2023. – С. 47.
9. Очистка стали от радиоактивного загрязнения методом электрошлакового переплава / А.Д. Вурим и др. // Вестник НЯЦ РК. – 2002. – № 1. – С. 34-39.
10. Моделирование омического нагрева электрода установки электрошлакового переплава в программном пакете ANSYS / Е.А. Қабдылқақов и др. // Вестник НЯЦ РК. – 2025. – № 3. – С. 147-155.
11. Моделирование теплового состояния кристаллизатора установки электрошлакового переплава после образования расплава металла / Е.А. Қабдылқақов и др. // Вестник НЯЦ РК. – 2026. – № 2. – С. 167-175.

References

1. Chto takoe radioaktivnye otkhody? / Yu. Amano i dr. // IAEA Bulletin. – 2014. – T. 55, № 3. – S. 3-4. (in Russian).
2. Radioactive Waste: A Review / D. Deng et al // Water Environment Research. – 2020. – Vol. 92, № 10. – P. 1818-1825. (in English).
3. Radioactive Waste Treatment Technology: A Review / G. Tochaikul et al // Kerntechnik. – 2022. – Vol. 87, № 2. – P. 208-225. (in English).
4. Methods of Thermal Treatment of Radioactive Waste / L. Fuks et al // Energies. – 2022. – Vol. 15, № 1, Art. 375. (in English).
5. Santana L.P. Management of Radioactive Waste: A Review / L.P. Santana // Proceedings of the International Academy of Ecology and Environmental Sciences. – 2016. – Vol. 6, № 2. – P. 38-43. (in English).
6. Walek J. Analysis of Thermophysical Properties of Electro Slag Remelting and Evaluation of Metallographic Cleanliness of Steel / J. Walek, A. Odehnalová, R. Kocich // Materials. – 2024. – Vol. 17, № 18, Art. 4613. (in English).
7. Numerical Investigation on the Electroslag Remelting of High Carbon Martensitic Stainless Steels / X. Liu et al // Metals. – 2023. – Vol. 13, № 3, Art. 482. (in English).
8. Dolzhikov S.A. Primenenie ehlektroshlakovogo pereplava dlya ochistki radioaktivno-zagryaznennogo metalla / S.A. Dolzhikov, A.V. Pakhnits, N.E. Mukhamedov // Semipalatinskii ispytatel'nyi poligon: nasledie i perspektivy razvitiya nauchno-tekhnicheskogo potentsiala: materialy X Mezhdunarodnoi konferentsii (12-14 sentyabrya 2023 g.). – Kurchatov: RGP NYATs RK, 2023. – S. 47. (in Russian).
9. Ochistka stali ot radioaktivnogo zagryazneniya metodom ehlektroshlakovogo pereplava / A.D. Vurim i dr. // Vestnik NYATs RK. – 2002. – № 1. – S. 34-39. (in Russian).
10. Modelirovanie omicheskogo nagreva ehlektroda ustanovki ehlektroshlakovogo pereplava v programmnom pakete ANSYS / E.A. Қabdylқақov i dr. // Vestnik NYATs RK. – 2025. – № 3. – S. 147-155. (in Russian).
11. Modelirovanie teplovogo sostoyaniya kristallizatora ustanovki ehlektroshlakovogo pereplava posle obrazovaniya rasplava metalla / E.A. Қabdylқақov i dr. // Vestnik NYATs RK. – 2026. – № 2. – S. 167-175. (in Russian).

Информация о финансировании:

Работа проведена в рамках проекта программно-целевого финансирования BR24993118 «НИР по обоснованию выбора и реализации технологии переработки твердых радиоактивных отходов».

Е.А. Қабдылқақов*, Н.Е. Мухамедов, А.С. Сураев, С.А. Должиков, А.В. Пахниц
Филиал «Атом энергия институты» Қазақстан Республикасының Ұлттық ядролық орталығы
180010, Қазақстан Республикасы, Абай облысы, Курчатов қаласы, Бейбіт атом көшесі 10.
*e-mail: kabdylkakov@nnc.kz

БН-350 РЕАКТОРЫНЫҢ ҚАТТЫ РАДИОАКТИВТІ ҚАЛДЫҚТАРЫН ҚАЙТА ӨҢДЕУ ҮШІН ЭШП ҚОНДЫРҒЫСЫН ҚОЛДАНУ

Ядролық қондырғыларды пайдаланудан шығару кезінде түзілетін металл қатты радиоактивті қалдықтарды (ҚРҚ) қайта өңдеу көмуге жататын қалдықтардың көлемін азайтуға мүмкіндік беретін өзекті міндеттердің бірі болып табылады. Зерттеуде БН-350 реакторының металл ҚРҚ-сын қайта өңдеу үшін электрошлактық қайта балқыту (ЭШҚБ) әдісін қолдану мүмкіндігін зерттеу нәтижелері ұсынылған. Эксперимент бұрын ИВГ.1М зерттеу реакторының болат жалын құбырларын радиоактивті ластанудан тазарту кезінде сынақтан өткен ЭШҚБ қондырғысында жүргізілді. БН-350 реакторының ҚРҚ үлгілерінің бірінің имитаторы ретінде өлшемі Ø50×5 мм болатын 12Х18Н10Т болатынан жасалған құбыр фрагменті пайдаланылды. Эксперимент алдында қондырғыны дайындау, жұмсалатын электродты орналастыру және шлак ваннасын қалыптастыру жұмыстары орындалды. Қайта балқыту барысында қондырғының электрлік параметрлері тіркеліп, процестің жүру ерекшеліктеріне талдау жүргізілді. Нәтижесінде 2,3 кг металл қайта балқытылып, диаметрі шамамен 60 мм цилиндр пішінді құйма алынды. Тіркелген ток пен кернеу мәндерін талдау процестің бастапқы кезеңіндегі тұрақсыздық электрод пен кристаллизатордың мыс кокилі арасындағы қысқа тұйықталулармен байланысты болғанын көрсетті. Қысқа тұйықталулар сақиналы саңылаудың аз болуынан және ондағы флюс мөлшерінің жеткіліксіздігінен туындаған. Қондырғының қолданыстағы конфигурациясы құбыр тәрізді металл бұйымдарды қайта балқытуға мүмкіндік беретіні анықталды, алайда қайта өңделетін үлгілердің геометриялық өлшемдері кристаллизатор параметрлерімен және қажетті сақиналы саңылау шамасымен шектеледі. Өлшемдері мен пішіні өзгеше ҚРҚ-ны қайта өңдеу үшін тиісті геометриялық және конструкциялық параметрлері бар кристаллизаторларды әзірлеу қажет.

Түйін сөздер: *қатты радиоактивті қалдық, реактор, электрқожды балқытып қайта өңдеу, кристаллизатор, кокиль.*

Y.A. Kabdylkakov*, N.Y. Mukhamedov, A.S. Suraev, S.A. Dolzhikov, A.V. Pakhnits
Branch «Institute of atomic energy» National nuclear center of Republic Kazakhstan
180010, Republic of Kazakhstan, Abay region, Kurchatov, Beybit atom street 10
*e-mail: kabdylkakov@nnc.kz

APPLICATION OF AN ELECTROSLAG REMELTING FACILITY FOR PROCESSING SOLID RADIOACTIVE WASTE FROM THE BN-350 REACTOR

The processing of solid metallic radioactive waste (SRW) generated during the decommissioning of nuclear facilities is an important task that can reduce the volume of waste requiring disposal. This paper presents the results of a study on the feasibility of applying electroslag remelting (ESR) to process solid metallic radioactive waste from the BN-350 reactor. The experiment was conducted using an ESR facility previously tested for the decontamination of steel flame tubes from the IVG.1M research reactor. A fragment of a 12Cr18Ni10Ti steel tube with dimensions of Ø50×5 mm was used as a surrogate for one of the BN-350 SRW samples. Prior to the experiment, the facility was prepared, the consumable electrode was positioned, and a molten slag bath was formed. During remelting, the electrical parameters of the facility were recorded to analyze the characteristics of the process. As a result, 2.3 kg of metal was remelted, producing a cylindrical ingot approximately 60 mm in diameter. Analysis of the recorded current and voltage values showed that process instability at the initial stage was associated with short circuits between the electrode and the copper mold of the crystallizer. The short circuits were caused by the small annular gap and an insufficient amount of flux within this gap. The results demonstrated that the existing facility configuration enables the remelting of tubular metallic components; however, the geometric dimensions of the processed samples are limited by the crystallizer parameters and the required annular gap. Processing SRW samples of different sizes and shapes therefore requires the development of crystallizers with appropriate geometric and design parameters.

Key words: *solid radioactive waste, reactor, electroslag remelting, crystallizer, copper mold.*

Сведения об авторах

Ержан Асқаруұлы Қабдылқақов* – научный сотрудник лаборатории исследования теплофизических и нейтронно-физических характеристик облучательных устройств филиала «Институт атомной энергии» Национального ядерного центра Республики Казахстан, г. Курчатов,

Республика Казахстан, докторант 2 курса специальности «Техническая физика», исследовательской школы физических и химических наук, Shakarim university, г. Семей, Республика Казахстан; e-mail: kabdylkakov@nnc.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3541-2569.

Нуржан Еролович Мухамедов – начальник отдела разработки и испытания реакторных устройств, филиала «Институт атомной энергии» Национального ядерного центра Республики Казахстан, PhD, ассоциированный профессор, г. Курчатов, Республика Казахстан, e-mail: mukhamedov@nnc.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6672-180X.

Артур Сергеевич Сураев – ведущий научный сотрудник лаборатории исследования теплофизических и нейтронно-физических характеристик облучательных устройств филиала «Институт атомной энергии» Национального ядерного центра Республики Казахстан, г. Курчатов, Республика Казахстан. PhD, ассоциированный профессор; e-mail: suraev@nnc.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5250-2852.

Сергей Александрович Должиков – начальник группы лаборатории испытания реакторного топлива филиала «Институт атомной энергии» Национального ядерного центра Республики Казахстан, город Курчатов, Республика Казахстан, докторант 2 курса специальности «Техническая физика», исследовательской школы физических и химических наук, Shakarim university, г. Семей, Республика Казахстан; e-mail: Dolzhikov@nnc.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0003-9109-7767.

Александр Владимирович Пахниц – заместитель начальника отдела разработки и испытания реакторных устройств филиала «Институт атомной энергии» Национального ядерного центра Республики Казахстан, г. Курчатов, Республика Казахстан; e-mail: pav@nnc.kz.

Автор туралы мәліметтер

Ержан Асқарұлы Қабдылқақов* – Қазақстан Республикасы Ұлттық ядролық орталығы «Атом энергиясы институты» филиалының сәулелендіру құрылғыларының жылуфизикалық және нейтрондық-физикалық сипаттамаларын зерттеу зертханасының ғылыми қызметкері, Курчатов қаласы, Қазақстан Республикасы, Shakarim University, Физика-химия ғылымдары зерттеу мектебінің «Техникалық физика» мамандығы бойынша 2-курс докторанты, Семей қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: kabdylkakov@nnc.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3541-2569.

Нұржан Еролович Мухамедов – Қазақстан Республикасы Ұлттық ядролық орталығы «Атом энергиясы институты» филиалының реакторлық құрылғыларды әзірлеу және сынау бөлімінің бастығы, PhD, қауымдастырылған профессор, Курчатов қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: mukhamedov@nnc.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6672-180X.

Артур Сергеевич Сураев – Қазақстан Республикасы Ұлттық ядролық орталығы «Атом энергиясы институты» филиалының сәулелендіру құрылғыларының жылуфизикалық және нейтрондық-физикалық сипаттамаларын зерттеу зертханасының жетекші ғылыми қызметкері, PhD, қауымдастырылған профессор, Курчатов қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: suraev@nnc.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5250-2852.

Сергей Александрович Должиков – Қазақстан Республикасы Ұлттық ядролық орталығы «Атом энергиясы институты» филиалының реакторлық отынды сынау зертханасының топ бастығы. Курчатов қ., Қазақстан Республикасы, Shakarim University, Физика-химия ғылымдары зерттеу мектебінің «Техникалық физика» мамандығы бойынша 2-курс докторанты, Семей қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: Dolzhikov@nnc.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0003-9109-7767.

Александр Владимирович Пахниц – Қазақстан Республикасы Ұлттық ядролық орталығы «Атом энергиясы институты» филиалының реакторлық құрылғыларды әзірлеу және сынау бөлімінің бастығының орынбасары, PhD, қауымдастырылған профессор, Курчатов қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: pav@nnc.kz.

Information about the authors

Yerzhan A. Kabdylkakov* – Researcher at the Laboratory for Investigation of Thermophysical and Neutron-Physical Characteristics of Irradiation Devices, Branch «Institute of Atomic Energy» of the National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan, Kurchatov, Republic of Kazakhstan, Second-year PhD student in Technical Physics at the Research School of Physical and Chemical Sciences, Shakarim University, Semey, Republic of Kazakhstan; e-mail: kabdylkakov@nnc.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3541-2569.

Nurzhan E. Mukhamedov – Head of the Department for Development and Testing of Reactor Devices, Branch «Institute of Atomic Energy» of the National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan, Kurchatov, Republic of Kazakhstan, PhD, Associate Professor, e-mail: mukhamedov@nnc.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6672-180X.

Artur S. Suraev – Leading Researcher at the Laboratory for Investigation of Thermophysical and Neutron-Physical Characteristics of Irradiation Devices, Branch «Institute of Atomic Energy» of the National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan, Kurchatov, Republic of Kazakhstan, PhD, Associate Professor; e-mail: suraev@nnc.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5250-2852.

Sergey Aleksandrovich Dolzhikov – Head of Group, Reactor Fuel Testing Laboratory, Institute of Atomic Energy Branch of the National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan, Kurchatov, Republic of Kazakhstan. Second-year doctoral student in Technical Physics at the Research School of Physical and Chemical Sciences, Shakarim University, Semey, Republic of Kazakhstan, e-mail: Dolzhikov@nnc.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0003-9109-7767.

Aleksandr Vladimirovich Pakhnits – Deputy Head of the Department of Development and Testing of Reactor Devices, Institute of Atomic Energy Branch of the National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan, Kurchatov, Republic of Kazakhstan; e-mail: pav@nnc.kz.

Поступила в редакцию 06.06.2026
Поступила после доработки 11.09.2026
Принята к публикации 16.09.2026