

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2026-2-167-175>
УДК 519.876.5

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ КРИСТАЛЛИЗАТОРА УСТАНОВКИ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОГО ПЕРЕПЛАВА ПОСЛЕ ОБРАЗОВАНИЯ РАСПЛАВА МЕТАЛЛА

Е. А. Кабылкаков*, А. С. Сураев, С. А. Должиков, Н. Е. Мухамедов, А. В. Пахниц, А. А. Куздеубай, Д. Т. Женис

Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

** E-mail для контактов: kabdylkakov@nnc.kz*

Переработка и очистка металлических радиоактивных отходов является одной из актуальных задач использования ядерной энергетики. Одним из методов переработки и очистки металлических отходов является метод электрошлакового переплава. В данной работе обсуждается моделирование теплофизического состояния кристаллизатора установки электрошлакового переплава с использованием программы ANSYS FLUENT. Проведено построение геометрической и расчетной модели, выполнен расчет теплофизического состояния кристаллизатора в условиях проведенных ранее пусков. Результаты расчета демонстрирует тепловое состояние кристаллизатора в условиях остывания образовавшегося в нем металлического расплава. Результаты расчетов демонстрируют физическую состоятельность принятых граничных условий и параметров теплообмена.

Ключевые слова: *твердые радиоактивные отходы, электрошлаковый переплав, тепловое состояние, моделирование, ANSYS FLUENT, кристаллизатор.*

ВВЕДЕНИЕ

Вывод из эксплуатации исследовательских и энергетических ядерных установок, а также реабилитация загрязненных территорий неизбежно сопровождаются образованием радиоактивных отходов (РАО), требующих регламентированного обращения и последующей изоляции. Несмотря на применение технологий, направленных на минимизацию объема образующихся отходов, в процессе указанных работ формируются значительные количества как жидких, так и твердых радиоактивных отходов (ТРО). Существенную долю в структуре накопленных ТРО составляют изделия и конструктивные элементы из металлов и сплавов [1–2].

В мировой практике окончательная изоляция РАО, как правило, осуществляется посредством их захоронения в специализированных хранилищах различного типа – от приповерхностных сооружений до глубоких инженерно-геологических объектов. В государствах–членах МАГАТЭ эксплуатируется более ста подобных объектов; часть из них продолжает прием отходов, другие находятся на стадии проектирования или строительства.

Для Республики Казахстан, как и для других стран с развитой ядерной инфраструктурой, актуальной является задача обращения с металлическими изделиями, загрязненными радионуклидами. К данной категории относится оборудование, загрязненное в процессе добычи и переработки уранового сырья, нефти, а также конструктивные элементы исследовательских реакторов НЯЦ РК и энергетического реактора БН-350. В этой связи приоритетным направлением является разработка и внедрение технологий переработки ме-

таллических РАО с целью их дезактивации либо перевода в формы, пригодные для дальнейшего контролируемого обращения [3, 4].

Одним из перспективных методов переработки металлических радиоактивных отходов является электрошлаковый переплав (ЭШП). Процесс основан на селективном поглощении урана и других радиоактивных изотопов, содержащихся в расплавляемом электроде, изготовленном из загрязненного металла, подвергаемого очистке, при плавлении электрода в расплаве шлака заданного состава. Плавление электрода и шлака осуществляется за счет омического нагрева электрическим током, проходящим между расходуемым электродом и кристаллизатором (слитком очищенного металла после начала его формирования).

В установившемся режиме ток замыкается между электродом и формирующимся слитком через электропроводный шлак, обладающий существенно большим электрическим сопротивлением по сравнению с металлом. Вследствие этого, основное тепловыделение локализуется в объеме шлака, который нагревается до температуры, превышающей температуру плавления металла электрода. Тепловой режим определяется балансом между подводимой электрической мощностью и интенсивным теплоотводом в водоохлаждаемый кристаллизатор.

После прохождения через шлак капли аккумулируются в металлической ванне в нижней части кристаллизатора, где формируется слиток. Интенсивный радиальный теплоотвод через стенки медного водоохлаждаемого кристаллизатора обеспечивает направленную кристаллизацию снизу вверх и стабилизацию глубины жидкой ванны. Скорость опускания электро-

да автоматически согласуется со скоростью его плавления, в результате чего поддерживается квазистационарный тепловой и гидродинамический режим. Совокупность тепловых, электромагнитных и массопереносных процессов определяет форму жидкой ванны, макроструктуру слитка и уровень химической однородности получаемого металла (рисунок 1) [5-7].

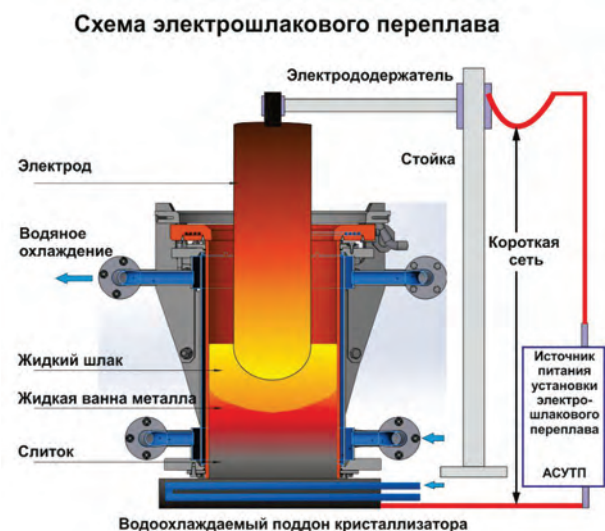


Рисунок 1. Схема электрошлакового переплава

В филиале Института атомной энергии НЯЦ РК проводятся исследования по оценке эффективности электрошлакового переплава для очистки нержавеющей сталей от урана и трансурановых элементов, а также продуктов их распада. Для проведения экспериментов используется установка ЭШП, созданная на базе аппарата электрошлаковой сварки А-550У [8]. Проведенные серии пусков [9-10] подтвердили принципиальную возможность применения данной технологии для переработки твердых металлических РАО.

Экспериментальное исследование тепловых процессов в кристаллизаторе затруднено вследствие отсутствия возможности прямого измерения параметров расплава. В этих условиях методы вычислительной гидродинамики (CFD) являются эффективным инструментом анализа теплового состояния. Численное моделирование позволяет определить распределение температуры и тепловых потоков, выявить зоны тепловой концентрации и исследовать влияние параметров конструктивных элементов на устойчивость теплового режима.

В настоящее время в области электрометаллургии опубликовано значительное количество исследований, например [6, 11], посвященных применению методов вычислительной гидродинамики (CFD) для анализа тепловых и гидродинамических процессов в установках электрошлакового переплава (ЭШП). Чис-

ленные модели, как правило, включают описание распределения плотности электрического тока, джоулева тепловыделения, конвективного переноса в шлаковой и металлической ваннах, а также формирования фронта кристаллизации. Использование CFD-подходов позволяет проводить параметрические исследования влияния силы тока, состава флюса, геометрии кристаллизатора и условий охлаждения на температурное поле и устойчивость процесса переплава.

Однако тепловое состояние кристаллизатора установки ЭШП ранее не являлось предметом самостоятельного численного исследования. Между тем, именно кристаллизатор (его форма, размеры и материал) определяет интенсивность теплоотвода, конфигурацию изотерм в зоне затвердевания и стабильность направленной кристаллизации, что особенно критично при переработке металлических радиоактивных отходов.

Ранее была выполнена работа [7], направленная на численное моделирование омического нагрева электрода данной установки. По результатам моделирования получены пространственные распределения температуры по объему электрода, а также количественная оценка выделяемой тепловой мощности. Анализ показал, что температура стальной трубы, выполняющей функцию расходуемого электрода, при заданных параметрах пуска не достигает температуры фазового перехода. Это свидетельствует о том, что плавление электрода обусловлено не только его внутренним джоулевым разогревом, но и взаимодействием с расплавленным металлом.

С физической точки зрения процесс плавления реализуется преимущественно в области металлической ванны расплава. Это объясняется перераспределением плотности тока и локализацией тепловыделения в средах с повышенным электрическим сопротивлением – прежде всего в шлаковой ванне и приэлектродной зоне. Более высокое удельное сопротивление расплавленного шлака по сравнению с твердым металлическим электродом приводит к концентрации джоулева тепловыделения в расплаве, что формирует устойчивую зону плавления на торце электрода.

Таким образом, несмотря на наличие ранее выполненных исследований, посвященных электротермическим процессам в установке, комплексная оценка теплового состояния кристаллизатора с учетом сопряженного теплообмена и гидродинамики до настоящего времени не проводилась, что и определяет актуальность настоящей работы.

Целью настоящей работы является разработка расчетной модели и проведение теплового моделирования кристаллизатора установки ЭШП для инженерного обоснования его конструкции, направленного на повышение безопасности технологии переработки металлических радиоактивных отходов.

Постановка задачи

Методы CFD широко применяются для моделирования процессов образования и затвердевания расплава в различных установках для электрошлакового переплава [5, 6, 11]. Одним из наиболее широко применяемых программных инструментов в этой области является ANSYS FLUENT [12]. Данная программа предназначена для выполнения теплофизического и гидравлического анализа систем [13-15], а также для решения задач аэродинамики и моделирования химических реакций [16-19]. ANSYS FLUENT использует метод конечных элементов и входит в программный пакет ANSYS.

Разработка расчетной (математической) модели кристаллизатора установки ЭШП включает следующие этапы:

1. Создание трехмерной геометрической модели кристаллизатора;
2. Генерация конечно-элементной сетки;
3. Задание свойств материалов и настройка решателя;
4. Задание начальных и граничных условий расчета.
5. Проведение нестационарного расчета теплового состояния кристаллизатора применительно к условиям эксперимента по переплавке имитатора ТРО, проведенного на установке ЭШП.

ПОСТРОЕНИЕ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ

Описание установки ЭШП

Установка ЭШП филиала ИАЭ РГП НЯЦ РК состоит из следующих элементов (рисунок 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;
7. Система контроля и регистрации параметров;
8. Система визуального контроля;
9. Система дозиметрического контроля.

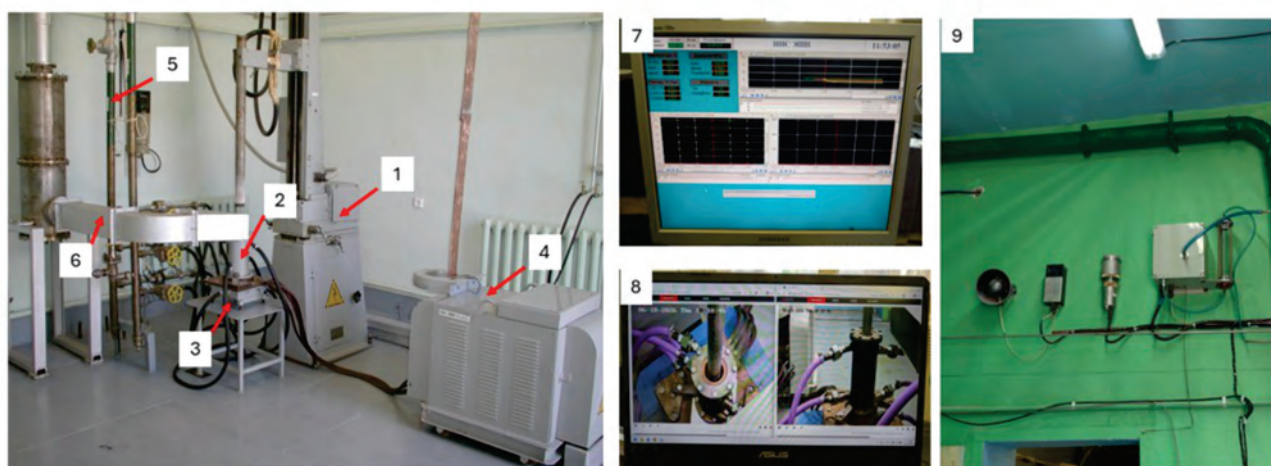
Управление установкой осуществляется с учетом информации, получаемой от систем контроля и регистрации параметров, визуального контроля и дозиметрического контроля. Технические характеристики установки ЭШП представлены в таблице 1.

Таблица 1. Технические характеристики установки ЭШП

№	Параметр	Значение
1	Мощность, кВА	150
2	Номинальный ток, А	до 3000
3	Номинальное напряжение, В	до 47
4	Управление ходом плавки	дистанционное
5	Вес стали, переплавляемой за одну плавку, кг	до 20
6	Теплоноситель	Вода

Кристаллизатор и поддон установки предназначены для формирования и получения застывших цилиндрических слитков очищенного металла, полученных в процессе электрошлакового переплава. В кристаллизаторе происходит плавление металла электрода, рабочего флюса и формирование слитка в процессе принудительного охлаждения жидкого металла.

Кристаллизатор состоит из двух основных деталей – наружного кожуха и кокиля. Кожух кристаллизатора представляет собой отрезок трубы, к которой приварены нижний и верхний фланцы. На боковой поверхности трубы приварены патрубки подвода и



1 – электрошлаковая печь; 2 – кристаллизатор; 3 – поддон; 4 – трансформатор; 5 – система водяного охлаждения и сбора сточных вод; 6 – система автономной вентиляции; 7 – система контроля и регистрации параметров; 8 – Система визуального контроля; 9 – Система дозиметрического контроля.

Рисунок 2. Внешний вид установки ЭШП



а) кристаллизатор и поддон



б) медный кокиль

Рисунок 3. Кристаллизатор на поддоне и медный кокиль

отвода теплоносителя, в качестве которого выступает вода. Крепление кожуха кристаллизатора к кокилю осуществляется с помощью фланцевых соединений (рисунок 3 а, б). Кристаллизатор и поддон установки охлаждаются водой.

ПОСТРОЕНИЕ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ

Геометрическая модель

В программе SpaceClaim, входящей в пакет программ ANSYS, построена трехмерная модель кри-

сталлизатора установки ЭШП (рисунок 4). Для построения модели использована информация из чертежно-технической документации, позволяющая в точности передать геометрию и размеры кристаллизатора.

Расчетная модель кристаллизатора строится с предположением об уже образовавшемся расплаве стали внутри медного кокиля. Сам процесс плавления стального электрода и процесс образования расплава в рамках данной работы не рассматривается.

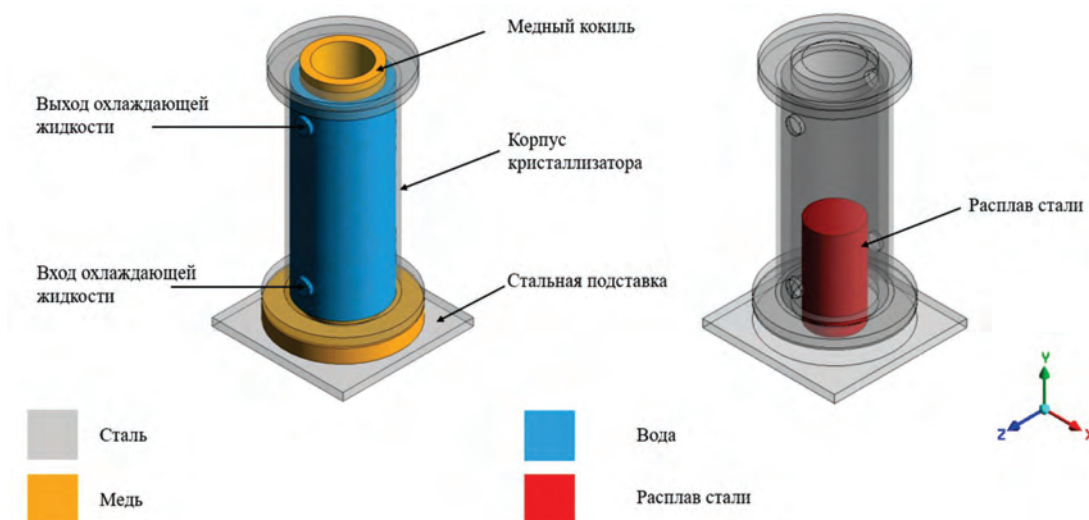
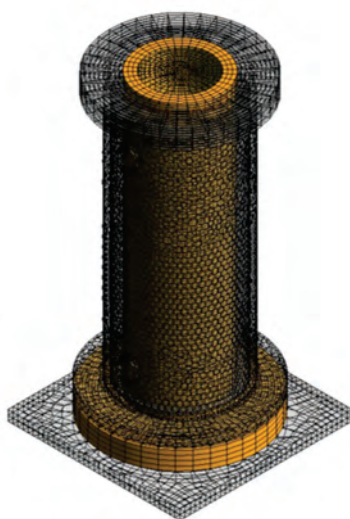
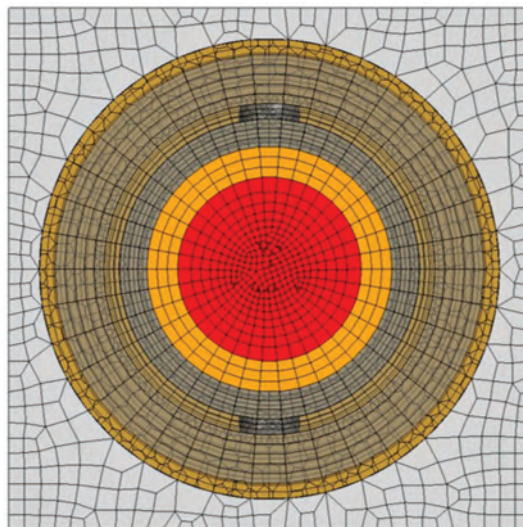


Рисунок 4. Геометрическая модель (изометрический вид) кристаллизатора установки ЭШП



а) изометрический вид



б) вид сверху

Рисунок 5. Конечно-элементная модель (сетка) кристаллизатора ЭШП

Конечно-элементная модель

Расчетная конечно-элементная модель была сформирована в модуле ANSYS Meshing. Общее количество элементов сетки составило 92000. После импорта в ANSYS FLUENT исходная дискретизация была преобразована в полиэдрическую сетку, что позволило повысить устойчивость численного решения и улучшить точность аппроксимации градиентов при сохранении приемлемых вычислительных ресурсов.

НАСТРОЙКА РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ

Масса и начальная температура расплава стали

В качестве имитатора ТРО был выбран фрагмент трубы ($\varnothing 50 \times 5$ мм) максимально приближенный по своим геометрическим размерам ($\varnothing 47 \times 5$ мм) и мате-

риальному составу (сталь 12X18H10T) к одному из образцов ТРО.

Масса расходуемого (переплавляемого) фрагмента трубы имитатора ТРО составила 3,514 кг (рисунок 6). К этому фрагменту трубы был приварен наконечник – стальной стержень, служащий для крепления электрода в электрододержатель установки ЭШП. Общая длина электрода (фрагмент трубы и наконечник) составила 1,2 м, общая длина расходуемой части 0,62 м. Во время процесса ЭШП было переплавлено 450 мм электрода, что соответствует массе 2,5 кг.

В установке ЭШП отсутствуют датчики или приборы для измерения температуры в области кристаллизатора на этапе пуска. Поэтому начальные значения температуры задаются на основе приближенных оце-



а) имитатор ТРО



б) образец ТРО

Рисунок 6. Внешний вид переплавляемой трубы

нок. Температура плавления стали марки 12Х18Н10Т составляет 1673 К [19]. В работе [6] приведено моделирование температурного поля в шлаковой и металлической ваннах при установившемся плавлении, где максимальная температура шлака в зоне контакта достигает примерно 2165 К, а при увеличении скорости плавления снижается до 2090 К. Принимая во внимание приведенную выше информацию, начальная температура расплава задана на уровне 2000 К. На остальные элементы модели кристаллизатора (медный кокиль, теплоноситель в пространстве между кокилем и корпусом, корпус, нижняя стальная пластина, нижний и верхний фланцы) задана начальная температура 300 К.

Расход воды

На кристаллизаторе установки ЭШП имеется два патрубка для входа и два – для выхода воды (рисунок 3а, рисунок 4). Во время эксперимента по плавлению стальной трубы массовый расход воды на каждом входе был задан равным 0,2 кг/с.

Конвективный теплообмен с окружающей средой

На внешней границе модели кристаллизатора задан конвективный теплообмен с коэффициентом теплоотдачи $5 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$ при температуры окружающей среды 300 К.

Настройка решателя

В таблице 2 представлены параметры настройки решателя ANSYS FLUENT.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

По результатам расчета теплового состояния кристаллизатора получено распределение температуры в центральном продольном сечении модели (рисунок 7).

На представленных распределениях температуры в центральном продольном сечении кристаллизатора установки электрошлакового переплава прослеживается эволюция теплового поля от стадии интенсивного начального нагрева к формированию квазистационарного режима направленной кристаллизации. В период от 0 до 1 с объем металла практически полностью находится в высокотемпературном состоянии (до ~2000 К), при этом наблюдается крайне высокий радиальный температурный градиент вблизи стенок кристаллизатора, что указывает на мощный тепловой поток к системе охлаждения и формирование тонкого затвердевшего слоя. Уже к 25–50 с формируется отчетливо выраженная куполообразная жидкая ванна: изотермы приобретают сглаженную параболическую форму, зона расплава сужается к оси, а у стенок развивается устойчивая зона кристаллизации, что свидетельствует о доминировании радиального теплоотвода. В интервале с 75 по 125 с глубина ванны уменьшается, и она становится более вытянутой вдоль продольной оси и осевой температурный градиент начинает преобладать над радиальным, а фронт кристаллизации стабилизируется, что характерно для перехода к квазистационарному тепловому режиму.

Таблица 2. Основные настройки решателя ANSYS FLUENT

Параметр	Значение	Комментарий
Тип решателя	Pressure-based	Это стандартный выбор для дозвуковых течений. В задачах теплопроводности он эффективно связывает изменения плотности (от температуры) с давлением, что важно для учета естественной конвекции.
Влияние сил гравитации	Включено, (-9.81 м/с^2)	Критический параметр, так как без гравитации Fluent не учтет подъемную силу (эффект Архимеда), и теплая жидкость не будет подниматься вверх, что сильно исказит реальную картину охлаждения.
Вид расчета	Transient	Нестационарный тип расчета позволяет увидеть, как прогревается или остывает объект моделирования во времени.
Модель турбулентности	k-omega, SST	Данная модель лучше всего рассчитывает отрыв потока и теплоотдачу у стенок твердого тела. Для теплопроводности это важно, так как точность расчета температуры внутри тела напрямую зависит от того, насколько верно рассчитан коэффициент теплоотдачи на его поверхности.
Схема дискретизации	SIMPLE	Это классический алгоритм связи давления и скорости. Для большинства задач сопряженного теплообмена он обеспечивает хорошую сходимость
Gradient	Least Squares Cell Based	Метод вычисления градиентов (изменений) величин между ячейками. Этот метод более точен на полидральных или неструктурированных сетках, что помогает избежать численных ошибок при расчете резких перепадов температур.
Pressure	PRESTO!	Оптимальный выбор для задач с высокой плавучестью (гравитацией). Этот метод лучше вычисляет давление в узлах ячеек, что предотвращает паразитные течения при естественной конвекции вокруг нагретого твердого тела
Momentum	Second Order Upwind	Применены схемы второго порядка точности для решения уравнений момента, турбулентности, удельной скорости диссипации и энергии. Наиболее критично для Energy, так как схемы первого порядка (First Order) «размывают» температурные границы (численная диффузия), а второй порядок точности дает четкий профиль температуры в твердом теле и жидкости, хотя и приводит к увеличению времени расчета.
Turbulent Kinetic Upwind		
Specific Dissipation Rate		
Energy		
Transient Formulation	First order Implicit	Определяет шаг по времени. Первый порядок неявно (Implicit) обеспечивает высокую устойчивость расчета, позволяя выбирать более крупные шаги по времени без «вылета» решения.

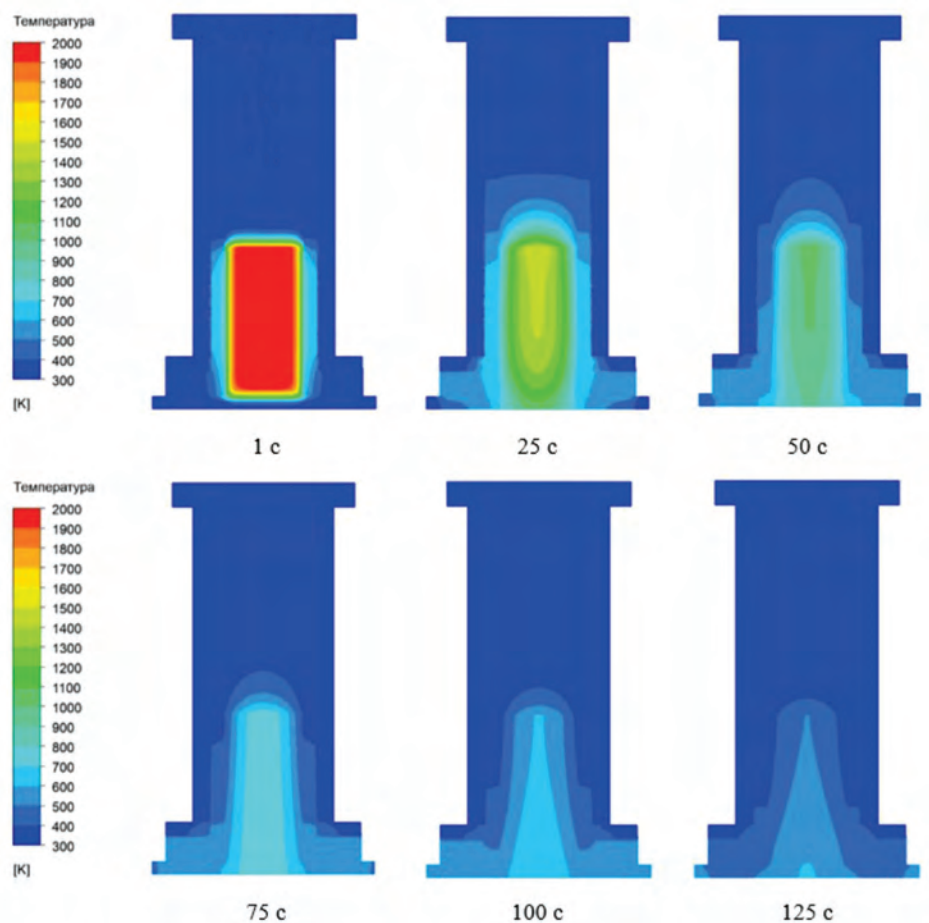


Рисунок 7. Распределение температуры в центральном-продольном сечении кристаллизатора ЭШП

На рисунке 8 показано расположение точек, в которых контролировалась температура расплава стали, медного кокиля и стального корпуса во время расчета. Соответствующий график изменения температуры в этих точках представлен на рисунке 9.

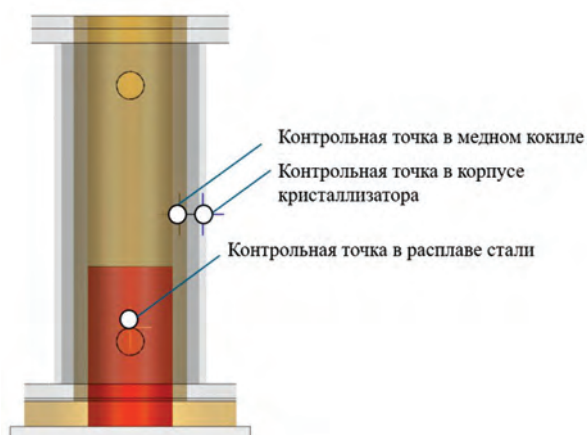


Рисунок 8. Расположение точек контроля температуры в модели кристаллизатора

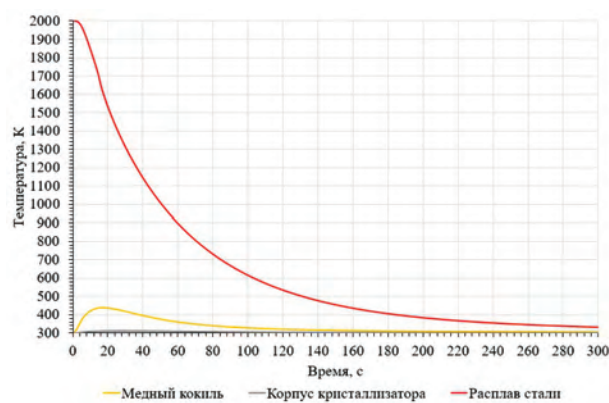


Рисунок 9. График изменения максимальной температуры расплава стали, медного кокиля и корпуса кристаллизатора

Представленный на рисунке 9 график отражает нестационарную тепловую динамику трех характерных зон системы ЭШП – расплава стали, медного кокиля и корпуса кристаллизатора, – и хорошо коррелирует с ранее показанной эволюцией температурных полей.

Максимальная температура расплава (красная кривая) в начальный момент составляет порядка 2000 К, после чего наблюдается монотонное и достаточно интенсивное снижение. Температура медного кокиля (желтая кривая) демонстрирует характерный начальный максимум: быстрый рост до ~400-450 К в первые секунды обусловлен резким тепловым потоком от расплава к высокотеплопроводной меди. Далее температура снижается, что свидетельствует о перераспределении теплового потока и влиянии системы охлаждения. Наличие выраженного пика указывает на значительную тепловую инерцию кокиля и кратковременную аккумуляцию тепла до выхода на баланс между подводом и отводом энергии. Температура корпуса кристаллизатора в контрольной точке практически не меняется (серая кривая).

Результаты расчета показывают, что на ранней стадии (до ~70 с) система находится в режиме интенсивной нестационарной теплопередачи с большими тепловыми потоками и высокими градиентами. После устанавливается режим с постепенно уменьшающимися температурными перепадами, что соответствует стабилизации формы жидкой ванны.

Выводы

В работе проведено моделирование теплового состояния кристаллизатора установки ЭШП. Построены геометрическая и расчетная модель кристаллизатора.

Расчеты показали, что на начальной стадии процесса реализуется режим интенсивной нестационарной теплопередачи, характеризующийся высокими радиальными температурными градиентами и значительными тепловыми потоками к водоохлаждаемым стенкам.

Анализ температурных кривых медного кокиля и корпуса кристаллизатора показал наличие кратковременного начального температурного максимума, обусловленного тепловой инерцией конструкции и интенсивным подводом тепла от расплава. Дальнейшее снижение температуры подтверждает эффективность системы охлаждения и устойчивость теплового баланса. Согласованность динамики температуры в расплаве и элементах кристаллизатора свидетельствует о корректном описании сопряженной теплопередачи в расчетной модели.

Тепловыделяющие объекты (переплавляемые твердые радиоактивные отходы) могут существенно различаться по геометрическим параметрам, и, в ряде случаев, их габариты не позволяют использовать их в качестве электрода в установке электрошлакового переплава. В подобных ситуациях возникает необходимость разработки кристаллизатора ЭШП с иными конструктивно-геометрическими характеристиками, адаптированными к конкретным размерам исходного материала. Проектирование нового медного кокиля требует обязательной оценки его теплотехнической

надежности, включая анализ температурных полей, тепловых потоков и возможных термических напряжений. Для решения этих задач целесообразно применение методов вычислительной гидродинамики и теплопередачи, реализованных, в частности, в программном комплексе ANSYS FLUENT, что позволяет провести комплексное численное моделирование сопряженных тепловых и гидродинамических процессов.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аmano Ю. и др. Что такое радиоактивные отходы? // IAEA Bulletin. – 2014. – Vol. 55, № 3. – С. 3–4.
2. Барретто П., Уэбб Д., Мрабит Х. Радиационная безопасность и безопасность отходов: укрепление национального потенциала // IAEA Bulletin. – 1997. – №1. – С. 29.
3. Mukhamedov N. et al. Decommissioning of the BN-350 Fast Neutron Reactor: History Review and Current Status // Energies. – 2025. – Vol. 18, No. 13. – Art. 3486.
4. Mukhamedov N. et al. The BN-350 Reactor Decommissioning: Quantitative Analysis and Prospects for Solid Radioactive Waste Management // Energies. – 2025. – Vol. 18, No. 17. – Art. 4651.
5. Walek J., Odehnalová A., Kocich R. Analysis of Thermophysical Properties of Electro Slag Remelting and Evaluation of Metallographic Cleanliness of Steel // Materials. – 2024. – Vol. 17, No. 18. – Art. 4613.
6. Liu X. et al. Numerical Investigation on the Electroslag Remelting of High Carbon Martensitic Stainless Steels // Metals. – 2023. – Vol. 13, No. 3. – Art. 482.
7. Кабдылкаков Е.А. и др. Моделирование омического нагрева электрода установки электрошлакового переплава в программном пакете ANSYS // Вестник НЯЦ РК. – 2025. – № 3. – С. 147–155.
8. Вурим А. Д., Алейников Ю. В., Жданов В. С. и др. Очистка стали от радиоактивного загрязнения методом электрошлакового переплава // Вестник НЯЦ РК. – 2002. – № 1. – С. 34–39.
9. Паспорт технического устройства «Лабораторная электрошлаковая печь» / Предприятия «Сварка». – Курган, 2001.
10. Должиков С. А., Мухамедов Н.Е., Пахниц А. В., Попов Ю. А. Применение электрошлакового переплава для очистки радиоактивно загрязненного металла // Семипалатинский испытательный полигон: наследие и перспективы развития научно-технического потенциала: материалы X Междунар. конф. – Курчатов, Республика Казахстан, 12–14 сентября 2023 г.
11. Obiso D. et al. CFD Modeling of the Melting Behavior of a Fayalitic Slag // JOM. – 2022. – Vol. 74, No. 4. – P. 1533–1542.
12. ANSYS Academic Research Mechanical and CFD. Release 2021 R1 [Электронный ресурс]. – Canonsburg, PA: ANSYS, Inc., 2021.

13. Yadav A. S. et al. CFD Analysis of Heat Transfer Performance of Ribbed Solar Air Heater // Materials Today: Proceedings. – 2022.
14. Gibreel M., Zhang X., Elmouazen H. Numerical Study on Enhanced Heat Transfer and Flow Characteristics of Supercritical Hydrogen Rocket Engine's Chamber Wall Using Cylindrical Ribs Structure // International Journal of Hydrogen Energy. – 2022. – Vol. 47, No. 39. – P. 17423–17441.
15. Huang J. et al. Heat Transfer Analysis of Heat Pipe Cooled Device with Thermoelectric Generator for Nuclear Power Application // Nuclear Engineering and Design. – 2022. – Vol. 390. – Art. 111652.
16. Choudhary T. et al. Computational Analysis of a Heat Transfer Characteristic of a Wavy and Corrugated Channel // Materials Today: Proceedings. – 2022. – Vol. 56. – P. 263–273.
17. Lee J. et al. Vehicle Aerodynamic Drag for Tire Shape Parameters Using Numerical Analysis // International Journal of Automotive Technology. – 2022. – Vol. 23, No. 2. – P. 335–344.
18. Basit A., Hidayatuloh R.S., Royana M. Aerodynamic Analysis and Car Body Optimization of Saving Energy “WARAK” Using Software ANSYS FLUENT R15.0 // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 788, No. 1. – Art. 012073.
19. Sakipova S. E., Tanasheva N. K. Modeling Aerodynamics of the Wind Turbine with Rotating Cylinders // Eurasian Physical Technical Journal. – 2021. – Vol. 16, No. 1(31). – P. 88–93.
20. International Atomic Energy Agency. Thermophysical Properties of Materials for Nuclear Engineering: A Tutorial and Collection of Data. – Vienna: IAEA, 2008.

МЕТАЛЛ БАЛҚЫМАСЫ ТҮЗІЛГЕННЕН КЕЙІНГІ ЭЛЕКТРҚОЖДЫ ҚАЙТА БАЛҚЫТУ ҚОНДЫРҒЫСЫНЫҢ КРИСТАЛЛИЗАТОРЫНЫҢ ЖЫЛУЛЫҚ КҮЙІН МОДЕЛЬДЕУ

Е. А. Кабдылқаков*, А. С. Сураев, С. А. Должиков, Н. Е. Мухамедов, А. В. Пахниц, А. А. Куздеубай, Д. Т. Жәніс

Атом энергиясы институтының филиалы, Күрчатов, Қазақстан

* Байланыс үшін E-mail: kabdylkakov@nnc.kz

Металлдық радиоактивті қалдықтарды қайта өңдеу және тазарту ядролық энергетиканы пайдаланудың өзекті мәселелерінің бірі болып табылады. Металлдық қалдықтарды қайта өңдеу мен тазартудың әдістерінің бірі – электрошлақты қайта балқыту әдісі. Осы жұмыста ANSYS FLUENT бағдарламалық кешенін пайдалана отырып, электрошлақты қайта балқыту қондырғысының кристаллизаторының жылуфизикалық күйін модельдеу қарастырылған. Геометриялық және есептік модельдер құрылып, бұрын жүргізілген іске қосу жұмыстарының шарттарына сәйкес кристаллизатордың жылуфизикалық күйіне есептеулер орындалды. Есептеу нәтижелері кристаллизатор ішінде түзілген металл балқымасының салқындауы барысында кристаллизатордың жылулық күйін сипаттайды. Алынған нәтижелер қабылданған шекаралық шарттар мен жылуалмасу параметрлерінің физикалық тұрғыдан негізді екенін көрсетеді.

Түйін сөздер: қатты радиоактивті қалдықтар, электрошлақтық қайта балқыту, жылулық күй, модельдеу, ANSYS FLUENT, кристаллизатор.

MODELING OF THE THERMAL STATE OF THE CRYSTALLIZER OF AN ELECTROSLAG REMELTING UNIT AFTER THE FORMATION OF THE METAL MELT

E.A. Kabdylkakov*, A.S. Suraev, S.A. Dolzhikov, N.E. Mukhamedov, A.V. Pakhnits, A.A. Kuzdeubay, D.T. Zhenis

Institute of Atomic Energy Branch of the RSE “National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan, Kurchatov, Kazakhstan

* E-mail for contacts: kabdylkakov@nnc.kz

The processing and decontamination of metallic radioactive waste is one of the pressing challenges associated with the utilization of nuclear energy. One of the methods used for the treatment and purification of metallic waste is electros slag remelting. This paper discusses the modeling of the thermophysical state of the crystallizer in an electros slag remelting facility using the ANSYS FLUENT software package. A geometric model and a computational model were developed, and calculations of the crystallizer thermophysical behavior were performed under conditions corresponding to previously conducted experimental runs. The simulation results illustrate the thermal behavior of the crystallizer during the cooling of the metallic melt formed within it. The obtained results confirm the physical consistency of the adopted boundary conditions and heat transfer parameters.

Keywords: solid radioactive waste, electros slag remelting (ESR), thermal state, numerical simulation, ANSYS FLUENT, crystallizer.