DOI: 10.25283/2587-9707-2022-4-13-23 УДК 621.039.7

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИНДУКЦИОННЫХ ПЕЧЕЙ С ХОЛОДНЫМИ ТИГЛЯМИ И ДОННЫМ НАГРЕВОМ ДЛЯ ОСТЕКЛОВЫВАНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

Д. Б. Лопух[1], А. В. Вавилов[1], А. А. Хоршев[1,2], И. Н. Скриган[1,2], А. П. Мартынов[1]

[1]Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург

[2]АО «Радиевый институт им. В. Г. Хлопина», Санкт-Петербург

Статья поступила в редакцию 20 октября 2022 г.

Статья посвящена развитию разработок в области использования метода индукционной плавки в холодном тигле с донным нагревом (ИПХТ-ДН) расплава для остекловывания радиоактивных отходов (РАО). Представлены экспериментальные и теоретические исследования печей ИПХТ-ДН, предоставляющие возможность создания промышленных установок остекловывания РАО высокой производительности. Приведены экспериментальные результаты с определением эле ктрических и энергетических характеристик печей. На основе математического 2D-моделирования электромагнитных и гидродинамических процессов исследованы распределенные параметры в индукционных системах, показывающие особенности и преимущества печей ИПХТ-ДН.

Ключевые слова: *численное моделирование, индукционная плавка, холодный тигель, индуктор, радиоактивные отходы.*

Введение

Официальные данные МАГАТЭ [1] свидетельствуют, что с 1990 года количество выгруженного из ядерных реакторов отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) увеличилось в 4 раза. За тот же период количество переработанного ядерного топлива выросло немногим более чем в два раза. Объем ОЯТ, находящегося на длительном контролируемом хранении, стремительно нарастает [2]. В России в настоящее время накоплено более 26,5 тысяч тонн тяжелых металлов (ТМ) и с каждым годом данная цифра увеличивается примерно на 700 тонн ТМ. Одной из стратегических целей Госкорпорации «Росатом» на ближайшие десятилетия является замыкание ядерного топливного цикла, причем достижение этой цели напрямую связано с повышением мощностей по переработке ОЯТ АЭС (ВВЭР, БН, БРЕСТ и др.). На данный момент единственным действующим радиохимическим производством в России по переработке ОЯТ является РТ-1 на ПО «Маяк» с проектной производительностью до 400 тонн ОЯТ в год. Готовится к запуску опытно-демонстрационный центр ФГУП «ГХК» с плановой производительностью 250 тонн ОЯТ в год. В будущем планируется строительство завода РТ-2 с производительностью до 800 тонн ТМ в год. При

значительном увеличении мощностей по переработке ОЯТ еще более остро ставится задача эффективного и надежного способа кондиционирования РАО высокого и среднего уровня активности, образующихся в процессе переработки. Одним из наиболее применяемых способов кондиционирования РАО данного типа является остекловывание, а технологией остекловывания — индукционная плавка в холодном тигле (ИПХТ). Производительность существующих в России печей остекловывания методом ИПХТ по одностадийной технологии составляет от 2,5 до 12 кг/ч по стеклу [3]—[6] и определяется в основном диаметром плавильной поверхности печи, которая не превышает 630 мм. Увеличение диаметра плавильной поверхности и, следовательно, производительности классических печей ИПХТ с охватывающими индукторами ограничено значением 1,0—1,2 м из-за увеличения «холодной» зоны в центре ванны расплава и значительного снижения электрического КПД печи при снижении частоты тока. Взаимосвязь рассматриваемых параметров представлена в работах [7], [8]. Перспективным решением задачи повышения производительности является развитие печей ИПХТ-ДН.

В Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ «ЛЭТИ») с 1987 года проводятся исследования по использованию печей ИПХТ-ДН [7]—[11]. За рубежом только во Франции имеются публикации по использованию данной технологии [12], [13]. Причем в работе [13] опубликована информация о разработке фирмой AREVA (Франция) промышленного комплекса печей ИПХТ-ДН для комбината в Хенфорде (США) (в варианте авторов: ACCIM — Advanced Cold Crucible Induction Melter) с диаметром холодного тигля 1,4 метра и проектной производительностью комплекса 21 тонна в день по стеклу. При этом отмечается, что завершение переработки РАО к 2047 году требует увеличения производительности комплекса до 37 тонн стекла в день. К основным преимуществам печей ИПХТ-ДН при остекловывании РАО относятся [12]: возможность удаления отработанного холодного тигля вверх и вбок; использование электрически замкнутой боковой стенки тигля, обеспечивающей его герметизацию и повышение надежности работы печи; увеличение скорости перемешивания расплава, способствующего его гомогенизации и увеличению производительности печи; лучший нагрев расплава у дна тигля, что способствует донному сливу расплава стекла и др.

Анализ отечественных и зарубежных публикаций показывает отсутствие достаточного объема информации по конструктивным решениям и технологии остекловывания РАО в печах ИПХТ-ДН. Это касается конструкции донной части холодного тигля, сливного устройства, формы индуктора и его расположения относительно холодного тигля, частоты тока генератора, условий стартового нагрева, подачи шихты и др.

Основным недостатком печей ИПХТ-ДН, сдерживающим их внедрение в промышленность, является пониженный электрический КПД [7], [11], [12], который может быть компенсирован повышенным термическим КПД, поскольку общий КПД печи является произведением электрического и термического КПД [7], или использованием высокочастотных магнитопроводов [14]. Для изучения этих характеристик также целесообразно проведение численного моделирования и экспериментальных исследований печей ИПХТ-ДН с использованием новых технических решений.

Численные исследования

Основными целями численных исследований ИПХТ являются определение оптимальной конструкции печей, энергетических параметров плавки, распределенных параметров внутри ванны расплава. В частности, температуры и скорости движения расплава в зависимости от размеров ванны, поскольку эти характеристики определяют производительность плавки, условия слива расплава и расположение сливного устройства, а также обеспечивают низкие показатели уноса летучих радионуклидов. Исследование проводили с использованием 2D электрогидродинамической (ЭГД) численной модели, разработанной авторами в работах [15], [16]. Моделировали печь ИПХТ-ДН с цилиндрическим холодным тиглем с внутренним диаметром 1 м, размеры которого, с учетом высоты расплава 0,4 м, позволяют заполнить стеклом 100-литровый контейнер за один слив расплава. Использован трехвитковый индуктор, работающий на частоте тока 300 кГц. Боковая стенка холодного тигля представлена в виде цельносварного водоохлаждаемого металлического цилиндра. Секции дна холодного тигля в расчетах не учитываются. Температурные зависимости физических свойств стекла, принятые в расчетах, представлены в работах [16], [17].

Граничные условия:

- Температура на боковой и донной поверхности ванны расплава 20 °С.
- Излучательная способность расплава боросиликатного стекла 0,5.

- Температура на поверхности ванны расплава не более 1250 °С.
- Граничное условие для электромагнитного расчета: полубесконечная поверхность (расчет затухания электромагнитного поля).

Основные результаты расчетов представлены на рис. 1—3 и в табл. 1. Стрелками на рис. 3 указаны векторы скорости движения расплава, а длина стрелки определяет величину скорости.

Таблица 1. Основные результаты расчетов характеристик плавки

Параметр	Значение
Мощность в расплаве, кВт	335
Потери в медном индукторе, кВт	6,5
Максимальная температура на поверхности расплава, °С	1200
Максимальная температура в объёме расплава, °С	1350
Максимальная скорость движения расплава, мм/с	40

Из распределения источников теплоты в ванне расплава на рис. 2 видно, что большая часть тепла выделяется в донной области, это обеспечивает лучшие условия для образования вертикальных конвективных потоков расплава и тепломассопереноса в верхнюю часть ванны. Интенсивное перемешивание обеспечивает выравнивание температуры по объему ванны и лучшую гомогенизацию расплава с более быстрым растворением РАО в расплаве стекла и снижению уносов радионуклидов. Например, перепад температуры по ванне расплава в рассматриваемой печи ИПХТ-ДН составляет 150 °С, в то время как этот показатель в печах с охватывающим индуктором составляет 250—350 °С [15]—[17]. Такие условия индукционного нагрева в печи ИПХТ-ДН невозможно получить в печах с охватывающими индукторами.

Также 2D численным моделированием определено влияние стального замкнутого корпуса, внутри которого располагается печь и, как правило, имеющегося в конструкции печей для иммобилизации РАО, стальной боковой замкнутой стенки тигля и магнитопровода с относительной магнитной проницаемостью 1000 на картину ЭМ поля и электрические параметры печи. Эскиз модели представлен на рис. 4. Использовали такие же размеры индуктора и ванны расплава, как в приведенных выше расчетах. В расчетах диаметр корпуса печи 1500 мм, расстояние между индуктором и корпусом 50 мм. Корпус печи и боковую стенку тигля выполняли водоохлаждаемыми из нержавеющей стали.

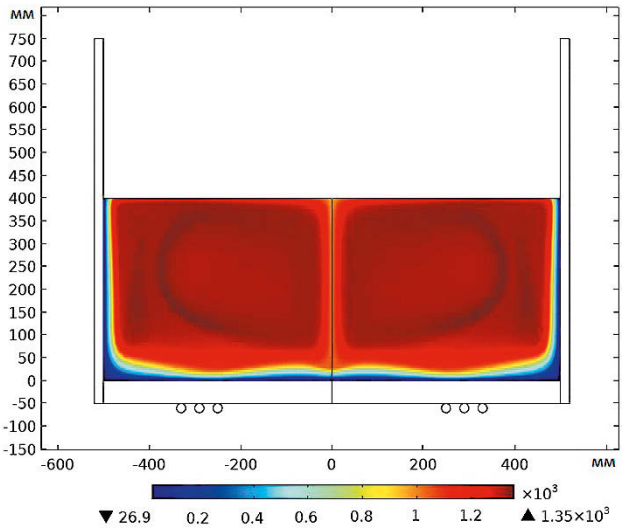

Рис. 1. Распределение температуры в ванне расплава, [°С]

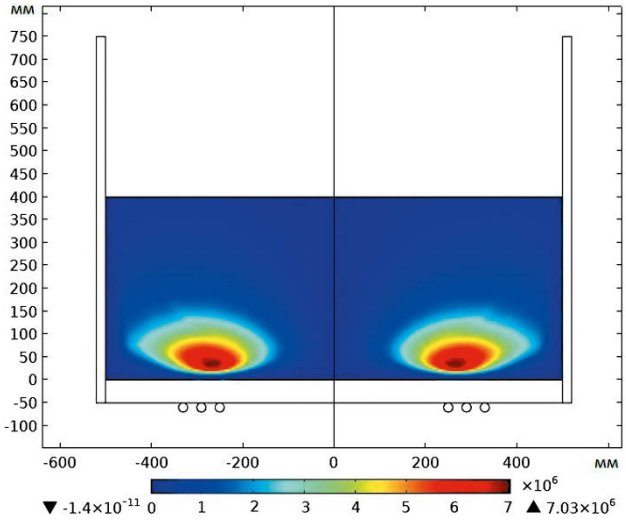

Рис. 2. Распределение источников теплоты в ванне расплава, [Вт/м³]

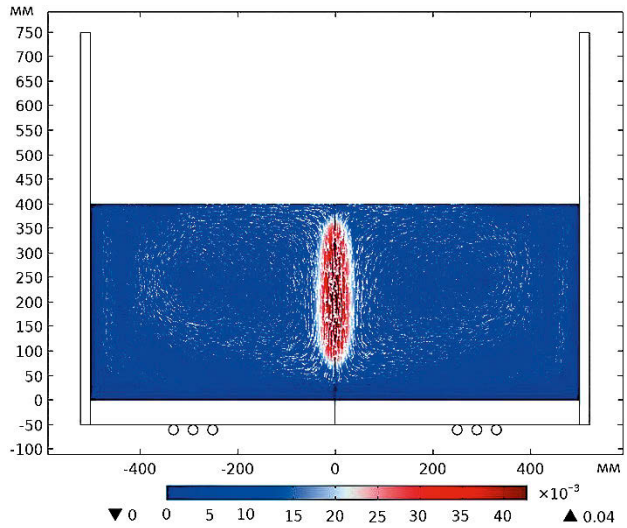

Рис. 3. Распределение скорости движения расплава, [м/с]

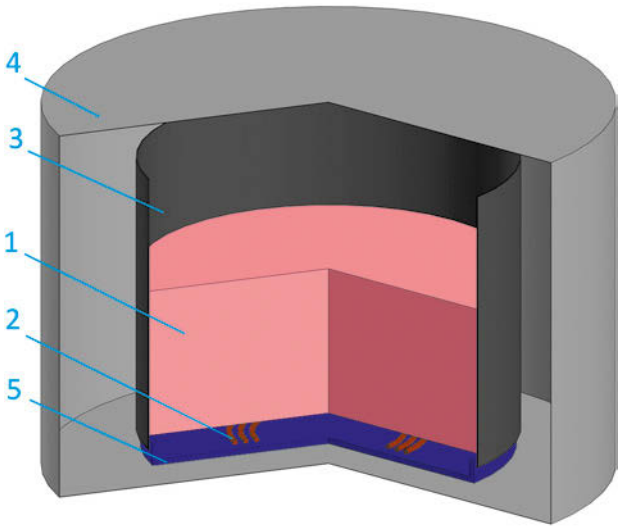

Рис. 4. Схема расчетной модели печи ИПХТ-ДН: 1 – расплав, 2 – индуктор, 3 – боковая стенка тигля, 4 – корпус печи, 5 – магнитопровод

Удельную электропроводность расплава стекла принимали одинаковой по объему ванны и равной 20 См/м, что соответствует температуре расплава 1 200 °С [14]—[16]. Ток в индукторе выбирали таким, чтобы мощность в расплаве составляла 335 кВт, а частота тока — 300 кГц. Эти параметры соответствуют результатам расчета по ЭГД-модели (табл. 2).

Таблица 2. Результаты расчетов параметров индукционных систем для всех случаев на рис. 5—8

Параметр	Номер расчета			
	1	2	3	4
Ток индуктора, А	634	1312	1530	547
Мощность электрических потерь в индукторе, кВт	6,8	30,0	40,1	6,4
Мощность электрических потерь в корпусе печи, кВт	–	52,3	71,2	0
Мощность электрических потерь в боковой стенке, кВт	–	–	1,3	2,5
Активная мощность, подводимая к индуктору, кВт	342	419	447	342
Индуктивность индуктора, мкГн	7,36	4,44	4,39	11,61
Электрический КПД индуктора, %	98	80	75	98
Напряжение на индукторе, кВ	8,6	11,0	12,7	11,6
Коэффициент мощности индуктора	0,065	0,029	0,023	0,056

В расчетах использовали следующие составы индукционных систем:
1) индуктор и расплав;
2) индуктор, расплав и корпус;
3) индуктор, расплав, корпус и боковая стенка тигля;
4) индуктор, расплав, корпус, боковая стенка тигля и магнитопровод под индуктором.

На рис. 5—8 приведены картины силовых линий магнитного поля, полученные в результате моделирования.

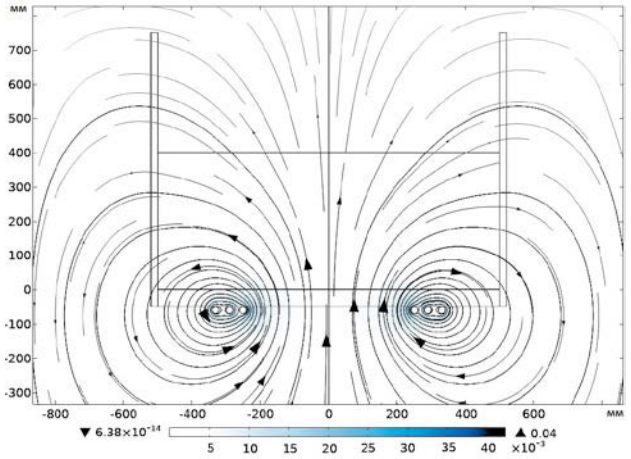

Рис. 5. Картина силовых линий магнитного поля из расчета № 1, [Тл]

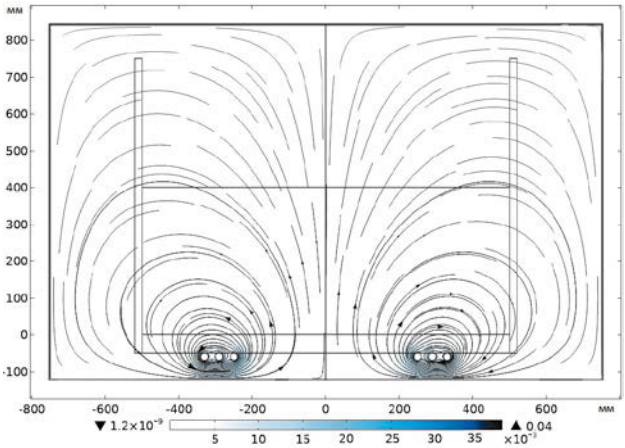

Рис. 6. Картина силовых линий магнитного поля из расчета № 2, [Тл]

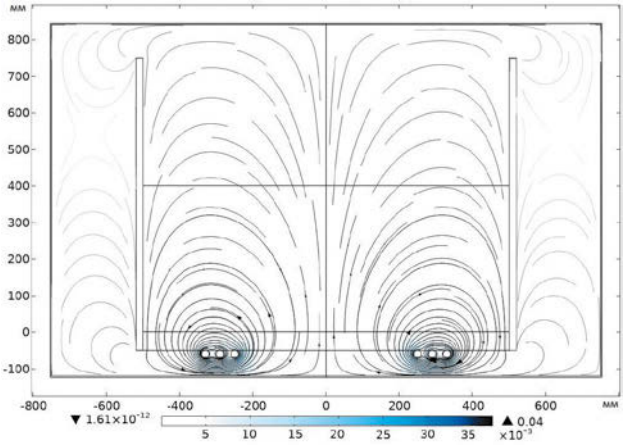

Рис. 7. Картина силовых линий магнитного поля из расчета № 3, [Тл]

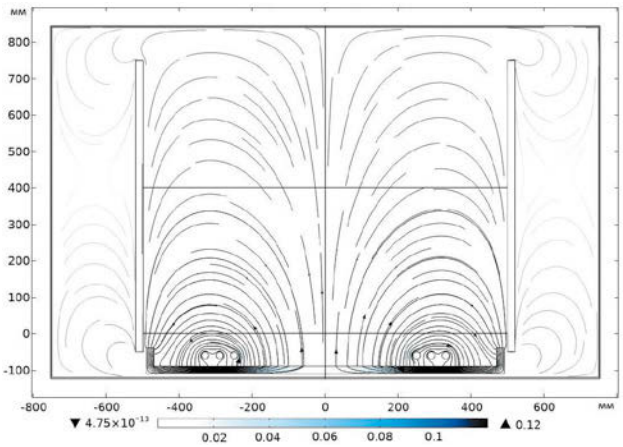

Рис. 8. Картина силовых линий магнитного поля из расчета № 4, [Тл]

Картины силовых линий указывают на наличие эффектов концентрации ЭМ поля в расплаве при использовании боковой стенки, потери в которой составляют всего 0,3% от мощности, подводимой к индуктору.

При этом большие электрические потери в корпусе печи и их увеличение при использовании боковой стенки свидетельствуют о необходимости более значительного удаления корпуса от витков индуктора. Следовательно, при конструировании печи ИПХТ-ДН нужно проводить оптимизацию положения корпуса, боковой стенки и параметров индуктора.

Использование магнитопровода привело к экранированию особенно нижней части корпуса печи от ЭМ поля, увеличению электрического КПД индуктора с 75 до 98 %, повышению напряжения на индукторе и к увеличению его индуктивности в 2,6 раз, что надо учитывать при согласовании индуктора с генератором. Снизить напряжение на индукторе можно уменьшением числа его витков, добавлением к нему балластной индуктивности (параллельно), изменением размеров и магнитной проницаемости магнитопровода.

Экспериментальные исследования

Тесты проводили в печи ИПХТ-ДН с плоским секционированным водоохлаждаемым медным дном, набранным из круглой трубки диаметром 10 мм и медным трехвитковым индуктором с наружным диаметром 350 мм. Фотография секций дна холодного тигля используемых печей представлена на рис. 9а.

В качестве источника питания использовали ламповый генератор ВЧИ-11-60/1,76 с колебательной мощностью 60 кВт и частотой тока 1,76 МГц. Стартовый нагрев осуществляли с использованием одновиткового графитового кольца с внешним диаметром 160 мм.

Тест № 1

Боковая поверхность тигля оформлена шамотным кирпичом с размерами в плане 550 × 500 мм (рис. 9б). Для плавки использовали фритту боросиликатного стекла. Стартовый нагрев проходил в течение 35 минут. Высота ванны расплава стекла составила 10 см. Максимальное потребление мощности установки — 80 кВА. Производительность плавления фритты стекла составила около 70 кг/ч. Режимы генератора и этапы проведения теста приведены в табл. 3, где $U_а$ — анодное напряжение генераторной лампы; $I_а$ — анодный ток генераторной лампы; I_g — сеточный ток генераторной лампы; $U_{инд}$ — напряжение на индукторе; $P_а$ — электрические потери на аноде генераторной лампы; $P_{конт}$ — электрические потери в колебательных контурах генератора; $P_{шин}$ — электрические потери на шинах конденсаторной батареи; $\eta_{ген}$ — электрический КПД генератора; P_1 — активная мощность, подводимая к индуктору; $P_{инд}$ — мощность электрических потерь в индукторе; $P_{дно}$ — мощность тепловых потерь от дна ванны расплава; $P_{изл}$ — мощность излучения с поверхности ванны расплава, теряемая в пространстве (определена по остатку).

Таблица 3. Режимы генератора и этапы проведения теста № 1

Время	$U_а$, кВ	$I_а$, А	I_g, А	$U_{инд}$, кВ	Примечание
14:00	8,15	1,9	1,88	5,16	Начало теста
14:23	9,17	1,91	1,5	5,64	Увеличили $U_а$
14:40	9,75	4,25	1,4	5,44	Формирование ванны, растет $I_а$
15:00	9,09	9	1,35	3,47	Уменьшили $U_а$
15:45	8,08	9,9	1,74	3,45	Уменьшили $U_а$
17:15	8,21	9,15	1,60	3,51	Калориметриметрирование: $P_{конт}$ = 0,72 кВт, $P_{шин}$ = 0,07 кВт, $P_{инд}$ = 0,41 кВт, $P_{дно}$ = 12,61 кВт, $P_{изл}$ = 11,41 кВт, P_1 = 25,22 кВт
17:35	0	0	0	0	Выключение нагрева

Фотографии печи с расплавом представлены на рис. 10. Анализ распределения температуры в расплаве показывает снижение температуры расплава к боковой стенке тигля, что обусловлено распределением источников тепла в ванне расплава с их уменьшением к периферии ванны и подтверждает результаты математического моделирования.

Рис. 9. ИПХТ-ДН со стенками из шамотного кирпича

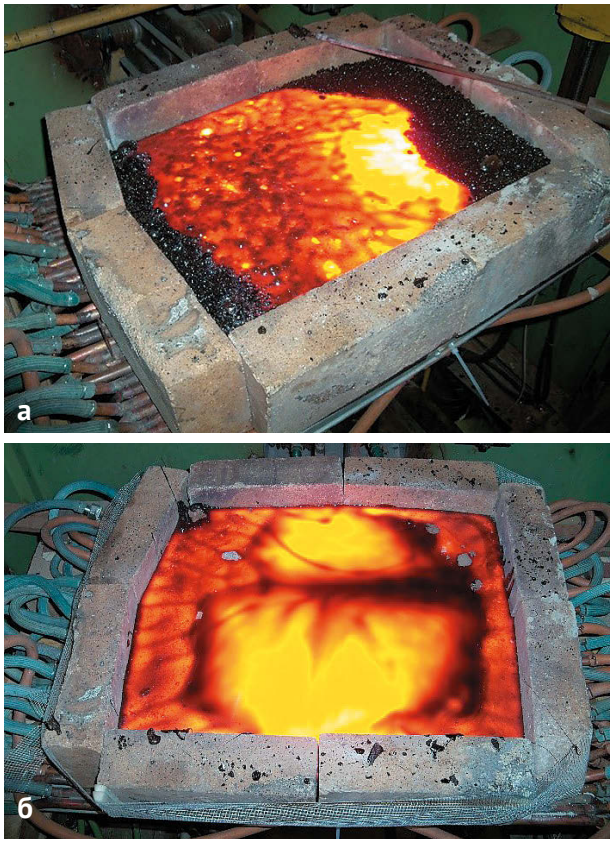

Рис. 10. Виды расплава на различных этапах плавки в тесте № 1

При этом стекло полностью расплавлено до боковой стенки тигля, и шамотная стенка не растворена в расплаве стекла.

Тест № 2

Боковая поверхность тигля оформлена электрически замкнутым медным водоохлаждаемым листом с внутренним диаметром 550 мм. Фотографии печи с расплавом представлены на рис. 11. Для плавки использовали крупный бой боросиликатного стекла.

Рис. 11. Виды холодного тигля с расплавом на различных этапах плавки в тесте № 2: а – стартовый нагрев, б – установившийся режим

Параметры генератора, электрические и энергетические параметры плавки и этапы проведения теста приведены на рис. 12—15 и в табл. 4, где все обозначения соответствуют представленным в табл. 3 и дополнительно введено измерение суммарной мощности тепловых и электрических потерь в в боковой стенке холодного тигля $P_{бок}$.

Стартовый нагрев проходил в течение 40 минут. Высота ванны расплава стекла составила 10 см. Максимальное потребление мощности установки — 65 кВА. Производительность плавления боя стекла составила около 60 кг/ч. Визуальный анализ распределения температуры в расплаве на рис. 11б в этом тесте так же, как и в первом, показывает снижение температуры

расплава к боковой стенке тигля и расплавление стекла у стенки холодного тигля.

Таблица 4. Режимы генератора и этапы проведения теста № 2

Время	U_a, кВ	I_a, А	I_g, А	$U_{инд}$, кВ	Примечание
15:30	8,70	1,90	1,65	5,60	Начало эксперимента
16:13	9,92	3,20	0,96	4,51	Увеличили U_a
16:17:	10,11	3,30	1,12	4,86	Достали стартовое кольцо
16:22	7,34	4,05	0,90	3,05	Уменьшили U_a
16:56	9,48	5,70	1,11	4,36	Увеличили U_a, растет I_a, происходит наплавление ванны
17:12	9,92	6,27	1,13	4,60	Увеличили U_a, растет I_a, происходит наплавление ванны
17:20	10,08	6,42	1,13	4,66	Увеличили U_a
17:30	10,20	6,41	1,13	4,66	Проведение калориметрических измерений: P_a = 18,30 кВт, $P_{конт}$ = 1,45 кВт, $P_{шин}$ = 0,16 кВт, $\eta_{ген}$ = 69,55 %, P_1 = 45,47 кВт; $P_{инд}$ = 0,84 кВт, $P_{дно}$ = 15,90 кВт, $P_{бок}$ = 7,26 кВт, $P_{изл}$ = 21,41 кВт.
17:32	0	0	0	0	Выключение нагрева

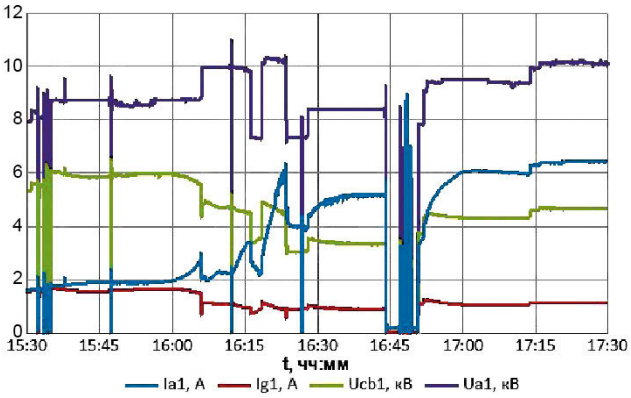

Рис. 12. Изменение во времени параметров генератора

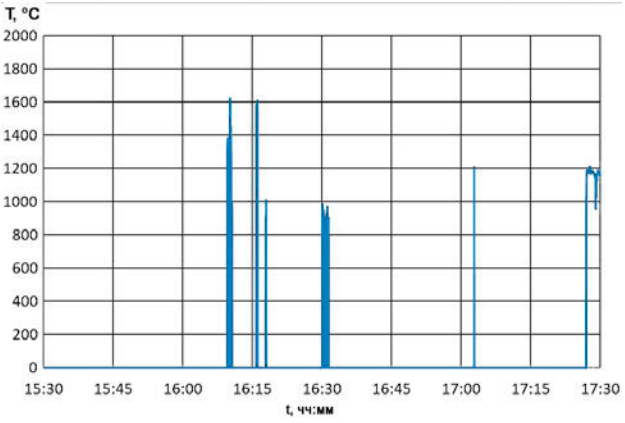

Рис. 13. Изменение во времени показаний пирометра

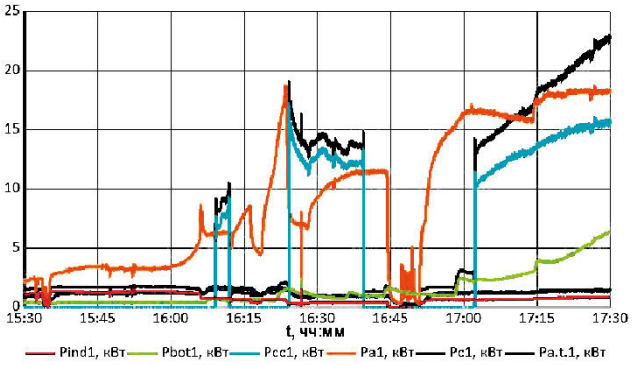

Рис. 14. Изменение во времени тепловых и электрических потерь

Проведенные измерения и полученные результаты в тестах позволяют судить о сравнительно высоком термическом КПД печи ИПХТ-ДН при варке модельного боросиликатного стекла, содержащего имитаторы ВАО. Этому способствуют сравнительно малые тепловые потери от дна ванны расплава в боковую стенку холодного тигля и основная доля мощности потерь со свободной плавильной поверхности ванны расплава, определяющей производительность плавки.

Так, минимальный коэффициент мощности потерь на излучение по отношению к мощности, подводимой к индуктору, $P_{изл}/P_1$, составил 0,45—0,47, в то время как в печах с охватывающими индукторами при диаметре холодного тигля 0,4 метра это соотношение, по данным авторов, составляет 0,3—0,4. Кроме того, свободная поверхность в печи ИПХТ-ДН прогревается равномерно в отличии от печей ИПХТ с охватывающим индуктором, для которых характерно наличие холодной зоны в центре свободной поверхности расплава, что значительно снижает производительность остекловывания.

Настоящие исследования открывают пути усовершенствования технологии при остекловывании РАО в печах ИПХТ-ДН, имеющих особые преимущества перед традиционными печами ИПХТ.

Заключение

Постановка настоящих исследований открывает возможности разработки инновационных конструкций и технологий, обладающих новыми преимуществами перед существующими установками ИПХТ для остекловывания РАО в печах ИПХТ-ДН отходов любого уровня активности. Настоящий вывод подтвержден пусками комплекса печей ИПХТ-ДН на комбинате в Хенфорде французскими специалистами фирмы AREVA [13].

Результаты проведенных теоретических и экспериментальных исследований показывают перспективность использования печей ИПХТ-ДН для остекловывания жидких или кальцинированных РАО с повышенной производительностью и надежностью, что обеспечивается отсутствием ограничений по площади плавильной поверхности, усиленной свободной конвекцией в ванне расплава, полной герметизацией плавильного пространства печи и значительным упрощением дистанционной замены элементов печи ИПХТ-ДН.

Литература

1. Spent Fuel Reprocessing Options. IAEA TECDOC 1587. IAEA, Vienna, 2008. 144 p.
2. *Кащеев В. А., Логунов М. В., Шадрин А. Ю., Рыкунова А. А., Шмидт О. В.* Стратегия фракционирования ВАО от переработки ОЯТ // Радиоактивные отходы. 2022. № 2 (19). С. 6—16. DOI: 10.25283/2587-9707-2022-2-6-16.
3. *Stefanovsky S. V.* SIA Radon Experiences with Cold-Wall Melters // EM–30 Next Generation Melter Technology Workshop, Washington, D.C., USA, March 3—5, 2010. P. 28.
4. *Borisov G., Musatov N., Poluektov P. et al.* Radioactive waste solidification in cold crucible induction melter // EM–30 Next Generation Melter Technology Workshop. Washington, D.C., USA, March 3—5, 2010. Pp. 1—6.
5. *Дулепов Ю. Н., Вишнёв В. Г., Яковлев Г. И. и др.* Разработка оборудования для установки отверждения ЖРО на основе индукционного плавления в холодном тигле // Труды СвердНИИХимМаш, Екатеринбург. 2010. Вып. 17. № 81. С. 202—216.
6. *Abashkin A., Skrigan I., Ivanov E. et al.* Investigation of silver behavior in the glass melt and its effect on the IMCC conditions in an industrial-scale furnace during vitrification of HLLW simulants // MRS Advances. 2020. Vol. 5. Issue 1—2. Pp. 83—92.
7. *Лопух Д. Б.* Разработка технологии и оборудования для отверждения имитаторов радиоактивных отходов методом индукционной плавки в холодных тиглях : дисс. … канд. техн. наук. — Ленинград, ЛЭТИ, 1987.
8. *Лопух Д. Б.* Современные направления и новые результаты исследований индукционных печей с холодными тиглями (ИПХТ) // Индукционный нагрев. 2008. № 4 (6). С. 27—36.
9. *Лопух Д. Б., Печенков А. Ю., Петров Ю. Б.* Измерение удельной электропроводности расплавов тугоплавких материалов. В сб. Исследование и расчет характеристик электротехнологических устройств и преобразователей энергии. — Л. : ЛЭТИ, 1989. 111 с. (Известия Ленинградского электротехнического института им. В. И. Ульянова (Ленина) ; Вып. 417). С. 106—109.
10. *Печенков А. Ю., Пронин А. М., Лопух Д. Б.* Исследование электрических характеристик печей ИПХТ с торцевыми индукторами. В сб. Исследование электротехнологических и преобразовательных устройств. — Л. : ЛЭТИ, 1991. 98 с. (Известия Ленинградского электротехнического института им. В. И. Ульянова (Ленина) ; Вып. 439). С. 61—65.
11. *Лопух Д. Б., Хоршев А. А., Мартынов А. П., Скриган И. Н., Вавилов А. В.* Индукционная плавка в холодном тигле с донным нагревом // Радиохимия—2022 : X Российская конференция с международным участием, Санкт-Петербург, 26—30 сентября 2022 года. — Москва: ООО «Месол», 2022. С. 466.
12. *Ladirat C., Lacombe J., Do Quang R., Prod'homme A.* Advanced cold crucible melter pilot plant characteristic and first results on HLLW surrogates. WM'04 Conference, February 29—March 4, 2004, Tucson, AZ WM-4223.
13. *Girold C., Bailly F., Tchevitcheff E.* CEA/AREVA Experiens with Cold-wall Induction Melters. DOE EM-30 Next Generation Wastes Glass Melter Workshop, March 3—5, 2010.
14. *Nemkov V., Goldstein R., Kreter K., Jackowski J.* Modeling and optimization of cold crucible furnace for melting metals. HES-13, Padua, Italy, May 21—24, 2013.
15. *Лопух Д. Б., Бешта С. В., Мартынов А. П., Вавилов А. В., Скриган И. Н.* Индукционная плавка кориума и варка стекла в холодном тигле. Свойства и моделирование. — Санкт-Петербург : Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2021. 201 с.
16. *Скриган И. Н.* Экспериментальные и численные исследования для разработки промышленной печи остекловывания высокоактивных отходов индукционной плавкой в холодном тигле : дисс.… канд. техн. наук. — Санкт-Петербург : Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2021. 204 с.
17. *Roach J. A., Lopukh D. B., Martynov A. P., Polevodov B. S. et al.* Advanced Modeling of Cold Crucible Induction Melting for Process Control and Optimization. WM2008 Conference, February 24—28, 2008, no. 8359. Phoenix, AZ.

Информация об авторах

Лопух Дмитрий Борисович, кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) (197022, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 5, лит. Ф), e-mail: dblopukh@yandex.ru.

Вавилов Антон Валерьевич, кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) (197022, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 5, лит. Ф), e-mail: avvavilov@mail.ru.

Хоршев Алексей Алексеевич, аспирант, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) (197022, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 5, лит. Ф); младший научный сотрудник, АО «Радиевый институт им. В. Г. Хлопина» (194021, Санкт-Петербург, 2-й Муринский пр-кт, д. 28), e-mail:aahorshev@khlopin.ru.

Скриган Илья Николаевич, кандидат технических наук, ассистент, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) (197022, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 5, лит. Ф); начальник лаборатории, АО «Радиевый институт им. В. Г. Хлопина» (194021, Санкт-Петербург, 2-й Муринский пр-кт, д. 28), e-mail: ilya.skrigan@khlopin.ru.

Мартынов Александр Петрович, старший преподаватель, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) (197022, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 5, лит. Ф), e-mail: armartynov@yandex.ru.

Библиографическое описание статьи

Лопух Д. Б., Вавилов А. В., Хоршев А. А., Скриган И. Н., Мартынов А. П. Экспериментальные и теоретические исследования индукционных печей с холодными тиглями и донным нагревом для остекловывания радиоактивных отходов // Радиоактивные отходы. 2022. №4 (21). С. 13—23. DOI: 10 25283/2587-9707-2022-4-13-23.

EXPERIMENTAL AND THEORETICAL STUDIES OF INDUCTION FURNACES WITH COLD CRUCIBLES AND BOTTOM HEATING FOR RADIOACTIVE WASTE VITRIFICATION

Lopukh D. B.[1], Vavilov A. V.[1], Khoroshev A. A.[1,2], Skrigan I. N.[1,2], Martynov A. P.[1]

[1]Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", Saint-Petersburg, Russia

[2] JSC "V. G. Khlopin Radium Institute", Saint-Petersburg, Russia

Article received on October 20, 2022

The paper describes the development of a concept for bottom-heated induction melting in cold crucible (CCIM-BH) applied for radioactive waste vitrification purposes. It presents experimental and theoretical research data that can be used in the design development of industrial high-performance radioactive waste vitrification facilities. The paper

provides experimental data involving electrical and energy characteristics of the melters. Based on 2D simulation of electromagnetic and hydrodynamic processes, the study evaluates the distributed parameters of induction systems demonstrating CCIM-BH features and advantages.

Keywords: *numerical modeling, induction melting, cold crucible, inductor, vitrification, radioactive waste.*

References

1. *Spent Fuel Reprocessing Options.* IAEA TECDOC 1587. IAEA, Vienna, 2008. 144 p.
2. Kashcheev V. A., Logunov M. V., Shadrin A. Yu., Rykunova A. A., Schmidt O. V. Strategy for the fractionation of HLW from SNF reprocessing. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste,* 2022, no. 2 (19), pp. 6—16. DOI: 10.25283/2587-9707-2022-2-6-16.
3. Stefanovsky S. V. SIA Radon Experiences with Cold-Wall Melters. *EM–30 Next Generation Melter Technology Workshop,* Washington, D.C., USA, March 3—5, 2010. P. 28.
4. Borisov G., Musatov N., Poluektov P. et al. Radioactive waste solidification in cold crucible induction melter. *EM–30 Next Generation Melter Technology Workshop*. Washington, D.C., USA, March 3—5, 2010. Pp. 1—6.
5. Dulepov Yu. N., Vishnev V. G., Yakovlev G. I. et al. Razrabotka oborudovaniya dlya ustanovki otverzhdeniya ZHRO na osnove induktsionnogo plavleniya v kholodnom tigle [Development of Equipment for LRW Solidification Unit based on Induction Melting in a Cold Crucible]. *Trudy SverdNIIKhimMash* [SverdNIIKhimMash Proceedings]. Yekaterinburg, 2010, issue 17, no. 81, pp. 202—216.
6. Abashkin A., Skrigan I., Ivanov E. et al. Investigation of silver behavior in the glass melt and its effect on the IMCC conditions in an industrial-scale furnace during vitrification of HLLW simulants. *MRS Advances,* 2020, vol. 5, issue 1—2, pp. 83—92.
7. Lopukh D. B. *Razrabotka tekhnologii i oborudovaniya dlya otverzhdeniya imitatorov radioaktivnykh otkhodov metodom induktsionnoy plavki v kholodnykh tiglyakh* [Development of a Solidification Method and Equipment for the Solidification of Radioactive Waste Simulators Based on Induction Melting in Cold Crucibles], Cand. tekhn. sci. diss. Leningrad, LETI Publ., 1987.
8. Lopukh D. B. Sovremennyye napravleniya i novyye rezul'taty issledovaniy IPKHT [Current areas of focus and latest findings of IPKHT research]. *Induktsionnyy nagrev — Induction Heating,* 2008, no. (6), pp. 27—36.
9. Lopukh D. B., Pechenkov A. Yu., Petrov Yu. B. Izmereniye udel'noy elektroprovodnosti rasplavov tugoplavkikh materialov [Measured Specific Electrical Conductivity of Refractory Material Melts]. *Issledovaniye i raschet kharakteristik elektrotekhnologicheskikh ustroystv i preobrazovateley energii* [Characteristics of Electrotechnological Devices and Energy Converters: Research and Calculation]. Issue 417. Leningrad, 1989. 111 p. Pp. 106—109.
10. Pechenkov A. Yu., Pronin A. M., Lopukh D. B. Issledovaniye elektricheskikh kharakteristik pechey IPKHT s tortsevymi induktorami [Exploring Electrical Characteristics of IPKhT Melters with End Inductors]. *Issledovaniye i raschet kharakteristik elektrotekhnologicheskikh ustroystv i preobrazovateley energii* [Characteristics of Electrotechnological Devices and Energy Converters: Research and Calculation]. Issue 439. Leningrad, 1991. 98 p. Pp. 61—65.
11. Lopukh D. B., Khorshev A. A., Martynov A. P., Skrigan I. N., Vavilov A. V. Induktsionnaya plavka v kholodnom tigle s donnym nagrevom [Induction melting in a cold crucible with bottom heating], *X konferentsiya "Radiokhimiya-2022"* (Saint-Petersburg, 26—30.09.2022) [X conference "Radiochemistry-2022" (Saint-Petersburg, September, 26—30, 2022)]. Moscow, OOO "Mesol", 2022, p. 466.
12. Ladirat C., Lacombe J., Do Quang R., Prod'homme A. Advanced cold crucible melter pilot plant characteristic and first results on HLLW surrogates. *WM'04 Conference,* February 29—March 4, 2004, Tucson, AZ WM-4223.
13. Girold C., Bailly F., Tchevitcheff E. CEA/AREVA Experiens with Cold-wall Induction Melters. *DOE EM-30 Next Generation Wastes Glass Melter Workshop,* March 3—5, 2010.
14. Nemkov V., Goldstein R., Kreter K., Jackowski J. Modeling and optimization of cold crucible furnace for melting metals. *HES-13,* Padua, Italy, May 21—24, 2013.
15. Lopukh D. B., Beshta S. V., Martynov A. P., Vavilov A. V., Skrigan I. N. *Induktsionnaya plavka koriuma i varka stekla v kholodnom tigle. Svoystva i modelirovaniye* [Corium Induction Melting and Glass Melting in a Cold Crucible. Properties and Modeling]. Sainct-Petersburg, SPbGETU "LETI" Publ., 2021. 201 p.
16. Skrigan I. N. *Eksperimental'nyye i chislennyye issledovaniya dlya razrabotki promyshlennoy pechi osteklovyvaniya vysokoaktivnykh otkhodov induktsionnoy plavkoy v kholodnom tigle* [Experimental and Numerical Studies for the Development of an Industrial Melter for the Vitrification of High-level Waste by Induction Melting in a Cold Crucible], Cand. techn. sci. diss. Sainct-Petersburg, 2021. 204 p.
17. Roach J. A., Lopukh D. B., Martynov A. P., Polevodov B. S. et al. Advanced Modeling of Cold Crucible Induction Melting for Process Control and Optimization. *WM2008 Conference,* February 24—28, 2008, No. 8359. Phoenix, AZ.

Information about the authors

Lopukh Dmitry Borisovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI" (5, lit. F, Prof. Popov st., Saint-Petersburg, 197022, Russia), e-mail: dblopukh@yandex.ru.

Vavilov Anton Valerievich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI" (5, lit. F, Prof. Popov st., Saint-Petersburg, 197022, Russia), e-mail: avvavilov@mail.ru.

Khorshev Alexey Alekseevich, graduate student, Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI" (5, lit. F, Prof. Popov st., Saint-Petersburg, 197022, Russia); junior research assistant, JSC "V. G. Khlopin Radium Institute" (28, 2nd Murinsky Ave., Saint-Petersburg, 194021, Russia), e-mail: aahorshev@khlopin.ru.

Skrigan Ilya Nikolaevich, Candidate of Technical Sciences, assistant, Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI" (5, lit. F, Prof. Popov st., Saint-Petersburg, 197022, Russia); head of the laboratory, JSC "V. G. Khlopin Radium Institute" (28, 2nd Murinsky Ave., Saint-Petersburg, 194021, Russia), e-mail: ilya.skrigan@khlopin.ru.

Martynov Alexander Petrovich, senior lecturer, Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI" (5, lit. F, Prof. Popov st., Saint-Petersburg, 197022, Russia), e-mail: armartynov@yandex.ru.

Bibliographic description

Lopukh D. B., Vavilov A. V., Khoroshev A. A., Skrigan I. N., Martynov A. P. Experimental and Theoretical Studies of Induction Furnaces with Cold Crucibles and Bottom Heating for Radioactive Waste Vitrification. *Radioactive Waste,* 2022, no. 4 (21), pp. 13—23. DOI: 10.25283/2587-9707-2022-4-13-23. (In Russian).