

Численное исследование электрических напряжений между элементами индукционных печей с холодными тиглями

А. А. Хоршев^{1,2}, Д. Б. Лопух^{1✉}, А. В. Вавилов¹, И. Н. Скриган^{1,2},
П. В. Высоцкий¹, А. П. Мартынов¹

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

² АО «Радиовый институт им. В. Г. Хлопина», Санкт-Петербург, Россия

✉ dblopukh@yandex.ru

Аннотация. Статья посвящена исследованию распределения электрических напряжений в печах индукционной плавки в холодном тигле (ИПХТ) на основе численного моделирования с использованием 3D-электромагнитной (ЭМ) модели в A–V-постановке. В частности, исследуется распределение электрических напряжений между элементами печей ИПХТ с использованием электрических замыканий. На основе полученных зависимостей сформулированы рекомендации по достижению наилучших электрических параметров, обеспечивающих повышенную надежность работы печей ИПХТ.

Ключевые слова: индукционная плавка, холодный тигель, остекловывание радиоактивных отходов, численное моделирование, электрическое поле, напряжение, надежность печи

Для цитирования: Численное исследование электрических напряжений между элементами индукционных печей с холодными тиглями / А. А. Хоршев, Д. Б. Лопух, А. В. Вавилов, И. Н. Скриган, П. В. Высоцкий, А. П. Мартынов // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2025. Т. 18, № 5. С. 95–107. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-5-95-107.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование: Исследование выполнено в рамках проекта НР/ЭТПТ-70 «Разработка, изготовление и испытание лабораторной установки индукционной плавки в холодном тигле с донным нагревом (ИПХТ-ДН) для остекловывания высокоактивных отходов (ВАО)» в СПбГЭТУ «ЛЭТИ» в 2024 г.

Original article

Numerical Study of Electrical Voltages between Elements of Induction Furnaces with Cold Crucibles

A. A. Khorshev^{1,2}, D. B. Lopukh^{1✉}, A. V. Vavilov¹, I. N. Skrigan^{1,2},
P. V. Vysotsky¹, A. P. Martynov¹

¹ Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

² JSC «V. G. Khlopin Radium Institute», Saint Petersburg, Russia

✉ dblopukh@yandex.ru

Abstract. The article is devoted to the study of the distribution of electrical voltages in induction melting in the cold crucible (IMCC) furnaces based on numerical simulation using a 3D electromagnetic (EM) model in A–V formulation. In particular, the distribution of electrical voltages between the elements of IMCC furnaces using electrical short circuits is being investigated. Based on the dependences obtained, recommendations are formulated for achieving the best electrical parameters that ensure increased reliability of IMCC furnaces.

Keywords: induction melting, cold crucible, vitrification of radioactive waste, numerical modeling, electric field, voltage, furnace reliability

For citation: Numerical Study of Electrical Voltages between Elements of Induction Furnaces with Cold Crucibles / A. A. Khorshev, D. B. Lopukh, A. V. Vavilov, I. N. Skrigan, P. V. Vysotsky, A. P. Martynov // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2025. Vol. 18, no. 5. P. 95–107. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-5-95-107.

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Financing: The research was carried out within the framework of the NR/ETPT-70 project «Development, manufacture and testing of a laboratory induction melting unit in a cold crucible with bottom heating (IMCC-BH) for vitrification of highly radioactive waste (HW)» at Saint Petersburg Electrotechnical University in 2024.

Введение. В настоящее время развивается и расширяется использование метода ИПХТ для получения тугоплавких огнеупорных материалов, особо чистых веществ и химически активных материалов в расплавленном состоянии. Это касается производства слитков и порошков плавящихся оксидных материалов высшей огнеупорности, оптических и технических стекол, монокристаллов, исследований с кориумом и др. [1]–[7].

При разработке новых устройств и технологий ИПХТ в основном решаются вопросы проектирования и конструирования на основе результатов предварительной экспериментальной работы и математического моделирования с использованием ЭМ, электрогидродинамических и магнитогидродинамических моделей различной размерности. При использовании этих моделей рассматриваются в основном результаты воздействия магнитной составляющей ЭМ-поля и только некоторое внимание обращается к электрическим параметрам и их распределению в индукционной системе: току в элементах печи и напряжению на индукторе. Однако не рассматривается распределение напряжения между элементами индукционной системы, которое определяет возникновение электрических пробоев газовых промежутков и шунтирующих токов при электрическом пробое гарнисажа, как, например, при ИПХТ металлов [8]. Последние явления могут приводить к выходу из строя индуктора и холодного тигля, к аварийным ситуациям и снижению срока службы печей ИПХТ.

Особое внимание к электрическим полям необходимо уделять при остекловывании высокоактивных отходов (ВАО) методом ИПХТ, где важнейшим требованием к установке служит высокая надежность и срок службы печи, определяющие уровень эксплуатационных расходов на ее замену. Поэтому цель настоящей статьи состоит в численном исследовании распределения электрических напряжений в печах ИПХТ [9], [10] различной конструкции для остекловывания ВАО. Для достижения этой цели разработана 3D-ЭМ-модель в A – V -постановке [11], позволяющая более

точно решать поставленную задачу. Полученные результаты и выводы справедливы и для иных описанных приложений метода ИПХТ.

Описание математической 3D-ЭМ-модели.

Для исследования электрических параметров печей ИПХТ, как правило, применяют 2D- и 3D-электромагнитные численные модели в частотной области в A -постановке, где $\mathbf{A}$ – векторный магнитный потенциал, Вб/м. Основные компоненты электромагнитного поля – напряженность электрического поля $\mathbf{E}$, В/м и индукция магнитного поля $\mathbf{B}$, Тл – выражаются в ней через вектор $\mathbf{A}$ в первой паре следующих уравнений. Связь компонентов ЭМ-поля с плотностью тока в общем случае устанавливается во второй паре уравнений [11]:

$$\begin{cases} \mathbf{E} = -j\omega\mathbf{A}, \\ \mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}, \\ \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}, \\ \mathbf{J} = \sigma\mathbf{E} + j\omega\mathbf{D} + \sigma\mathbf{v} \times \mathbf{B} + \mathbf{J}_e, \end{cases} \quad (1)$$

где $\mathbf{H}$ – напряженность магнитного поля, А/м; $\mathbf{D}$ – смещение электрического поля, Кл/м²; $\mathbf{J}$ – плотность тока, А/м²; $\mathbf{J}_e$ – плотность тока, вызванного сторонними источниками, А/м²; σ – удельная электропроводность материала, С/м; $\mathbf{v}$ – скорость движения проводящего тела, м/с; $\omega = 2\pi f$ – угловая частота тока, рад/с; ∇ – оператор набла; $j = \sqrt{-1}$.

Определяют следующие основные электрические параметры печей ИПХТ: эквивалентное активное и реактивное сопротивления индуктора; напряжение и ток индуктора; активная мощность в расплаве и мощности электрических потерь в индукторе, тигле и других элементах печи. Они могут быть получены решением уравнений (1) с помощью численной конечно-элементной модели в 2D- или 3D-постановке.

Однако для более точной оценки надежности работы печи ИПХТ необходимо знать значения электрического напряжения между индуктором и тиглем, тиглем и расплавом, а также между конструктивными элементами тигля. Высокое значение напряжения может вызвать электрический пробой, что, в свою очередь, приводит к протека-

нию шунтирующих токов и быстрому износу конструктивных элементов печи.

В системе уравнений (1) отсутствует скалярный электрический потенциал V , что делает невозможным корректное определение напряжений между элементами печи. Для решения этой задачи необходимо добавить в первое уравнение системы скалярный электрический потенциал и введя калибровку кулона, тогда получим следующую систему уравнений, учитывающую электрическую и магнитную составляющие ЭМ-поля [11, с. 431]:

$$\begin{cases} \mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}, \\ \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}, \\ \mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} + j\omega \mathbf{D} + \sigma \mathbf{v} \times \mathbf{B} + \mathbf{J}_e, \\ \mathbf{E} = -\nabla V - j\omega \mathbf{A}, \\ \nabla \mathbf{J} = 0. \end{cases} \quad (2)$$

Четвертое уравнение в системе – это условие непрерывности вектора плотности тока при неизменной плотности электрического заряда по всему объему модели: $dq/dt = 0$. Такую математическую модель принято называть моделью в A – V -постановке [12].

Для того чтобы определить электрическое напряжение между двумя точками a и b в пространстве вдоль траектории l , необходимо вычислить значение следующего линейного интеграла:

$$\begin{aligned} U_{ab} &= \int_l \mathbf{E} d\mathbf{l} = \int_l (-\nabla V - j\omega \mathbf{A}) d\mathbf{l} = \\ &= -\left(V_a - V_b + \int_l j\omega \mathbf{A} d\mathbf{l} \right), \end{aligned} \quad (3)$$

где V_a , V_b – значения скалярного электрического потенциала в точках a и b .

Если напряженность на прямой между точками измерения напряжения изменяется по линейному закону, то уравнение (3) может быть сведено к выражению

$$U_{ab} = 0.5(\mathbf{E}_a + \mathbf{E}_b) \mathbf{l}_{ab}, \quad (4)$$

где $\mathbf{E}_a$, $\mathbf{E}_b$ – напряженности электрического поля в точках a и b ; $\mathbf{l}_{ab}$ – расстояние между точками a и b . Если разложить векторы $\mathbf{E}_a$, $\mathbf{E}_b$ на составляющие вдоль осей координат, получим выражение

$$\begin{aligned} U_{ab} &= 0.5 \mathbf{l}_{ab} [(E_{ax} + E_{bx}) \cos \alpha + \\ &+ (E_{ay} + E_{by}) \cos \beta + (E_{az} + E_{bz}) \cos \gamma], \end{aligned} \quad (5)$$

где E_{ax} , E_{ay} , E_{az} , E_{bx} , E_{by} , E_{bz} – проекции векторов $\mathbf{E}_a$, $\mathbf{E}_b$ на координатные оси; α , β , γ – углы между отрезком ab и осями Ox , Oy , Oz . Так как все

расчеты производятся по методу комплексных амплитуд, выражения (3)–(5) необходимо применить отдельно к действительной и мнимой частям вектора $\mathbf{E}$, а затем вычислить квадратный корень из суммы квадратов действительной и мнимой составляющих напряжения.

В электромагнитных моделях в A -постановке граничные условия применяются к вектору $\mathbf{A}$. Это может ограничивать нормальную и/или тангенциальную составляющую магнитного векторного потенциала, либо имитировать свободную (неограниченную) поверхность. В моделях в A – V -постановке граничное условие применяется также и к скалярному электрическому потенциалу. Это может быть условие фиксированного электрического потенциала на границе ($V = \text{const}$) или идеального изолятора ($J_n = 0$), а также периодическое граничное условие. Последнее условие может быть применено в том случае, когда и токи, и напряжения на двух разных плоскостях в точности одинаковы ($V_1 = V_2$, $J_1 = J_2$).

Численная модель, в основе которой лежит система уравнений (2), требует больше вычислительной мощности за счет добавления дополнительной переменной V , поэтому, если нет необходимости в определении напряжений между элементами печи, ее не применяют.

Оценка погрешности метода расчета напряжений. При небольшой нелинейности распределения $\mathbf{E}$ вдоль отрезка длины, соединяющего две точки, для определения напряжения можно пользоваться формулой (5). Для оценки погрешности результатов, получаемых с помощью этой формулы, построена упрощенная модель печи ИПХТ-ДН, состоящая из одновиткового индуктора с внутренним диаметром 50 мм; 6 донных секций круглого сечения диаметром 12 мм с воздушным зазором между ними 1.5 мм и длиной 72 мм и цилиндрической ванны расплава диаметром 60 и высотой 50 мм. Удельное сопротивление индуктора и секций холодного тигля равно $2 \cdot 10^{-8}$ Ом · м (медь), удельное электрическое сопротивление расплава стекла – 0.05 Ом · м.

Для определения распределения напряжения между дном тигля и ванной расплава на обращенной к расплаву поверхности секций было расположено по 13 точек с шагом 5 мм. Напротив, каждой из этих точек в плоскости нижней поверхности ванны расплава было расположено еще по одной точке, и между ними строился отрезок, разбиваемый на 5 равных частей при построении конечно-элементной сетки. На рис. 1, a показан

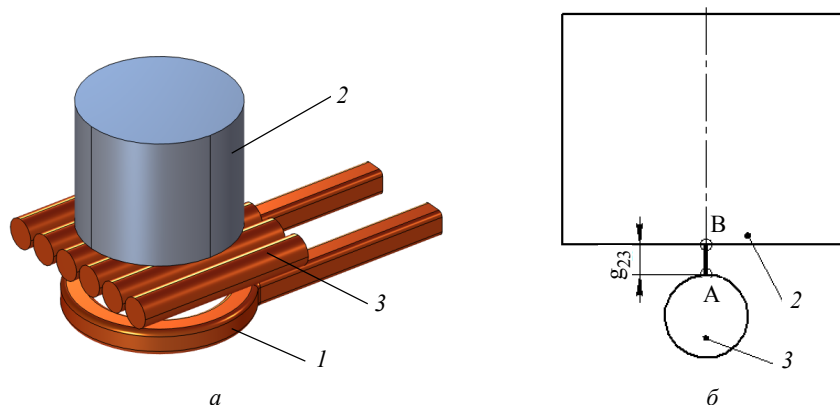


Рис. 1. Изометрический вид модели ИПХТ-ДН (а) и расположение расчетных точек и отрезков между дном холодного тигля и ванной расплава (б);

1 – индуктор; 2 – ванна расплава; 3 – донные секции

Fig. 1. Isometric view of the IMCC-BH model (a) and the location of the calculated points and segments between the bottom of the cold crucible and the melt pool (b);

1 – inductor; 2 – molten bath; 3 – bottom sections

изометрический вид модели, на рис. 1, б – схема расположения расчетных точек и отрезков между дном тигля и ванной расплава.

Расстояние между донными секциями и нижней поверхностью ванны расплава g_{23} от расчета к расчету изменяли от 0.5 до 32 мм. После каждого расчета определяли значения напряженностей электрического поля в точках на концах отрезков E_z для расчета по формуле (5), а также интеграл от z -компоненты вектора электрической напряженности вдоль расчетных отрезков по формуле (3).

Затем значения напряжений U_{AB7} и U_{AB9} , полученные с помощью формул (3) и (5) соответственно, сравнивали друг с другом и определяли относительную погрешность формулы (3). Для каждой пары точек A и B рассчитывали относительную погрешность dU определения U_{AB} по формуле (5):

$$\Delta U = \frac{U_{AB7} - U_{AB9}}{U_{AB9}}.$$

Потом для каждого значения g_{23} определялась максимальная относительная погрешность расчета напряжения и относительная погрешность расчета максимального среди всех пар точек напряжения между дном тигля и ванной расплава. На рис. 2 представлен график зависимости этих погрешностей от расстояния между дном тигля и ванной расплава g_{23} .

Можно заметить, что максимальная погрешность растет с 8 до 23 % при увеличении зазора g_{23} от 0.5 до 8 мм, а затем остается практически неизменной. Погрешность расчета максимального напряжения по формуле (3) начинается с 1–2 % при значении зазора от 0.5 до 3 мм, затем достигает 7 % при $g_{23} = 16$ мм и продолжает медленно расти.

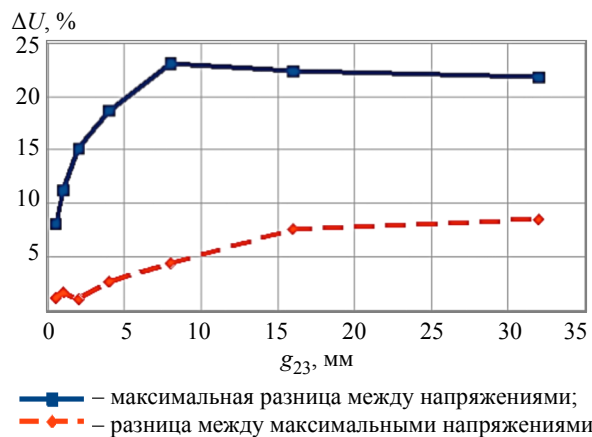


Рис. 2. Зависимость максимальной погрешности расчета напряжения и погрешности расчета максимального напряжения между дном тигля и ванной расплава при использовании формулы (5)

Fig. 2. Dependence of the maximum error in calculating the voltage and the error in calculating the maximum voltage between the bottom of the crucible and the melt pool using formula (5)

При исследовании напряжений между элементами печей ИПХТ наибольший интерес представляют именно максимальные напряжения, возбуждающие электрические пробой между элементами печи ИПХТ, поэтому при оценке погрешности расчета напряжения по формуле (5) для печей ИПХТ следует руководствоваться нижним графиком на рис. 2. При этом размеры зазоров между секциями холодного тигля и толщины гарнисажа при варке стекол обычно составляют от 1 до 3 мм, что соответствует определенной погрешности по рис. 2 – не более 2 %. При проведении численного 3D-моделирования печей большого размера добавление в модель значительного количества отрезков между расчетными точками и разбиение этих отрезков на несколько

частей серьезно уплотняет конечно-элементную сетку, увеличивает затраты оперативной памяти и время расчета. Использование формулы (5) не требует добавления в модель дополнительных отрезков и, следовательно, упрощает расчетную сетку, значительно экономит время расчета, снижает требования к аппаратному обеспечению и, согласно рис. 2, обеспечивает отклонение результатов по максимальным напряжениям всего на 1–2 % при расстояниях между расчетными точками в конструкции печи меньше 3 мм. Если расстояния больше, то для повышения точности расчета следует вводить в модель линии между расчетными точками и пользоваться формулой (3).

Электромагнитная 3D-модель в A - V -постановке. Печи ИПХТ не осесимметричны по причине наличия секций холодного тигля и спиральной или коаксиальной с перемычками формы индуктора. Электромагнитные 3D-модели в A -постановке позволяют уменьшить размер модели до n раз, где n – количество плоскостей симметрии тигля. На плоскостях симметрии устанавливается граничное условие для векторного магнитного потенциала: $A_n = 0$. При этом не учитывается асимметрия индуктора и наличие токоподводящих шин. Таким образом, за счет небольшого снижения точности расчета (в первую очередь, напряжения на индукторе) значительно уменьшаются требования к вычислительным ресурсам и время расчета. На рис. 3, *a* представлен пример 3D-модели печи ИПХТ с холодным тиглем, состоящим из 32 секций, и трехвитковым охватывающим индуктором, которую можно уменьшить в 32 раза для проведения расчета в виде сектора индукционной системы на рис. 3, *б* [7]. Для печей ИПХТ-ДН такой метод снижения затрат расчетных ресурсов также применим.

Так, у холодных тиглей, имеющих плоскопараллельные донные секции, есть две плоскости симметрии, а у печей с донными секциями в виде

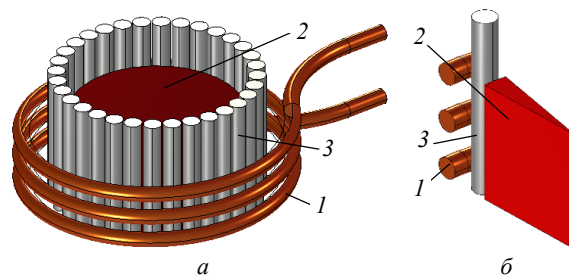


Рис. 3. Полная модель печи ИПХТ (*a*) и уменьшенная в 32 раза (*б*); 1 – индуктор; 2 – ванна расплава; 3 – донные секции
Fig. 3. Complete model of the IMCC furnace (*a*) and a 32-fold reduced one (*б*); 1 – inductor; 2 – molten bath; 3 – bottom sections

секторов количество плоскостей симметрии равно количеству секций [13]. Если упростить донный индуктор печи до концентрических колец или тороидов, то и расчетная модель может быть уменьшена согласно количеству плоскостей симметрии холодного тигля.

Для моделей печей ИПХТ в A - V -постановке ни одно из перечисленных ранее условий (фиксированное напряжение, идеальный изолятор или периодическое граничное условие) не соответствует реальному распределению электрического поля в индукционной системе с холодным тиглем, поскольку:

- условие идеального изолятора не подходит, так как через расплав на плоскости симметрии протекает ток (рис. 4, *a*);
- условие фиксированного электрического потенциала ($V = \text{const}$) не позволяет учесть снижение электрического потенциала при удалении от индуктора (рис. 4, *б*);
- периодическое граничное условие приравнивает друг к другу электрические потенциалы на плоскостях симметрии, что не позволяет учесть падение напряжения на индукторе (рис. 4, *в*).

Таким образом, ЭМ-модели печей ИПХТ в A - V -постановке наиболее точно отражают физику

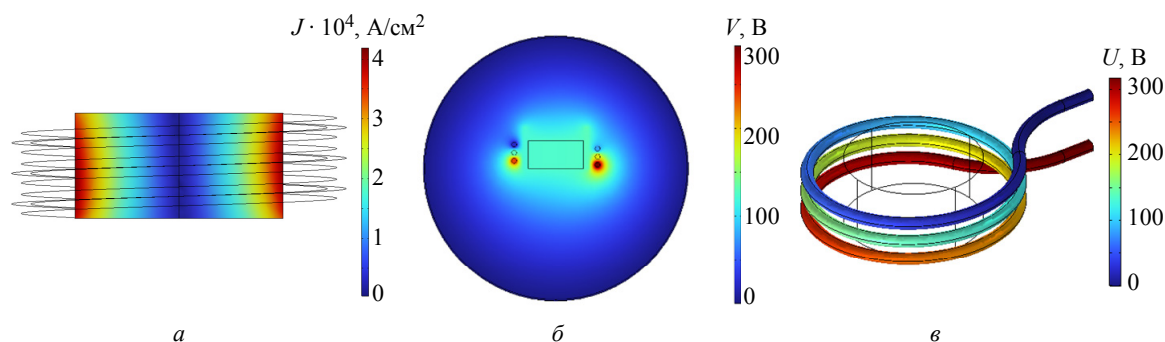


Рис. 4. Распределение плотности тока в расплаве (*a*) и электрического потенциала на плоскости симметрии (*б*) в индукционной системе «индуктор–расплав», а также распределение напряжения на витках индуктора (*в*)
Fig. 4. Distribution of current density in the melt (*a*) and electric potential on the plane of symmetry (*б*) in the inductor-melt induction system, as well as voltage distribution on the coils of the inductor (*в*)

процесса и могут быть корректно применены только для полной индукционной системы.

Исследование электрических напряжений между элементами печей с охватывающим индуктором. Исследование электрических напряжений между элементами печей ИПХТ позволяет определить участки, которые могут быть наиболее подвержены электрическим пробоям и должны быть дополнительно электроизолированы или конструктивно изменены.

В качестве примера приведем исследование напряжений между элементами печи ИПХТ с цилиндрическим тиглем из нержавеющей стали и трехвитковым медным индуктором, представленной на рис. 3, а. Размеры и параметры печи приведены в табл. 1. Расчет проводился для частоты тока 1.76 МГц и действующего значения тока индуктора 100 А. Для определения напряжений между элементами печи на индукторе, секциях тигля и боковой поверхности ванны расплава были выбраны точки, расположенные следующим образом:

– 96 точек на поверхности витков индуктора, обращенной к тиглю. Углы между горизонтальными лучами, соединяющими ось индуктора и две соседние точки, равны 11.25° . Таким образом, на один оборот индуктора вокруг тигля приходится 32 точки (рис. 5, а);

– по 12 точек на каждой из 32 секций холодного тигля: по 4 точки, расположенные напротив каждого витка индуктора: одна обращена к индуктору, вторая – к расплаву, две оставшиеся – к соседним секциям (рис. 5, б). Итого – 384 точки на секциях холодного тигля;

– 96 точек на боковой поверхности расплава, расположенные ровно напротив точек на витках индуктора (рис. 5, в).

Зазор между секциями холодного тигля, а также между тиглем и расплавом составляет 2 мм. Согласно графику на рис. 2, погрешность

Табл. 1. Размеры и параметры печи ИПХТ с охватывающим индуктором

Tab. 1. Dimensions and parameters of the IMCC furnace with an enveloping inductor

Параметр	Значение
Диаметр ванны расплава, мм	196
Высота ванны расплава, мм	100
Количество секций холодного тигля, шт	32
Наружный диаметр секции холодного тигля, мм	20
Высота секции холодного тигля, мм	150
Зазор между секциями холодного тигля, мм	2
Зазор между ванной расплава и секциями холодного тигля (гарнисаж), мм	2
Внутренний диаметр индуктора, мм	280
Высота индуктора, мм	100
Количество витков индуктора, шт	3
Наружный диаметр трубки индуктора, мм	18
Длина токоподводящей шины индуктора, мм	150
Диаметр расчетного региона, мм	1000
Высота расчетного региона, мм	1000
Степень проявления поверхностного эффекта в расплаве	3

расчета максимальных напряжений при таком зазоре составляет 1 %, поэтому для расчета напряжения может быть применена формула (5). Зазор между индуктором и тиглем равен 2 см, и характер изменения E в этой области не линейный, а погрешность расчета максимального напряжения по формуле (5) может составлять порядка 8 % (рис. 2). Следовательно, для более точного определения напряжений между точками на индукторе и на секциях холодного тигля необходимо рассчитывать линейный интеграл (3). Для этого между ближайшими точками на индукторе и холодном тигле были построены отрезки.

На рис. 6 представлены графики зависимости напряжений между индуктором и тиглем (а), между секциями тигля (б) и между секциями и боковой поверхностью ванны расплава (в). На оси абсцисс представлено количество витков индуктора между началом индуктора и точкой измерения напряжения. Значение $N_1 = 0$ соответствует

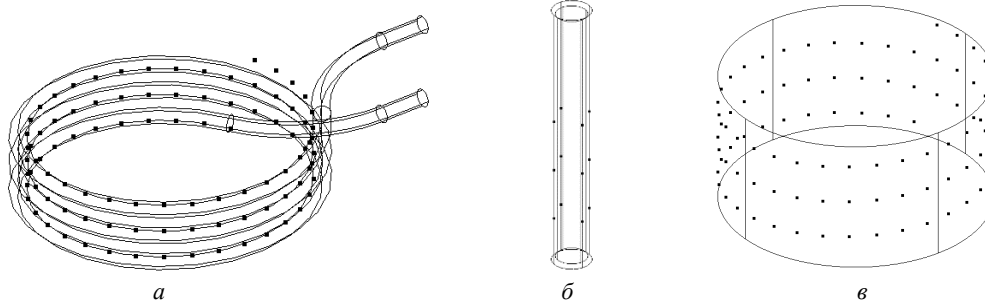


Рис. 5. Расположение расчетных точек: а – на индукторе, б – на секции тигля; в – на боковой поверхности ванны расплава. Для удобства восприятия показаны только контуры
Fig. 5. The location of the design points: а – on the inductor, б – the crucible section; в – the side surface of the melt pool. For ease of perception, only the contours are shown

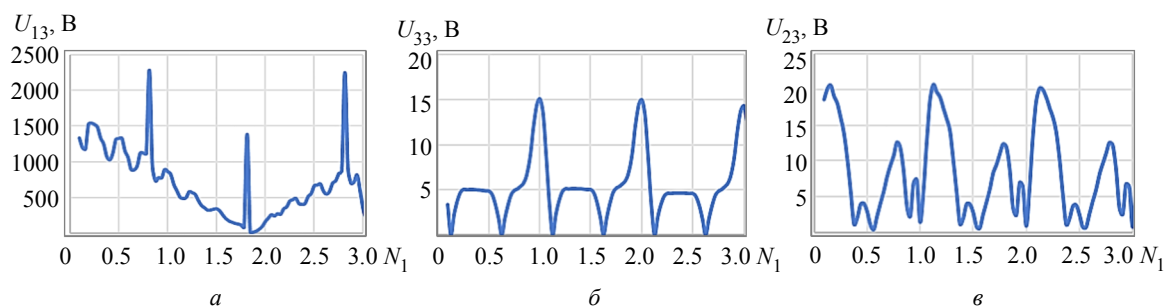


Рис. 6. Графики зависимостей напряжений: *a* – между индуктором и тиглем; *б* – между секциями тигля; *в* – между тиглем и боковой поверхностью ванны расплава от номера витка индуктора, напротив которого измеряется напряжение

Fig. 6. Graphs of the voltage dependences: *a* – between the inductor and the crucible; *б* – between the sections of the crucible; *в* – between the crucible and the side surface of the melt pool on the number of the inductor coil opposite which the voltage is measured

началу первого витка индуктора у нижней шины, значение $N_1 = 3$ – концу 3-го витка индуктора у верхней шины.

Анализ результатов, показанных на рис. 6, приведен в настоящей статье далее.

Исследование напряжений между донными секциями и ванной расплава в печах ИПХТ-ДН. Печи ИПХТ-ДН отличаются от классических печей ИПХТ расположением индуктора под дном холодного тигля [10], [14]. Такое расположение индуктора позволяет выполнить секционированным только дно холодного тигля, тогда как его боковая стенка может быть цельносварной и электрически замкнутой. Этот тип печей отличает повышенная тепловая эффективность плавки при использовании крупномасштабных холодных тиглей с большим диаметром. Однако, кроме перечисленных положительных эффектов, расположение индуктора под донными секциями холодного тигля может привести к локальному возрастанию напряжения между донными секциями и нижней поверхностью ванны расплава. В том случае, если это напряжение превысит пробивное напряжение донного гарнисажа, может произойти электрическое замыкание, что, в свою очередь, приведет к возникновению шунтирующих токов, протекающих через расплав, донный гарнисаж и секции [9]. Шунтирующие токи могут возникать в печах ИПХТ любой конфигурации, значительно ускоряют коррозию в месте пробоя и снижают срок службы холодного тигля. Следовательно, для повышения надежности печей ИПХТ-ДН необходимо снижать напряжение между дном тигля и нижней поверхностью ванны расплава. Для этого авторами предложено выполнение замыкания донных секций тигля между собой.

В данной статье проводится сравнение 4 типов печей ИПХТ-ДН: с параллельными изолиро-

ванными донными секциями; замкнутыми по одному и по двум торцам с помощью прямых медных шин; с донными секциями, замкнутыми на боковую цилиндрическую замкнутую стенку холодного тигля. На рис. 7 (*a*, *б*) представлена печь с холодным тиглем, донные секции которого замкнуты на боковую цилиндрическую стенку холодного тигля, а на рис. 7 (*в*, *г*) – замкнуты с обоих торцов с помощью прямых медных шин.

В каждом расчете ток индуктора подбирался так, чтобы обеспечить подвод 45 кВт активной мощности к ванне расплава, что соответствует стационарному режиму плавки с температурой свободной поверхности ванны расплава $\sim 1250^\circ\text{C}$ и средней температурой в объеме $\sim 1400^\circ\text{C}$. Принятые параметры получены экспериментально при использовании изолированных донных секций холодного тигля и варке боросиликатного стекла для включения ВАО [15]. Во всех расчетах

Табл. 2. Размеры и параметры печи ИПХТ-ДН
Tab. 2. Dimensions and parameters of the IPHT-DN

Параметр	Значение
Диаметр ванны расплава, мм	400
Высота ванны расплава, мм	100
Внешний диаметр донной секции, мм	12
Зазор между донными секциями, мм	1.5
Зазор между дном тигля и ванной расплава, мм	2
Зазор между секциями холодного тигля, мм	2
Количество донных секций, шт	32
Внешний диаметр индуктора, мм	350
Внутренний диаметр индуктора, мм	190
Внешний диаметр трубки индуктора, мм	16
Длина токоподводящих шин, мм	150
Зазор между индуктором и дном тигля, мм	10
Высота боковой стенки тигля, мм	150
Диаметр расчетного региона, мм	1000
Высота расчетного региона, мм	1000
Удельное сопротивление расплава, Ом · см	4.24

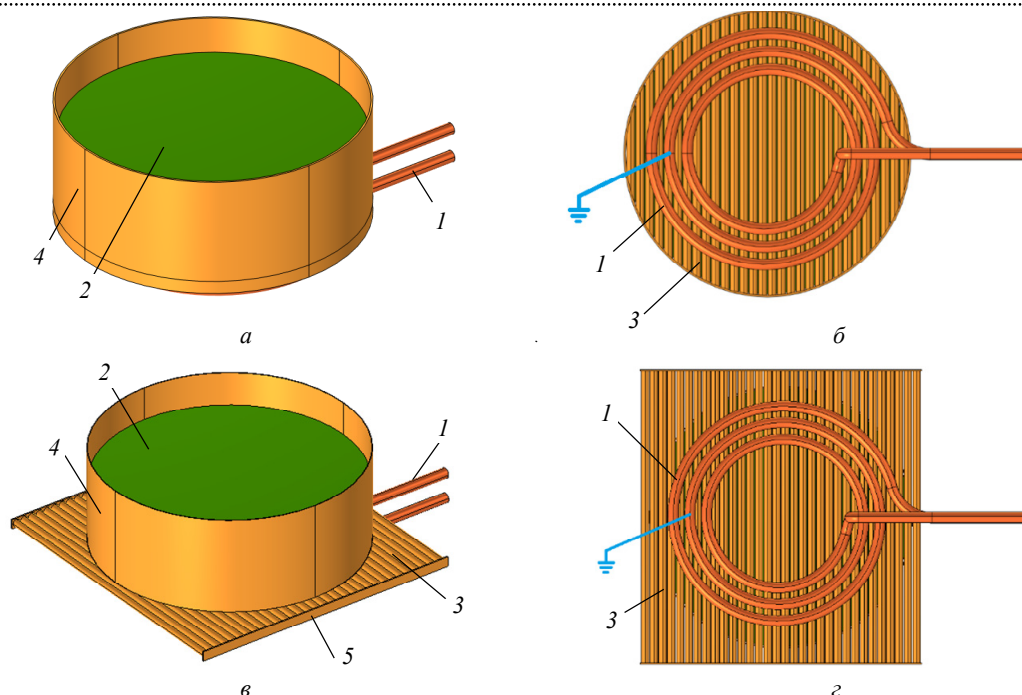


Рис. 7. Изометрические проекции и вид снизу на холодные тигли печей ИПХТ-ДН с донными секциями, замкнутыми на боковую стенку холодного тигля (а, б) и с помощью шин (в, г). Точки заземления индуктора: 1 – индуктор; 2 – ванна расплава; 3 – донные секции; 4 – боковая стенка; 5 – замыкающая шина

Fig. 7. Isometric projections and a bottom view of the cold crucibles of the IPT-DN furnaces with bottom sections closed using on the side wall (a, б) and busbars (в, г). Inductor grounding points: 1 – inductor; 2 – molten bath; 3 – bottom sections; 4 – sidewall; 5 – closing bus

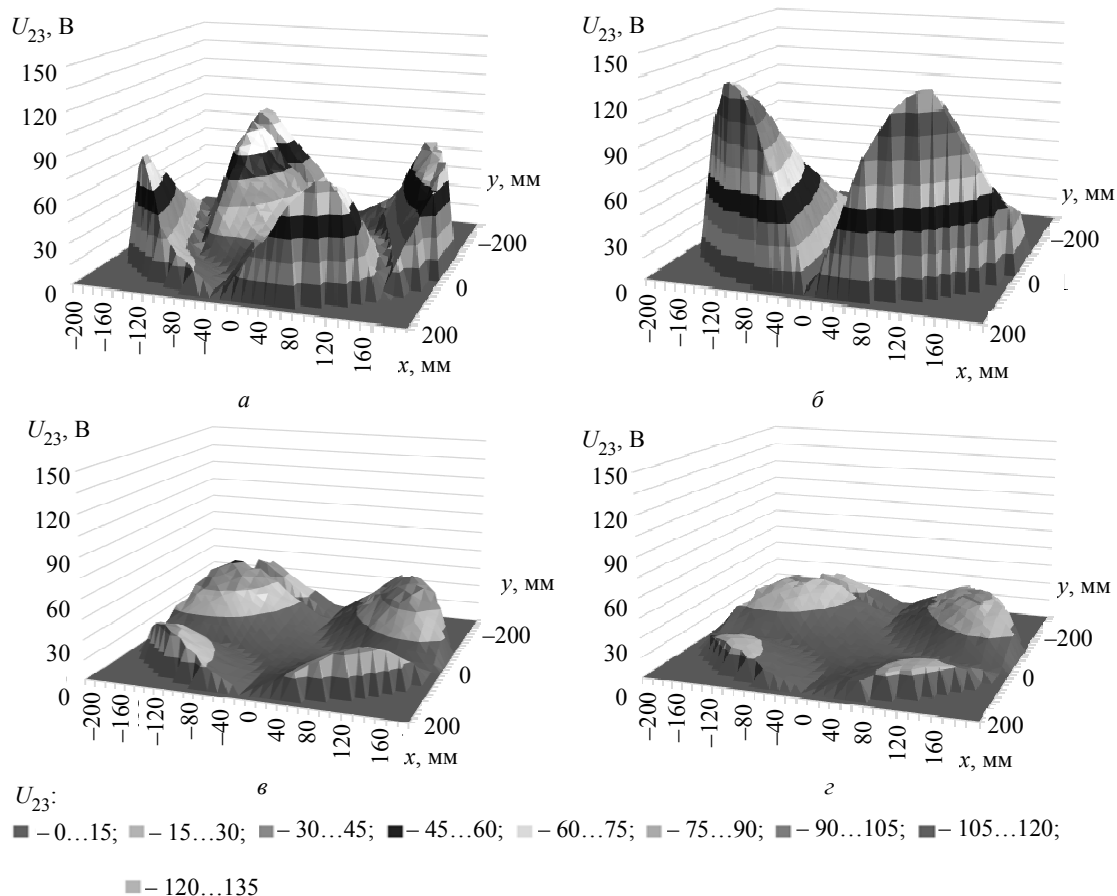


Рис. 8. Распределения напряжений между дном тигля и ванной расплава в печах ИПХТ-ДН с изолированными (а), амкнутыми одной (б) и двумя (в) шинами, а также замкнутыми на боковую стенку (г) донными секциями холодного тигля

Табл. 3. Значения максимального и среднего по площади напряжения между дном холодного тигля и нижней поверхностью ванны расплава

Tab. 3. Values of the maximum and average area stress between the bottom of the crucible and the lower surface of the melt pool

Напряжение	Изолированные донные секции	Замыкание донных секций на одну шину	Замыкание донных секций на 2 шины	Замыкание донных секций на боковую стенку тигля
Максимальное, %	84.4/100	133.3/158	45.9/54.4	32.3/38.3
Среднее по площади, %	31.8/100	46.1/145	14.9/46.9	11.0/34.6

* – за 100 % выбрано напряжение между дном тигля с изолированными секциями и ванной расплава

применяли заземление индуктора в средней точке, как показано выносными линиями на рис. 7 (б, г). Размеры и параметры модели представлены в табл. 2. Сторона квадрата дна холодного тигля на рис. 7 (в, г) равна 430.5 мм.

Для определения напряжения между донными секциями и ванной расплава на поверхностях секций, обращенных к ванне, были расположены расчетные точки с шагом 13.5 мм. Напротив каждой из них были добавлены точки на нижней поверхности ванны расплава. Ввиду того, что расстояние между дном тигля и ванной расплава составляет всего 2 мм, напряжение рассчитывалось по формуле (5) с погрешностью 1 % (рис. 2).

На рис. 8 представлены распределения действующих значений напряжения между дном холодного тигля и нижней поверхностью ванны расплава U_{23} для 4 конструкций тигля на рис. 7: с изолированными донными секциями (а); с секциями, замкнутыми одной шиной (б); с секциями, замкнутыми двумя шинами (в); с секциями, замкнутыми на боковую стенку (г). На всех графиках установлен одинаковый масштаб для наглядного сравнения. В табл. 3 представлены максимальное и среднее по площади дна холодного тигля напряжения между донными секциями и ванной расплава U_{23} .

Обсуждение результатов. 1. Напряжения между элементами в печах ИПХТ с охватывающими индукторами. Из графиков на рис. 6 видно, что максимальные значения всех рассматриваемых напряжений располагаются у шин индуктора (значения 1–3 на оси абсцисс) с локальными максимумами между ними. Следовательно, области вблизи шин должны быть дополнительно защищены от электрических пробоев.

Распределение напряжения по виткам индуктора показывает сугубо нелинейный характер, что, по-видимому, связано с наличием секциони-

рованного холодного тигля. Причем сумма числа всех максимумов (наибольших и локальных), равных 12, примерно в три раза меньше числа секций холодного тигля и составляет 4 максимума на виток индуктора. В областях вблизи шин индуктора наблюдаются самые значительные пики распределений напряжений между элементами печи. Так, напряжение между секциями также возрастает вблизи шин приблизительно в 3 раза, до 15 В, тогда как вдали от шин оно не превышает 5 В. При этом на один виток индуктора приходится две точки, где напряжение между секциями падает до 0. В отличие от напряжения между индуктором и холодным тиглем, график напряжения между секциями U_{33} периодичен с шагом в один виток индуктора. Для напряжения между секциями тигля и ванной расплава также есть периодичность в один виток индуктора. Вблизи шин наблюдается три локальных максимума, наибольший из них составляет 20 В.

Таким образом, напряжение между индуктором и незаземленным холодным тиглем может составлять до 75 % от действующего напряжения на индукторе. Напряжение между соседними секциями составляет не более 0.5 % от напряжения на индукторе, а напряжение между тиглем и ванной расплава – до 0.65 %. Для данных условий расчетов напряжения U_{33} и U_{23} не превышают значений для образования дугового разряда. Для других условий плавки эти значения могут быть превышены.

2. Напряжение между донными секциями и ванной расплава в печах ИПХТ-ДН. При одинаковой мощности, подводимой к ванне расплава (45 кВт), наибольшее значение напряжения между дном холодного тигля и ванной расплава наблюдается у печи с холодным тиглем, донные секции которого замкнуты одной шиной с торца, и оно составляет 133.3 В. Это на 58 % выше, чем у тигля с изолированными секциями. Замыкание донных секций двумя медными шинами с обоих

торцов снижает напряжение до 45.9 В, т. е. 54.4 % относительно тигля с изолированными секциями. Лучший результат – 32.3 В, или 38.3 %, наблюдается у печи с холодным тиглем, секции которого замкнуты на боковую стенку.

Если принять за 0° плоскость токоподводящих шин, то максимумы напряжений между дном холодного тигля и ванной расплава у всех печей расположены на ± 45 и $\pm 135^\circ$. Для холодного тигля, секции которого замкнуты медной шиной с одного торца, самые явные максимумы расположены со стороны изолированных концов секций.

При ИПХТ-ДН с изолированными донными секциями холодного тигля и взятыми исходными экспериментальными параметрами для расчетов получены самые высокие значения напряжений до 133.3 В, чего достаточно для образования дугового разряда. При замыкании донных секций на боковую стенку тигля это максимальное напряжение уменьшается в 4 раза и достигает значения 32.3 В, при котором дуговой разряд практически не может образоваться при реальной толщине гарнисажа (зазоре) 2 мм. Таким образом, для повышения надежности печей ИПХТ-ДН необходимо электрически замыкать донные секции

между собой за витками индуктора и не оставлять изолированных торцов секций.

Закключение. Разработана электромагнитная 3D-модель печей ИПХТ в A – V -постановке для исследования электрических полей и явлений. Показано, что подобная постановка необходима для более точного анализа результатов печей ИПХТ.

Проведенные численные исследования показали сугубо неравномерное распределение напряжений между элементами индукционной системы с холодным тиглем с наличием значительных локальных максимумов для двух конфигураций печей ИПХТ с охватывающим индуктором и донным нагревом. Эти результаты позволили определить конкретные места в индукционных системах, наиболее подверженные электрическим пробоям и выходу печей из строя.

Для проектирования печей ИПХТ-ДН для остекловывания ВАО предложено электрически замыкать донные секции на замкнутую боковую стенку холодного тигля, что снижает напряжение между расплавом и донными секциями в 4 раза и способствует повышению срока службы печи ИПХТ-ДН для остекловывания ВАО.

Список литературы

1. Петров Ю. Б., Ратников Д. Г. Холодные тигли. М.: Металлургия, 1972. 112 с.
2. Петров Ю. Б. Индукционная плавка окислов. Л.: Энергоатомиздат, 1983. 104 с.
3. Chemically durable iron phosphate glasses for Vitrifying Sodium Bearing Waste (SBW) using Conventional and Cold Crucible Induction Melting (CCIM) techniques / Ch. W. Kim, C. S. Ray, D. Zhu, D. E. Day, D. Gombert, A. Aloy, A. Moguš-Milanković, M. Karabulut // J. of Nuclear Materials. 2003. Vol. 322, no. 2. P. 152–164. doi: 10.1016/S0022-3115(03)00325-8.
4. Петров Ю. Б., Канаев И. А. Индукционные печи для плавки оксидов. Сер. «Библиотечка высококачественника-электротермиста» / под ред. А. Н. Шамова. Л.: Политехника, 1991. 55 с.
5. Melting and draining tests on glass waste form for the immobilization of Cs, Sr, and rare-earth nuclides using a cold-crucible induction melting system / J.-H. Choi, B. Lee, Ki-R. Lee, H. W. Kang, H. J. Eom, H. S. Park // Nuclear Engin. and Technol., 2022. Vol. 54, no. 4. P. 1206–1212. doi: 10.1016/j.net.2021.09.041.
6. Кузьминов Ю. С., Ломонова Е. Е., Осико В. В. Тугоплавкие материалы из холодного тигля. М.: Наука, 2004. 372 с.
7. Cold-crucible design parameters for next generation HLW melters / D. Gombert, J. Richardson, A. Aloy, D. Day // WM'02 Conf. 2002, Tucson, AZ. P. 1–9. URL: <https://archivedproceedings.econference.io/wmsym/2002/Procee-dings/18/126.pdf> (дата обращения: 27.03.2025).
8. Тир Л. Л., Губченко А. П. Индукционные плавильные печи для процессов повышенной точности и чистоты. М.: Энергоатомиздат, 1988. 120 с.
9. Экспериментальные и теоретические исследования индукционных печей с холодными тиглями и донным нагревом для остекловывания радиоактивных отходов / Д. Б. Лопух, А. В. Вавилов, А. А. Хоршев, И. Н. Скриган, А. П. Мартынов // Радиоактивные отходы. 2022. Т. 21, № 4. С. 13–23.
10. Coupled field-circuit finite element models of a cold crucible furnace in its environment / P. Brun, V. Fireteanu, E. Sauvage, E. Rousset, A. I. Constantin // XVIII Intern. UIE-Congress Electrotechnol. for Material Proc. Hannover, Germany: Vulkan-Verlag, 2017. P. 1–6.
11. Смайт В. Р. Электростатика и электродинамика / пер. А. В. Гапонова, М. А. Миллера. М.: Изд-во иностранной литературы, 1954. 604 с.
12. 3-D thermal, hydrodynamic & magnetic modeling of elaboration of glass by induction in cold crucible / E. Sauvage, P. Brun, A. Bonnetier, J. Lacombe, E. Chauvin // WM2010 Conf. Phoenix, AZ. 2010. P. 1–11. URL: <https://archivedproceedings.econference.io/wmsym/2010/pdfs/10051.pdf> (дата обращения: 24.11.2024).
13. Study of the cold crucible design influence on the electrical parameters of a bottom-heated induction furnace for vitrification of radioactive waste / A. A. Khorshev, D. B. Lopukh, I. N. Skrigan, A. V. Vavilov, A. P. Martynov, P. V. Visotskiy // 2024 Conf. of Young Researchers in

Electr. and Electron. Engin. (ElCon). SPb.: IEEE, 2024. P. 370–374. doi: 10.1109/ElCon61730.2024.10468476.

14. Radioactive-waste vitrification by cold-crucible induction melting in a bottom-heated furnace / D. B. Lopukh, A. V. Vavilov, A. P. Martynov, I. N. Skrigan, A. A. Khorshev // Russ. Electr. Engin. 2023. Vol. 94, no. 1. P. 39–45. doi: 10.3103/S1068371223010066.

15. Исследование остекловывания имитаторов высокоактивных отходов индукционной плавкой в холодном тигле с донным нагревом / А. А. Хоршев, Д. Б. Лопух, И. Н. Скриган, А. В. Вавилов, А. П. Мартынов // Сб. докл. VI науч.-техн. сем. «Проблемы переработки и кондиционирования радиоактивных отходов». СПб.: Техн. академия «РОСАТОМ», 2023. С. 113–122.

Информация об авторе

Хоршев Алексей Алексеевич – ассистент кафедры электротехнологической и преобразовательной техники СПбГЭТУ «ЛЭТИ»; научный сотрудник лаборатории технологии и процессов отверждения радиоактивных отходов, АО «Радиовый институт им. В. Г. Хлопина», 2-й Муринский пр., д. 28, Санкт-Петербург, 194021, Россия.

E-mail: aahorshev@yandex.ru

Лопух Дмитрий Борисович – канд. техн. наук, доцент кафедры электротехнологической и преобразовательной техники СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: dblopukh@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0001-7364-1915>

Вавилов Антон Валерьевич – канд. техн. наук, доцент кафедры электротехнологической и преобразовательной техники СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: avavolov@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0002-3506-0615>

Скриган Илья Николаевич – канд. техн. наук, доцент кафедры электротехнологической и преобразовательной техники СПбГЭТУ «ЛЭТИ»; начальник лаборатории технологии и процессов отверждения радиоактивных отходов, АО «Радиовый институт им. В. Г. Хлопина», 2-й Муринский пр., д. 28, Санкт-Петербург, 194021, Россия.

E-mail: ilya.skrigan@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0002-4996-3663>

Высоцкий Павел Викторович – аспирант, инженер кафедры электротехнологической и преобразовательной техники СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: pavelv2512@mail.ru

Мартынов Александр Петрович – доцент кафедры электротехнологической и преобразовательной техники СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: apmartynov@yandex.ru

<https://orcid.org/0009-0004-9544-9923>

Вклад авторов:

Хоршев А. А. – настройка моделей и проведение расчетов.

Лопух Д. Б. – общее руководство, выводы и рекомендации по конструкциям печей.

Вавилов А. В. – обработка результатов расчетов.

Скриган И. Н. – методология проведения исследования.

Высоцкий П. В. – обзор научных источников.

Мартынов А. П. – анализ электрических параметров печей.

References

1. Petrov Ju. B., Ratnikov D. G. Holodnye tigli. M.: Metallurgija, 1972. 112 s. (In Russ.).

2. Petrov Ju. B. Indukcionnaja plavka okislov. L.: Jenergoatomizdat, 1983. 104 s. (In Russ.).

3. Chemically durable iron phosphate glasses for Vitrifying Sodium Bearing Waste (SBW) using Conventional

and Cold Crucible Induction Melting (CCIM) techniques / Ch. W. Kim, C. S. Ray, D. Zhu, D. E. Day, D. Gombert, A. Alloy, A. Moguš-Milanković, M. Karabulut // J. of Nuclear Materials. 2003. Vol. 322, no. 2. P. 152–164. doi: 10.1016/S0022-3115(03)00325-8.

4. Petrov Ju. B., Kanaev I. A. Indukcionnye pechi dlja plavki oksidov. Ser. «Bibliotekha vysokochastotnika–jelektrotermista» / pod red. A. N. Shamova. L.: Politehnika, 1991. 55 s. (In Russ.).

5. Melting and draining tests on glass waste form for the immobilization of Cs, Sr, and rare-earth nuclides using a cold-crucible induction melting system / J.-H. Choi, B. Lee, Ki-R. Lee, H. W. Kang, H. J. Eom, H. S. Park // Nuclear Engin. and Technol., 2022. Vol. 54, no. 4. P. 1206–1212. doi: 10.1016/j.net.2021.09.041.

6. Kuz'minov Ju. S., Lomonova E. E., Osiko V. V. Tugoplavkie materialy iz holodnogo tiglja. M.: Nauka, 2004. 372 s. (In Russ.).

7. Cold-crucible design parameters for next generation HLW melters / D. Gombert, J. Richardson, A. Aloy, D. Day // WM'02 Conf. 2002, Tucson, AZ. P. 1–9. URL: <https://archivedproceedings.econference.io/wmsym/2002/Proceedings/18/126.pdf> (data obraschenija: 27.03.2025).

8. Tir L. L., Gubchenko A. P. Indukcionnye plavil'nye pechi dlja processov povyshennoj tochnosti i chistoty. M.: Jenergoatomizdat, 1988. 120 s. (In Russ.).

9. Jeksperimental'nye i teoreticheskie issledovanija indukcionnyh pechej s holodnymi tigljami i donnym nagrevom dlja osteklovyvanija radioaktivnyh othodov / D. B. Lopukh, A. V. Vasilov, A. A. Khorshev, I. N. Skrigan, A. P. Martynov // Radioaktivnye othody. 2022. T. 21, № 4. S. 13–23. (In Russ.).

10. Coupled field-circuit finite element models of a cold crucible furnace in its environment / P. Brun, V. Fireteanu, E. Sauvage, E. Rousset, A. I. Constantin //

XVIII Intern. UIE-Congress Electrotechnol. for Material Proc. Hannover, Germany: Vulkan-Verlag, 2017. P. 1–6.

11. Smajt V. R. Jelektrostatika i jelektrodinamika / per. A. V. Gaponova, M. A. Millera. M.: Izd-vo inostrannoje literatury, 1954. 604 s. (In Russ.).

12. 3-D thermal, hydrodynamic & magnetic modeling of elaboration of glass by induction in cold crucible / E. Sauvage, P. Brun, A. Bonnetier, J. Lacombe, E. Chauvin // WM2010 Conf. Phoenix, AZ. 2010. P. 1–11. URL: https://archivedproceedings.econference.io/wmsym/2010/pdfs/10051.pdf (data obraschenija: 24.11.2024).

13. Study of the cold crucible design influence on the electrical parameters of a bottom-heated induction furnace for vitrification of radioactive waste / A. A. Khorshev, D. B. Lopukh, I. N. Skrigan, A. V. Vasilov, A. P. Martynov, P. V. Visotskiy // 2024 Conf. of Young Researchers in Electr. and Electron. Engin. (ElCon). SPb.: IEEE, 2024. P. 370–374. doi: 10.1109/ElCon61730.2024.10468476.

14. Radioactive-waste vitrification by cold-crucible induction melting in a bottom-heated furnace / D. B. Lopukh, A. V. Vasilov, A. P. Martynov, I. N. Skrigan, A. A. Khorshev // Russ. Electr. Engin. 2023. Vol. 94, no. 1. P. 39–45. doi: 10.3103/S1068371223010066.

15. Issledovanie osteklovyvanija imitatorov vysoko-aktivnyh othodov indukcionnoj plavkoj v holodnom tigre s donnym nagrevom / A. A. Khorshev, D. B. Lopukh, I. N. Skrigan, A. V. Vasilov, A. P. Martynov // Sb. dokl. VI nauch.-tehn. sem. «Problemy pererabotki i kondicionirovanija radioaktivnyh othodov». SPb.: Tehn. akademija «ROSATOM» 2023. S. 113–122. (In Russ.).

Information about the author

Alexey A. Khorshev – Assistant of the Department of Electrotechnological and Transformative Engineering, Saint Petersburg Electrotechnical University; Researcher at the Laboratory of Technology and Processes of Solidification of Radioactive Waste, JSC «V. G. Khlopin Radium Institute», 2nd Murinsky av., 28, Saint Petersburg, 194021, Russia.
E-mail: aahorshev@yandex.ru

Dmitry B. Lopukh – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Electrotechnological and Transformative Engineering, Saint Petersburg Electrotechnical University.
E-mail: dblopukh@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0001-7364-1915>

Anton V. Vasilov – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Electrotechnological and Transformative Engineering, Saint Petersburg Electrotechnical University.
E-mail: avvavolov@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-3506-0615>

Ilya N. Skrigan – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Electrotechnological and Transformative Engineering, Saint Petersburg Electrotechnical University; Head of the Laboratory of Technology and Processes of Solidification of Radioactive Waste, JSC «V. G. Khlopin Radium Institute», 2nd Murinsky av., 28, Saint Petersburg, 194021, Russia.
E-mail: ilya.skrigan@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4996-3663>

Pavel V. Vysotsky – postgraduate student, an engineer at the Department of Electrotechnological and Transformative Engineering, Saint Petersburg Electrotechnical University.
E-mail: pavelv2512@mail.ru

Alexander P. Martynov – Associate Professor of the Department of Electrotechnological and Transformative Engineering, Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: apmartynov@yandex.ru

<https://orcid.org/0009-0004-9544-9923>

Author contribution statement:

Khorshev A. A. – setting up models and performing calculations.

Lopukh D. B. – general guidance, conclusions and recommendations on furnace designs.

Vavilov A. V. – processing of calculation results.

Skrigan I. N. – research methodology.

Vysotsky P. V. – review of scientific sources.

Martynov A. P. – analysis of electrical parameters of furnaces.

Статья поступила в редакцию 23.01.2025; принята к публикации после рецензирования 28.03.2025; опубликована онлайн 26.05.2025.

Submitted 23.01.2025; accepted 28.03.2025; published online 26.05.2025.
