

## Численное моделирование варки стекла с имитаторами радиоактивных отходов в индукционных печах с холодным тиглем и донным нагревом

А. А. Хоршев<sup>1,2</sup>, Д. Б. Лопух<sup>1</sup>✉, А. В. Вавилов<sup>1</sup>, И. Н. Скриган<sup>1,2</sup>,  
А. П. Мартынов<sup>1</sup>, П. В. Высоцкий<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> АО «Радиевый институт им. В. Г. Хлопина», Санкт-Петербург, Россия

✉ dblopukh@yandex.ru

**Аннотация.** Представлены результаты численного исследования зависимости электрических параметров печей индукционной плавки в холодном тигле (ИПХТ) с донным нагревом (ИПХТ-ДН) от наличия электрического замыкания донных секций в периферийной зоне тигля. Исследование проводилось с помощью трехмерного численного моделирования электромагнитного поля (3D ЭМ-модели). Выполнен ряд расчетов для печей ИПХТ-ДН с холодным тиглем из меди и нержавеющей стали и с донными секциями различного типа. Установлено, что коэффициент мощности индуктора снижается на 19–31 % при замыкании медных донных секций тигля на замыкающую прямую шину, тогда как электрический коэффициент полезного действия (КПД) индуктора изменяется незначительно на 2.0–3.6 %. При замыкании донных секций тигля из меди на боковую стенку электрический КПД индуктора падает на 10 %, а  $\cos \varphi$  индуктора – на 48 %. Для холодных тиглей из нержавеющей стали, используемых для остекловывания радиоактивных отходов, замыкание донных секций тигля на боковую стенку на оборот приводит к незначительному снижению коэффициента мощности индуктора на 2.5–8.0 %, тогда как электрический КПД индуктора уменьшается значительно – на 15–30 %. Учитывая, что электрическая активная мощность в ванне расплава пропорциональна произведению коэффициента мощности и электрического КПД индуктора, можно считать, что изменение эффективности индукционного нагрева при замыкании донных секций тигля незначительно зависит от материала холодного тигля. С увеличением диаметра холодного тигля при постоянных размерах индуктора влияние замыкания донных секций тигля на электрические параметры печи существенно ослабляется, что компенсирует негативное влияние замыкания донных секций. Установлено, что для увеличения электрического КПД и  $\cos \varphi$  индуктора размеры индуктора следует выбирать такими, чтобы расстояние между внешним витком индуктора и боковой стенкой тигля находилось в оптимальном диапазоне 120...150 мм. Определено влияние периметра поперечного сечения донных секций на электрический КПД и  $\cos \varphi$  индуктора. На основе полученных данных сформулирован вывод о целесообразности применения конструкции ИПХТ-ДН с электрически замкнутыми донными секциями в периферийной зоне холодного тигля с целью повышения надежности работы и герметичности печи ценой незначительного снижения электрических параметров индуктора.

**Ключевые слова:** индукционная плавка, холодный тигель, остекловывание радиоактивных отходов, численное моделирование, надежность печи

**Для цитирования:** Численное моделирование варки стекла с имитаторами радиоактивных отходов в индукционных печах с холодным тиглем и донным нагревом / А. А. Хоршев, Д. Б. Лопух, А. В. Вавилов, И. Н. Скриган, А. П. Мартынов, П. В. Высоцкий // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2024. Т. 17, № 10. С. 113–127. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-10-113-127.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## Numerical Simulation of Glass Melting with Radioactive Waste in Induction Furnaces with a Cold Crucible and Bottom Heating

A. A. Horshev<sup>1,2</sup>, D. B. Lopukh<sup>1</sup>, A. V. Vavilov<sup>1</sup>,  
I. N. Skrigan<sup>1,2</sup>, A. P. Martynov<sup>1</sup>, P. V. Vysotsky<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

<sup>2</sup> JSC Khlopin Radium Institute, Saint Petersburg, Russia

✉dblopukh@yandex.ru

**Abstract.** Presents the results of a numerical study of the electrical parameters dependence of induction melting furnaces in a cold crucible (IMCC) furnaces with bottom heating (IMCC-BH) on the presence of an electric circuit of the bottom sections in the peripheral zone of the crucible. The study was conducted using three-dimensional numerical simulation of the electromagnetic field (3D EM models). A number of calculations have been performed for IMCC-BH furnaces with a cold crucible made of copper and stainless steel and bottom sections of various types. It was found that the power factor of the inductor decreases by 19–31 % when the copper bottom sections of the crucible are connected to the straight closing bus, whereas the electrical efficiency of the inductor changes slightly by 2.0–3.6 %. When the bottom sections of the copper crucible are closed to the side wall, the electrical efficiency of the inductor decreases by 10 %, and the  $\cos \varphi$  of the inductor decreases by 48 %. For stainless steel cold crucibles used for radioactive waste vitrification, connecting the bottom sections of the crucible to the side wall, contrary, leads to a slight decrease in the power factor of the inductor by 2.5–8 %, while the electrical efficiency of the inductor significantly decreases by 15–30 %. Considering that the electric power in the melt pool is proportional to the result of multiplication of the power factor by the electric efficiency of the inductor, it can be assumed that the change in the efficiency of induction heating when closing the bottom sections of the crucible slightly depends on the material of the cold crucible. With an increase in the diameter of the cold crucible at constant inductor sizes, the effect of closing the bottom sections of the crucible on the electrical parameters of the furnace is significantly weakened, which compensates for the negative effect of closing the bottom sections. It was found that in order to increase the electrical efficiency and  $\cos \varphi$  of the inductor, the inductor dimensions should be chosen such that the distance between the outer coil of the inductor and the side wall of the crucible is in the optimal range of 120–150 mm. The influence of the perimeter of the cross-section of the bottom sections on the electrical efficiency and  $\cos \varphi$  of the inductor is determined. Based on the data obtained, a conclusion is formulated on the expediency of using the IMCC-BH design with electrically closed bottom sections in the peripheral zone of the cold crucible in order to increase the reliability and tightness of the furnace at the cost of a slight decrease in the electrical parameters of the inductor.

**Keywords:** induction melting, cold crucible, vitrification of radioactive waste, numerical modeling, furnace reliability.

**For citation:** Numerical Simulation of Glass Melting with Radioactive Waste in Induction Furnaces with a Cold Crucible and Bottom Heating / A. A. Horshev, D. B. Lopukh, A. V. Vavilov, I. N. Skrigan, A. P. Martynov, P. V. Vysotsky // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2024. Vol. 17, no. 10. P. 113–127. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-10-113-127.

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

**Введение.** Развитие атомной энергетики и радиохимических производств в России и за рубежом ставит перед современной инженерной наукой задачу кратного увеличения мощностей для переработки радиоактивных отходов (РАО) [1]. Наиболее сложны с точки зрения хранения и обращения жидкие высокоактивные отходы (ВАО), которые перед захоронением необходимо приве-

сти в соответствии с критериями приемлемости согласно НП-019-15. На данный момент остекловывание, основанное на включении радионуклидов в стеклоподобную матрицу, зарекомендовало себя как наиболее безопасный и эффективный способ иммобилизации ВАО. Метод ИПХТ позволяет проводить плавление материалов, в том числе и остекловывание радиоактивных отходов,

с высокой производительностью благодаря объемному выделению тепла непосредственно в расплаве и повышенной надежности работы печи благодаря гарнисажным условиям плавки [2]–[4]. В Ленинградском электротехническом институте работы по ИПХТ оксидных материалов проводятся с 1963 года, а в направлении остекловывания имитаторов РАО – с 1981 г. На комплексе в Маркуле (Франция) печь ИПХТ используется для остекловывания радиоактивных отходов также с 1980-х гг. [5]–[7]. В Корее [8] и в США [9] установки с печами ИПХТ используются для переработки ВАО. В России на Сибирском химическом комбинате (г. Северск) успешно запущена установка с печью ИПХТ для остекловывания среднеактивных отходов (САО) [10], а в данный момент проходят предпусковые испытания печи ИПХТ для остекловывания ВАО в Опытном-демонстрационном центре ФГУП «ГХК» (г. Железногорск) [11].

В свою очередь, повышение производительности установки остекловывания в классических печах ИПХТ с охватывающими индукторами ограничено плавильной площадью ванны расплава, где происходит синтез матрицы стекла, поскольку с увеличением диаметра холодного тигля, даже со снижением частоты тока при этом, происходит уменьшение теплового КПД плавки из-за снижения температуры расплава в центре ванны. В печах ИПХТ-ДН за счет подведения высокочастотной энергии к донной части расплава отсутствуют данные недостатки, что открывает широкие возможности к масштабированию печи, а следовательно, к повышению производительности. Подобная схема нагрева использована только в разработках авторов настоящей статьи [12], а также применена во Франции [13], [14]. Следует отметить, что в существующих публикациях отсутствуют подробные описания конструкций используемых печей ИПХТ-ДН. Особенность донного нагрева в печах таких обеспечивает следующие их преимущества [12]:

- боковая стенка холодного тигля выполняется цельносварной, что позволяет полностью герметизировать плавильное пространство печи;
- обеспечивается более равномерное распределение температуры на поверхности ванны расплава при увеличении ее диаметра, ограниченно только мощностью источника питания печи. При этом повышается удельная поверхностная производительность плавки;

- повышенный тепловой КПД печи благодаря возможности плавки с большой площадью плавильной поверхности и малой высотой ванны расплава;

- лучшее перемешивание и гомогенность расплава благодаря повышенной свободной конвекции при донном нагреве;

- упрощается дистанционная замена индуктора и холодного тигля при выработке ресурса, что особенно актуально при остекловывании ВАО.

- меньший объем высокорadioактивного расплава в тигле при выработке ресурса холодного тигля, что удешевляет его утилизацию.

Исследования, проведенные в этом направлении коллективом лаборатории ИПХТ, касались только печей ИПХТ-ДН с донными секциями, изолированными друг от друга и от боковой стенки тигля [12]. Однако при внедрении печей ИПХТ-ДН в радиохимические производства необходимо соблюдать требования к оборудованию объектов ядерного топливного цикла (НП-070-06), из которых следует, что:

- холодный тигель необходимо выполнять из нержавеющей немагнитной стали, стойкой к коррозии и пригодной для дезактивации;

- в конструкции печи не должно быть разъемных соединений (требование к оборудованию 1-го и 2-го классов безопасности);

- необходимо обеспечивать требования сейсмической стойкости, тогда как раздельное исполнение боковой стенки и дна холодного тигля значительно снижает жесткость и устойчивость конструкции печи.

Очевидным решением для радиохимических производств представляется использование цельносварного холодного тигля из нержавеющей стали, однако это может значительно снизить эффективность использования электрической энергии из-за снижения электрического КПД и коэффициента мощности индуктора, а также привести к экономической нецелесообразности использования печей ИПХТ-ДН по сравнению с традиционными печами ИПХТ с охватывающими индукторами.

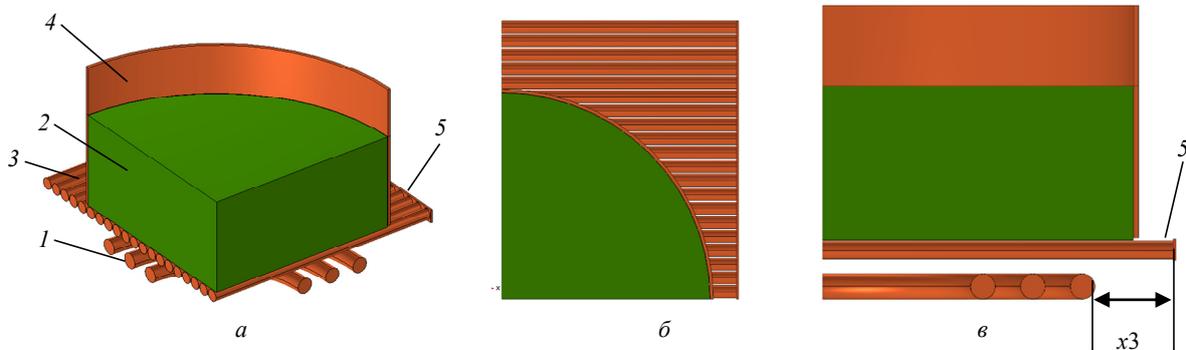
Размещение индуктора под дном холодного тигля приводит к уменьшению толщины донного гарнисажа, так как источники теплоты концентрируются в придонной части ванны расплава. Это обстоятельство способствует улучшению условий донного слива расплава стекла, но не способствует проведению остекловывания ВАО, содержащих благородные металлы (БМ), осаждение которых может приводить к электрическому замыканию донных секций и выходу холодного тигля из строя. Следовательно, печи ИПХТ-ДН

лучше всего подходят для остекловывания радиоактивных отходов, не содержащих благородные металлы и иные нерастворенные металлические включения. В настоящее время в России [15]–[17] и за рубежом [18], [19] ведутся научно-исследовательские работы, направленные на извлечение БМ из отработавшего ядерного топлива, что открывает новые возможности для применения печей ИПХТ-ДН при остекловывании ВАО.

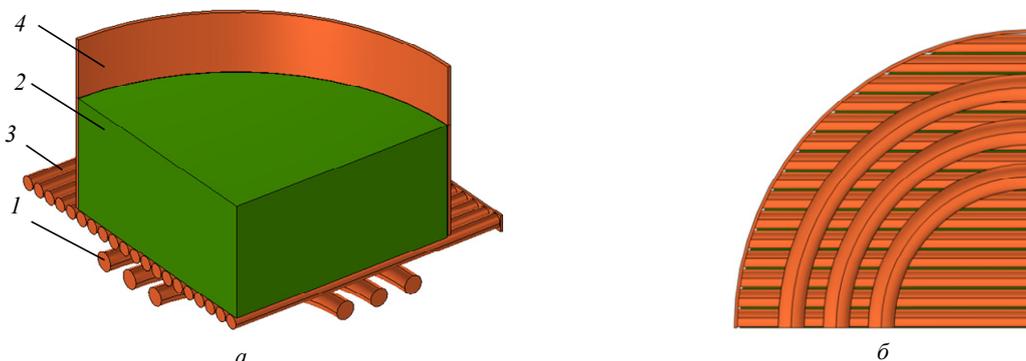
Таким образом, одним из критериев применения печей ИПХТ-ДН в цикле переработки радиоактивных отходов служит обоснование возможности использования цельносварных холодных тиглей с точки зрения энергетической эффективности индукционного нагрева. Ввиду того, что размеры холодного тигля определяются на этапе проектирования печи под конкретную задачу и напрямую зависят от требуемой производительности плавки, численное моделирование необходимо

провести для разных диаметров холодных тиглей. Использование трехмерных численных электромагнитных моделей [20] позволяет быстро и с высокой точностью получить распределенные и интегральные электромагнитные параметры печей с различными размерами и с разными формами донных секций без значительных финансовых затрат.

Цель данной работы состоит в определении влияния замыкания донных секций холодных тиглей из меди и нержавеющей стали на электрический КПД и  $\cos \phi$  индуктора, а также на ток и напряжение индуктора, с определением целесообразности использования печей ИПХТ-ДН с замыканием донных секций по сравнению с традиционными печами ИПХТ с охватывающими индукторами. Так как использование 3D-электрогидродинамических моделей требует гораздо больше расчетного времени и вычислительных ресурсов, в работе использована 3D-электромагнитная модель.



*Рис. 1.* Внешний вид модели исследуемой печи: *а* – тигель с ванной расплава в разрезе, 1/4 печи; *б* – донные секции с замыканием накоротко, замыкающая шина справа; *в* – вид сбоку, показано расстояние между индуктором и местом замыкания донных секций  $x3$ ; *1* – индуктор; *2* – ванна расплава; *3* – донные секции; *4* – боковая стенка; *5* – замыкающая шина  
*Fig. 1.* Appearance of the model of the furnace under study; *a* – crucible with a melt bath in the section, 1/4 of the furnace; *б* – bottom sections with a short circuit, the closing tire is on the right; *в* – side view, shows the distance between the inductor and the place of closure of the bottom sections  $x3$ ; *1* – inductor; *2* – melt pool; *3* – bottom sections; *4* – side wall; *5* – closing bus



*Рис. 2.* Внешний вид модели печи с замыканием донных секций на боковую стенку; *а* – тигель с ванной расплава в разрезе, 1/4 печи; *б* – вид снизу; *1* – индуктор; *2* – ванна расплава; *3* – донные секции; *4* – боковая стенка  
*Fig. 2.* Appearance of the furnace model with the bottom sections closed to the side wall; *a* – crucible with a melt pool in the section, 1/4 of the furnace; *б* – bottom view; *1* – inductor; *2* – melt pool; *3* – bottom sections; *4* – side wall

**1. Исследование замыкания донных секций медных тиглей.** Несмотря на то что обеспечение жесткости и сейсмической стойкости конструкции тигля требуется для промышленных печей, выполняемых из нержавеющей стали, проблема шунтирующих токов между секциями актуальна и для медных тиглей. Кроме того, верификация моделей печей ИПХТ-ДН с замкнутыми и разомкнутыми донными секциями по данным, полученным при проведении экспериментов с медными тиглями, позволит подтвердить справедливость сделанных выводов и для промышленных печей.

На рис. 1 представлен внешний вид модели печи ИПХТ-ДН с медным тиглем и замыканием донных секций плоской шиной по торцу донных трубок холодного тигля.

Размеры элементов печи и свойства их материалов представлены в табл. 1. Расчеты проводились для шести значений длины дна холодного тигля в диапазоне 450...700 мм. Также был проведен один расчет для тигля с замыканием донных секций на боковую стенку. Внешний вид модели этой печи представлен на рис. 2.

Ток индуктора подбирается для обеспечения требуемой активной мощности в ванне расплава, соответствующей рассчитанным ранее с помощью 2D-электрогидродинамической модели стационарным режимам ИПХТ боросиликатного стекла со средней температурой на поверхности ванны около 1200 °С [21]. На рис. 3 представлен пример распределения температуры в стационарном режиме плавки в объеме (а) и на свободной поверхности (б) ванны расплава с диаметром

Табл. 1. Параметры печи и свойства материалов (первая серия расчетов)

Tab. 1. Furnace parameters and properties of materials (first series of calculations)

Параметр	Значение
Частота тока, МГц	1.76
<i>Холодный тигель</i>	
Высота боковой стенки, мм	150
Толщина боковой стенки, мм	2
Зазор между донными секциями, мм	1.5
Материал холодного тигля	Медь М1
Удельное сопротивление материала холодного тигля, мкОм · м	0.02
Количество донных секций, шт	40
Внешний диаметр трубки донной секции, мм	12
Ширина дна, мм	538.5
Длина дна, мм	450...700
Толщина замыкающей шины, мм	2
<i>Индуктор</i>	
Внешний диаметр, мм	350
Внутренний диаметр, мм	190
Количество витков	3
Диаметр трубки индуктора, мм	16
Зазор между индуктором и донными секциями, мм	10
Материал индуктора	Медь М1
Удельное сопротивление материала индуктора, мкОм · м	0.02
<i>Ванна расплава</i>	
Высота, мм	100
Удельное сопротивление расплава (при температуре 1200 °С), Ом · см	5 [12]
Мощность в расплаве, кВт	47.6
Диаметр ванны расплава, м	0.4

400 и высотой 100 мм. Размеры расчетного региона представлены в форме цилиндра с диаметром  $D = 1$  м и высотой  $H = 1$  м. Граничное условие на

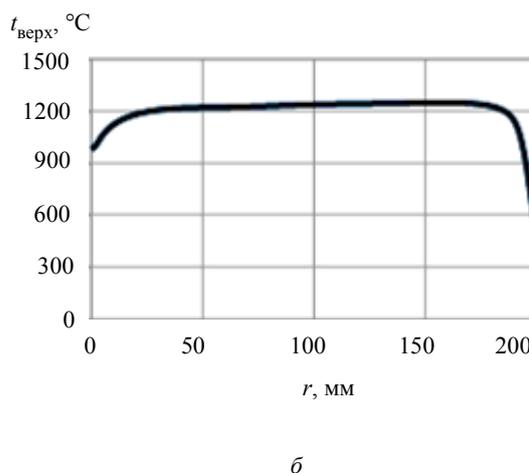
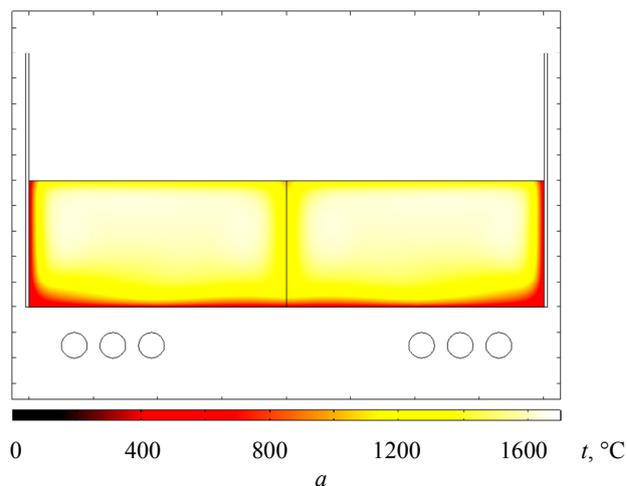


Рис. 3. Распределения температуры расплава, полученные с помощью 2D ЭГД модели [21]:

а – в объеме ванны расплава; б – на свободной поверхности ванны расплава; по оси абсцисс – радиус относительно оси ванны расплава

Fig. 3. Temperature distributions obtained using the 2D EHD model [21]:

а – in the volume of the melt pool; б – on the free surface of the melt pool; on the axis of the abscissa is the radius relative to the axis of the melt pool

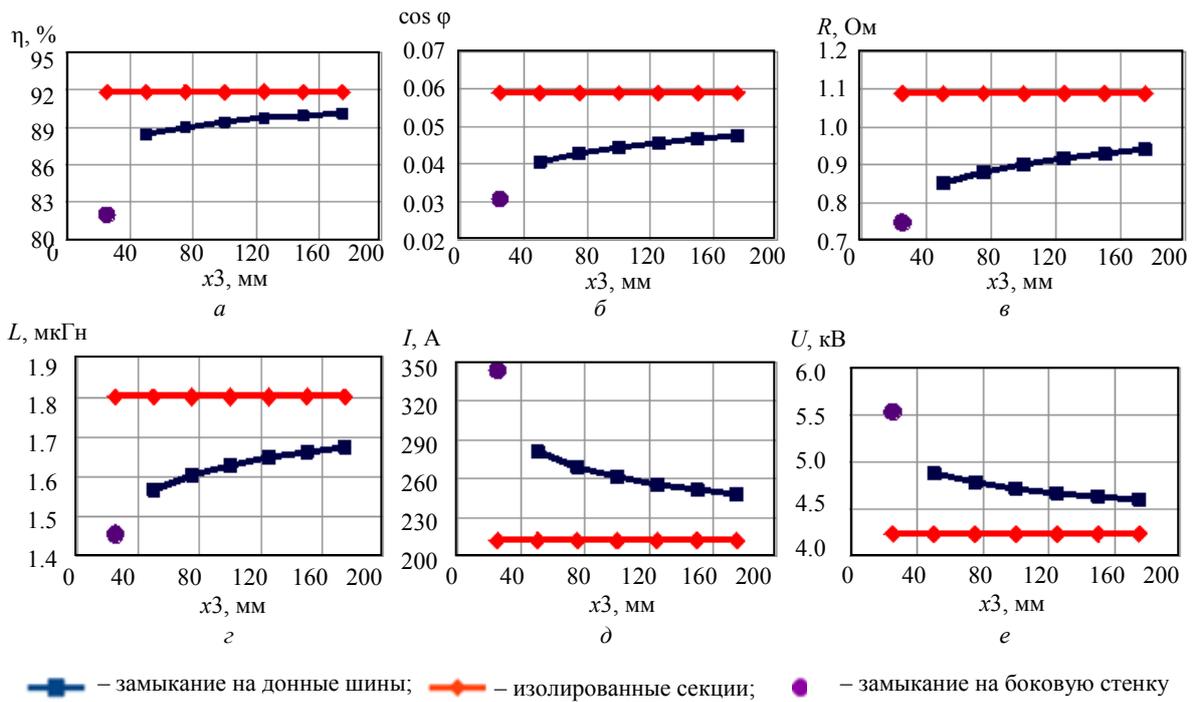


Рис. 4. Зависимости электрических параметров печей ИПХТ-ДН и медным холодным тиглем с замыканием донных секций от расстояния между внешним витком индуктора и местом замыкания донных секций: а – электрический КПД индуктора; б – коэффициент мощности индуктора  $\cos \varphi$ ; в – активное сопротивление индуктора  $R$ ; г – индуктивность индуктора  $L$ ; д – действующее значение тока индуктора  $I$ ; е – действующее значение напряжения индуктора  $U$

Fig. 4. Dependences of the electrical parameters of the IMCC-BH furnaces and a copper cold crucible with a bottom section closure on the distance between the outer coil of the inductor and the bottom section closure site: а – the electrical efficiency of the inductor; б – the power factor of the inductor  $\cos \varphi$ ; в – the active resistance of the inductor  $R$ ; г – the inductor inductance  $L$ ; д – RMS of the inductor current  $I$ ; е – RMS of the inductor voltage  $U$

границах расчетного региона представлено как свободная поверхность.

На рис. 4 представлены зависимости электрических параметров печей ИПХТ-ДН с медным тиглем и с замыканием донных секций тигля от расстояния между внешним витком индуктора и местом замыкания донных секций  $x_3$ . В частности, на рис. 4 показаны зависимости электрического КПД,  $\cos \varphi$ , активного сопротивления и индуктивности, а также действующих значений тока и напряжения индуктора.

Прямая с ромбическими маркерами на графиках соответствует параметрам печей с изолированными донными секциями, кривая с квадратными маркерами – параметрам печей с замыканием донных секций на шины, круглый маркер – параметрам печей с замыканием на боковую стенку.

Как можно заметить на рис. 4, а, электрический КПД слабо зависит от  $x_3$  при замыкании донных секций (замыкание) на шину и имеет достаточно высокое значение. Отличие составляет от 2 до 3.6 %. Замыкание на боковую стенку тигля снижает КПД более значительно: на 10 %. Замы-

кание значительно влияет на  $\cos \varphi$  (рис. 4, б), относительное снижение которого составляет от 19 до 31 % при замыкании на донные шины и при замыкании на боковую стенку на 48 %, т. е. почти в два раза при малых значениях  $x_3$ . Снижение  $\cos \varphi$  вместе с падением активного сопротивления и электрического КПД приводит к росту тока и напряжения, необходимых для поддержания одинаковых температурных режимов варки стекла. Однако анализ зависимости параметров от  $x_3$  на рис. 4 показывает улучшение эффективности индукционного нагрева при увеличении значения  $x_3$ . В частности, при изменении  $x_3$  от 50 до 175 мм значение электрического КПД увеличивается всего на 1.6 %, а  $\cos \varphi$  увеличивается на относительное значение 15.9 %. Полученные результаты свидетельствуют в основном о размагничивающем влиянии замыкания донных секций тигля на индуктор.

**2. Исследование замыкания донных секций тиглей из нержавеющей стали.** Электрическое замыкание донных секций тигля ИПХТ-ДН наи-

более актуально для тиглей из нержавеющей стали, которое обеспечивает жесткость и сейсмическую стойкость конструкции по требованиям радиохимических производств [НП-070-06]. Однако электрический КПД и коэффициент мощности печей ИПХТ с тиглями из нержавеющей стали значительно ниже, чем у печей с медными тиглями ввиду более высокого удельного сопротивления материала тигля. Дополнительное снижение энергетических параметров плавки из-за замыкания донных секций тигля может сделать варку стекла при ИПХТ-ДН энергетически менее эффективной. Для определения такого влияния проведено численное исследование.

**2.1. Исследование влияния диаметра холодного тигля и замыкания донных секций на электрические параметры индуктора с неизменными размерами.** Диаметр холодного тигля определяет производительность печи при неизменной температуре расплава на поверхности ванны и скорости движения расплава на этой поверхности. Кроме того, больший диаметр печи обеспечивает больший объем расплава, благодаря чему можно уменьшить количество сливов расплава до заполнения приемного контейнера, что также способствует повышению производительности печи.

Как показали экспериментальные и численные исследования зависимости тепловых параметров плавки от диаметра ванны расплава при ИПХТ-ДН боросиликатного стекла с имитаторами ВАО, увеличение отношения диаметра к высоте ванны расплава повышает тепловой КПД печи. Поэтому обоснование улучшения электрических параметров с увеличением диаметра позволит сделать однозначный выбор в пользу печей с большим диаметром и меньшей высотой ванны расплава. Особенно важно определить влияние диаметра печи с замкнутыми донными секциями, так как их электрические параметры будут заведомо хуже, чем у печей с изолированными секциями. Кроме того, на электрические параметры индуктора при замыкании донных секций могут влиять размеры и форма их поперечного сечения. Поэтому для получения более полных данных исследование проводится для печей с разными формами трубок, использованных для изготовления донных секций.

В отличие от медного тигля из подразд. 1, замыкание донных секций тигля из нержавеющей стали выполнено посредством сваривания их с боковой стенкой. Такая конструкция обеспечивает жесткость и устойчивость тигля к вибрационным нагрузкам, что актуально для промышленных печей.

В табл. 2 представлены размеры элементов печей и свойства материалов, использованные в расчетах. Условия определения тока индуктора и граничные условия такие же, как в предыдущих расчетах для медных тиглей. Размеры расчетного региона представлены в форме цилиндра,  $D = 1.5$  м,  $H = 1$  м.

Табл. 2. Размеры элементов печи и свойства их материалов (вторая серия расчетов)

Tab. 2. Dimensions of furnace elements and properties of their materials (second series of calculations)

Параметр	Значение
<i>Холодный тигель</i>	
Материал холодного тигля	Сталь 12X18H10T (AISI 321)
Удельное сопротивление материала холодного тигля, мкОм·м	0.72
Зазор между донными секциями, мм	1
Зазор между боковой стенкой и дном тигля в печах с изолированными секциями, мм	2
Количество донных секций в печах с изолированными секциями, шт	48 и 62
Ширина дна тигля с изолированными секциями, мм	807 и 817
Длина дна тигля с изолированными секциями, мм	807 и 817
<i>Индуктор</i>	
Зазор между индуктором и донными секциями, мм	15
<i>Ванна расплава</i>	
Мощность в расплаве (в зависимости от диаметра ванны расплава и типа донных секций), кВт	от 50 до 120 [21]

Другие размеры элементов печи и свойства их материалов такие же, как в табл. 1

На рис. 5 (а, б) представлен внешний вид модели с изолированными секциями, на рис. 5 (в, г) – с замкнутыми на боковую стенку холодного тигля.

Диаметры ванны расплава для печей с замкнутыми донными секциями выбирались такими, чтобы в них укладывалось целое количество донных секций и зазоров между ними. Расчеты проводились для пяти типов донных секций, параметры которых представлены в табл. 3. Для трубок типов 1 и 2 был выбран следующий ряд диаметров тигля: 417, 521, 625, 703 и 807 мм. Для трубок типов 3–5 ряд диаметров тигля следующий: 409, 511, 613, 715 и 817 мм. Все трубки донных секций имели скругление внешних углов с радиусом 2 мм.

На рис. 6 представлены зависимости электрических параметров печей ИПХТ-ДН с изолированными донными секциями разных типов. Для компактного представления результатов расчетов и сравнения электрических параметров печей с замкнутыми и изолированными секциями на гра-

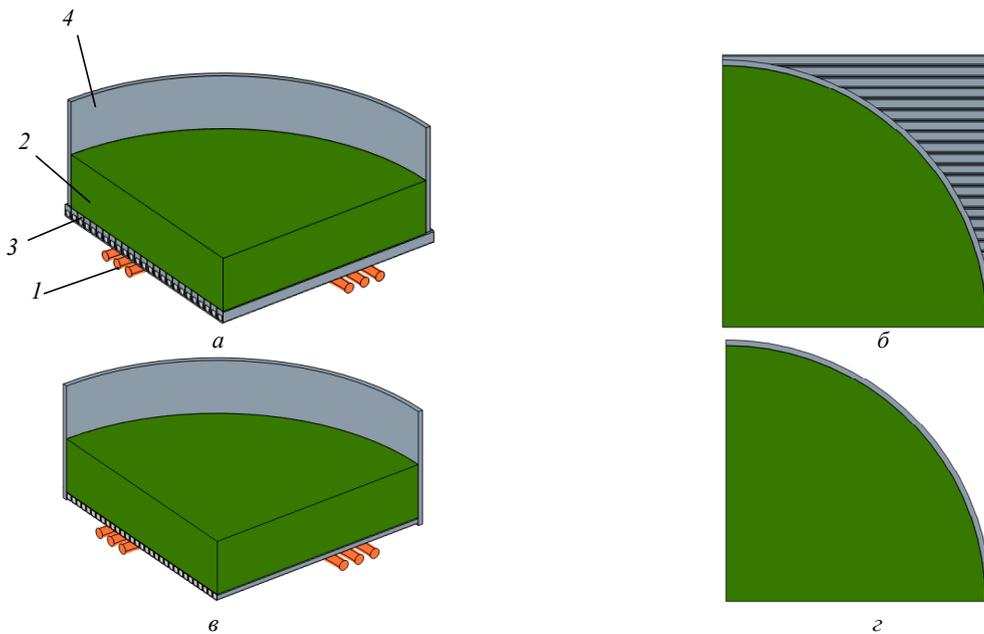


Рис. 5. Внешний вид моделей индукционных систем, 1/4 от всей печи: а – тигель с изолированными секциями, изометрия; б – тигель с изолированными секциями, вид сверху; в – тигель с замкнутыми секциями, изометрия; г – тигель с замкнутыми секциями, вид сверху; 1 – индуктор; 2 – ванна расплава; 3 – донные секции; 4 – боковая стенка

Fig. 5. Appearance of models of induction systems, 1/4 of the entire furnace: а – crucible with isolated sections, isometry; б – crucible with isolated sections, top view; в – crucible with closed sections, isometry; г – crucible with closed sections, top view; 1 – inductor; 2 – melt pool; 3 – bottom sections; 4 – side wall

Табл. 3. Размеры донных секций (вторая серия расчетов)  
Tab. 3. Dimensions of these sections (second series of calculations)

Тип донных секций	Форма сечения	Диаметр (высота), мм	Ширина, мм	Толщина стенки, мм	Наружный периметр, мм	Относительный периметр, %
1	Круг	12	–	1	37.7	100
2	Квадрат	12	12	1	44.6	132
3	Квадрат	16	16	3	60.6	161
4	Прямоугольник	18	16	Верхняя – 5, остальные – 3	64.6	171
5	Прямоугольник	23	16	Верхняя – 10, остальные – 3	74.6	198

фиках (рис. 7) представлены относительные величины, где выведено отношение электрических параметров, полученных для печей с замкнутыми и изолированными донными секциями при одинаковых диаметрах боковой стенки тигля.

Как можно заметить по кривым электрического КПД и  $\cos \phi$ , увеличение периметра донных секций снижает электрический КПД и  $\cos \phi$  печей. Наилучшие результаты наблюдаются для печей с круглыми секциями (тип 1), внешний периметр которых минимален и составляет 37.7 мм. Заметно падает электрический КПД на 17–39 % для трубок типа 2 с внешним периметром 44.6 мм, при этом  $\cos \phi$  практически не изменяется. С дальнейшим увеличением периметра донных секций указанные параметры снижаются еще сильнее.

Можно заметить, что электрические параметры тиглей с изолированными и замкнутыми секциями становятся тем ближе друг к другу, чем дальше внешний виток индуктора отстоит от боковой стенки тигля, т. е., чем больше величина  $x_3$ , (рис. 1, в). При этом значения относительных величин  $\cos \phi$ , индуктивности и активного сопротивления зависят от  $x_3$  на исследованном интервале почти линейно, тогда как графики электрического КПД, активного сопротивления, индуктивности, тока и напряжения имеют гораздо более пологие зависимости к концу интервала.

Также можно легко заметить, что снижение электрического КПД печи при замыкании донных секций намного сильнее проявляется для печей с донными секциями типов 3–5. Это значит, что

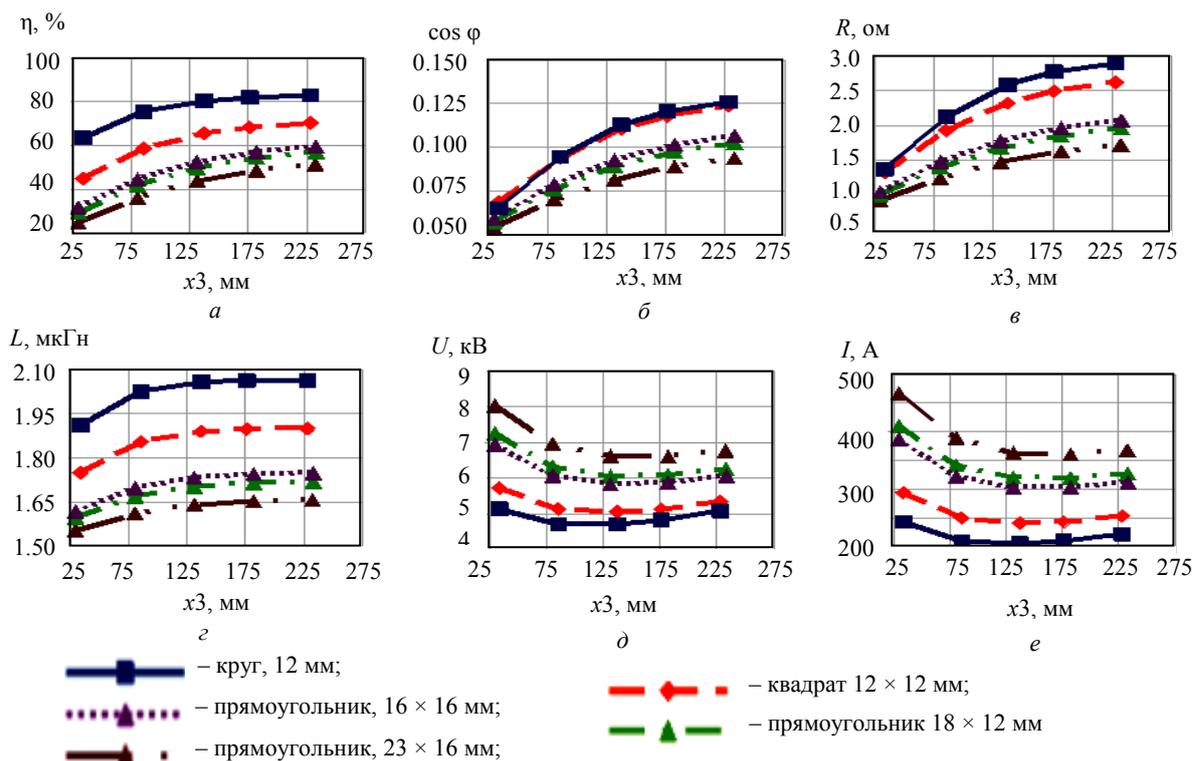


Рис. 6. Зависимости электрических параметров печей ИПХТ-ДН с изолированными секциями при одинаковых размерах ванны расплава и режимах плавки: *a* – электрический КПД индуктора; *b* –  $\cos \varphi$  (коэффициент мощности индуктора); *в* – активное сопротивление индуктора; *г* – индуктивность индуктора; *д* – напряжение на индукторе; *е* – ток индуктора.

Fig. 6. Dependences of the electrical parameters of IMCC-BH furnaces with insulated sections with the same size of the melt pool and melting modes: *a* – electric efficiency of the inductor; *b* –  $\cos \varphi$  (inductor power factor); *в* – active resistance of the inductor; *г* – inductor inductance; *д* – voltage on the inductor; *е* – inductor current.

чем больше периметр донных секций, тем сильнее снижается эффективность нагрева.

**2.2. Исследование влияния наружного диаметра индуктора и замыкания донных секций на электрические параметры индуктора при неизменном диаметре холодного тигля.** Исследование проводилось для печей с одинаковыми диаметрами холодных тиглей, разными диаметрами индуктора и с донными секциями типов 1, 2 и 5, см. с. 7. Как показали расчеты из подраздела 2.1 настоящей статьи (рис. 6 и 7), электрические параметры печей незначительно отличаются для донных секций типов 3, 4 и 5, поэтому, для секций типов 3 и 4 в этом подразделе расчеты не проводятся. Диаметр ванны расплава выбирался наиболее близким к 800 мм и составлял: для тиглей с секциями типов 1 и 2 – 807 мм, для тиглей с секциями типа 5 – 817 мм. Диаметр внешнего витка индуктора выбирался равным 350, 450, 550 и 650 мм. Зазор между витками индуктора оставался неизменным. Ток в индукторе подбирался таким же образом, как в предыдущих пунктах.

На рис. 8 представлены зависимости электрических параметров печей ИПХТ-ДН от расстояния  $x_3$  с изолированными и замкнутыми секция-

ми при одинаковых диаметрах холодного тигля для разных типов донных секций.

Так как вместо 5 типов донных секций исследованы только 3, результаты представлены в абсолютных значениях сразу для печей с изолированными и замкнутыми донными секциями тигля.

Зависимости электрического КПД и коэффициента мощности имеют максимум для печей с донными секциями всех типов, который находится в диапазоне значений  $x_3 = 120 \dots 150$  мм. Остальные параметры индуктора – ток, напряжение, активное сопротивление и индуктивность, изменяются в исследованном диапазоне  $x_3$  монотонно. Некоторое исключение составляет ток индуктора, который имеет постоянное значение в диапазоне  $x_3 = 75 \dots 125$  мм.

Необходимо отметить, что в рассматриваемом случае индуктивность индуктора изменяется в несколько раз в зависимости от выбранного типа донных секций холодного тигля, и особенно от расстояния  $x_3$ . Это обстоятельство необходимо учитывать при проектировании печей ИПХТ-ДН для обеспечения условий согласования индукционной системы с промышленным источником питания, или при задании требований к его производству.

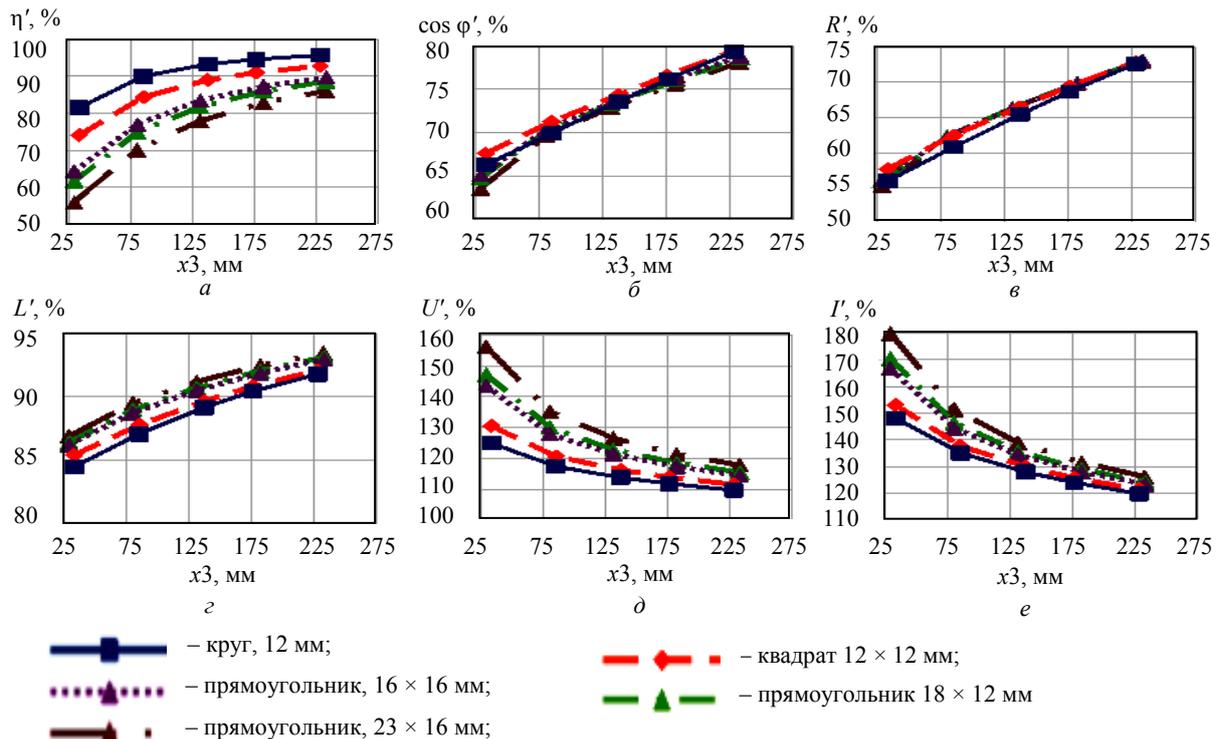


Рис. 7. Зависимости отношения электрических параметров печей ИПХТ-ДН с замкнутыми и изолированными секциями при одинаковых размерах ванны расплава и режимах плавки: а – электрический КПД; б –  $\cos \varphi$  (коэффициент мощности); в – активное сопротивление; г – индуктивность; д – напряжение на индукторе; е – ток индуктора.

Fig. 7. Dependences of the ratio of the electrical parameters of IMCC-BH furnaces with closed and isolated sections with the same size of the melt pool and melting modes: а – electrical efficiency; б –  $\cos \varphi$  (power factor); в – active resistance; г – inductance; д – voltage on the inductor; е – inductor current.

**Обсуждение результатов.** Результаты расчетов печей ИПХТ-ДН с медным тиглем показывают, что замыкание донных секций на донные шины и их удаление от индуктора значительно влияет на коэффициент мощности индуктора и незначительно – на электрический КПД. Удаление места замыкания донных секций от индуктора (величина  $x_3$ ) позволяет снизить негативный эффект от замыкания, однако на исследованном интервале значений  $x_3$  значения на зависимостях электрических параметров не достигают таковых для изолированных донных секций, будучи уже достаточно пологими к концу интервала. Следовательно, полностью компенсировать эффект уменьшения параметров от замыкания донных секций удалением места замыкания от индуктора удастся частично. Следовательно, с учетом влияния на электрические параметры индуктора наиболее оптимальным расстоянием  $x_3$  относится к диапазону 120...150 см и наименьший периметр донных секций.

Замыкание донных секций на боковую стенку тигля ухудшает электрические параметры индуктора значительно сильнее, чем при замыкании на

донные шины. Такой способ замыкания следует применять, только когда необходимо максимально увеличить прочность и сейсмостойкость конструкции.

Исследование, проведенное для печей ИПХТ-ДН с тиглями из нержавеющей стали, показало, что замыкание донных секций тигля влияет на снижение электрических параметров индуктора тем сильнее, чем меньше диаметр тигля при неизменном диаметре индуктора (см. рис. 7, а и б). Изменение электрического КПД практически прекращается при удалении боковой стенки тигля от индуктора более, чем на  $x_3 = 200$  мм. При малых значениях  $x_3$  относительное снижение электрического КПД индуктора значительно зависит от формы и периметра сечения донных секций, что отчетливо видно на рис. 8, а, что делает замыкание донных секций у печей малого диаметра исключительно невыгодным.

Сравнение зависимостей электрических параметров печей ИПХТ-ДН с замкнутыми и изолированными донными секциями от  $x_3$  при сохранении диаметра ванны расплава и изменении диаметра индуктора показывает наличие области

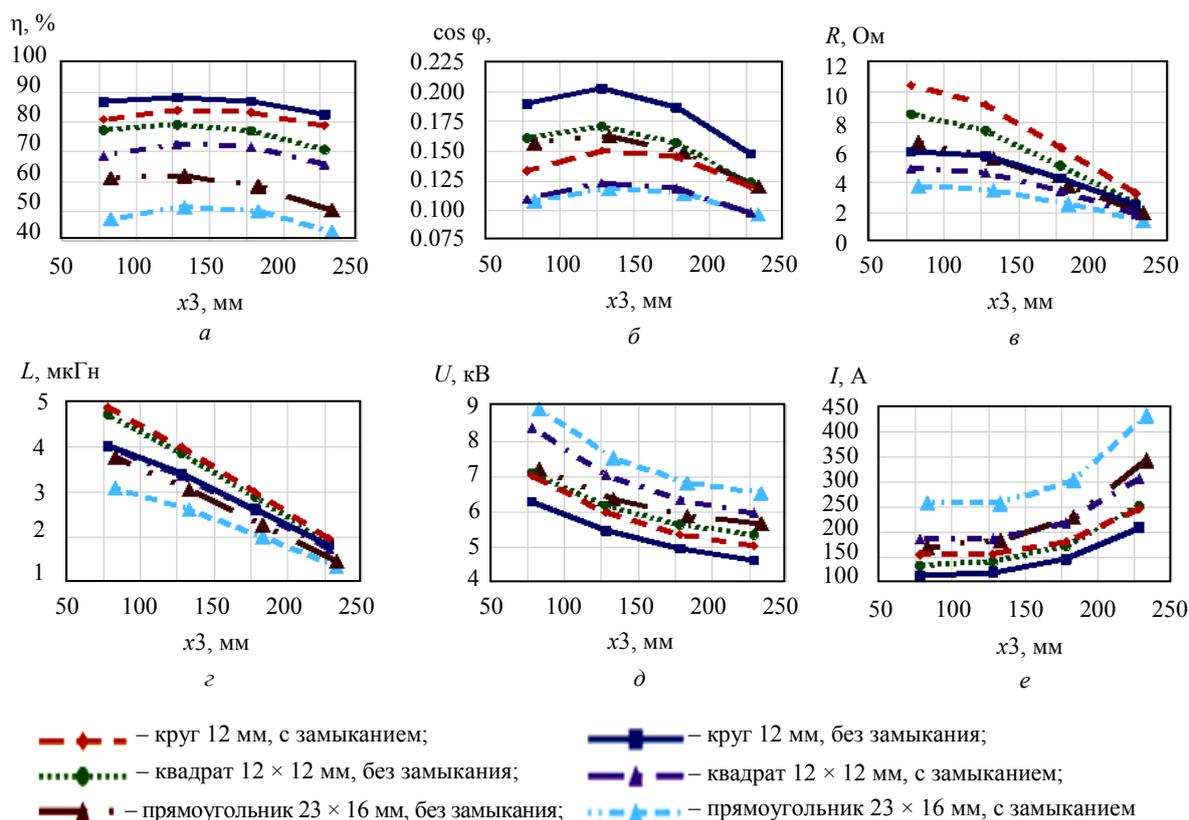


Рис. 8. Зависимости электрических параметров печей ИПХТ-ДН от величины  $x_3$  при одинаковом диаметре холодного тигля для разных типов донных секций

Fig. 8. Dependences of the electrical parameters of the IMCC-BH furnaces on the value  $x_3$  with the same diameter of the cold crucible for different types of bottom sections

оптимальных значений  $x_3$ . В диапазоне  $x_3 = 125 \dots 175$  мм наблюдается максимум электрического КПД и  $\cos \varphi$ . Это явление не зависит от замыкания донных секций тигля, следовательно, для печей большого диаметра независимо от их конструкции следует выбирать диаметр внешнего витка индуктора таким, чтобы попасть в оптимальную область значений  $x_3$ .

**Заключение.** С помощью численного 3D-моделирования электромагнитных процессов в печах ИПХТ-ДН установлено следующее:

1. При электрическом замыкании донных секций на прямую замыкающую шину у холодных тиглей из меди  $\cos \varphi$  индуктора снижается на 19...31 %, а электрический КПД индуктора – на 2...3.6 % в зависимости от размеров элементов индукционной системы. При замыкании медных донных секций на боковую цилиндрическую стенку  $\cos \varphi$  индуктора падает на 48 %, а электрический КПД индуктора – на 10 %. При этом абсолютное значение электрического КПД остается достаточно высоким и может составлять до 82 %.

2. Для тиглей из нержавеющей стали электрическое замыкание донных секций на боковую

стенку тигля приводит к снижению  $\cos \varphi$  индуктора на 20...35 %, а электрического КПД индуктора – на 5...45 % в зависимости от размеров элементов индукционной системы. Однако правильный выбор конструкции тигля и диаметра индуктора может свести влияние замыкания донных секций на электрические параметры к минимуму.

3. Увеличение диаметра ванны расплава у печи с нержавеющей тиглем приводит к повышению электрического КПД и  $\cos \varphi$  индуктора независимо от типа донных секций и наличия электрического замыкания между ними. Так, увеличение диаметра тигля с 400 до 800 мм может повысить электрический КПД индуктора на 20–30 %, или в 1.4...2.5 раза, в зависимости от размеров элементов индукционной системы. При этом  $\cos \varphi$  индуктора при удвоении диаметра холодного тигля из нержавеющей стали повышается почти в 2 раза. Для тиглей из меди следует ожидать такого же эффекта.

4. Расстояние между боковой стенкой тигля и внешним витком индуктора следует выбирать из диапазона 120...150 мм для дополнительного увеличения электрического КПД и  $\cos \varphi$  индуктора.

5. Для повышения срока службы нержавеющей холодной тигля необходимо увеличивать толщину донных секций, обращенных к ванне расплава, и их высоту. Однако это обстоятельство снижает электрический КПД и  $\cos \phi$  индуктора. Так, удвоение периметра донных секций снижает электрический КПД на 30–40 % и  $\cos \phi$  индуктора – на 25–30 %. При этом чем больше высота и периметр донной секции, тем меньше влияет это увеличение на электрические параметры индуктора.

Таким образом, электрические и энергетические параметры печей ИПХТ-ДН достигают высоких значений, пригодных для создания про-

мышленных установок остекловывания РАО. Даже при замыкании донных секций электрический КПД печей может достигать 50–80 %, а коэффициент мощности – значений 0.1...0.125, что с учетом повышенного термического КПД соответствует показателям промышленных печей с охватываемыми индукторами. Таким образом, повышенная прочность и надежность цельносварной конструкции тигля печи ИПХТ-ДН может сочетаться с достаточно высокими показателями энергоэффективности плавки, что позволяет рекомендовать ее для промышленного использования.

### Список литературы

1. Маркитанова Л. И. Проблемы обезвреживания радиоактивных отходов // Науч. журн. НИУ ИТМО. Сер.: Экономика и экологический менеджмент. 2015. № 1. С. 140–146.
2. Лопух Д. Б., Неженцев В. В., Петров Ю. Б. Варка стекла в индукционной печи с холодным тиглем // Электромеханика. 1984. № 9. С. 64–69.
3. Лебедев В. В., Стефановский С. В. Применение технологии ИПХТ для переработки радиоактивных отходов: опыт МосНПО «РАДОН» // Вопр. радиационной безопасности. 2011. № 2 (62). С. 16–34.
4. Получение высокотемпературных материалов методом прямого высокочастотного плавления в холодном контейнере / В. И. Александров, В. В. Осико, А. М. Прохоров, В. М. Татаринцев // Успехи химии. 1978. Т. 47, № 3. С. 385–427. doi: 10.1070/RC1978v047n03ABEH002214.
5. French nuclear waste vitrification: State of the art and future developments / C. Ladirat, R. Boen, A. Jouan, J. P. Moncouyoux // Ceramic Eng. & Sci. Proc. Columbus, OH: Am. Ceramic Soc., 1995. P. 11–14. doi: 10.1002/9780470314661.ch2.
6. Vitrification of HLW produced by uranium/molybdenum fuel Reprocessing in COGEMA's Cold Crucible Melter / R. Do Quang, V. Petitjean, F. Hollebecque, O. Pincet, T. Flament, A. Prod'homme // 9<sup>th</sup> Int. Conf. on Radioactive Waste Management and Environmental Remediation. Oxford, England: ASME, 2003. P. 1585–1591. doi: 10.1115/ICEM2003-4594.
7. A milestone in vitrification: the replacement of a «hot metallic crucible» with a «cold crucible melter» in a hot cell at the La Hague plant, France / S. Robert, F. Gassot Guilbert, B. Carpentier, S. Naline, F. Gouyau, C. Girold // ASME 13<sup>th</sup> Int. Conf. on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management. Tsukuba, Japan: ASME, 2010. P. 399–406. doi: 10.1115/ICEM2010-40188.
8. 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, K.-R. Lee, H. W. Kang, H. J. Eom, H.-S. Park // Nuclear Engin. and Technol. Vol. 54, iss. 4. 2022. P. 1206–1212.
9. Hanford high level waste processing in a cold crucible melter: test results obtained in the framework of the TWRS-P contract / E. Nicaise, C. Veyer, S. Goetghebeur, P. Hrma, E. V. Morrey, G. L. Smith, J. D. Vienna, J. L. Dusossoy, C. Ladirat, A. Ledoux, M. Puyou // Waste Management Conf. Tuscon, Arizona. 2010. 11 p. URL: <https://archivedproceedings.econference.io/wmsym/1999/48/48-6.pdf> (дата обращения: 29.10.2024)
10. Состояние разработок АО «ВНИИНМ» по созданию индукционных плавителей с холодным тиглем (ИПХТ) для остекловывания жидких радиоактивных отходов (ЖРО) / В. А. Кащеев, Д. Ю. Сунцов, Т. В. Смелова, Н. Д. Мусатов, А. В. Демин, А. И. Тучкова, И. Н. Шестоперов, П. М. Родин // Тез. докл. на конф. «Радиохимия-2022». М.: Изд-во ООО «Месол», 2022. 281 с.
11. 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 / A. Yu. Abashkin, I. N. Skrigan, E. Yu. Ivanov, A. O. Pleshakov, D. B. Lopukh, A. V. Vavilov, A. P. Martynov // MRS Advances. 2020. Vol. 5. P. 83–92. doi: 10.1557/adv.2020.146.
12. 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. №4(21). С. 13–23.
13. Advanced cold crucible melter pilot plant characteristic and first results on HLLW surrogates / C. Ladirat, J. Lacombe, R. Do Quang, A. Prod'homme // WM'04 Conf., Tucson, AZM-4223, 2004. 7 p. URL: <https://archivedproceedings.econference.io/wmsym/2004/pdfs/4223.pdf> (дата обращения: 29.10.2024).
14. French Industrial Vitrification Plant: 30 Years old, Robust and still Innovating / E. Chauvin, R. Do Quang, F. Drain, P. M. Fabrice // Proc. of Global. Paris, France, 2009. URL: [https://www.researchgate.net/publication/284156723\\_French\\_Industrial\\_Vitrification\\_Plant\\_30\\_Years\\_old\\_Robust\\_and\\_still\\_Innovating](https://www.researchgate.net/publication/284156723_French_Industrial_Vitrification_Plant_30_Years_old_Robust_and_still_Innovating) (дата обращения: 29.10.2024).

15. Извлечение металлов платиновой группы из высокоактивных рафинатов переработки ОЯТ / П. В. Давыдова, О. Н. Егорова, Ю. И. Корнейко, В. А. Королев, Л. В. Красников, А. А. Лумпов, Д. В. Рябков // Тез. докл. на конф. «Радиохимия-2022». X Росс. конф. с междунар. уч. Санкт-Петербург. М.: ООО «Месол», 2022. С. 369.

16. Сорбенты на основе активированного угля и гексацианоферрата (II) железа (III) для извлечения металлов платиновой группы из азотнокислых растворов / Ю. И. Корнейко, П. В. Давыдова, О. Н. Егорова, В. А. Королев, Н. В. Сапожникова // Тез. докл. на конф. «Радиохимия-2022». X Росс. конф. с междунар. уч. Санкт-Петербург. М.: ООО «Месол», 2022. С. 107.

17. Извлечение палладия из азотнокислых растворов переработки отработавшего ядерного топлива / П. В. Давыдова, Ю. И. Корнейко, В. А. Королев, Л. В. Красников, Ю. Л. Крецер // Радиохимия. 2022. Т. 64, № 3. С. 213–216. doi: 10.31857/S0033831122030029.

18. Precise stepwise recovery of platinum group metals from high level liquid waste based on SDB poly-

mer modified SiO<sub>2</sub> / K. Wu, N. Shunyan, X. Yin, S. Xu, Y. Zhong, Zh. Li, L. Chen, F. M. Hamza, T. Fujita, Yu. Wei // Dalton Transactions. 2024. Iss. 4. P. 53. doi: 10.1039/D3DT03469K.

19. Recovery of platinum group metal resources from high-level radioactive liquid wastes by non-contact photoreduction / W. Hanqin, W. Yi, Li Fuhai, M. Yusa, Ya. Shinichi, Ch. Sheng // J. of Hazardous Materials. 2023. Vol. 458. Art. 131852. doi: 10.1016/j.jhazmat.2023.131852.

20. Индукционная плавка кориума и варка стекла в холодном тигле. Свойства и моделирование / Д. Б. Лопух, С. В. Бешта, А. П. Мартынов, А. В. Вавилов, И. Н. Скриган. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2021. 178 с.

21. Study of the influence of the melt pool diameter on the electrical and thermal parameters of an induction melting furnace in a cold crucible with bottom heating / A. Khorshv, D. Lopukh, A. Vavilov, I. Skrigan // Conf. on Electr. Power Engin. (UralCon). Magnitogorsk, Russia: IEEE, 2023. P. 561–567. doi: 10.1109/UralCon59258.2023.10291099.

### Информация об авторах

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

E-mail: [dblopukh@yandex.ru](mailto:dblopukh@yandex.ru)

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

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

E-mail: [apmartynov@yandex.ru](mailto:apmartynov@yandex.ru)

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

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

E-mail: [avvavilov@yandex.ru](mailto:avvavilov@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, АО «Радиовый институт им. В. Г. Хлопина», 2-й Мушинский пр., д. 28, Санкт-Петербург, 194021, Россия.

E-mail: [ilya.skrigan@yandex.ru](mailto:ilya.skrigan@yandex.ru)

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

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

E-mail: [aahorshev@yandex.ru](mailto:aahorshev@yandex.ru)

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

E-mail: [pavelv2512@mail.ru](mailto:pavelv2512@mail.ru)

### Вклад авторов:

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

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

Скриган И. Н. – методология проведения исследования.

Вавилов А. В. – обработка результатов расчетов.

Мартынов А. П. – анализ электрических параметров печей.

Высоцкий П. В. – обзор научных источников.

## References

1. Markitanova L. I. Problemy obezvezhivaniya radioaktivnykh othodov // Nauch. zhurn. NIU ITMO. Seriya: Jekonomika i jekologicheskij menedzhment. 2015. № 1. S. 140–146. (In Russ.).
2. Lopuh D. B., Nezhencev V. V., Petrov Ju. B. Varka stekla v indukcionnoj pechi s holodnym tiglem // Jelektromehaniika. 1984. №9. S. 64–69. (In Russ.).
3. Lebedev V. V., Stefanovskij S. V. Primenenie tehnologii IPHT dlja pererabotki radioaktivnykh othodov: opyt MosNPO «RADON» // Vopr. radiacionnoj bezopasnosti. 2011. №2(62). S. 16–34. (In Russ.).
4. Poluchenie vysokotemperaturnykh materialov metodom prjamoogo vysokochastotnogo plavljenija v holodnom kontejnere / V. I. Aleksandrov, V. V. Osiko, A. M. Prohorov, V. M. Tatarincev // Uspehi himii. 1978. T. 47, № 3. S. 385–427. doi: 10.1070/RC1978v047n03ABEH002214. (In Russ.).
5. French Nuclear Waste Vitrification: State of the Art and Future Developments / C. Ladirat, R. Boen, A. Jouan, J. P. Moncouyoux // Ceramic Eng. & Sci. Proc. Columbus, OH: Am. Ceramic Soc., 1995. P. 11–14. doi: 10.1002/9780470314661.ch2.
6. Vitrification of HLW produced by uranium/molybdenum fuel Reprocessing in COGEMA's Cold Crucible Melter / Quang R. Do, Petitjean V., Hollebecque F., Pincet O., Flament T., Prod`homme A. // 9<sup>th</sup> Intern. Conf. on Radioactive Waste Management and Environmental Remediation. Oxford, England: ASME, 2003. P. 1585–1591. doi: 10.1115/ICEM2003-4594.
7. A milestone in vitrification: the replacement of a «hot metallic crucible» with a «cold crucible melter» in a hot cell at the La Hague plant, France / S. Robert, F. Gassot Guilbert, B. Carpentier, S. Naline, F. Gouyau, C. Girolid // ASME 13<sup>th</sup> Int. Conf. on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management. Tsukuba, Japan: ASME, 2010. P. 399–406. doi: 10.1115/ICEM2010-40188.
8. 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, K.-R. Lee, H. W. Kang, H. J. Eom, H.-S. Park // Nuclear Engin. and Technol. Vol. 54, iss. 4. 2022. P. 1206–1212.
9. Hanford high level waste processing in a cold crucible melter: test results obtained in the framework of the TWRS-P contract / E. Nicaise, C. Veyer, S. Goetghebeur, P. Hirma, E. V. Morrey, G. L. Smith, J. D. Vienna, J. L. Dussossoy, C. Ladirat, A. Ledoux, M. Puyou // Waste Management Conf. Tuscon, Arizona. 2010. 11 p. URL: <https://archivedproceedings.econference.io/wmsym/1999/48/48-6.pdf> (data obrashhenija: 29.10.2024)
10. Sostojanie razrabotok AO «VNIINM» po sozdaniju indukcionnykh plavitelej s holodnym tiglem (IPHT) dlja osteklovyvanija zhidkih radioaktivnykh othodov (ZhRO) / V. A. Kashheev, D. Ju. Suncov, T. V. Smelova, N. D. Musatov, A. V. Demin, A. I. Tuchkova, I. N. Shestoperov, P. M. Rodin // Tez. dokl. na konf. «Radiohimija-2022». M.: Izd-vo OOO «Mesol», 2022. 281 s. (In Russ.).
11. 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 / A. Yu. Abashkin, I. N. Skrigan, E. Yu. Ivanov, A. O. Pleshakov, D. B. Lopukh, A. V. Vavilov, A. P. Martynov // MRS Advances. 2020. Vol. 5. P. 83–92. doi: 10.1557/adv.2020.146.
12. Jeksperimental'nye i teoreticheskie issledovanija indukcionnykh pechej s holodnymi tigljami i donnym nagrevom dlja osteklovyvanija radioaktivnykh othodov / D. B. Lopuh, A. V. Vavilov, A. A. Horshev, I. N. Skrigan, A. P. Martynov // Radioaktivnye othody. 2022. № 4(21). S. 13–23. (In Russ.).
13. Advanced cold crucible melter pilot plant characteristic and first results on HLLW surrogates / C. Ladirat, J. Lacombe, R. Do Quang, A. Prod'homme // WM'04 Conf., Tucson, AZM-4223, 2004. 7 p. URL: <https://archivedproceedings.econference.io/wmsym/2004/pdfs/4223.pdf> (data obrashhenija: 29.10.2024).
14. French Industrial Vitrification Plant: 30 Years old, Robust and still Innovating / E. Chauvin, R. Do Quang, F. Drain, P. M. Fabrice // Proc. of Global. Paris, France, 2009. URL: [https://www.researchgate.net/publication/284156723\\_French\\_Industrial\\_Vitrification\\_Plant\\_30\\_Years\\_old\\_Robust\\_and\\_still\\_Innovating](https://www.researchgate.net/publication/284156723_French_Industrial_Vitrification_Plant_30_Years_old_Robust_and_still_Innovating) (data obrashhenija: 29.10.2024).
15. Izvlechenie metallov platinovoj gruppy iz vysokoaktivnykh rafinatov pererabotki OJaT / P. V. Davydova, O. N. Egorova, Ju. I. Kornejko, V. A. Korolev, L. V. Krasnikov, A. A. Lumpov, D. V. Rjabkov // Tez. dokl. na konf. «Radiohimija-2022». X Ross. konf. s mezhdunar. uch. Sankt-Peterburg. M.: OOO «Mesol», 2022. S. 369. (In Russ.).
16. Sorbenty na osnove aktivirovannogo uglja i gekzacianoferrata (II) zheleza (III) dlja izvlechenija metallov platinovoj gruppy iz azotnokislykh rastvorov / Ju. I. Kornejko, P. V. Davydova, O. N. Egorova, V. A. Korolev, N. V. Sapozhnikova // Tez. dokl. na konf. «Radiohimija-2022». X Ross. konf. s mezhd. uch. Sankt-Peterburg. M.: OOO «Mesol», 2022. S. 107. (In Russ.).
17. Izvlechenie palladija iz azotnokislykh rastvorov pererabotki otrabotavshago jadernogo topliva / P. V. Davydova, Ju. I. Kornejko, V. A. Korolev, L. V. Krasnikov, Ju. L. Kreker // Radiohimija. 2022. T. 64, № 3. S. 213–216. doi: 10.31857/S0033831122030029. (In Russ.).
18. Precise stepwise recovery of platinum group metals from high level liquid waste based on SDB polymer modified SiO<sub>2</sub> / K. Wu, N. Shunyan, X. Yin, S. Xu, Y. Zhong, Zh. Li, L. Chen, F. M. Hamza, T. Fujita, Yu. Wei // Dalton Transactions. 2024. Iss. 4. P. 53. doi: 10.1039/D3DT03469K.
19. Recovery of platinum group metal resources from high-level radioactive liquid wastes by non-contact photoreduction / W. Hanqin, W. Yi, Li Fuhai, M. Yusa, Ya. Shinichi, Ch. Sheng // J. of Hazardous Materials. 2023. Vol. 458. Art. 131852. doi: 10.1016/j.jhazmat.2023.131852.
20. Indukcionnaja plavka koriuma i varka stekla v holodnom tigle. Svoystva i modelirovanie / D. B. Lopuh, S. V. Beshta, A. P. Martynov, A. V. Vavilov, I. N. Skrigan. SPb.: Izd-vo SPbGETU, 2021. 178 s. (In Russ.).

21. Study of the influence of the melt pool diameter on the electrical and thermal parameters of an induction melting furnace in a cold crucible with bottom heating / A. Khorshev, D. Lopukh, A. Vavilov, I. Skrigan // Conf. on Electr. Power Engin. (UralCon). Magnitogorsk, Russia: IEEE, 2023. P. 561–567. doi: 10.1109/UralCon59258.2023.10291099.

---

#### Information about the authors

**Dmitry B. Lopukh** – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Electrotechnological and Transformative Engineering of St. Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: [dblopukh@yandex.ru](mailto:dblopukh@yandex.ru)

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

**Alexander P. Martynov** – Associate Professor of the Department of Electrotechnological and Transformative Engineering at St. Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: [apmartynov@yandex.ru](mailto:apmartynov@yandex.ru)

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

**Anton V. Vavilov** – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Electrotechnological and Transformative Engineering at St. Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: [avvavilov@yandex.ru](mailto:avvavilov@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 of St. Petersburg Electrotechnical University; Head of the Laboratory of Technology and Curing Processes, JSC «V. G. Khlopin Radium Institute», 2<sup>nd</sup> Murinsky ave., 28, Saint Petersburg, 194021, Russia.

E-mail: [ilya.skrigan@yandex.ru](mailto:ilya.skrigan@yandex.ru)

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

**Alexey A. Khorshev** – Assistant of the Department of Electrotechnological and Transformative Engineering at St. Petersburg Electrotechnical University; Employee of the Laboratory of Technology and Curing Processes, JSC «V. G. Khlopin Radium Institute», 2<sup>nd</sup> Murinsky ave., 28, Saint Petersburg, 194021, Russia.

E-mail: [aahorshev@yandex.ru](mailto:aahorshev@yandex.ru)

**Pavel V. Vysotsky** – post-graduate student, an engineer at the Department of Electrotechnological and Transformative Engineering at St. Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: [pavelv2512@mail.ru](mailto:pavelv2512@mail.ru)

#### Contribution of the authors:

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

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

Skrigan I. N. – methodology of the research.

Vavilov A. V. – processing of calculation results.

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

Vysotsky P. V. – review of scientific sources.

Статья поступила в редакцию 12.07.2024; принята к публикации после рецензирования 05.11.2024; опубликована онлайн 25.12.2024.

Submitted 12.07.2024; accepted 05.11.2024; published online 25.12.2024.

---