

Влияние числа донных секций печи ИПХТ с донным нагревом и поверхностного эффекта на электрические параметры индуктора

А. А. Хоршев^{1,2}, Д. Б. Лопух¹✉, 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 «Радиевый институт им. В. Г. Хлопина», Санкт-Петербург, Россия

✉ dblopukh@yandex.ru

Аннотация. Статья посвящена исследованию электромагнитных процессов в печи ИПХТ (индукционная печь с холодным тиглем) с донным нагревом (ИПХТ-ДН) на основе численного моделирования с использованием 3D-электромагнитной (ЭМ) модели. Показана перспективность использования печей ИПХТ-ДН для остекловывания радиоактивных отходов (РАО) благодаря новым преимуществам схемы плавки. В частности, исследуется влияние числа донных секций холодного тигля и степени проявления поверхностного эффекта в ванне расплава m_2 боросиликатного стекла на электрические параметры индуктора: электрический КПД, коэффициент мощности, напряжение и ток индуктора, мощность в расплаве и др. На основе полученных зависимостей сформулированы рекомендации по достижению наилучших значений исследуемых параметров, обеспечивающих повышенную эффективность и надежность работы печей ИПХТ-ДН.

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

Для цитирования: Влияние числа донных секций печи ИПХТ с донным нагревом и поверхностного эффекта на электрические параметры индуктора / А. А. Хоршев, Д. Б. Лопух, А. В. Вавилов, И. Н. Скриган, П. В. Высоцкий, А. П. Мартынов // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2025. Т. 18, № 1. С. 80–90. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-1-80-90.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

Influence of Bottom Sections Number of a Cold Crucible Induction Melting Furnance and Skin Effect on the Electrical Parameters of the Inductor

A. A. Khorshev^{1,2}, D. B. Lopukh¹✉, A. V. Vavilov¹, I. N. Skrigan^{1,2}, P. V. Vysotsky¹, A. P. Martynov¹

¹ Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

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

✉ dblopukh@yandex.ru

Abstract. This work investigates electromagnetic processes in a bottom-heated induction furnace of the induction melting in a cold crucible with bottom heating (IMCC-BH) by means of numerical modeling with a 3D electromagnetic model. Due to the improved melting scheme, IMCC-BH furnaces are promising for vitrification of radioactive waste. We analyze the influence of the number of bottom sections of the cold crucible and the degree of manifestation of the surface effect in the melt bath m_2 of borosilicate glass on the electrical parameters of the inductor, including electrical skin effect, power pool, inductor voltage and current, power in the melt, etc. On the basis of the data obtained, recommendations on achieving optimal values of the investigated parameters, which provide for increased efficiency and reliability of BH IFCC, are formulated.

Keywords: induction melting, cold crucible, vitrification of radioactive waste, numerical modeling, furnace reliability, inductor parameters

For citation: Influence of Bottom Sections Number of a Cold Crucible Induction Melting Furnance and Skin Effect on the Electrical Parameters of the Inductor / 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. 1. P. 80–90. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-1-80-90.

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

Введение. Остекловывание – это общепризнанный способ иммобилизации РАО в мировом сообществе, в котором в основном рассматривается включение РАО в структуру алюмофосфатных и боросиликатных сертифицированных стекол с высокой химической устойчивостью [1]–[6]. Однако подчеркивается, что печи электрорварки стекла с погружными электродами и керамической футеровкой имеют ряд существенных недостатков, которых лишены печи ИПХТ благодаря преимуществам этого метода плавки оксидов и варки стекол [7]–[11].

В последнее время обращается внимание на использование печей ИПХТ-ДН для остекловывания радиоактивных отходов (рис. 1) [12]–[16].

В обосновании использования печи ИПХТ-ДН для остекловывания ВАО (высокоактивных отходов) лежат следующие факторы:

- упрощенная процедура дистанционной замены элементов печи вбок в отличие от традиционных печей с охватывающими индукторами;
- надежная герметизация плавильной зоны холодного тигля благодаря замкнутой боковой стенке холодного тигля;
- более интенсивная свободная конвекция и гомогенизация расплава стекла из-за донного подвода высокочастотной энергии;
- улучшенные условия организации донного слива расплава стекла.

Повышенный термический КПД печи при небольшой высоте ванны расплава.

Анализ литературы позволяет отметить полное отсутствие данных по проектированию и

конструированию печей ИПХТ-ДН, кроме работ авторов данной статьи [12], [14], [16]. Например, на основе численного моделирования плоскопараллельного ЭМ-поля по 2D-ЭМ-модели «LUKS» [16] известно влияние числа донных секций холодного тигля только до $N = 20$ (рис. 2) при постоянном напряжении индуктора. Обозначения на рисунке: P_2 – активная мощность, подводимая к ванне расплава; P_{2max} – мощность, подводимая к ванне расплава при $N = 20$; P_{cc} – мощность потерь в холодном тигле; P_{ind} – мощность потерь в индукторе; η_1 – электрический КПД; $\cos \varphi$ – коэффициент мощности.

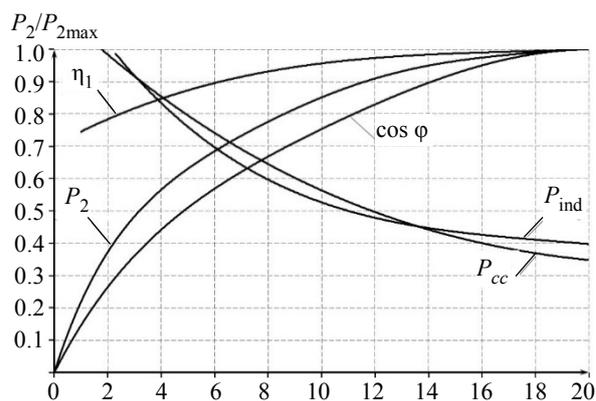


Рис. 2. Зависимости относительных изменений параметров индукционной плоскопараллельной системы от числа донных секций холодного тигля печей ИПХТ-ДН [16]

Fig. 2. Dependences of relative changes in the parameters of the induction plane-parallel system on the number of bottom sections of the cold crucible of IMCC-BH [16]

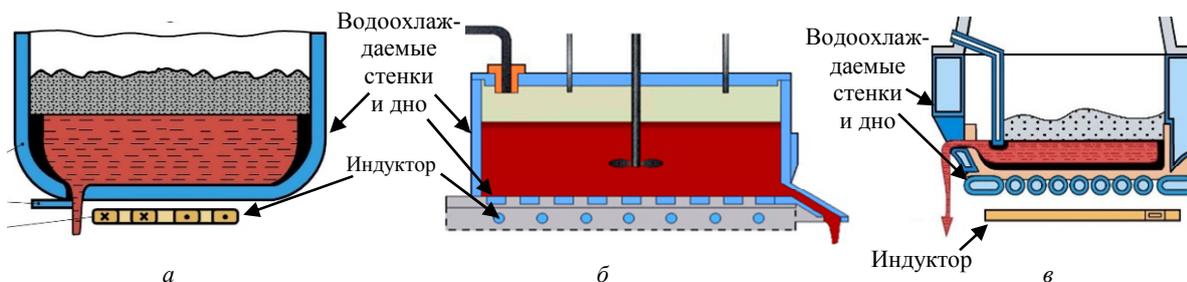


Рис. 1. Схемы печей ИПХТ-ДН с различными способами слива расплава: донный слив расплава – а [12], б [11]; в – боковой слив расплава
 Fig. 1. Schemes of IMCC-BH with different melt drainage methods: bottom melt drain – а [12], б [11]; в – side melt drain

В этой статье рекомендовано проектировать плоскопараллельные индукционные системы ИПХТ-ДН при N более 16 и степень проявления поверхностного эффекта $m_2 = 5 \dots 8$. Однако отсутствуют данные по влиянию числа донных секций и степени проявления поверхностного эффекта в расплаве на электрические характеристики цилиндрической индукционной системы с холодным тиглем из нержавеющей стали при больших значениях электрических параметров, характерных для крупномасштабных высокопроизводительных печей ИПХТ-ДН.

В связи с этим сформулированы следующие основные цели настоящей статьи:

- Построить расчетную модель цилиндрической печи ИПХТ-ДН с холодным тиглем из нержавеющей стали для численного моделирования с использованием 3D-ЭМ-модели, учитывающей особенности индукционной системы.

- Провести численное исследование электрических параметров цилиндрических печей ИПХТ-ДН с плоским индуктором по 3D-ЭМ-модели при изменении числа донных секций холодного тигля и степени проявления поверхностного эффекта в ванне расплава m_2 , варьируя удельное электрическое сопротивление расплава боросиликатного стекла, содержащее имитаторы РАО. При этом остаются неизменными внутренний диаметр холодного тигля, высота ванны расплава, зазор между донными секциями, высота донных секций, толщина трубок донных секций. При изменении числа донных секций варьируется только их ширина. Расчеты проводятся для пяти значений удельных электрических сопротивлений расплава.

- Разработать рекомендации по проектированию цилиндрических печей ИПХТ-ДН с холодным тиглем из нержавеющей стали по результатам расчетов.

Разработка 3D-электромагнитной модели. Все печи ИПХТ, в том числе ИПХТ-ДН, представляют собой трехмерные объекты для математического моделирования, поскольку холодный тигель не имеет осевой симметрии, что приводит к необходимости проведения расчетов с помощью 3D-ЭМ-модели [12].

На рис. 3 и 4 представлена схема моделей исследуемых систем.

При создании моделей сделаны следующие допущения: одинаковое удельное электрическое сопротивление в объеме ванны расплава и осесимметричное расположение витков индуктора.

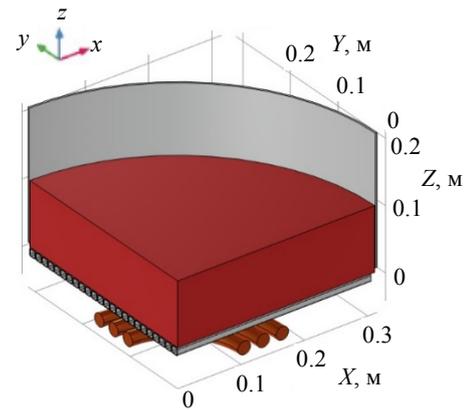


Рис. 3. Схема модели 1/4 печей
Fig. 3. Diagram of 1/4 furnace model

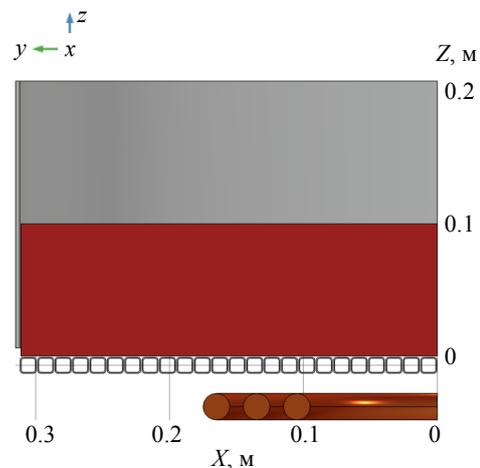


Рис. 4. Схема модели 1/4 печей – вид сбоку
Fig. 4. Side view 1/4 of furnace models

Свойства материалов, размеры элементов печи, а также мощность и частота электрического тока индуктора приведены в табл. 1. Расчеты проводились для всех сочетаний количеств донных секций тигля и удельных сопротивлений расплава.

Значение степени проявления поверхностного эффекта в ванне расплава определяли по формуле $m_2 = D_2 / \sqrt{2} \Delta_2$, где $\Delta_2 = 503 \sqrt{\rho_2 / f}$ – глубина проникновения тока в расплав.

На рис. 5 представлена расчетная сетка исследуемых систем. Для корректного расчета электрических параметров системы размеры элементов у токопроводящих поверхностей должны иметь глубину меньшую, чем глубина проникновения тока в материал [17]–[20]. В тигле и индукторе сетка имеет повышенную плотность у поверхности: 6 элементов на 2 глубины проникновения тока в материал на рабочей частоте.

Результаты исследований. На рис. 6 показано распределение удельной тепловой мощности, выделяющейся в ванне расплава, на рис. 7 – распределение температуры в ванне расплава для

Табл. 1. Параметры моделей печей, использованные в расчетах
 Tab. 1. Furnace model parameter used in calculations

Параметр	Значение				
<i>Холодный тигель</i>					
(материал – нержавеющая немагнитная аустенитная сталь марки 12Х18Н10Т (AISI 321))					
Удельное электрическое сопротивление тигля, Ом · см	72 · 10 ⁻⁶				
Высота/толщина/радиус скругления углов донных секций, мм	12/1,5/2				
Ширина донных секций, мм	51	25	16,4	12	6
Количество секций дна, соответствующее ширине донных секций, шт.	12	24	36	48	96
Зазор между секциями, мм	1				
Высота боковой стенки, мм	200				
Внутренний диаметр боковой стенки D ₂ , мм	630				
Толщина боковой стенки, мм	3				
Зазор между боковой стенкой и донными секциями, мм	3				
<i>Ванна расплава боросиликатного стекла</i>					
Диаметр ванны расплава, мм, с боковым гарнисажем – 3 мм	624				
Высота ванны расплава, мм	100				
Расстояние между индуктором и дном тигля, мм	15				
Удельное электрическое сопротивление расплава ρ ₂ , Ом · см	10	5	2,5	1,25	0,625
<i>Параметры модели</i>					
Диаметр и высота расчетного региона, м	1				
Частота тока f, МГц	1,76				
Степень проявления поверхностного эффекта, m ₂	3,7	5,2	7,36	10,4	14,7
Электрическая мощность, выделяемая в ванне расплава, кВт	87				
<i>Медный индуктор</i>					
Внутренний диаметр, мм	190				
Внешний диаметр, мм	350				
Количество витков, шт.	3				
Диаметр трубки, мм	20				
Зазор между витками, мм	20				
Удельное электрическое сопротивление индуктора, Ом · см	2 · 10 ⁻⁶				

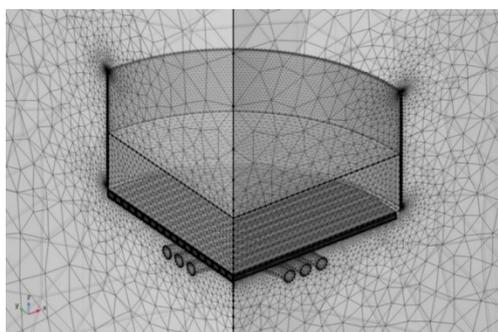


Рис. 5. Расчетная сетка 1/4 исследуемой системы

Fig. 5. Calculation grid 1/4 of the studied system

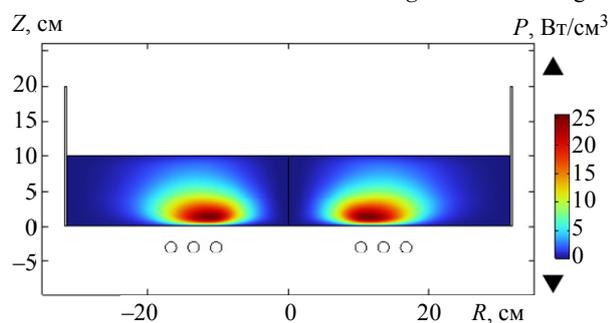


Рис. 6. Распределение источников теплоты в ванне расплава, Вт/м³

Fig. 6. Distribution of heat sources in the melt pool, W/m³

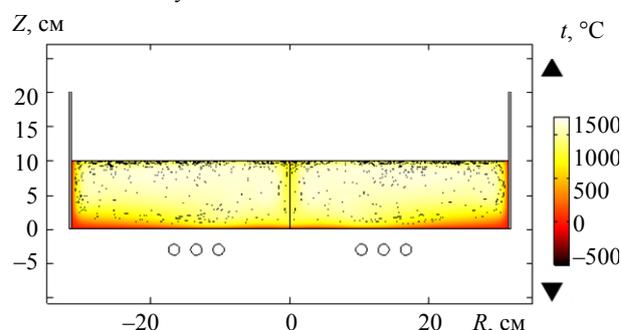


Рис. 7. Распределение температуры в ванне расплава, °C

Fig. 7. Temperature distribution in the melt pool, °C

рассматриваемого случая [14]. Из рис. 6, 7 видно, что высокочастотная энергия выделяется в придонных слоях ванны расплава и температура рас-

плава распределена достаточно равномерно по ванне благодаря усилению свободной конвекции в расплаве, что позволяет проводить численные

расчеты при постоянном значении удельного электрического сопротивления.

На рис. 8–14 представлены результаты расчетов электрических параметров индуктора в зависимости от числа донных секций холодного тигля N , разных значений коэффициента m_2 и удельного электрического сопротивления расплава ρ_2 при $P_2 = \text{const}$.

На рис. 15–19 представлены результаты расчетов электрических параметров индуктора в зависимости от коэффициента m_2 и удельного электрического сопротивления расплава ρ_2 при различных количествах донных секций холодного тигля N и $P_2 = \text{const}$.

Представленное распределение источников тепла в ванне расплава (см. рис. 6) позволяет предложить новый подход к определению степени проявления поверхностного эффекта в расплаве m_2 , по-

скольку источники тепла значительно уменьшаются к краю внешнего витка индуктора и практически отсутствуют в зоне ванны расплава за индуктором. Исследования показывают, что при изменении наружного диаметра индуктора наружный край источников тепла перемещается вслед за крайним витком индуктора и можно ввести эквивалентный диаметр ванны расплава D_2^* вместо наружного диаметра ванны расплава для расчета коэффициента m_2^* . Т. е. $m_2^* = D_2^* / \sqrt{2} \Delta_2 \leq m_2 = D_2 / \sqrt{2} \Delta_2$, и значения m_2 на оси абсцисс уменьшатся (рис. 15–19). Использование такого подхода позволяет точнее оценивать условия тепловой устойчивости ИПХТ-ДН и сравнивать степень проявления поверхностного эффекта в печах ИПХТ различной конфигурации.

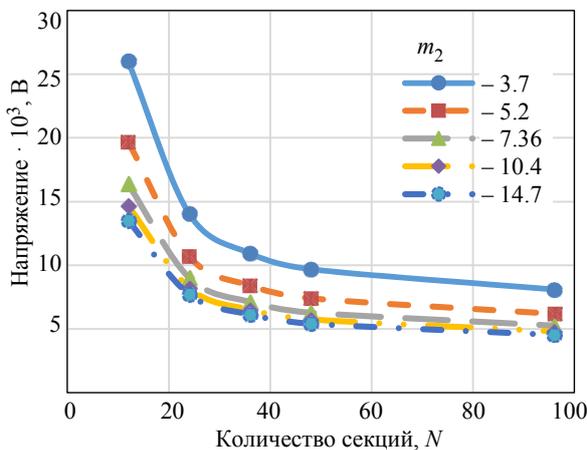


Рис. 8. Зависимость напряжения на индукторе от N при разных значениях m_2
Fig. 8. Dependence of inductor voltage on N at different values of m_2

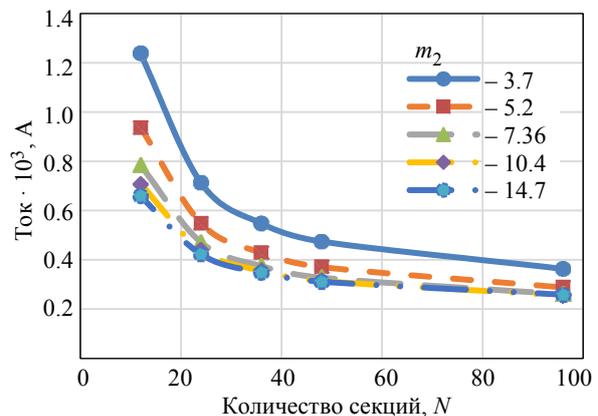


Рис. 9. Зависимость тока индуктора от N при разных значениях m_2
Fig. 9. Dependence of inductor current on N at different values of m_2

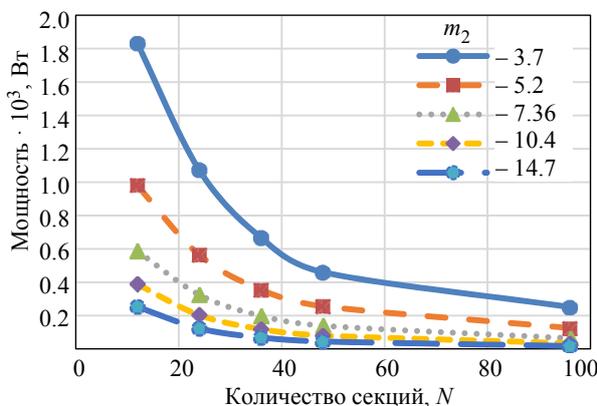


Рис. 10. Зависимость электрической мощности в боковой стенке холодного тигля от N при разных значениях m_2
Fig. 10. Dependence of electric power in the side wall of the cold crucible on N at different values of m_2

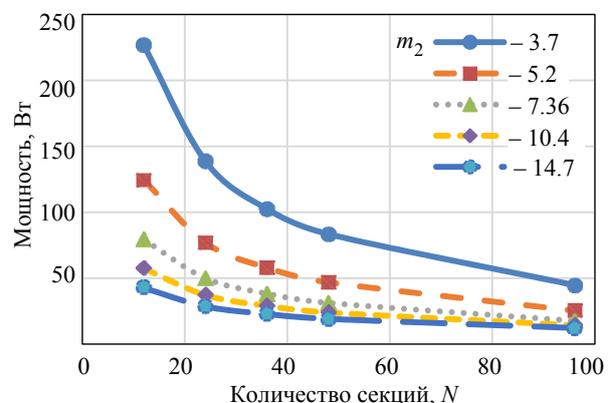


Рис. 11. Зависимость мощности электрических потерь в дне холодного тигля от N при разных значениях m_2
Fig. 11. Dependence of electric loss power in the cold crucible bottom on N at different values of m_2

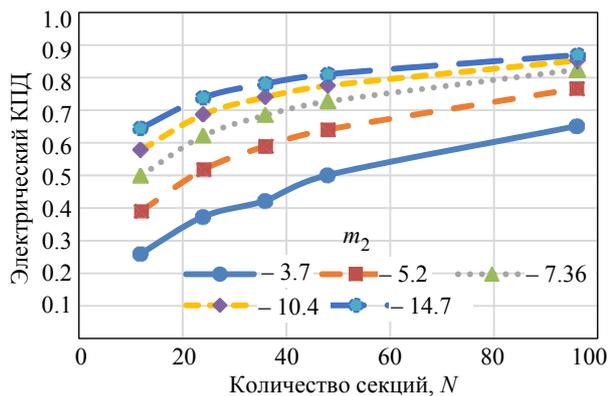


Рис. 12. Зависимость электрического КПД индуктора от N при разных значениях m_2

Fig. 12. Dependence of the inductor electrical efficiency on N at different values of m_2

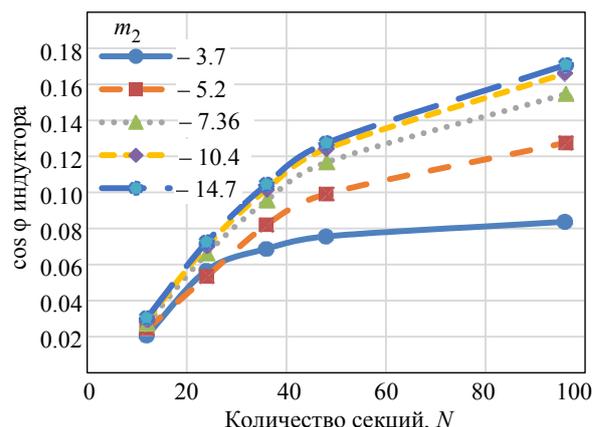


Рис. 13. Зависимость $\cos \varphi$ индуктора от N при разных значениях m_2

Fig. 13. Dependence of $\cos \varphi$ of the inductor on N at different values of m_2

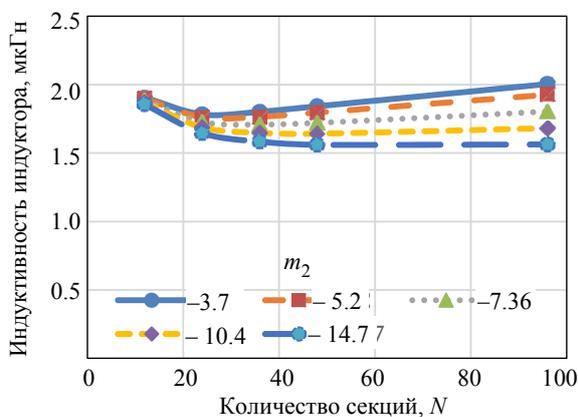


Рис. 14. Зависимость индуктивности индуктора от N при разных значениях m_2

Fig. 14. Dependence of inductor inductance on N at different values of m_2

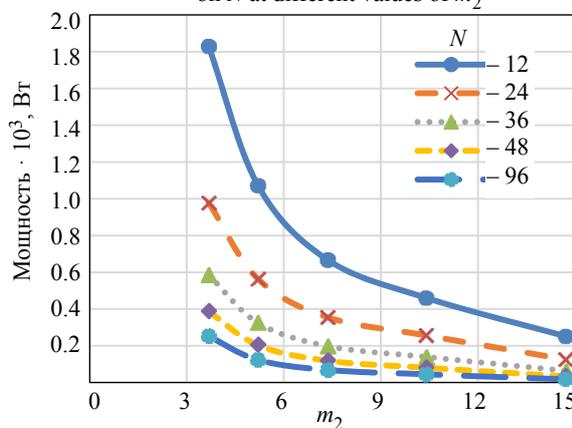


Рис. 15. Зависимость электрической мощности в боковой стенке холодного тигля от m_2 при разном числе донных секций N

Fig. 15. Dependence of electric power in the side wall of the cold crucible on m_2 at different number of bottom sections N

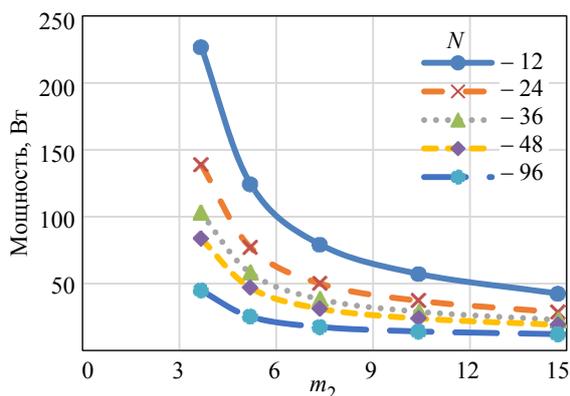


Рис. 16. Зависимость мощности электрических потерь в дне холодного тигля от m_2 при разном числе донных секций N

Fig. 16. Dependence of electric loss power in the bottom of the cold crucible on m_2 at different number of bottom sections N

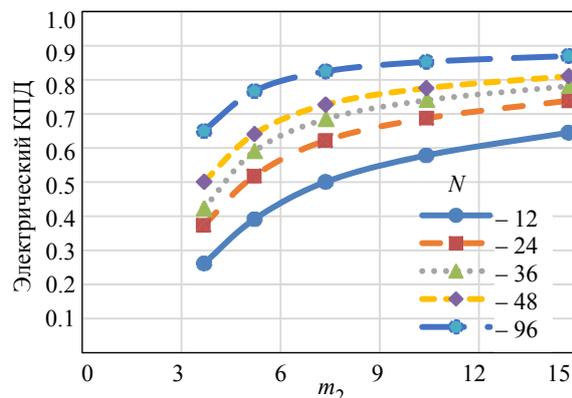


Рис. 17. Зависимость электрического КПД индуктора от m_2 при разном числе донных секций N

Fig. 17. Dependence of inductor electrical efficiency on m_2 at different number of bottom sections N

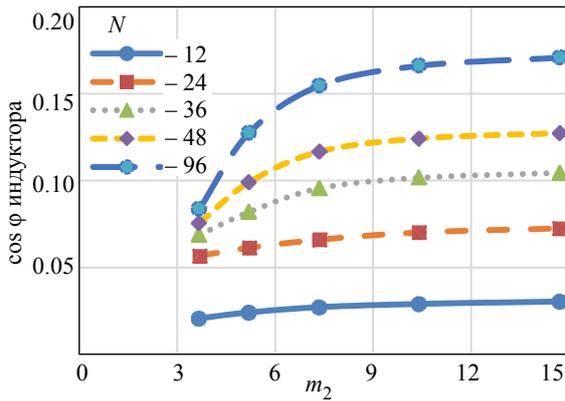


Рис. 18. Зависимость $\cos \varphi$ индуктора от m_2 при разном числе донных секций N
Fig. 18. Dependence of inductor $\cos \varphi$ on m_2 at different number of bottom sections N

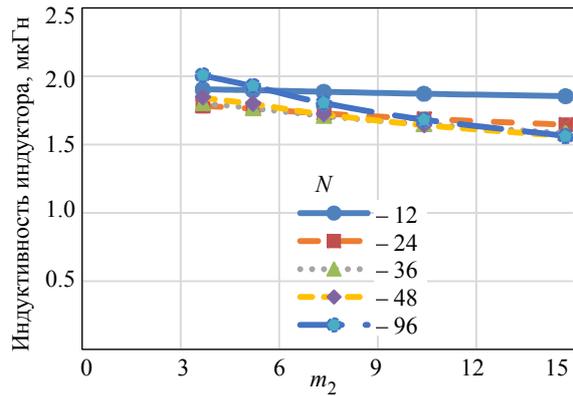


Рис. 19. Зависимость индуктивности индуктора от m_2 при разном числе донных секций N
Fig. 19. Dependence of inductor inductance on m_2 at different number of bottom sections N

Обсуждение результатов. Анализ зависимостей, приведенных на рис. 8–19, позволяет сделать следующие заключения:

1. Эффективность индукционного нагрева ванны расплава в виде электрического КПД и коэффициента мощности индуктора монотонно возрастает с увеличением числа донных секций холодного тигля (рис. 8 и 14) и m_2 (рис. 15–19) при снижении мощности электрических потерь в холодном тигле. Падение электрического КПД с уменьшением числа донных секций тигля связано с уменьшением количества зазоров между донными секциями, вследствие чего происходит экранирование электромагнитного поля индуктора дном тигля и ухудшение эффективности индукционного нагрева ванны расплава. В то же время наблюдается некоторое насыщение в значениях электрического КПД и коэффициента мощности индуктора при m_2 более 7. Следовательно, рекомендуется выполнять дно холодного тигля из наибольшего числа секций при обеспечении условий системы охлаждения и повышать значение m_2 до 7 и более. При этом необходимо контролировать недогрев центральной зоны ванны расплава.

2. При изменении количества донных секций и значений m_2 индуктивность индуктора изменяется незначительно (рис. 14 и 19).

Заключение. Проведено численное исследование цилиндрической печи ИПХТ-ДН с плоским индуктором для остекловывания РАО с использованием 3D ЭМ-модели. При этом выявлено, что для повышения эффективности индукционного нагрева расплава необходимо увеличивать число секций дна стального холодного тигля и степень проявления поверхностного эффекта. Таким образом, показано, что особенность печей ИПХТ-ДН заключается в отсутствии насыщения кривых электрического КПД и коэффициента мощности индуктора от числа донных секций холодного тигля, характерном для систем с охватывающими индукторами и показанном в более ранних публикациях для плоскопараллельных систем ИПХТ-ДН. В то же время, для повышения эффективности индукционного нагрева расплава необходимо увеличивать степень проявления поверхностного эффекта до 7 и выше.

Предложена новая характеристика описания степени проявления поверхностного эффекта в расплавах при ИПХТ-ДН.

Полученные результаты дают возможность построения 3D-ЭГД-моделей печей с улучшенными характеристиками с целью разработки опытно-промышленных образцов новых печей ИПХТ-ДН для остекловывания РАО в холодных тиглях из нержавеющей стали.

Список литературы

1. Научные и проектные аспекты остекловывания жидких радиоактивных отходов АЭС с ВВЭР-1200 / В. Т. Сорокин, Д. И. Павлов, В. А. Кащеев, Н. Д. Мусатов, А. С. Баринов // Радиоактивные отходы. Переработка, кондиционирование и транспортирование РАО. 2020. № 2(11). С. 56–65. doi: 10.25283/2587-9707-2020-2-56-65.

2. Стратегия фракционирования ВАО от переработки ОЯТ / В. А. Кащеев, М. В. Логунов, А. Ю. Шадри, А. А. Рыкунова, О. В. Шмидт // Радиоактивные отходы. 2022. № 2(19). С. 6–16. doi: 10.25283/2587-9707-2022-2-6-16.

3. 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. Dussoisoy, C. Ladirat, A. Ledoux, M. Puyou // Waste Management conf. 1999. 11 p. URL: <https://archivedproceedings.econference.io/wmsym/1999/48/48-6.pdf> (дата обращения: 29.10.2024).

4. French Nuclear Waste Vitrification: State of the Art and Future Developments / C. Ladirat, R. Boen, A. Jouan, J. P. Moncouyoux // Ceramic Eng. & Sci. Proc. 1995. P. 11–14.

5. Glasses, glass-ceramics and ceramics for immobilization of highly radioactive nuclear wastes / D. Caurant, P. Loiseau, O. Majérus, V. Aubin-Chevaldonnet, I. Bardez-Giboire, Q. Arnaud. New York: Nova Sci. Publ. Inc, 2009. 445 p.

6. Ретроспективный анализ разработки технологий переработки накопленных ВАО радиохимического производства ФГУП «ПО «МАЯК» / П. В. Козлов, М. В. Логунов, М. Б. Ремизов, С. М. Шайдуллин, С. А. Лукин, Е. Н. Зубриловский // Радиоактивные отходы. 2023. № 3(24). С. 14–33. doi: 10.25283/2587-9707-2023-3-14-33.

7. 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.

8. International perspectives on glass waste form development for low-level and intermediate-level radioactive waste / J. S. McCloy, B. J. Riley, M. C. Dixon Wilkins, J. S. Everts, J. Bussey, J. D. Vienna, P. A. Bingham, D. J. Gregg, M. Ojovan, S. Schuller, K. Uruga, D. Perret, E. Regnier, I. Giboire, W. Um, K. Xu, A. Goel, A. A. Kruger // Materials Today. 2024. Vol. 80. P. 594–618. doi: 10.1016/j.mattod.2024.08.025.

9. Инновационная индукционная печь с холодным тиглем для остекловывания высокоактивных отходов / Д. Б. Лопух, И. Н. Скриган, А. В. Вавилов, А. П. Мартынов // Вопр. атомной науки и техники. Материаловедение и новые материалы. 2018. Вып. 4 (95). С. 49–61.

10. 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 13th Intern. Conf. on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management (ICEM2010). Tsukuba, Japan: ASME, 2010. Vol. 2. P. 1–8. doi: 10.1115/ICEM2010-40188.

11. Лопух Д. Б. Обоснование новой российской концепции построения установки остекловывания радиоактивных отходов методом индукционной плавки в холодных тиглях // Вопр. радиационной безопасности. 2009. № 2(54). С. 26–32.

12. Остекловывание радиоактивных отходов методом индукционной плавки в холодном тигле в печи с донным нагревом / Д. Б. Лопух, А. В. Вавилов,

А. П. Мартынов, И. Н. Скриган, А. А. Хоршев // Электротехника. 2023. № 1. С. 43–50.

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, AZ, 2004. WM-4223. URL: <https://archivedproceedings.econference.io/wmsym/2004/pdfs/4223.pdf> (дата обращения: 29.10.2024).

14. 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.

15. Vitrification of HLW Produced by uranium/molybdenum fuel reprocessing in COGEMA's cold crucible melter / R. Do Quang, V. Petitjean, F. Hollebecque, O. Pinet, T. Flament // 9th Intern. conf. on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management (ICEM'03). Oxford, England: Examination Schools, 2003. P. 1585–1591. doi: 10.1115/ICEM2003-4594.

16. Печенков А. Ю., Пронин А. М., Лопух Д. Б. Исследование электрических характеристик печей ИПХТ с торцевыми индукторами / Изв. ЛЭТИ. 1991. Вып. 439. С. 61–65.

17. Meshing of solid conductor regions modeled by surface impedance for accurate results in the finite element analysis of a cold crucible furnace / V. Fireteanu, P. Brun, E. Sauvage, A.-I. Constantin // 18th Intern. Symp. on Appl. Electromagnetics and Mechanics (ISEM). Chamonix Mont-Blanc, France, 2017. URL: <https://www.researchgate.net/publication/338863738> (дата обращения: 30.10.2024).

18. Modeling and optimization of cold crucible furnaces for melting metals / V. Nemkov, R. Goldstein, K. Kreter, J. Jackowski // Conf. HES. Atlantic, USA: Fluxtrol, Inc., 2013. P. 1–9. URL: <https://fluxtrol.com/inc/pdf/MODELING-AND-OPTIMIZATION-OF-COLD-CRUCIBLE-FURNACES-FOR-MELTING-METALS.pdf> (дата обращения: 30.10.2024).

19. Bojarevics V., Pericleous K. Cold crucible melting with bottom pouring nozzle // COMPEL – The Intern. J. for Computation and Math. in Electr. and Electronic Engin. 2019. Vol. 39, no. 1. P. 36–42. doi: 10.1108/COMPEL-05-2019-0208. URL: https://www.researchgate.net/publication/338441109_Cold_crucible_melting_with_bottom_pouring_nozzle (дата обращения: 29.10.2024).

20. Numerical studies of the melting process in the induction furnace with cold crucible / A. Umbrasko, E. Baake, B. Nacke, A. Jakovics // COMPEL – The Intern. J. for Computation and Math. in Electr. and Electronic Engin. 2008. Vol. 27, no. 2. P. 359–368. doi: 10.1108/03321640810847643. URL: <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/03321640810847643/full/html> (дата обращения: 30.10.2024).

Информация об авторах

Хоршев Алексей Алексеевич – ассистент кафедры электротехнологической и преобразовательной техники СПбГЭТУ «ЛЭТИ»; научный сотрудник лаборатории технологии и процессов отверждения РАО, АО «Радиовый институт им. В. Г. Хлопина», 2-й Мушинский 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: 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 РАО, АО «Радиевый институт им. В. Г. Хлопина», 2-й Мурунский 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: armartynov@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, постановка задач, редактирование текста.

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. Nauchnye i proektnye aspekty osteklovyvaniya zhidkih radioaktivnyh othodov AJeS s VJeR-1200 / V. T. Sorokin, D. I. Pavlov, V. A. Kashheev, N. D. Musatov, A. S. Barinov // Radioaktivnye othody. Pererabotka, kondicionirovanie i trans-portirovanie RAO. 2020. № 2(11). S. 56–65. doi: 10.25283/2587-9707-2020-2-56-65. (In Russ.).

2. Strategija frakcionirovaniya VAO ot pererabotki OJaT / V. A. Kashheev, M. V. Logunov, A. Ju. Shadri, A. A. Rykunova, O. V. Shmidt // Radioaktivnye othody. 2022. № 2(19). S. 6–16. doi: 10.25283/2587-9707-2022-2-6-16. (In Russ.).

3. 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. Dussossoy, C. Ladirat, A. Ledoux, M. Puyou // Waste Management conf. 1999. 11 p. URL: <https://archivedproceedings.econference.io/wmsym/1999/48/48-6.pdf> (data obrashheniya: 29.10.2024).

4. French Nuclear Waste Vitrification: State of the Art and Future Developments / C. Ladirat, R. Boen, A. Jouan, J. P. Moncouyoux // Ceramic Eng. & Sci. Proc. 1995. P. 11–14.

5. Glasses, glass-ceramics and ceramics for immobilization of highly radioactive nuclear wastes / D. Caurant, P. Loiseau, O. Majérus, V. Aubin-Chevaldonnet, I. Bardez-Giboire, Q. Arnaud. New York: Nova Sci. Publ. Inc, 2009. 445 p.

6. Retrospektivnyj analiz razrabotki tehnologij pererabotki nakoplenykh VAO radiohimicheskogo proizvodstva FGUP «PO «MAJaK» / P. V. Kozlov, M. V. Logunov, M. B. Remizov, S. M. Shajdullin, S. A. Lukin, E. N. Zubrilovskij // Radioaktivnye othody. 2023. № 3(24). C. 14–33. doi: 10.25283/2587-9707-2023-3-14-33. (In Russ.).

7. Lebedev V. V., Stefanovskij S. V. Primenenie tehnologii IPHT dlja pererabotki radioaktivnyh othodov: opyt MosNPO «Radon» // Vopr. radiacionnoj bezopasnosti. 2011. № 2 (62). C. 16–34. (In Russ.).

8. International perspectives on glass waste form development for low-level and intermediate-level radioactive waste / J. S. McCloy, B. J. Riley, M. C. Dixon Wilkins, J. S. Everts, J. Bussey, J. D. Vienna, P. A. Bingham, D. J. Gregg, M. Ojovan, S. Schuller, K. Uruga, D. Perret, E. Regnier, I. Giboire, W. Um, K. Xu, A. Goel, A. A. Kruger // Materials Today. 2024. Vol. 80. P. 594–618. doi: 10.1016/j.mattod.2024.08.025.

9. Innovacionnaja indukcionnaja pech' s holodnym tiglem dlja osteklovyvanija vysokoaktivnyh othodov / D. B. Lopukh, I. N. Skrigan, A. V. Vavilov, A. P. Martynov // Vopr. atomnoj nauki i tehniki. Materialovedenie i novye materialy. 2018. Vyp. 4 (95). S. 49–61. (In Russ.).

10. 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 13th Intern. Conf. on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management (ICEM2010). Tsukuba, Japan: ASME, 2010. Vol. 2. P. 1–8. doi: 10.1115/ICEM2010-40188.

11. Lopukh D. B. Obosnovanie novej rossijskoj koncepcii postroenija ustanovki osteklovyvanija radioaktivnyh othodov metodom indukcionnoj plavki v holodnyh tigljah // Vopr. radiacionnoj bezopasnosti. 2009. № 2(54). S. 26–32. (In Russ.).

12. Osteklovyvanie radioaktivnyh othodov metodom indukcionnoj plavki v holodnom tigre v pechi s donnym nagrevom / D. B. Lopukh, A. V. Vavilov, A. P. Martynov, I. N. Skrigan, A. A. Horshev // Jeletrotehnika. 2023. № 1. S. 43–50. (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, AZ, 2004. WM-4223. URL: <https://archivedproceedings.econference.io/wmsym/2004/pdfs/4223.pdf> (data obrashhenija: 29.10.2024).

14. Jeksperimental'nye i teoreticheskie issledovanija indukcionnyh pechej s holodnymi tigljami i donnym nagrevom dlja osteklovyvanija radioaktivnyh othodov / D. B. Lopukh, A. V. Vavilov, A. A. Horshev, I. N. Skrigan, A. P. Martynov // Radioaktivnye othody. 2022. № 4(21). S. 13–23. (In Russ.).

15. Vitrification of HLW Produced by uranium/molybdenum fuel reprocessing in COGEMA's cold crucible melter / R. Do Quang, V. Petitjean, F. Hol-

lebecque, O. Pinet, T. Flament // 9th Intern. conf. on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management (ICEM'03). Oxford, England: Examination Schools, 2003. P. 1585–1591. doi: 10.1115/ICEM2003-4594.

16. Pechenkov A. Ju., Pronin A. M., Lopukh D. B. Issledovanie jelektricheskikh harakteristik pechej IPHT s torcevyymi induktorami / Izv. LJeTI. 1991. Vyp. 439. S. 61–65. (In Russ.).

17. Meshing of solid conductor regions modeled by surface impedance for accurate results in the finite element analysis of a cold crucible furnace / V. Fireteanu, P. Brun, E. Sauvage, A.-I. Constantin // 18th Intern. Symp. on Appl. Electromagnetics and Mechanics (ISEM). Chamonix Mont-Blanc, France, 2017. URL: <https://www.researchgate.net/publication/338863738> (data obrashhenija: 30.10.2024).

18. Modeling and optimization of cold crucible furnaces for melting metals / V. Nemkov, R. Goldstein, K. Kreter, J. Jackowski // Conf. HES. Atlantic, USA: Fluxtrol, Inc., 2013. P. 1–9. URL: <https://fluxtrol.com/inc/pdf/MODELING-AND-OPTIMIZATION-OF-COLD-CRUCIBLE-FURNACES-FOR-MELTING-METALS.pdf> (data obrashhenija: 30.10.2024).

19. Bojarevics V., Pericleous K. Cold crucible melting with bottom pouring nozzle // COMPEL – The Intern. J. for Computation and Math. in Electr. and Electronic Engin. 2019. Vol. 39, no. 1. P. 36–42. doi: 10.1108/COMPEL-05-2019-0208. URL: https://www.researchgate.net/publication/338441109_Cold_crucible_melting_with_bottom_pouring_nozzle (data obrashhenija 29.10.2024).

20. Numerical studies of the melting process in the induction furnace with cold crucible / A. Umbrasko, E. Baake, B. Nacke, A. Jakovics // COMPEL – The Intern. J. for Computation and Math. in Electr. and Electronic Engin. 2008. Vol. 27, no. 2. P. 359–368. doi: 10.1108/03321640810847643. URL: <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/03321640810847643/full/html> (data obrashhenija: 30.10.2024).

Information about the authors

Alexey A. Khorshev – Assistant of the Department of Electrotechnological and Transformative Engineering, Saint Petersburg Electrotechnical University; Researcher of the Radioactive Waste Treatment Laboratory, 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. Vavilov – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Electrotechnological and Transformative Engineering, Saint Petersburg Electrotechnical University.
E-mail: avvavilov@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-3506-0615>

Илья N. Skrigan – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Electrotechnological and Transformative Engineering, Saint Petersburg Electrotechnical University; Head of the Radioactive Waste Treatment Laboratory, 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, settings of tasks, text editing.

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 12.07.2024; принята к публикации после рецензирования 03.12.2024; опубликована онлайн 27.01.2025.

Submitted 12.07.2024; accepted 03.12.2024; published online 27.01.2025.
