

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ НОВОЙ ИНДУКЦИОННОЙ СТЕКЛОВАРЕННОЙ ПЕЧИ С "ВНУТРЕННИМ" ИНДУКТОРОМ

И.В. Волков*, чл.-корр. НАН Украины, **И.Н. Кучерявая**, докт. техн. наук
 Институт электродинамики НАН Украины
 пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина.

E-mail: ig.volkov@ukr.net

Выполнено математическое моделирование электромагнитных и тепловых процессов в индукционной стекловаренной печи новой конструкции, в которой замкнутый магнитопровод охватывает как индуктор, так и тигель в виде полого кольцеобразного желоба. Показана возможность и целесообразность работы предлагаемой печи при питании током промышленной частоты 50 Гц. Проведено сравнение основных характеристик печи с аналогичными характеристиками индукционных печей традиционного типа. Показано, что удельные расходы электроэнергии и потребляемая из сети мощность предлагаемой печи существенно меньше. Даны рекомендации по выбору параметров печи, направленные на оптимизацию ее основных энергетических характеристик. Библ. 9, табл. 1, рис. 6.

Ключевые слова: стекловаренная печь, индукционный нагрев, магнитопровод, энергетические показатели, регулирование тока, компьютерное моделирование, оптимизация.

Введение. В стекольной промышленности для изготовления стекла и изделий из него используются стекловаренные печи, в которых проходит плавление сырья (шихты) и варка расплавленного стекла при высоких температурах (до 2000⁰С). Существуют два типа печей для периодической плавки стекла. Первый – газовые печи, использующие в качестве теплоносителя природный газ, который, сгорая в специальных форсунках, своим пламенем разогревает и плавит стеклянную шихту. Второй тип – электрические печи, основанные на преобразовании электрической энергии в тепловую, которая непосредственно или, выделяясь в некотором промежуточном элементе, путем теплопроводности, конвекции или радиации передается стеклянной шихте и расплавляет ее.

Газовые печи имеют ряд недостатков, связанных с дефицитом и высокой стоимостью природного газа и его транспортировки, загрязнением окружающей среды продуктами сгорания, ограничениями выбора места установки печи и другие. В силу этого распространение в последние годы получили электрические печи, лишенные названных недостатков, удобные в эксплуатации, легко управляемые и обладающие большей энергетической эффективностью [1]. Так, газопламенные печи имеют удельные расходы энергии порядка 20 МДж/кг (5,7 кВт·час/кг), а электрические – 1 кВт·час/кг [2].

Электрические печи, в свою очередь, подразделяются на дуговые, печи сопротивления (прямого и косвенного) и индукционные. Последние наиболее экономичны и удобны для режима периодического действия ("day tank"). В них стеклянная шихта плавится в неохлаждаемом термостойком тигле, тепло в который поступает от нагретого до высокой температуры (выше температуры плавления стекла) токопроводящего графитового цилиндра, помещенного между тиглем и стеклом. При этом нагрев графитового цилиндра осуществляется токами повышенной частоты, индуцированными индуктором, который охватывает и графитовый цилиндр, и тигель [3]. Недостатком такой печи является непосредственный контакт между расплавленным стеклом и цилиндром, который приводит к химическим реакциям между графитом и стеклом, быстрому разрушению графита и загрязнению стекла.

Известны также электрические индукционные печи, в которых указанный недостаток устранен путем размещения токопроводящего цилиндра между тиглем и внутренней поверхностью термостойкой футеровки, а индуктор находится с внешней стороны футеровки [4]. Недостатком такого решения является повышенный расход тепла и, следовательно, электроэнергии на преодоление теплового сопротивления материала, заполняющего пространство между тиглем и цилиндром, а также увеличение расстояния между цилиндром и индуктором, что уменьшает интенсивность магнитного поля, индуцированные токи и ослабляет нагрев стекла. Общим недостатком печей при больших размерах тигля и весе стеклянной шихты (сотни-тысячи килограмм) является необходимость использо-

© Волков И.В., Кучерявая И.Н., 2019
 * ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0696-0382>

вания мощного (сотни-тысячи кВт) и дорогостоящего преобразователя промышленной частоты 50 Гц в повышенную частоту (до МГц).

В приведенных выше примерах тигель и токопроводящий цилиндр размещены внутри индуктора. В предлагаемой в настоящей работе печи, наоборот, индуктор помещается внутри тигля в форме круговой полый оболочки, охватывающей цилиндрический индуктор, а через общее внутреннее отверстие индуктора и тигля проходит стержень магнитопровода, окружающий всю конструкцию.

В статье рассматривается предложенный в Институте электродинамики НАН Украины вариант индукционной печи, предназначенной для периодического нагрева, плавления и варки стеклянной шихты при температуре 1400–1700⁰С, эффективной для большого объема (сотни кг загрузки) и высокой производительности (50–200 кг/час), например, однокамерной стекловаренной печи периодического действия типа "day tank" [5]. Поставленная задача актуальна с точки зрения достижения требуемой температуры стекла для получения расплавленной массы, обеспечения наибольшей равномерности нагрева стекломассы и максимальной производительности технологического процесса, а также решения проблемы энергосбережения – сокращения удельного расхода электроэнергии [6].

Цель работы состоит в проведении компьютерного моделирования предлагаемой конструкции индукционной печи и оптимизации на этой основе ее энергетических показателей.

1. Описание индукционной печи с внутренним индуктором. Эскиз предлагаемой печи с внутренним индуктором представлен на рис. 1 (продольный и поперечный разрезы печи). Средний стержень шихтованного магнитопровода 1 охвачен цилиндрическим индуктором 2, который, в свою очередь, окружен керамическим тиглем 5. Тигель выполнен в виде замкнутого кольцевого желоба и заполнен стеклянной шихтой 3, предназначенной для плавления. Внутрь стекломассы вставлен молибденовый тонкостенный цилиндр 4. Тигель находится между двумя слоями теплоизоляции ("тяжелой" и "легкой"), так же, как и крышка, и днище тигля (на рис. 1 они не обозначены). Отверстия и задвижки для заправки шихты и слива жидкого стекла, как и другие технические подробности, не показаны. Рис. 1 дает лишь общее представление о конструкции индукционной печи и ее особенностях.

В традиционных печах, два варианта которых описаны выше, индуктор окружает тигель и является по отношению к нему внешним, как это показано на рис. 2, тогда как предлагаемая конструкция отличается тем, что тигель вместе с молибденовым цилиндром охватывают индуктор, который по отношению к нему является внутренним (расположен внутри). Такое решение обеспечивает возможность питания печи без преобразователя частоты с помощью печного трансформатора 50 Гц.

При подключении индуктора к источнику питания за счет токов, наведенных переменным электромагнитным полем, происходит нагрев электропроводящего материала – молибденового цилиндра, вместе с ним нагревается и стекломасса, внутри которой находится цилиндр.

Компьютерное моделирование и анализ печей обоих типов, проводимые в дальнейшем, имеют целью сопоставление основных характеристик и выбор параметров, с помощью которых реализуется оптимизация печи. Поскольку перебор всех возможных сочетаний оптимизационных параметров достаточно велик, на первом этапе исследований используются двумерные (2D) модели, позволяющие выявить основные тенденции влияния таких сочетаний на оптимальность печи, а в дальнейшем использовать наилучшие из сочетаний для трехмерного (3D) моделирования процессов в печи (например, с использованием модели, подобной разработанной в работе [7]).

Физические модели печей для 2D и 3D моделирования представлены соответственно на рис. 3, а и б. Для перехода к 2D модели средний стержень квадратного сечения реального магнитопровода заменен стержнем кругового сечения той же площади, верхние и нижние ярма заменены дисками такого же сечения, а боковые стержни – цилиндром, стенки которого имеют такую же площадь сечения, как и боковые стержни. Это гарантирует, по крайней мере, такие же значения максимальной индукции магнитного поля, действующего на молибденовый цилиндр, и позволяет в первом

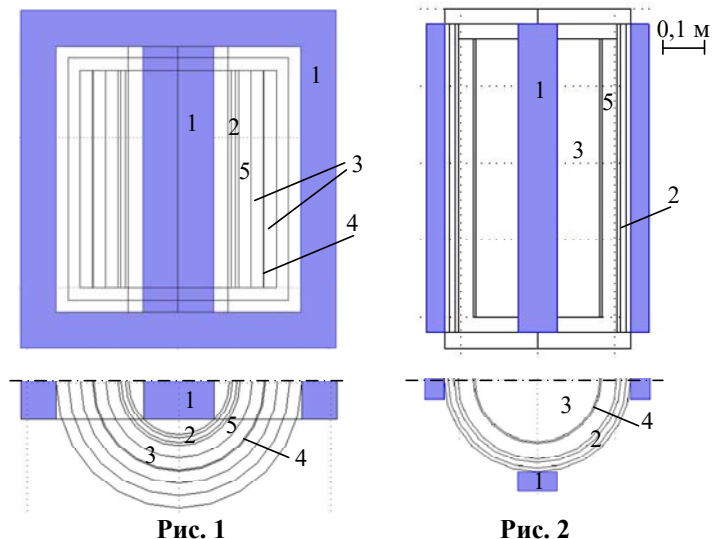


Рис. 1

Рис. 2

приближении использовать осесимметричную модель. Возможность использования 2D моделирования подтверждена путем сравнения его результатов с аналогичными результатами 3D моделирования. Отметим также, что методика эквивалентирования заслуживает отдельного рассмотрения.

2. Двумерное моделирование электро-тепловых процессов в индукционной печи. Модель для исследования взаимосвязанных электромагнитного и теплового процессов в индукционной печи при частоте источника питания 50 Гц строится в следующих предположениях:

- поскольку период изменения тока в обмотке индуктора при 50 Гц составляет 0,02 с и значительно превышает характерное время нагрева стекла (не менее 2–4 часов), необходимое для получения расплава, тепловая задача решается как нестационарная во временной области, а решение электромагнитной задачи проводится в частотной области; при этом для электромагнитной задачи представляется, что характеристики поля являются медленно меняющимися во времени функциями и реализуется синусоидальный процесс;
- учитываются нелинейные зависимости электропроводности молибденового цилиндра и теплопроводности стекломассы от температуры, что обуславливает сильную связь электромагнитной и тепловой задач и необходимость их одновременного решения [8], поэтому задачи решаются совместно методом конечных элементов в программе мультифизического моделирования Comsol [9];
- зависимость магнитной проницаемости магнитопровода от напряженности магнитного поля и температуры не учитывается ($\mu = const = 1000$);
- движение стекломассы под действием электромагнитных сил не рассматривается;
- тигель со стекляннной массой, индуктор и все остальные элементы печи предполагаются цилиндрическими, поэтому задачи решаются в двумерной постановке в цилиндрической системе координат $r\theta z$ относительно комплексных переменных – векторного магнитного потенциала $\dot{A}_\varphi(r, z, j\omega, t)$ и температуры $T(r, z, t)$.

Электромагнитная задача основывается на следующей системе дифференциальных уравнений относительно магнитного потенциала с единственной ненулевой составляющей $\dot{\mathbf{A}} = (0, \dot{A}_\varphi, 0)$:

$$j\omega\sigma(T)\dot{\mathbf{A}} + \nabla \times (\mu_0^{-1} \nabla \times \dot{\mathbf{A}}) = 0 \quad \text{– в молибденовом цилиндре;} \quad (1)$$

$$j\omega\sigma\dot{\mathbf{A}} + \nabla \times (\mu_0^{-1} \nabla \times \dot{\mathbf{A}}) = 0 \quad \text{– в области стекломассы;} \quad (2)$$

$$\nabla \times ((\mu_0\mu_r)^{-1} \nabla \times \dot{\mathbf{A}}) = 0 \quad \text{– в магнитопроводе;} \quad (3)$$

$$\nabla \times (\mu_0^{-1} \nabla \times \dot{\mathbf{A}}) = J_0 \quad \text{– в области индуктора;} \quad (4)$$

$$\nabla \times (\mu_0^{-1} \nabla \times \dot{\mathbf{A}}) = 0 \quad \text{– в остальных элементах.} \quad (5)$$

Здесь σ , μ_r – электропроводность и относительная магнитная проницаемость; μ_0 – магнитная проницаемость вакуума; ω – угловая частота; J_0 – заданная φ -составляющая средней плотности тока в индукторе; T – температура, определяемая из решения тепловой задачи, описанной далее; j – мнимая единица.

Начальные условия задачи: $\dot{A}_\varphi|_{t=0} = 0$. В качестве граничных условий выбирались: условие аксиальной симметрии – на оси симметрии; условие магнитной изоляции $\dot{A}_\varphi = 0$ – на внешних границах и условие непрерывности $\mathbf{n} \times (\dot{\mathbf{H}}_1 - \dot{\mathbf{H}}_2) = 0$ (\mathbf{n} – единичный вектор внешней нормали; $\dot{\mathbf{H}}$ – напряженность магнитного поля) – на внутренних границах. Электропроводность молибдена с ростом температуры задавалась зависимостью: $\sigma(T) = 1,2 \cdot 10^6 / (1 + 0,004(T - 293,15))$.

Тепловая задача решается с помощью следующего дифференциального уравнения:

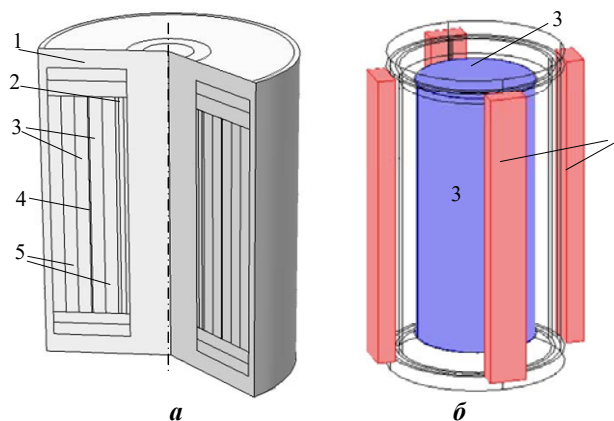


Рис. 3

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (\lambda \nabla T) = \begin{cases} Q & \text{в области стекла и молибденового цилиндра;} \\ 0 & \text{в остальных элементах печи.} \end{cases} \quad (6)$$

В уравнении (6): ρ , C_p , λ – плотность, удельная теплоемкость и теплопроводность материала соответственно; Q – удельная мощность источника тепла, обуславливающая индукционный нагрев наведенными токами и определяемая формулой

$$Q = \dot{J} \cdot J^* \sigma^{-1} = \omega^2 \sigma (\dot{A}_\phi \cdot A_\phi^*), \quad (7)$$

где $\dot{J} = -j\omega \sigma \dot{A}_\phi$ – действующее значение плотности наведенного тока; A_ϕ^* – комплексно-сопряженное значение магнитного потенциала.

Начальное условие нестационарной задачи (6): $T|_{t=0} = T_0 = 20^\circ\text{C}$, T_0 – температура окружающей среды. Для тепловой задачи принималось граничное условие Неймана $\partial T / \partial r = 0$ – на оси симметрии, на внешних границах расчетной области задавалось условие теплообмена с окружающей средой вида: $-\mathbf{n} \cdot (\lambda \nabla T) = k(T - T_0)$, k – коэффициент теплоотдачи. В области и на границах водоохлаждаемого индуктора температура полагалась равной 60°C . Теплопроводность стекла определялась выражением: $\lambda(T) = 1,34 + 0,0017(T - 293,15)$.

3. Сравнение основных показателей печей. Сравнение индукционных печей проводилось по таким показателям: производительность \bar{W} (кг/час), удельные расходы электроэнергии \bar{P} (кВт·час/кг), активная мощность P_A (кВт) и полная мощность S (кВА), потребляемые из сети 50 Гц.

2D-моделирование выполнялось для печей средней по весу загрузки стеклянной шихты – 230 кг и сравнительно большой загрузки – 800 кг стекла. Поскольку показатели печи существенно зависят от соотношения ее высоты и диаметра, моделирование проводилось для трех значений так называемого коэффициента формы – отношения радиуса молибденового цилиндра r к его высоте h , – $k_\phi = r/h = 0,21; 0,39; 1,1$. В частности, для печи с загрузкой стекла 230 кг при $k_\phi = 0,39$ и нагреве молибденового цилиндра до температуры 1700°C , что обеспечивает температуру во всем объеме тигля не менее 1400°C (при начальной 20°C) и плавление в таком случае стеклянной шихты, основные показатели оказались такими, как и приведенные в таблице. Данные таблицы показывают, что полная мощность, потребляемая из сети (а, следовательно, и ток), у традиционной печи с внешним индуктором в 35 раз больше, чем у печи с внутренним индуктором. Во столько же раз должна быть увеличена установленная мощность печного трансформатора или цеховой подстанции. Физически это объясняется двумя обстоятельствами – значительно большим диаметром внешнего индуктора и принципиальной невозможностью использования замкнутого магнитопровода.

	Частота, Гц	\bar{W} , кг/час	\bar{P} , кВт·час/кг	P_A , кВт	S , кВА	Время нагрева, час
Печь с внешним индуктором	50	57,5	1,42	82	5800	4
Печь с внешним индуктором	5000	28,0	1,8	138	204	8
Печь с внутренним индуктором	50	57,5	2,71	156	164	4

Компенсировать большую потребляемую реактивную мощность можно и батареей косинусных конденсаторов, однако габариты, вес и стоимость такой батареи превысят разумные пределы.

Приведенные соображения полностью исключают целесообразность применения печей традиционной конструкции без преобразования частоты 50 Гц в существенно более высокую частоту. Отметим также, то печь, использующая питание индуктора при частоте 5000 Гц, помимо высокой стоимости преобразователя частоты мощностью свыше 200 кВА, имеет вдвое меньшую производительность и, следовательно, вдвое большее время нагрева.

4. Результаты компьютерного моделирования. С учетом обоснованных преимуществ новой конструкции индукционной печи дальнейшие исследования проводились для нее.

Результаты численного моделирования показаны на рис. 4, а и б соответственно для печи с загрузкой стекла 230 кг и 800 кг.

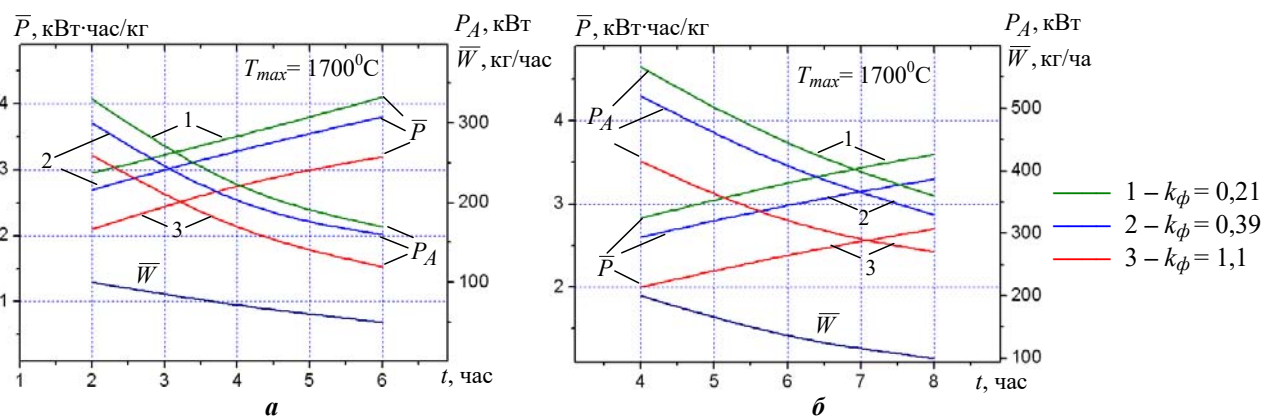


Рис. 4

Как видно из рис. 4, с увеличением допустимого по технологическим соображениям времени нагрева до температуры 1700°C потребляемая из сети мощность P_A уменьшается, но удельные расходы электроэнергии \bar{P} возрастают, причем эта тенденция наблюдается как для меньшей (с нагрузкой 230 кг), так и большей (800 кг) печи и при любом значении коэффициента k_{ϕ} . Абсолютные же значения этих показателей улучшаются с увеличением k_{ϕ} . Так, например, для печи 230 кг с $k_{\phi} = 0,21$ и временем нагрева 5 часов удельные расходы электроэнергии составляют 3,8 кВт·час/кг, а с коэффициентом $k_{\phi} = 1,1$ они снижаются до 2,9 кВт·час/кг при производительности 65 кг/час. Аналогично для печи 800 кг эти показатели составляют 3,2 и 2,1 кВт·час/кг при производительности 160 кг/час. Отметим, что при вычислении показателей P_A и \bar{P} за основу принимались полученные в результате расчета значения резистивных потерь молибденового цилиндра (значения Q , вычисленные согласно выражению (7), – Resistive heating в программе Comsol). Такие значения Q удваивались в предположении, что потери в индукторе примерно равны энергии, выделяемой в цилиндре.

Данные рис. 4 показывают, что удельные энергозатраты печи уменьшаются, во-первых, с ростом ее высоты по отношению к диаметру, а, во-вторых, с увеличением ее абсолютных размеров (веса загрузки стекла). Аналогичная тенденция относится и к потребляемой из сети мощности – с увеличением k_{ϕ} в тех же пределах потребляемая мощность при той же производительности уменьшается с 410 до 320 кВт для печи 230 кг и с 510 до 360 кВт – для печи 800 кг.

Таким образом, печи индукционного типа эффективнее при большей высоте по отношению к их диаметру и как можно большей загрузке стекла. Ограничения указанных параметров диктуются только конструкционными возможностями проектируемой печи, допустимой установленной мощностью цеха, в котором предполагается эксплуатация печи, и экономическими соображениями.

5. Оптимизация энергетических показателей.

Регулирование тока индуктора. Дальнейшие возможности улучшения энергетических показателей печи предполагают использование метода регулирования тока индуктора в течение времени нагрева и плавления стекломассы. Простейшим способом является трехступенчатое регулирование тока с одинаковыми интервалами по времени.

На рис. 5 построена ступенчатая функция изменения плотности подаваемого в индуктор тока в течение цикла работы для печи 800 кг. Здесь плотность тока J указана для одновиткового индуктора (для N -виткового индуктора она будет в N раз меньше). Данные рис. 5 соответствуют коэффициенту формы $k_{\phi} = r / h = 0,59 \text{ м} / 0,54 \text{ м} = 1,1$ и времени нагрева $t_{\max} = 6$ часов.

Математическая запись функции, определяющей плотность тока, использованная при моделировании печи 800 кг, имеет вид (время переключения выражено в секундах)

$$J = 3,9 \cdot 10^5 \{0,5 \cdot [1 - \text{sign}(t - 7200)] + 0,4 \cdot [\text{sign}(1 - 7200) - \text{sign}(t - 14400)] + 0,32 \cdot [\text{sign}(t - 14400) - \text{sign}(t - 21600)]\}. \quad (8)$$

Для печи 800 кг получен средний удельный расход электроэнергии $\bar{P} = 0,84$ кВт·час/кг, что намного лучше, чем при постоянной амплитуде тока нагрева (рис. 4). Максимальная потребляемая мощность при этом на каждом этапе составляет 128, 116 и 92 кВт. Другое важное преимущество сту-

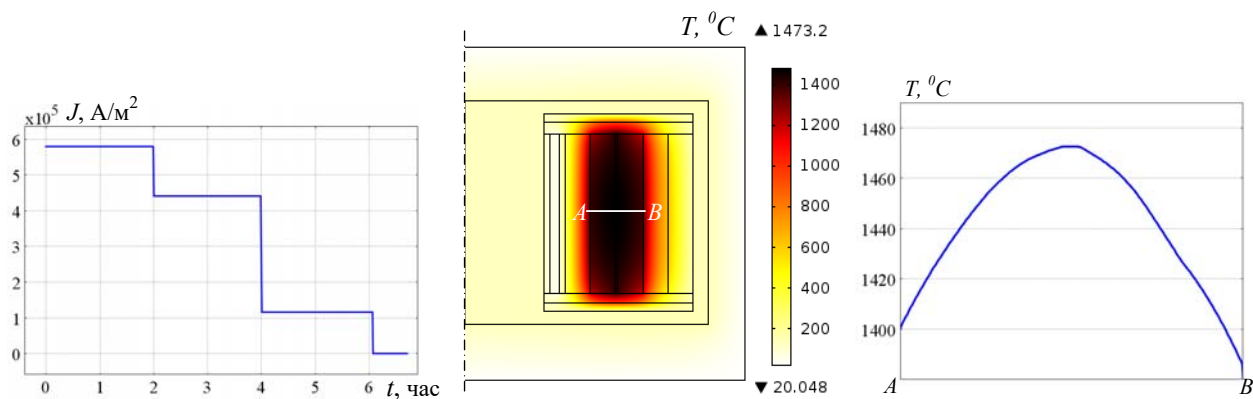


Рис. 5

пенчатого нагрева заключается в более равномерном распределении температуры по среднему сечению тигля (вдоль линии AB на рис. 5): от 1475°C на оси до 1400°C вблизи стенки тигля, в то время как при постоянной амплитуде тока эти значения составляли соответственно 1700°C и 1430°C .

При ступенчатом регулировании тока по закону, аналогичному выражению (8), наблюдается улучшение показателей и для печи с загрузкой стекла 230 кг.

Выбор толщины молибденового цилиндра. Существенное влияние на энергопотребление печи имеет выбор толщины стенки молибденового цилиндра. Как показано в результате компьютерного моделирования, для каждого коэффициента формы k_{ϕ} зависимость удельного электропотребления имеет параболический характер с выраженным минимумом (рис. 6).

На рис. 6 эта зависимость приведена для печи 800 кг с коэффициентом формы $k_{\phi} = 1$ при ступенчатом регулировании тока по приведенному выше закону (8). Видно, что минимальное удельное электропотребление реализуется при толщине молибденового цилиндра в диапазоне 8–9 мм.

Закключение. Сопоставление результатов компьютерного моделирования двух вариантов конструкции индукционных стекловаренных печей – с внешним и внутренним индуктором – подтвердило предположение о существенном преимуществе последней применительно к печам большого объема, питающимся от сети промышленной частоты 50 Гц. Преимущество это возрастает с ростом объема (тоннажа) печи.

Использование на первом этапе двумерной модели расчета электротепловых процессов в печах дает возможность оценить основные тенденции и способы оптимизации энергетических показателей печей, сократить количество варьируемых вариантов и в последующем проводить трехмерное моделирование более детализированных конструкций печей.

Установлено, что улучшению энергетических показателей и равномерности температуры расплава стекла по сечению ванны способствуют:

- увеличение высоты печи по отношению к ее диаметру;
- ступенчатое либо непрерывное уменьшение тока индуктора в ходе нагрева и плавки стекла;
- выбор оптимального значения толщины стенки молибденового цилиндра, находящегося в объеме стекломассы.

Предлагаемые индукционные печи с "внутренним" индуктором целесообразно использовать также для плавки базальта и других горных пород.

1. Glasstronics. URL: <http://www.glasstronics.co.uk/news.html>

2. Яковчук П.С., Солтисік Р.А., Почапська І.Я. Особливості застосування електронагрівання під час виробництва скла. *Вісник Національного університету Львівська політехніка, бюлетень Електроенергетичні та електромеханічні системи*. 2009. № 654. С. 277–280.

3. Лобода А.С., Дуб В.С., Якубов Ш.А., Литвак В.А. Индукционная тигельная печь. Патент SU 1091005 А, 07.05.1984.

4. Дятлов В.А., Челтыгдашев М.П., Ширяев А.В. Индукционная тигельная печь-термос. Патент РФ 2213311, 27.09.2003.

5. Hubert M. Basics of industrial glass melting furnaces. IMI-NFG Course on Processing in Glass, 2015. 75 p. URL: https://www.lehigh.edu/imi/teched/GlassProcess/Lectures/Lecture03_Hubert_industglassmeltfurnaces.pdf
6. Товажнянський Л.Л., Кошельник В.М., Соловей В.В., Кошельник А.В. Интегрированные энергосберегающие теплотехнологии в стекольном производстве. Харьков: НТУ ХПИ, 2008. 628 с.
7. Волков И.В., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Электромагнитные, тепловые и гидродинамические процессы при индукционном нагреве выходного канала стекловаренной печи. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2018. Вип. 51. С. 113-120.
8. Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Мультифизическое моделирование электротехнических устройств. *Техн. електродинаміка*. 2015. № 2. С. 3–15.
9. Comsol multiphysics modeling and simulation software. URL: <http://www.comsol.com/>

УДК 621.365.51

МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ НОВОЇ ІНДУКЦІЙНОЇ СКЛОВАРНОЇ ПЕЧІ З "ВНУТРІШНІМ" ІНДУКТОРОМ

І.В. Волков, чл.-кор. НАН України, **І.М. Кучерява**, докт.техн.наук

Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна.

E-mail: ig.volkov@ukr.net

Виконано математичне моделювання електромагнітних і теплових процесів в індукційній скловарній печі нової конструкції, у якій замкнений магнітопровід охоплює як індуктор, так і тигель у вигляді порожнього кільцевого жолоба. Показано можливість і доцільність роботи пропонованої печі при живленні струмом промислової частоти 50 Гц. Проведено порівняння основних характеристик печі з аналогічними характеристиками індукційних печей традиційного типу. Показано, що питомі витрати електроенергії та споживана з мережі потужність пропонованої печі істотно менші. Наведено рекомендації щодо вибору параметрів печі, спрямовані на оптимізацію її основних енергетичних характеристик. Бібл. 9, табл. 1, рис. 6.

Ключові слова: скловарна піч, індукційний нагрів, магнітопровід, енергетичні показники, регулювання струму, комп'ютерне моделювання, оптимізація.

MODELING AND OPTIMIZATION OF NEW GLASS MELTING FURNACE WITH "INNER" INDUCTOR

I.V. Volkov, I.M. Kucheriava

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,

pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine.

E-mail: ig.volkov@ukr.net

The mathematical modeling of electromagnetic and thermal processes in the induction glass melting furnace of new design is carried out. The furnace has a closed magnetic core that envelops both an inductor and a crucible in the form of a hollow circular chute. The possibility and expediency of the furnace operation with industrial frequency (50 Hz) power-line supply are grounded. The basic characteristics of the furnace are compared with the corresponding characteristics of traditional induction furnaces. As shown, the specific electric energy consumption and power consumption from line are substantially less for the proposed furnace. The propositions for furnace parameters providing the optimized energy characteristics are given. References 9, table 1, figures 6.

Key words: glass melting furnace, induction heating, magnetic core, energy characteristics, current control, computer modeling, optimization.

1. Glasstronics. URL: <http://www.glasstronics.co.uk/news.html>
2. Yakovchuk P.E., Soltusik P.A., Pochapska I.Ya. The features of application of electroheating in glass production. *Visnyk Natsionalnoho universytetu Lvivska polytechnika, Elektroenerhetychni ta elektromekhanichni systemy*. 2009. No 654. Pp. 277–280. (Ukr)
3. Loboda A.S., Dub V.C., Yakubov Sh.A., Litvak V.A. Induction crucible furnace. Patent SU 1091005 A, 1984. (Rus)
4. Diatlov V.A., Cheltygdashev M.P., Shiriaev A.V. Induction crucible furnace-thermos. Patent RU 2213311, 2003. (Rus)
5. Hubert M. Basics of industrial glass melting furnaces. IMI-NFG Course on Processing in Glass, 2015. 75 p. URL: https://www.lehigh.edu/imi/teched/GlassProcess/Lectures/Lecture03_Hubert_industglassmeltfurnaces.pdf
6. Tovazhnianskii L.L., Koshelnik V.M., Solovei V.V., Koshelnik A.V. Integrated energy-efficient thermal technologies in glass production. Kharkiv: NTU KhPI, 2008. 628 p. (Rus)
7. Volkov I.V., Podoltsev O.D., Kucheriava I.M. Electromagnetic, thermal and hydrodynamic processes at induction heating of output channel of glass melting furnace. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky NAN Ukrainy*. 2018. No 51. Pp. 113-120. (Rus)
8. Podoltsev O.D., Kucheriava I.M. Multiphysics modeling of electrotechnical devices. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2015. No 2. Pp. 3–15. (Rus)
9. Comsol multiphysics modeling and simulation software. URL: <http://www.comsol.com/>

Надійшла 30.08.2018
Остаточний варіант 03.09.2018