

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОЙ РАБОТЫ РЕБЕР В ВИДЕ ШИПОВ В КОНСТРУКЦИИ ПОДОВОГО ЭЛЕКТРОДА ДУГОВОЙ ПЕЧИ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ВОЗДУШНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ

*Ячиков И.М., Волгин Е.Л., Вдовин К.Н., Феоктистов Н.А.*

**Аннотация.** Рассмотрена проблема охлаждения подового электрода дуговой печи постоянного тока. В качестве альтернативы водяного охлаждения предлагается принудительное воздушное охлаждение электрода с размещением на его медной части радиатора в виде шипов. Предложена математическая модель для определения снимаемой шипами тепловой мощности. Полученная краевая задача решена аналитическим и численным методами. Создан программный продукт, позволяющий определить параметры воздушного радиатора с использованием круглых шипов при разном порядке расположения их на поверхности охлаждения. Расчеты с использованием пакета прикладных программ *MATLAB* показали, что аналитическое решение выполняется быстрее численного в среднем в два раза. Компьютерное моделирование установило принципиальную возможность перехода на воздушное охлаждения подового электрода дуговой печи малой мощности путем применения ребер в виде шипов в качестве радиатора охлаждения. Подобные конструкции теплообменников при прочих равных условиях по сравнению с кольцевыми и вертикальными ребрами обладают высокой эффективностью и низкой материалоемкостью.

**Ключевые слова:** моделирование, шипы охлаждения, тепловой поток, воздушное охлаждение, эффективность ребра, подовый электрод.

### SIMULATION OF THERMAL PERFORMANCE OF EDGES IN THE FORM OF PINS IN THE DESIGN OF THE BOTTOM ELECTRODE DCAF AIR COOLED

*Yachikov I.M., Volgin E.L., Vdovin K.N., Feoktistov N.A.*

**Abstract.** The problem of cooling of the bottom electrode DC arc furnace is reviewed. Alternative of water cooling is the forced air cooling of the electrode with its placement on the copper part of the radiator in the form of spikes. A mathematical model for determination the thermal power which is removable by spikes is offered. The resulting boundary value problem is solved by analytical and numerical methods. Software for determination the size of the air radiator with round spikes when a different order of their location on the surface of cooling was created. Calculations using the *MATLAB* application package are shown that the analytical solution is faster than numerical average twice. Computer modeling has established the fundamental switching to air-cooled bottom electrode arc furnace by applying a low power of edges in the form of pins as a heat sink. Similar designs of heat exchangers, *ceteris paribus*, compared with the ring and vertical fins have high efficiency and low consumption of materials.

**Keywords:** modeling, thorns cooling, heat flow, air cooling, the effectiveness of the ribs, bottom electrode.

#### Введение

Одним из основных элементов дуговой печи постоянного тока (ДППТ) является подовый электрод, позволяющий подводить ток к шихте или к жидкому металлу. На российских предприятиях, как правило, используются варианты конструкции подового электрода, состоящие из стальной головки, контактирующей с жидким металлом, и медного водоохлаждаемого корпуса (рис. 1). Стальная часть обеспечивает способность электрода самовосстанавливаться, а медная – является зоной охлаждения, она вынесена за пределы корпуса печи.

При работе ДППТ стальная часть электрода плавится, образуя в месте контакта с расплавом анодную яму, глубина которой определяется интенсивностью охлаждения. Одним из основных недостатков такой конструкции подового электрода является опасность контакта расплавленного металла с водой. Поэтому на металлургических предприятиях, использующих ДППТ, тепловое состояние подового электрода и параметров водяного охлаждения тщательно контролируется [1].

Одной из альтернативных мер по повышению безопасности работы ДППТ является изменение конструкции подового электрода путем перехода с водяного на воздушное охлаждение. Из литературных источников известно, что воздушное охлаждение подового электрода ДППТ уже используется на ряде предприятий за рубежом. Трудности перехода с водяного на воздушное охлаждение связаны с обеспечением приемлемых тепловых условий работы подового электрода из-за относительно низких коэффициентов теплоотдачи и теплоемкости воздуха по сравнению с водой. Отсюда возникает необходимость разработки конструкции теплообменника и выбор рациональных параметров охлаждения.

Проблема перехода с водяного на воздушное охлаждение поднималась в ряде работ, в частности было рассмотрено математическое и компьютерное моделирование воздушного охлаждения подового электрода [1-5]. Для интенсификации теплообмена были предложены

различные конструкции теплообменников с применением кольцевых [2] или прямых [5] ребер, приведена их сравнительная характеристика, дана оценка принципиальной возможности их использования при переходе на воздушное охлаждение. Так расчет теплового состояния подового электрода 5 т ДППТ ( $2R=122\text{ мм}$ ,  $h_c=100\text{ мм}$ ,  $h_m=250\text{ мм}$ ) показал, что для его нормальной работы тепловой поток, отводимый с его торца водой, составляет  $q \approx 0,4\text{ МВт/м}^2$ , а отводимая мощность – 5-6 кВт. Однако существуют и другие конструкции радиаторов и возможности интенсификации теплообмена при воздушном охлаждении.

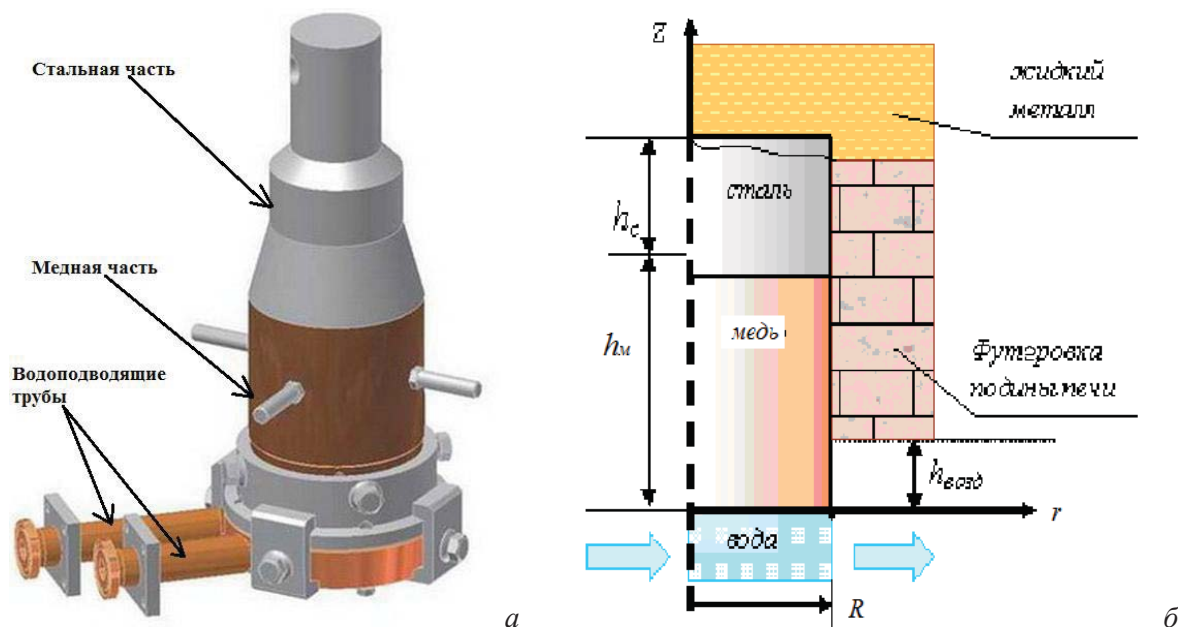


Рис. 1. Подовый электрод ДППТ: а – с водяным охлаждением; б – схематическое изображение и основные размеры

Целью данной работы является рассмотрение принципиальной возможности принудительного воздушного охлаждения подового электрода с размещением на его медной части радиатора в виде шипов.

### Математическая модель теплового состояния ребер в виде шипов

На рис. 2а представлено изображение поверхности оребренной шипами круглого поперечного сечения.

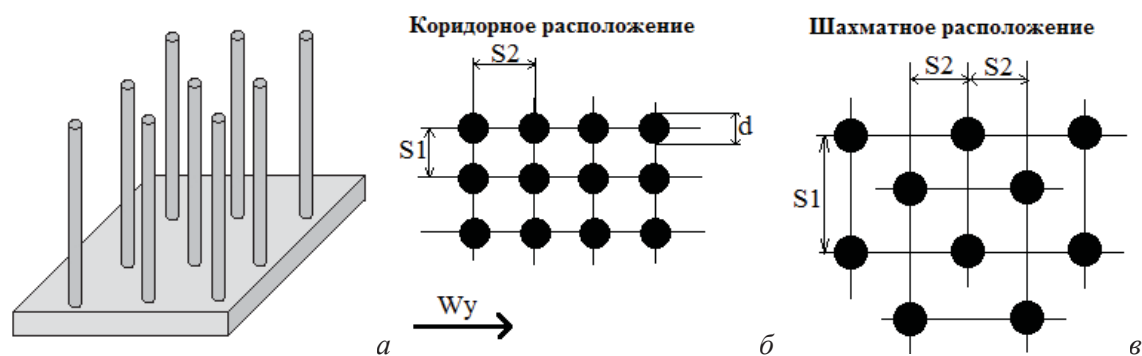


Рис. 2. Поверхность оребренная шипами: а – пространственное расположение шипов; б – коридорная схема расположения шипов; в – шахматная схема расположения шипов

Полагаем, что контур профиля шипа описывается уравнением  $\tilde{\delta}_y = Y^p$ , где  $\tilde{\delta}_y$  – безразмерная толщина шипа на расстоянии  $y$  от вершины;  $Y$  – безразмерная координата;  $p$  – профиль шипа по его высоте. В этом случае уравнение теплопроводности имеет следующий вид [7]

$$Y^2 \frac{d^2\theta}{dY^2} + 2pY \frac{d\theta}{dY} - N^2 Y^{2-p} \theta = 0, \quad (1)$$

где  $N = \sqrt{\frac{\alpha P_0}{\lambda f_0}} h = \sqrt{\frac{4\alpha}{\lambda \delta_0}} h$ ;  $\theta$  – безразмерная температура,  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала ребра;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи;  $\delta_0, f_0, P_0$  – диаметр, площадь и периметр в основании шипа соответственно;  $h$  – высота шипа.

Дифференциальное уравнение дополним граничными условиями

$$\begin{cases} \theta = 1, & \text{при } Y = 1; \\ \frac{d\theta}{dY} = 0, & \text{при } Y = 0. \end{cases} \quad (2)$$

Получаем краевую задачу (1) - (2).

Тепловую эффективность шипа  $\eta$  определим как отношение отводимого им теплового потока  $Q_0$  к тепловому потоку  $Q_{\max}$ , который бы отвел идеальный шип, имеющий материал с бесконечно большой теплопроводностью и постоянной температурой всей поверхности,  $\theta_0 = \text{const}$ . Эффективность шипа будет выражаться следующим образом

$$\eta = \frac{Q_0}{Q_{\max}} = \frac{\lambda f_0 \left( \frac{d\theta}{dY} \right)_{Y=h}}{\alpha F \theta_0} = \frac{p+1}{N^2} \frac{d\theta}{dY} \Big|_{Y=1}. \quad (3)$$

При вынужденном обтекании шипов воздухом средний коэффициент теплоотдачи  $\alpha = Nu \lambda_{жс} / \delta_0$  определяется по критериальному уравнению для турбулентного течения жидкости в зависимости от расположения шипов на поверхности охлаждения.

Для коридорного расположения (см. рис. 2б) [7]

$$Nu = 0,26 \cdot Re^{0,65} \cdot Pr_{жс}^{0,33} \left( \frac{Pr_{жс}}{Pr_c} \right)^{0,25} \varepsilon_s, \quad (4)$$

где  $\varepsilon_s = \left( \frac{s_2}{d} \right)^{-0,15}$ ,  $s_2$  – расстояние между шипами.

Для шахматного расположения (см. рис. 2в)

$$Nu = 0,41 \cdot Re^{0,5} \cdot Pr_{жс}^{0,33} \left( \frac{Pr_{жс}}{Pr_c} \right)^{0,25} \varepsilon_s, \quad (5)$$

где  $\varepsilon_s$  выражается следующим образом

$$\begin{cases} \varepsilon_s = \left( \frac{s_1}{s_2} \right)^{1/6} & \text{при } \frac{s_1}{s_2} < 2; \\ \varepsilon_s = 1,12 & \text{при } \frac{s_1}{s_2} > 2, \end{cases} \quad (6)$$

где  $s_1, s_2$  – расстояние между шипами.

При этом для обеспечения точности расчетов должно быть отношение  $s_{1,2}/d$  находится в диапазоне от 1,0 до 4,0, где  $d = \delta_0$  – диаметр основания шипа.

Число Рейнольдса определяется как  $Re = W_y \delta_0 / \nu_{жс}$ , где  $W_y$  – скорость потока охлаждающего воздуха,  $\nu_{жс}$  – кинематическая вязкость воздуха.

Уравнение (1) представляет собой частный случай обобщенного уравнения Бесселя [8, 9]. Его решение с учетом граничных условий (2) можно записать как

$$\theta = Y^A \frac{I_{-n}(MY^C)}{I_{-n}(M)}, \quad (7)$$

$$\text{где } A = \frac{1-2p}{2}, \quad C = \frac{2-p}{2}, \quad M = \frac{2N}{2-p}, \quad n = \frac{1-2p}{2-p}.$$

Для шипа вогнутого параболического профиля решение не может быть представлено в бесселевых функциях. В этом случае уравнение (1) принимает вид

$$Y^2 \frac{d^2\theta}{dY^2} + 4Y \frac{d\theta}{dY} - N^2\theta = 0. \quad (8)$$

Его решение, удовлетворяющее граничным условиям (2), записывается

$$\left\{ \begin{array}{l} Y^k, k = -\frac{3}{2} + \frac{3}{2} \left( 1 + \frac{4}{9} N^2 \right)^{\frac{1}{2}}; \\ \eta = \frac{2}{1 + \left( 1 + \frac{4}{9} N^2 \right)^{\frac{1}{2}}}. \end{array} \right. \quad (9)$$

Краевая задача (1) - (2) решалась аналитическим и численным методами. Для численного решения задача представлялась как система обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка, и использовался метод «стрельбы» для поиска недостающего начального условия, таким образом исходная краевая задача сводилась к задаче Коши. Для нахождения численного решения в пакете прикладных программ *MATLAB* использовалась встроенная функция *bvp4c*. Создан программный продукт, позволяющий определить параметры воздушного радиатора с использованием круглых шипов при разном порядке расположения их на поверхности охлаждения.

### Моделирование и обработка результатов

Моделирование проводилось для цилиндрического медного электрода с воздушным охлаждением, имеющего медные шипы при  $p=0$ . Расчет выполнен при условиях тепловой работы подового электрода, имеющего водяное охлаждение, при котором температура в основании шипа  $t_0 \approx 400$  °C. При моделировании принимали температуру охлаждающего потока воздуха  $t_{ж}=30$  °C; расстояние между шипами  $s_1=s_2=30$  мм.

На рис. 3 показано распределение температуры по высоте шипа при разных диаметрах основания  $\delta_0$  и расположениях шипов. Видно, что эффективность шипа растет с увеличением диаметра основания и падает с увеличением длины шипа. Так же следует отметить, что коридорное расположение шипов более эффективно при небольших диаметрах основания шипа, а шахматное - при больших диаметрах.

На рис. 4-5 приведены зависимости отводимой тепловой мощности от диаметра основания шипа при разной скорости охлаждающего потока воздуха, высоты шипа и расположения шипов по поверхности. Видно, что в зависимости от этих факторов отводимый тепловой поток от одного шипа может составлять 50-600 Вт. Использование ребер треугольного, вогнутого или выпуклого параболического профиля ( $p \neq 0$ ) приводит к небольшому снижению отводимого тепла, но при этом снижается масса шипа.

При помощи компьютерного моделирования было установлено, что для рассмотренной конструкции подового электрода (ДППТ емкостью 5 т) использование 120-130 шипов с диаметром у основания  $\delta_0=10$  мм, высотой  $h=100$  мм и вогнутым параболическим профилем общей массой около 3 кг позволит осуществить переход с водяного на воздушное охлаждение при средней скорости охлаждающего потока воздуха 10 м/с. Проведенное ранее математическое моделирование [1, 5] показывает, что для воздушного охлаждения такого же подового электрода при схожих условиях потребуется 2-3 кольцевых ребра с вогнутым параболическим профилем, имеющих у основания толщину 10 мм, внешний радиус 161 мм и общую массу около 8 кг или 8-9 прямых вертикальных ребер с вогнутым параболическим профилем,

имеющих длину и высоту 100 мм, толщину у основания 10 мм и общую массу около 7 кг. Это свидетельствует о высокой эффективности и низкой материалоемкости применения ребер в виде шипов в качестве радиатора охлаждения.

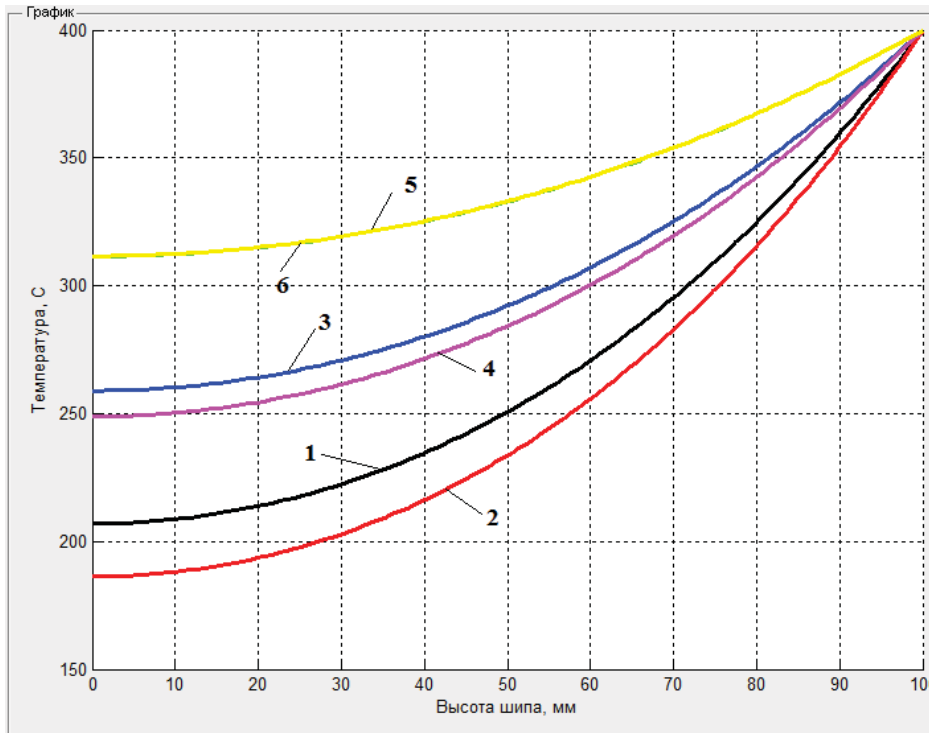


Рис.3. Фрагмент окна с распределением температуры по высоте шипа при следующих параметрах: 1 –  $\delta_0=10$  мм, расположение коридорное ( $\eta = 0,66$ ); 2 –  $\delta_0=10$  мм, расположение шахматное ( $\eta = 0,63$ ); 3 –  $\delta_0=15$  мм, расположение коридорное ( $\eta = 0,76$ ); 4 –  $\delta_0=15$  мм, расположение шахматное ( $\eta = 0,74$ ); 5 –  $\delta_0=25$  мм, расположение коридорное ( $\eta = 0,85$ ); 6 –  $\delta_0=25$  мм, расположение шахматное ( $\eta = 0,85$ )

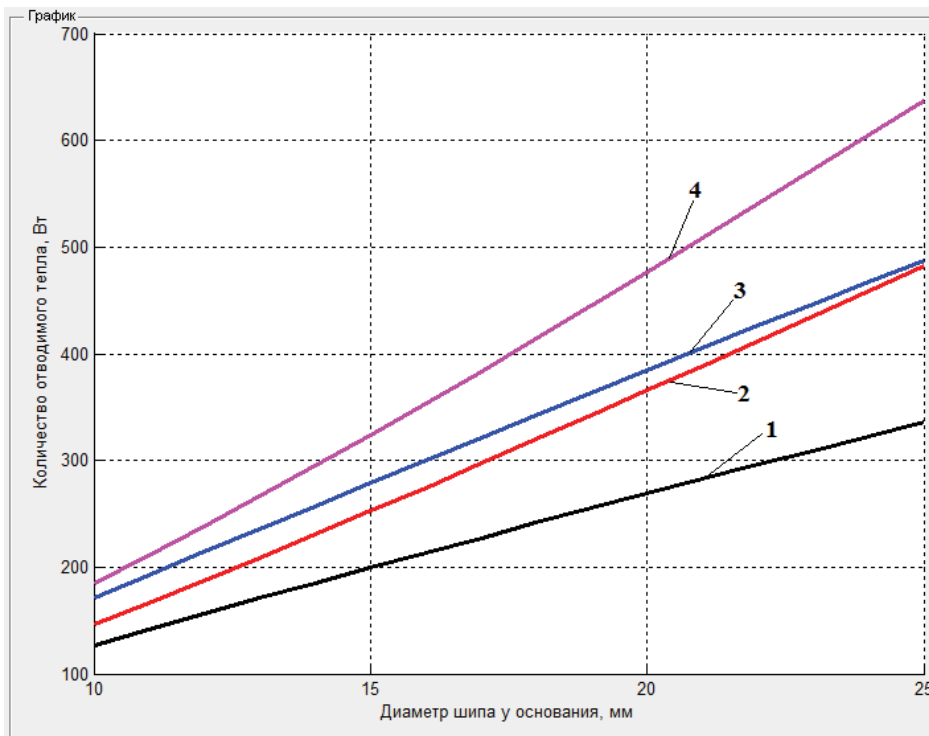


Рис. 4. Фрагмент окна с зависимостью количества отводимого тепла от диаметра основания шипа (расположение шипов коридорное) при: 1 –  $W_y = 10$  м/с,  $h = 100$  мм; 2 –  $W_y = 10$  м/с,  $h = 200$  мм; 3 –  $W_y = 20$  м/с,  $h = 100$  мм; 4 –  $W_y = 20$  м/с,  $h = 200$  мм

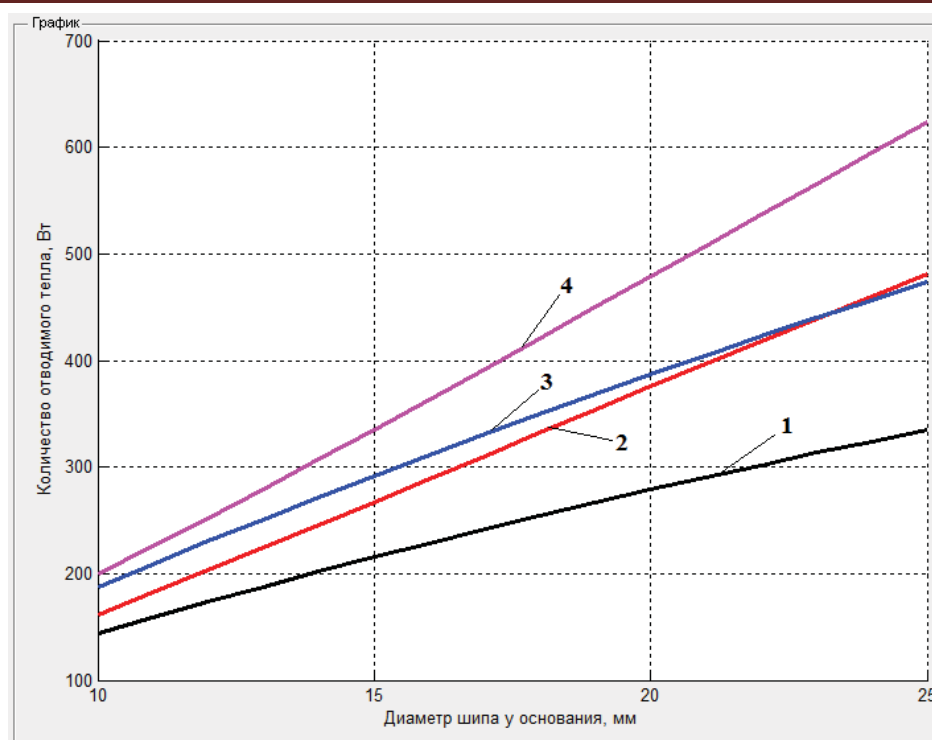


Рис. 5. Фрагмент окна с зависимостью отводимой тепловой мощности от толщины основания шипа (расположение шипов шахматное): 1 –  $W_y = 10$  м/с,  $h = 100$  мм; 2 –  $W_y = 10$  м/с,  $h = 200$  мм; 3 –  $W_y = 20$  м/с,  $h = 100$  мм; 4 –  $W_y = 20$  м/с,  $h = 200$  мм

## Заключение

Таким образом, создан программный продукт, позволяющий определить параметры воздушного радиатора с использованием круглых шипов при разном порядке расположения их на поверхности охлаждения. Проведенный анализ использования аналитического и численного методов решения краевой задачи показал, что для достижения относительной точности 0,001 достаточно около 100 итераций. Расчеты с использованием пакета прикладных программ *MATLAB* показали, что аналитическое решение выполняется быстрее численного в среднем в два раза.

Проведенное компьютерное моделирование обосновало принципиальную возможность перехода с водяного на воздушное охлаждения подового электрода дуговой печи малой мощности, имеющего ребра охлаждения в виде шипов. Подобные конструкции теплообменников при прочих равных условиях по сравнению с кольцевыми и вертикальными ребрами обладают высокой эффективностью и низкой материалоемкостью.

## Список использованных источников

1. Ячиков, И.М. Моделирование теплового состояния подового электрода дуговой печи постоянного тока при переходе с водяного на воздушное охлаждение / И.М. Ячиков, Т.П. Ларина // *Сталь*. – 2014. – № 8 – С. 58-64.
2. Ячиков, М.И. Использование кольцевых ребер в конструкции подового электрода ДППТ с воздушным охлаждением / М.И. Ячиков, О.С. Логунова, И.М. Ячиков // *Материалы 71-й научн.-техн. конф. «Актуальные проблемы современной науки, техники и образования»*. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорского гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2013. – Т. 2. – С. 89-93.
3. Ячиков, М.И. Моделирование теплового состояния подового электрода ДППТ с водяным и воздушным охлаждением / М.И. Ячиков, И.М. Ячиков // *Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве: сб. докл. II Всероссийской НПК студентов, аспирантов и молодых ученых*. – Екатеринбург: Изд-во УРФУ, 2013. – С. 123-127.
4. Ячиков, И.М., Моделирование теплового состояния подового электрода ДППТ с воздушным охлаждением / И.М. Ячиков, М.И. Ячиков // *Прикладная математика и информационные технологии в науке и образовании: Материалы Всероссийской заочн. научн.-практ. конф.* – Уфа: Изд-во РИЦ БашГУ, 2013. – С.124-130.
5. Миронец, И.Е. Сравнение эффективности теплоотвода кольцевых и прямых ребер воздушного охлаждения [Текст] / И.Е. Миронец, И.М. Ячиков // *Актуальные проблемы современной науки, техники и образования*, 2014. – Т. 2. – №1. – С. 181-185.
6. Ячиков, И.М. Математическая модель теплового состояния составного подового электрода ДППТ / И.М. Ячиков, М.В. Киреева // *Теория и технология металлургического производства: Межрегион. сб. науч. работ*. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорского гос. техн. ун-та, 2011. – Вып. 11. – С. 183-188.

7. Ройзен, Л. И. Тепловой расчет ребренных поверхностей /Л.И. Ройзен, И.Н. Дулькин. – Под ред. В.Г. Фастовского. – М: Энергия, 1977. - 256 с.
8. Три лекции по теории функций Бесселя : Учебно-методическое пособие / А.Б. Балакин. – Казань: Казанский государственный университет, 2009. – 39 с.
9. Белоусов, М.Д. Метод самодиагностики термопреобразователя сопротивлений в процессе работы [Текст] / М.Д. Белоусов, А.Л. Шестаков // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника, 2009. – № 3 (136). – С. 1719.

**Ячиков Игорь Михайлович** – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры вычислительной техники и программирования ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». E-mail: [jachikov@mail.ru](mailto:jachikov@mail.ru).

**Волгин Евгений Леонидович** – студент гр. АВБ-11-1ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». E-mail: [e.volgin51@yandex.ru](mailto:e.volgin51@yandex.ru).

**Вдовин Константин Николаевич** – д-р техн. наук, проф., заслуженный деятель науки Российской Федерации, заведующий кафедры литейного производства и материаловедения ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». E-mail: [vdovin@magtu.ru](mailto:vdovin@magtu.ru).

**Феоктистов Николай Александрович** - канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры литейного производства и материаловедения ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». E-mail: [fna87@mail.ru](mailto:fna87@mail.ru).

---

Ячиков И.М., Волгин Е.Л. Моделирование тепловой работы ребер в виде шипов в конструкции подового электрода ДППТ с воздушным охлаждением // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. – 2015. – №1. – С. 20-26.

Yachikov, I.M. and Volgin E.L. (2015). Simulation of thermal performance of edges in the form of pins in the design of the bottom electrode DCAF air cooled. Software of systems in the industrial and social fields, 5 (1): 20-26.

---