

УДК 536.24:519.63

DOI: 10.12737/article_59ae90c53930e5.50040191

**С.С. Макаров, к.т.н.,
В.Б. Дементьев, д.т.н.**

(Институт механики Уральского отделения РАН,
426067, г. Ижевск, ул. Т. Барамзиной, 34;

Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова,
426069, г. Ижевск, ул. Студенческая, 7)

E-mail: demen@udman.ru; ssmak15@mail.ru

Численное моделирование теплообмена при охлаждении высокотемпературной металлической заготовки из стали 30ХГСН2А*

Приведены результаты численного моделирования теплообмена при охлаждении металлической заготовки из стали 30 ХГСН2А. Определены скорости охлаждения заготовки потоком газожидкостной среды. Проанализировано изменение интенсивности охлаждения в зависимости от скорости движения заготовки противоположно потоку охлаждающей среды.

Ключевые слова: охлаждение; заготовка; поток газожидкостной среды; численное моделирование.

**S.S. Makarov, Can. Eng.,
V.B. Dementiev, D. Eng.**

(Mechanics Institute of Ural Branch of the RAS, 34, Baramzina Str., Izhevsk 426067;
Kalashnikov State Technical University of Izhevsk, 7, Studencheskaya Str. Izhevsk 426069)

Numerical simulation of heat exchange at cooling of high-temperature metal blank made of steel ChGSN2A

The results of the numerical simulation of heat exchange at the cooling metal blank made of steel 30ChGSN2A are shown. The velocities of blank cooling with the flow of gas-liquid medium are defined. Cooling intensity changes depending on the blank motion speed opposite the flow of cooling medium are analyzed.

Keywords: cooling; blank; flow of gas-liquid medium; numerical simulation.

При изготовлении металлических заготовок в машиностроении, таких как трубы, валы, оси, втулки, пальцы, пружины и т.д., применяют эффективные упрочняющие технологии термической обработки. В работах [1 – 4] приводятся результаты исследований, позволяющие улучшить комплекс физико-механических свойств материала металлических заготовок и существенно снизить метал-

лоемкость продукции. Практически отработана технология изготовления металлических заготовок цилиндрической формы ответственных деталей из конструкционных сталей марок 60С2, Ст40, Ст50, 40ХНМА, 65Г, 65С2ВА, 30 ХГСН2А внешним диаметром от 0,012 до 0,06 м (рис. 1).

Технология упрочнения металлических заготовок завершается охлаждением потоком жидкости с заданной скоростью для формирования требуемых физико-механических свойств материала (рис. 2). Скорость движе-

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-41-180211)

ния заготовки противоположно потоку охлаждающей среды определяется технологически-ми режимами обработки и варьируется от 0,001 до 0,1 м/с.



Рис. 1. Изделия цилиндрической формы

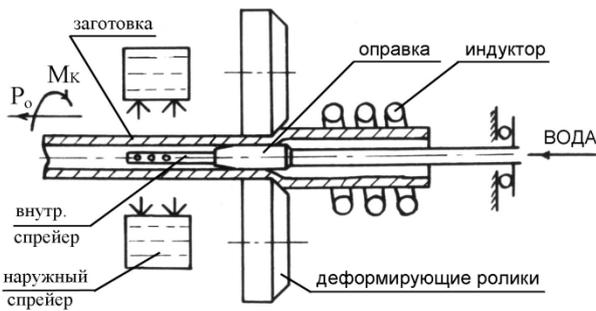


Рис. 2. Схема процесса ВТМО винтовым обжатием

Для охлаждения цилиндрических металлических заготовок широко применяют спрейерные устройства [3], позволяющие создавать одинаковые условия охлаждения по периметру заготовки за счет равномерного и симметричного подвода охлаждающей среды в виде быстро движущихся сплошных потоков жидкости.

В работе [4] рассмотрена математическая модель сопряженной задачи конвективного теплообмена при охлаждении нагретого металлического цилиндра ламинарным потоком охлаждающей среды. Охлаждение происходит без кипения жидкости. В работе [5] предложена математическая модель сопряженного теплообмена в гетерогенной системе «твердое тело – газожидкостная среда» с учетом парообразования в охлаждающем продольном потоке жидкости у поверхности высокотемпературного металлического цилиндра. Численный алгоритм применен для исследования охлаждения металлической заготовки цилинд-

рической формы из конструкционной стали 30ХГСН2А [6].

Настоящая статья посвящена численному моделированию теплообмена при охлаждении высокотемпературной металлической заготовки, движущейся относительно продольного потока газожидкостной среды, при начальных температурах нагрева, характерных для высокотемпературных тел, на поверхности которых процесс охлаждения происходит с кипением жидкости.

Постановка задачи. Сплошной металлический цилиндр радиусом r_m и длиной L охлаждается движущимся в направлении горизонтальной оси x потоком жидкости с начальной скоростью u_0 . Толщина слоя движущейся жидкости определяется расстоянием кольцевого зазора от r_m до r_l . Толщина внешнего кольца, определяется расстоянием от r_l до r_{m1} . Физическая схема расчетной области приведена на рис. 3.

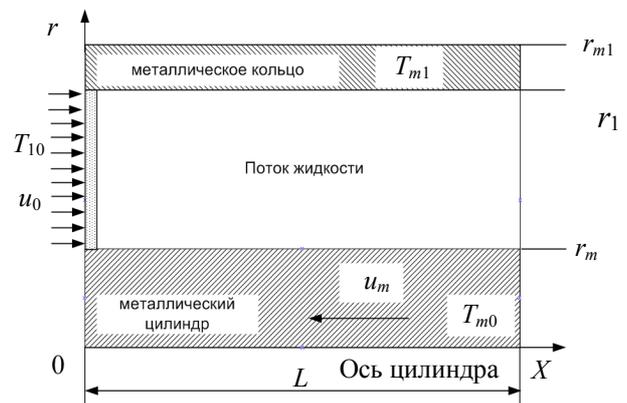


Рис. 3. Физическая схема расчетной области

При описании процесса приняты следующие предположения:

- течение жидкости считается осесимметричным относительно продольной оси цилиндра, действием гравитационных сил можно пренебречь;
- течение жидкости считается ламинарным;
- параметры в направлении r изменяются непрерывно, при этом на границах между металлом и жидкостью выполняются условия сопряжения по тепловым параметрам;
- в потоке жидкости у поверхности цилиндра имеет место процесс парообразования;
- теплофизические параметры газожидкостной среды определяются соотношениями, описывающими свойства на линии насыщения;
- считается, что плотность пара значи-

тельно меньше плотности жидкости, и описывается уравнением состояния идеального газа;

– испарение жидкости считается равновесным, давление пара равно давлению в жидкости;

– считается, что в начальный момент времени кольцевой зазор заполнен жидкостью.

Математическая модель. Математическая

модель сопряженного теплообмена потока газожидкостной среды и металлической заготовки в двухмерной нестационарной постановке, учитывающей осесимметричность течения потока охлаждающей среды относительно продольной оси цилиндра, рассмотрена в работах [5, 7].

Система уравнений, описывающая течение газожидкостной среды $r_m < r < r_l$:

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial r} = - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \mu \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \mu \frac{\partial u}{\partial r}, \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho u \frac{\partial v}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial r} = - \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial x} \mu \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \mu \frac{\partial v}{\partial r} - \mu \frac{v}{r^2}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r \rho v)}{\partial r} = 0, \quad (3)$$

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c u \frac{\partial T}{\partial x} + \rho c v \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial x} \lambda \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} - \dot{m}_v Q_v, \quad (4)$$

$$\rho \frac{\partial Y_v}{\partial t} + \rho u \frac{\partial Y_v}{\partial x} + \rho v \frac{\partial Y_v}{\partial r} = \dot{m}_v. \quad (5)$$

Удельная массовая скорость парообразования, находится из уравнения теплового баланса:

$$\dot{m}_v = \left(\rho c \Delta T^* \right) / Q_v,$$

где приведенный поток тепла определяется следующим соотношением:

$$\Delta T^* = \begin{cases} 0, & \text{если } T(t + \Delta t) < T_s \\ [T(t + \Delta t) - T_n(t)] / \Delta t, & \text{если } T(t + \Delta t) > T_s \end{cases},$$

$T(t) = \max(T(t); T_s)$, Δt – шаг по времени, T_s – температура насыщения.

Уравнение энергии для металлического цилиндра $0 < r < r_m$, и кольца $r_l < r < r_{m1}$ имеет вид:

$$\rho_m c_m \left(\frac{\partial T_m}{\partial t} + u_m \frac{\partial T_m}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \lambda_m \frac{\partial T_m}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \lambda_m \frac{\partial T_m}{\partial r}. \quad (6)$$

Скорость охлаждения материала металлической заготовки определяется по формуле:

$$V_{ohl} = \frac{T_m(t + \Delta t) - T_m(t)}{\Delta t}. \quad (7)$$

Эффективные теплофизические параметры газожидкостной среды определяются следующим образом:

$$\Gamma = \Gamma_1 Y_v + (1 - Y_v) \Gamma_2,$$

где $\Gamma = \{\rho, \mu, \lambda\}$, $\Gamma_1 = \{\rho_v, \mu_v, \lambda_v\}$,
 $\Gamma_2 = \{\rho_l, \mu_l, \lambda_l\}$;
 $c = (c_v \rho_v Y_v + c_l \rho_l (1 - Y_v)) / \rho$.

При расчете поля течения газожидкостной среды значения $\{\rho, \mu, \lambda\}$ интерполируются на гранях контрольного объема.

Граничные условия:

$$x = 0: 0 < r < r_m, \quad \frac{\partial T}{\partial x} = 0$$

$$r_m < r < r_l, \quad T = T_{l0}, \quad u = u_0, \quad v = 0, \quad \frac{\partial Y}{\partial x} = 0$$

$$r_l < r < r_{m1}, \quad \frac{\partial T}{\partial x} = 0$$

$$x = L: 0 < r < r_m, \quad \frac{\partial T}{\partial x} = 0$$

$$r_m < r < r_l, \quad \frac{\partial T}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial u}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial v}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial Y}{\partial x} = 0$$

$$r_m < r < r_{m1}, \quad \frac{\partial T}{\partial x} = 0,$$

$$0 < x < L: r = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial r} = 0$$

$$r = r_m, \quad r = r_l, \quad -\lambda_m \frac{\partial T_m}{\partial r} = -\lambda_l \frac{\partial T_l}{\partial r}, \quad T_m = T_l,$$

$$u = 0, \quad v = 0$$

$$r = r_{m1}: \quad \frac{\partial T}{\partial r} = 0,$$

где c – удельная теплоемкость, Дж/(кг·град);

ρ – плотность, кг/м³; λ – теплопроводность, Вт/(м·град); μ – динамическая вязкость, Па·с; p – давление, Па; T – температура, К; t – время, с; r – радиальная координата, м; x – продольная координата, м; L – длина расчетной области, м; u – компонента скорости по x ; v – компонента скорости по r , м/с; Y – объемная концентрация, Q – удельная теплота испарения, Дж/кг. Индексы: m – металл; l – жидкость; v – пар; 0 – начальное значение; s – параметры насыщения.

Система дифференциальных уравнений (1) – (6) решается методом контрольного объема. Параметры поля течения (1) – (3) рассчитаны применяемым при моделировании течений жидкости алгоритмом SIMPLE [8]. Дифференциальные уравнения приводятся к системе линейных алгебраических уравнений и решаются итерационно методом Гаусса–Зейделя с использованием коэффициента нижней релаксации.

Результаты численных расчетов. Рассмотрим охлаждение сплошной металлической заготовки цилиндрической формы: $r_m = 0,02$ м; $r_l = 0,03$ м; $r_{m1} = 0,02$ м; $L = 0,2$ м; $T_{m0} = 820$ °С продольным потоком воды $T_{l0} = 20$ °С. Начальная температура металлического кольца $T_{m1} = T_{l0}$. Материал заготовки сталь 30ХГСН2А. Материал кольца сталь 12Н18Н9Т. Скорость потока охлаждающей среды (вода) $u_0 = 1$ м/с. Теплофизические параметры сред приняты согласно [9, 10]. Время расчета $t = 2$ с.

На рис. 4 приведены графики скорости охлаждения вдоль поверхности заготовки при отсутствии скорости ее движения противоположно движению потока жидкости и со скоростью $u_m = 0,1$ м/с.

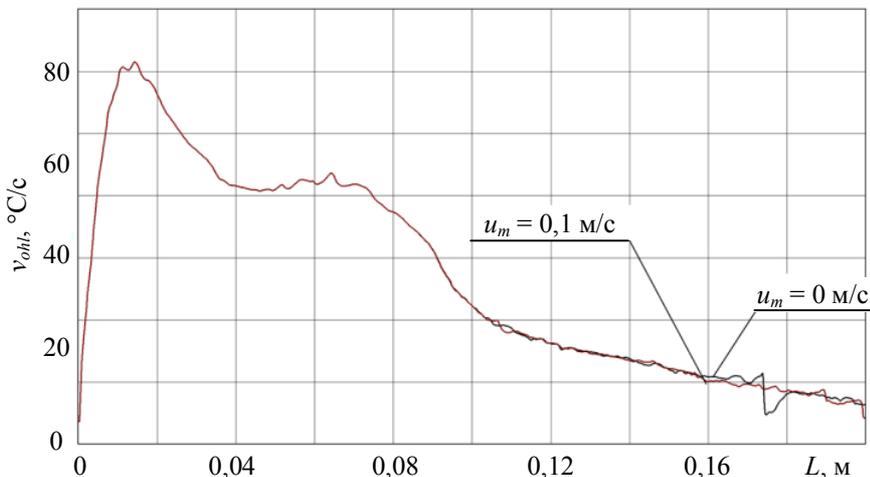


Рис. 4. Скорость охлаждения поверхности заготовки, при $t = 2$ с

Как видно из расчетов скорость противоположного движения цилиндра незначительно сказывается на скорости охлаждения поверхности.

На рис. 5 приведен график скорости охлаждения

по радиусу в середине заготовки.

Видно, что при заданных исходных данных противоположное движение заготовки потоку жидкости меняется незначительно и составляет около 1 %.

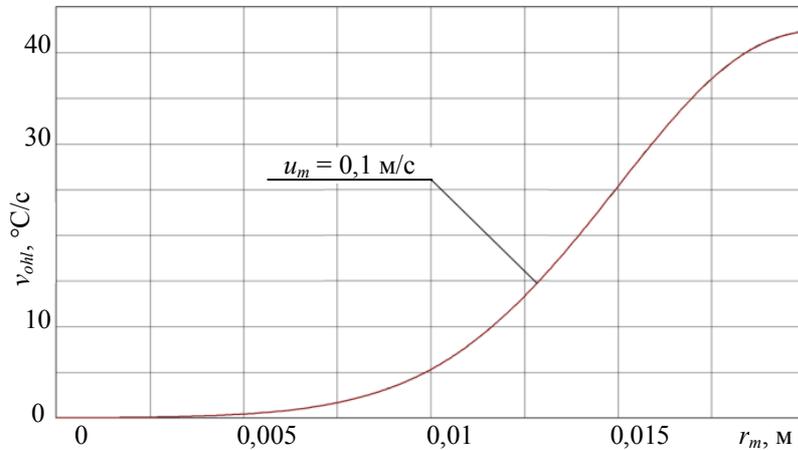


Рис. 5. Скорость охлаждения по радиусу в середине заготовки, при $t = 2$ с

На рис. 6 приведено поле скоростей охлаждения цилиндра за расчетное время.

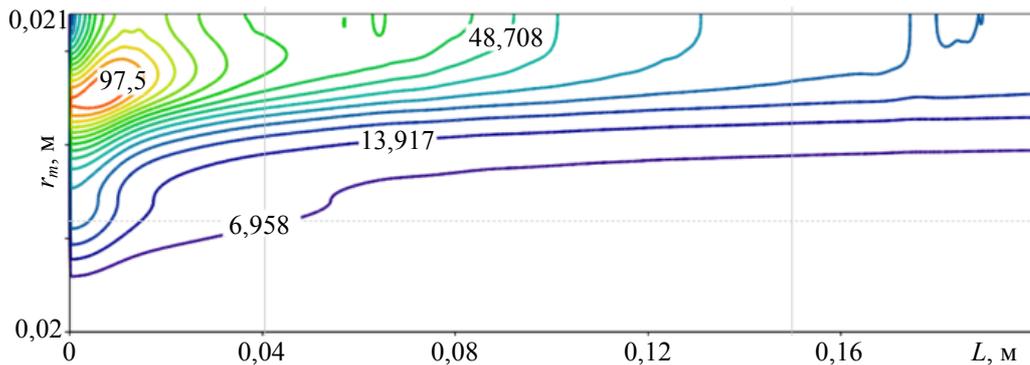


Рис. 6. Скорость охлаждения заготовки

Из расчета следует, что скорость охлаждения в объеме заготовки изменяется неравномерно и зависит от гидродинамических параметров потока газожидкостной среды. Более интенсивное охлаждение имеет место на начальном участке, где температура потока ниже. Дальше по потоку из-за нагрева жидкости и образующегося пара в жидкости у поверхности интенсивность охлаждения снижается. Значения объемной доли пара в жидкости у поверхности заготовки приведены на рис. 7.

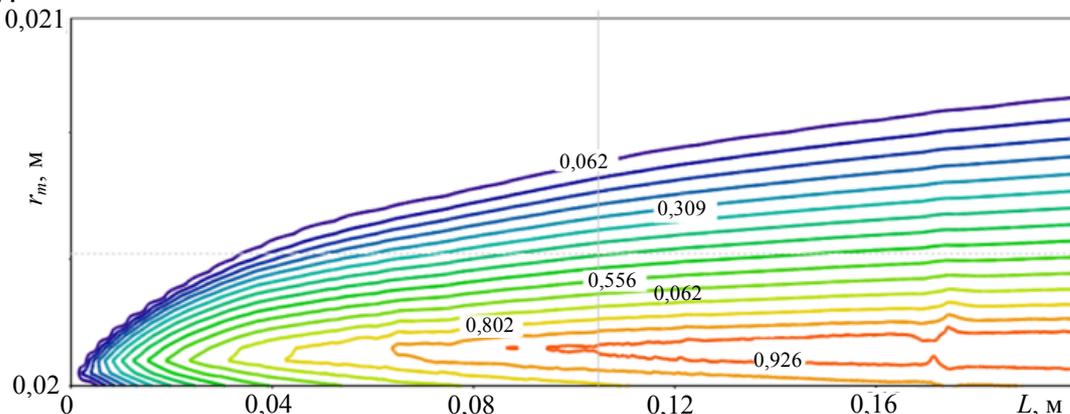


Рис. 7. Объемная доля пара в жидкости у поверхности заготовки

Из расчета видно, что доля образующегося пара увеличивается вдоль поверхности заготовки по направлению потока охлаждающей среды, тем самым создавая дополнительное термическое сопротивление и снижая скорость охлаждения.

Заключение

Приведенная математическая модель и разработанный численный алгоритм позволяют производить численное моделирование теплообмена при охлаждении высокотемпературных металлических заготовок. Получены численные значения параметров теплообмена при охлаждении в зависимости от гидродинамических и теплофизических свойств охлаждающей среды и скорости продольного перемещения заготовки натекающему потоку среды. Результаты расчетов будут полезны для наукоемких технологий в машиностроении при термическом упрочнении металлических заготовок.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Четкарев, В.А., Дементьев, В.Б., Шаврин, О.И. Анализ и оптимизация технологий упрочнения металлопродукции методом VTMO. – Ижевск: Изд-во ИПМ УрО РАН, 1996. – 136 с.
2. Дементьев, В.Б., Шаврин, О.И., Маслов, Л.Н., Засыпкин, А.Д. Качество пальцев траков – основа надежности и долговечности гусениц. – Ижевск: Изд-во ИПМ УрО РАН, 2009. – 232 с.
3. А. С. № 579322 СССР // Черненко В.Т., Узлов И.Г., Худик В.Т., Поляков С.Н., Бухиник Е.Н., Манько В.В., Кугушин А.А., Казырский О.Л., Ереметов А.М. Устройства для охлаждения прокатных изделий, 1977.
4. Макаров, С.С., Карпов, А.И., Макарова, Е.В. Математическая модель конвективного теплообмена при взаимодействии потока охлаждающей жидкости, двигающегося вдоль поверхности нагретого металлического цилиндра // Химическая физика и мезоскопия. – 2016. – Т. 18. – № 1. – С. 32 – 40.
5. Липанов, А.М., Макаров, С.С., Карпов, А.И., Макарова, Е.В. Численное исследование охлаждения высокотемпературного металлического цилиндра потоком газожидкостной среды // Теплофизика и аэромеханика. – 2017. – Т. 24. – № 1. – С. 53 – 59. doi: 10.1134/S0869864317010061.
6. Makarov S.S., Dement'yev V.B., Makarova E.V. Mathematical modeling of cooling high-temperature cylindrical workpieces // Procedia Engineering, 2016, vol. 150, pp. 393–399. doi: 10.1016/j.proeng.2016.06.734.
7. Макаров, С.С. Численное моделирование процесса охлаждения металлического цилиндра потоком газожид-

костной среды, двигающимся горизонтально в кольцевом канале // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2017. – Т. 17, – № 2. – С. 324 – 331.

8. Патанкар, С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости / пер. с англ. – М.: Изд-во Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.

9. Вукалович, М.П. Теплофизические свойства воды и водяного пара. – М.: Машиностроение. 1967. – 160 с.

10. Стали и сплавы. Марочник / под ред. В.Г.Сорокина, М.А. Гервасьева. – М.: Изд-во «Интермет Инжиниринг», 2001. – 608 с.

REFERENCES

1. Chetkaryov, V.A., Dementiev, V.B., Shavrin, O.I. *Analysis and Optimization of Technologies for Metal Product Strengthening by VTMO Method*. – Izhevsk: Publishing House of IPM Ural Branch of the RAS, 1996. – pp. 136.
2. Dementiev, V.B., Shavrin, O.I., Maslov, L.N., Zasyupkin, A.D. *Track Pin Quality – Basis of Caterpillar Life and Reliability*. – Izhevsk: Publishing House of IPM Ural Branch of the RAS, 2009. – pp. 232.
3. А. С. № 579322 the USSR // Chernenko V.T., Uzlov I.G., Khudik V.T., Polyakov S.N., Bukhinik E.N., Manko V.V., Kugushin A.A., Kazyrsky O.L., Yeremetov A.M. *Devices for Rolled Product Cooling*, 1977.
4. Makarov, S.S., Karpov, A.I., Makarova, E.V. Simulator of convective heat transfer at interaction of cooling liquid flow moving along surface of heated metal cylinder // *Chemical Physics and Mesoscopy*. – 2016. – Vol. 18. – № 1. – pp. 32 – 40.
5. Lipanov, A.M., Makarov, S.S., Karpov, A.I., Makarova, E.V. Numerical investigation of high-temperature metal cylinder with flow of gas-liquid medium // *Thermo-physics and Air Mechanics*. – 2017. – Vol. 24. – № 1. – pp. 53 – 59. DOI: 10.1134/S0869864317010061.
6. Makarov S.S., Dement'yev V.B., Makarova E.V. Mathematical modeling of cooling high-temperature cylindrical workpieces // *Procedia Engineering*, 2016, vol. 150, pp. 393–399. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.06.734.
7. Makarov, S.S. Numerical simulation of metal cylinder cooling with flow of gas-liquid medium moving horizontally in ring canal // *Scientific-Engineering Bulletin of Information Technologies, Techniques, Mechanics and Optics*. – 2017. – Vol. 17, – № 2. – pp. 324 – 331.
8. Patankar, S. *Numerical Methods for Solution of Problems of Heat Exchange and Liquid Dynamics* / transl. from Engl. – М.: Energoatomizdat Publishing House, 1984. –pp. 152.
9. Vukalovich, M.P. *Thermo-physical Properties of Water and Aqueous Vapor*. – М.: Mechanical Engineering. 1967. – pp. 160.
10. *Steels and Alloys*. Reference Book of Types / under the editorship of V.G. Sorokin, M.A. Gervasiev. – М.: “Internet Engineering” Publishing House, 2001. – pp. 608.

Рецензент д.т.н. Т.М. Махнева