

УДК 536.24

## ОЦЕНКА ТЕМПЕРАТУРНЫХ УСЛОВИЙ СЛУЖБЫ РОЛИКОВ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ МАШИН В УСЛОВИЯХ НАКИПЕОБРАЗОВАНИЯ

*Телин Н.В., д.т.н., профессор кафедры теплоэнергетики  
и теплотехники (telin\_nv@mail.ru)*

*Сеницын Н.Н., д.т.н., профессор кафедры теплоэнергетики  
и теплотехники (sinitsyn@chsu.ru)*

**Череповецкий государственный университет**

(162600, Россия, Вологодская обл., Череповец, просп. Луначарского, 5)

**Аннотация.** Использование жесткой воды для внутреннего охлаждения роликов металлургических машин приводит к образованию накипи на внутренней поверхности канала охлаждения. При прогнозировании температурных условий службы роликов обычно не принимается во внимание тот факт, что в начальный период эксплуатации ролика канал охлаждения чистый и работает в условиях, резко отличающихся от условий конечного периода эксплуатации. Непрерывно растущий слой накипи на поверхности канала охлаждения, имеющий высокие механические свойства и низкий коэффициент теплопроводности, вызывает повышение температуры рабочей поверхности до значений температуры отпуска материала роликов металлургических машин. В данной работе исследованы температурные условия службы роликов металлургических машин в условиях накипеобразования на поверхности канала охлаждения. Предложена методика оценки температурных условий службы роликов металлургических машин в условиях образования накипи на поверхности охлаждения. На примере ролика машины непрерывного литья заготовок показано, что для выбранных условий эксплуатации максимальная температура наружной поверхности ролика достигает своего критического значения через полгода работы металлургической машины. Методика позволяет дифференцированно подходить к определению средней и максимальной температуры поверхности роликов с учетом величины и характера тепловой нагрузки, условий охлаждения и накипеобразования на поверхности теплообмена. Она может служить основой для определения ресурса роликов, нормирования расхода реагентов для подготовки охлаждающей воды.

**Ключевые слова:** ролики, металлургические машины, ресурс, температура, теплообмен, охлаждение, накипеобразование.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2016-7-465-469

При использовании жесткой воды на поверхности канала охлаждения роликов металлургических машин образуется накипь. Непрерывно растущий слой накипи на поверхности канала охлаждения, имеющий высокие механические свойства и низкий коэффициент теплопроводности, ухудшая теплопередачу через бочку ролика, вызывает повышение температуры рабочей поверхности до значений температуры отпуска материала роликов металлургических машин (~ 650 °С). Превышение этого значения температуры неизбежно приводит к повышенному износу рабочей поверхности роликов, появлению сетки разгара и сокращению срока их службы, к неоправданным затратам на приобретение и монтаж новых роликов взамен вышедших из строя [1]. При проведении плановой остановки металлургического агрегата выполняется трудоемкая и дорогостоящая операция по очистке канала охлаждения ролика от образовавшейся накипи и отложений. Однако накипь и отложения образуются вновь.

При оценке теплового состояния роликов металлургических машин термическое сопротивление слоя накипи обычно принимается величиной постоянной во времени, а чаще равной нулю. При этом не принимается во внимание тот факт, что в начальный период эксплуатации ролика канал охлаждения чистый и ра-

ботает в условиях, резко отличающихся от условий конечного периода эксплуатации. Например, по данным работы [2] слой накипи толщиной 0,5 мм может вызвать повышение температуры рабочих поверхностей роликов более 735 °С. Известные данные о процессах накипеобразования на теплообменных поверхностях получены преимущественно для экранных труб паровых котлов при весьма высоких давлениях, больших тепловых нагрузках и низком содержании растворенных газов [3]. Поэтому их использование в расчетах систем охлаждения роликов металлургических машин и оценке их теплового состояния допустимо только в порядке предварительной оценки. Целью данной работы является исследование температурных условий службы роликов металлургических машин в условиях накипеобразования на поверхности канала охлаждения.

Теоретические и экспериментальные исследования показывают, что температурное поле роликов металлургических машин условно можно разделить на две составляющие: осесимметричную и неосесимметричную [4, 5]. Учитывая этот факт, влияние накипи на тепловое состояние роликов в данной работе исследуется отдельно для осесимметричной и неосесимметричной составляющих температуры.

Осесимметричная составляющая температуры бочки ролика формируется под действием осесимметричной составляющей теплового воздействия. Осесимметричная температура рабочей поверхности ролика на установившемся режиме работы при известной толщине слоя накипи на поверхности канала охлаждения, зависящего от времени, определяется из уравнения [6]

$$t_2(\tau) = t_{ж} + \frac{Q}{\pi L} \left[ \frac{1}{\alpha(d_1 - \delta(\tau))} + \frac{1}{2\lambda_n} \times \ln \left( \frac{d_1}{(d_1 - \delta(\tau))} \right) + \frac{1}{2\lambda_2} \ln \left( \frac{d_2}{d_1} \right) \right], \quad (1)$$

где  $t_2(\tau)$  – осесимметричная составляющая температуры наружной поверхности ролика;  $t_{ж}$  – средняя по длине канала охлаждения температура воды;  $Q$  – тепловой поток;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи от накипи к воде;  $\lambda_2$  – коэффициент теплопроводности материала ролика;  $\lambda_n$  – коэффициент теплопроводности накипи;  $\delta(\tau)$  – толщина слоя накипи;  $d_1$  – диаметр канала охлаждения ролика;  $d_2$  – наружный диаметр бочки ролика;  $L$  – длина бочки ролика;  $\tau$  – продолжительность работы ролика.

Накипь на поверхности охлаждения образуется в результате сложных физико-химических процессов и при понижении растворимости солей с повышением температуры воды, приводящих к образованию нерастворимых соединений. Толщина и характеристики слоя накипи на поверхности охлаждения являются функцией времени и изменяющихся величин: состава воды, режима движения воды и температуры поверхности охлаждения и тепловой нагрузки. Для практических расчетов применяется асимптотическая или линейная зависимость, описывающая процесс роста толщины слоя накипи во времени, поскольку она позволяет прогнозировать толщину слоя накипи до обязательной очистки теплообменной поверхности. Прогноз толщины слоя накипи на поверхности канала охлаждения ролика можно сделать по соотношению

$$\delta(\tau) = a \frac{D}{\lambda_{ж\rho}} C q_1 \tau, \quad (2)$$

где  $a$  – постоянная величина;  $D$  – коэффициент диффузии;  $\lambda_{ж}$  – коэффициент теплопроводности охлаждающей воды;  $\rho$  – плотность накипеобразователя;  $C$  – концентрация накипеобразователей в воде;  $q_1$  – величина тепловой нагрузки поверхности канала охлаждения.

Неосесимметричная составляющая температуры рабочей поверхности бочки ролика формируется, в основном, под действием неосесимметричной составляющей теплового воздействия в зоне контакта ролика со слитком. Поэтому наибольшие перепады температуры по поверхности возникают именно в зоне контак-

та ролика со слитком и на установившемся тепловом режиме работы. Неосесимметричная составляющая температурного поля проникает на некоторую глубину радиуса роликов. Глубина ее проникновения фактически определяет толщину поверхностного слоя бочки ролика, в котором возникают наиболее опасные с точки зрения возможности появления трещин термические напряжения. С увеличением угловой скорости вращения роликов и выравнивания тепловых воздействий по их образующей глубина проникновения неосесимметричной составляющей в тело ролика уменьшается. Распределение температуры по образующей бочки в зоне контакта ролика со слитком при установившемся режиме работы определяется выражением [4]

$$t(\varphi, \tau) = t_2(\tau) + q_2 \frac{R_2}{\lambda_2} \frac{1}{\pi} \frac{2}{\sqrt{Pd}} \times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n\sqrt{n}} \sin n\varphi_0 \cos \left[ n\varphi - \frac{\pi}{4} \right], \quad (3)$$

где  $q_2$  – плотность теплового потока в зоне контакта ролика и слитка;  $R_2$  – радиус бочки ролика;  $Pd = \frac{\omega R_2^2}{a_2}$  –

критерий Предводителя;  $\omega$  – угловая скорость вращения ролика;  $a_2$  – коэффициент температуропроводности материала ролика;  $\varphi$  – угловая координата;  $2\varphi_0$  – угол контакта ролика со слитком, может находиться в диапазоне  $2 \dots 7^\circ$  [1].

Плотность теплового потока, выходящего из слитка и поступающего в ролик в зоне контакта, определяется по формуле [7]

$$q_k = \frac{1}{2} \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2} \sqrt{\frac{\pi \omega}{2\varphi_0}} (t_1 - t_2(\tau)), \quad (4)$$

где  $\varepsilon_1 = \frac{\lambda_1}{\sqrt{a_1}}$  и  $\varepsilon_2 = \frac{\lambda_2}{\sqrt{a_2}}$  – тепловая активность материала слитка и ролика;  $\lambda_1, a_1$  – коэффициенты теплопроводности и температуропроводности материала слитка;  $t_1$  – температура обрабатываемого металла.

Используя соотношения (1–4), произведем оценку влияния образования накипи на поверхности канала охлаждения на тепловое состояние роликов машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ), изготовленных из стали 25Х1МФ при разливке слитков из углеродистой стали. Для проведения расчетов принято:  $t_1 = 950^\circ\text{C}$ ;  $\omega = 53 \cdot 10^{-3} \text{ 1/с}$ ;  $R_2 = 0,19 \text{ м}$ ;  $R_1 = 0,045 \text{ м}$ ;  $2\varphi_0 = 0,042 \text{ рад}$ ;  $\lambda_1 = 29,1 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ;  $\lambda_2 = 40 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ;  $\lambda_n = 1,7 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ;  $a_1 = 5,83 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ;  $a_2 = 11,59 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ; плотность накипи  $\rho = 2710 \text{ кг/м}^3$ ; средняя температура воды в канале охлаждения  $t_{ж} = 24,5^\circ\text{C}$ ; тепловой поток  $Q = 84,7 \cdot 10^3 \text{ Вт}$ ;  $a = 0,00347 \text{ 1/}^\circ\text{C}$ .

На рис. 1 показана зависимость температуры поверхности ролика в зоне контакта от угловой координаты

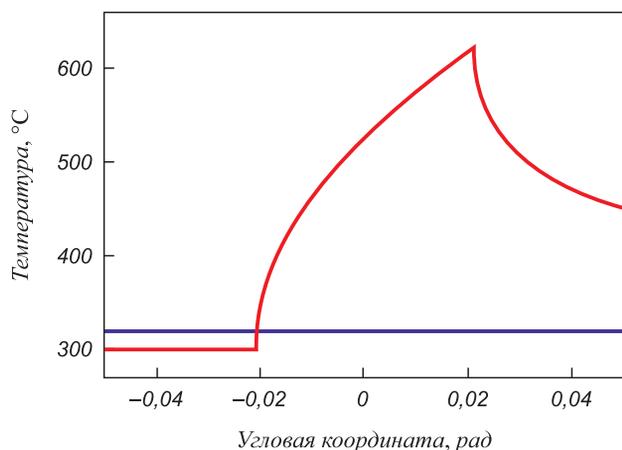


Рис. 1. Зависимость температуры от угловой координаты

Fig. 1. Dependence of temperature on angular coordinate

наты в начальный период эксплуатации. Видно, что по мере прохождения зоны контакта температура поверхности ролика увеличивается.

Максимальное значение температуры поверхности бочки ролика наблюдается на выходе поверхности ролика из зоны контакта с обрабатываемым металлом ( $\varphi = \varphi_0$ ), а минимальное значение – на входе поверхности ролика в зону контакта с обрабатываемым металлом ( $\varphi = -\varphi_0$ ). В начальный период эксплуатации максимальное значение температуры поверхности ролика равно 614 °С, минимальное значение – 300 °С. Температурный интервал составляет 314 К. Этот перепад температур определяется температурами взаимодействующих тел, углом контакта ролика со слитком и угловой скоростью вращения ролика. Соотношение между максимальной и минимальной температурами поверхности за время оборота определяет стойкость ролика против образования сетки разгара. Осесимметричная температура поверхности ролика в начальный период эксплуатации равна 318 °С. На рис. 2 показана зависимость максималь-

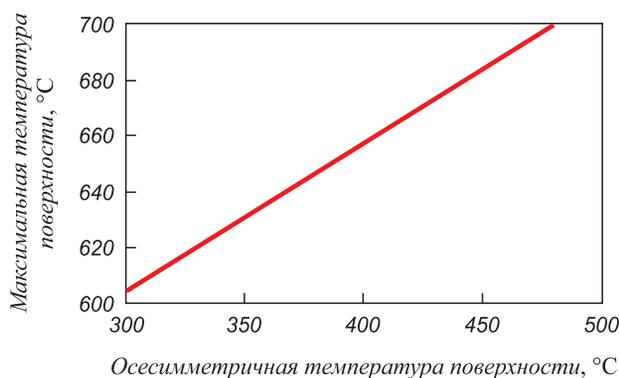


Рис. 2. Зависимость максимальной температуры поверхности ролика от осесимметричной температуры

Fig. 2. Dependence of the maximum temperature of roller surface on axisymmetric temperature

ной температуры поверхности ролика от осесимметричной температуры поверхности.

Видно, что с увеличением осесимметричной температуры, обусловленной ростом толщины накипи, максимальная температура поверхности бочки ролика увеличивается. При заданных условиях эксплуатации максимальная температура поверхности ролика достигнет своего критического значения (~ 650 °С) при достижении значения осесимметричной температуры, равного 385 °С.

Для охлаждения роликов применяется химически очищенная вода, имеющая карбонатную жесткость 0,7 мг-экв/л. Для выбранных значений параметров работы ролика и качества воды, применяемой для охлаждения роликов, скорость образования толщины слоя карбоната кальция на поверхности канала охлаждения, определенная по соотношению (2), составляет 0,12 мм/мес. Расчет скорости образования накипи по соотношению, приведенному в работе [3], полученному для парогенераторов на основе эксперимента, равно 0,15 мм/мес. Расхождение составляет 25 %. Коэффициент диффузии в охлаждающей жидкости определяется по формулам Стокса и Эйнштейна. На рис. 3 показана зависимость осесимметричной температуры поверхности ролика от времени его работы. Видно, что с увеличением продолжительности работы температура поверхности бочки ролика монотонно увеличивается. Значение осесимметричной температуры поверхности ролика, равное 385 °С, достигается через шесть месяцев эксплуатации. Таким образом, максимальная температура наружной поверхности ролика достигает своего критического значения через полгода работы металлургической машины.

Дальнейшая эксплуатация ролика может привести к выходу его из строя или аварийной остановке металлургической машины.

Предложенная методология позволяет дифференцированно подходить к определению осесимметричной

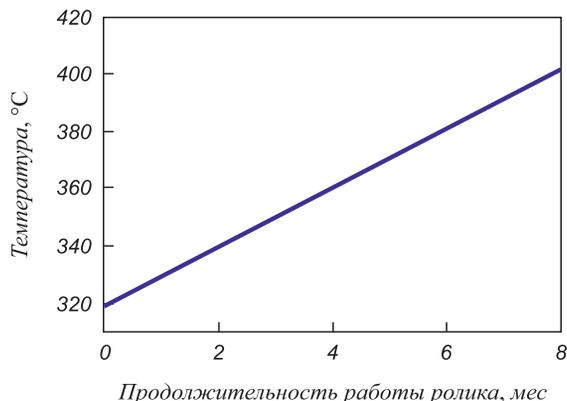


Рис. 3. Зависимость осесимметричной температуры поверхности от продолжительности работы ролика

Fig. 3. Dependence of the axisymmetric surface temperature on the duration of roller

и неосесимметричной составляющих температуры, характеризующих тепловое состояние роликов с учетом величины и характера тепловой нагрузки, качества воды, применяемой для их охлаждения. Она может служить основой для планирования объема выпускаемой продукции с учетом качества воды, используемой для внутреннего охлаждения роликов металлургических машин [8, 9].

Использованные в настоящей работе методы и полученные результаты могут быть применимы к проектированию новых и анализу существующих систем охлаждения роликов МНЛЗ и прокатных валков непрерывных широкополосных станов горячей прокатки [10 – 15].

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Машины непрерывного литья заготовок. Теория и расчет / Л.В. Буланов, Л.Г. Корзунин, Е.П. Парфенов и др. – Екатеринбург: Уральский центр ПР и рекламы «Марат», 2004. – 349 с.
2. Буланов Л.В., Волегова В.Е. Рациональное охлаждение роликов МНЛЗ // *Сталь*. № 2. 2001. С. 16 – 18.
3. Манькина Н.Н. Физико-химические процессы в пароводяном цикле электростанции. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2008. – 432 с.
4. Телин Н.В., Шестаков Н.И. Динамика неосесимметричного температурного поля полого вращающегося цилиндра // *Теплоэнергетика*. 2005. № 8. С. 72 – 76.
5. Рогальский В.А. Нестационарное распределение температуры во вращающейся трубе при неосесимметричной теплоотдаче // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2002. № 3. С. 40 – 42.
6. Исаченко В.В., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. – М.: Энергоатомиздат, 1981. – 416 с.
7. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967. – 599 с.
8. Gorbatyuk S.M., Polikarpov E.N. Method of calculating the gaps between the rolls of a rotary rolling mill // *Metallurgist*. 2000. No. 44(9 – 10). P. 483 – 484.
9. Gorbatyuk S.M., Sedykh L.V. Improving the durability of rolling-mill rolls // *Metallurgist*. 2010. No. 54 (5 – 6). P. 299 – 301.
10. Bast J., Gorbatyuk S.M., Kryukov I.Yu. Horizontal HCC-12000 unit for the continuous casting of semifinished products // *Metallurgist*. 2011. No. 55 (1 – 2). P. 116 – 118.
11. Gorbatyuk S.M., Kochanov A.V. Method and equipment for mechanically strengthening the surface of rolling-mill rolls // *Metallurgist*. 2012. No. 56 (3 – 4). P. 279 – 283.
12. Gorbatyuk S.M., Tuktarov E.Z., Rudenskii L.A. Small mill for the high-temperature rotary rolling of semifinished products composed of refractory metals in protective media // *Metallurgist*. 2012. No. 55 (9 – 10). P. 673 – 677.
13. Gorbatyuk S.M., Osadchii V.A., Tuktarov E.Z. Calculation of the geometric parameters of rotary rolling by using the automated design system Autodesk Inventor // *Metallurgist*. 2011. No. 55 (7 – 8). P. 543 – 546.
14. Gorbatyuk S.M. Design of helical rolling stand rolls // *Steel in Translation*. 1999. No. 29 (12). P. 57 – 62.
15. Gorbatyuk S.M., Pavlov V.M., Shapoval A.N., Gorbatyuk M.S. Experimental use of rotary rolling mills to deform compacts of refractory metals // *Metallurgist*. 1998. No. 42 (5 – 6). P. 178 – 183.

Поступила 27 марта 2015 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2016. VOL. 59. NO. 7, PP. 465–469.

### EVALUATION OF THE TEMPERATURE CONDITIONS OF SERVICE OF METALLURGICAL MACHINERY ROLLS AT SCALING

N.V. Telin, N.N. Sinitsyn

Cherepovets State University, Cherepovets, Russia

**Abstract.** The use of brackish water for indoor cooling of rollers of metallurgical machines leads to the formation of scale on the inner surface of the cooling channel. When forecasting the temperature conditions of service of rollers, the fact that in the initial period of operation of the roller cooling channel is clean and in working conditions dramatically different from those of the final period of operation, is usually not taken into account. Continuously increasing layer of scum on the surface of the cooling channel, which has high mechanical properties and low coefficient of thermal conductivity, causes a rise in temperature of the working surface to the tempering temperature of the material of metallurgical machinery rollers. The aim of this work was to study the temperature conditions of service of metallurgical machinery rollers at scale formation in the cooling channel surface. The authors have proposed a method of estimating the temperature conditions of service of metallurgical machinery rollers for this case. For example, the estimation for roller of continuous casting machine has shown that for selected operating conditions the maximum temperature of the roller outer surface reaches its critical value after six months of work of metallurgical machines. The technique allows a differentiated approach to the definition of average and maximum temperature of the surface of the rollers in view of the magnitude and nature of the heat load, cooling conditions, and scale formation on the heat transfer surface. It can serve as a basis for definition of rollers operation

life and rational consumption of reagents for the preparation of cooling water.

**Keywords:** rollers, metallurgical machines, operation life, temperature, heat exchange, cooling, scale formation.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2016-7-465-469

#### REFERENCES

1. Bulanov L.V., Korzunin L.G., Parfenov E.P., etc. *Mashiny nepre-rynogo lit'ya zagotovok. Teoriya i raschet* [Continuous casting machines. Theory and analysis]. Ekaterinburg: Ural center of PR and advertising “Marat”, 2004, 349 p. (In Russ.).
2. Bulanov L.V., Volegova V.E. Rational cooling of CC rollers. *Stal'*. 2001, no. 2, pp. 16–18. (In Russ.).
3. Man'kina N.N. *Fiziko-khimicheskie protsessy v parovodyanom tsikle elektrostantsii* [Physico-chemical processes in the water-steam cycle of power plant]. Moscow: Energoatomizdat, 2008, 432 p. (In Russ.).
4. Telin N.V., Shestakov N.A. The nonaxisymmetric temperature field of a hollow rotating cylinder. *Thermal Engineering (English translation of Teploenergetika)*. 2005, vol. 52, no. 8, pp. 658–661.
5. Rogalskii A.V. Nonstationary temperature distribution in a rotating pipe by non-axisymmetric heat transfer. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2002, no. 3, pp. 40–42. (In Russ.).
6. Isachenko V.V., Osipova V.A., Sukomel A.S. *Teploperedacha* [Heat transfer]. Moscow: Energoatomizdat, 1981, 416 p. (In Russ.).

7. Lykov A.V. *Teoriya teploprovodnosti* [Theory of thermal conductivity]. Moscow: Vysshaya shkola, 1967, 599 p. (In Russ.).
8. Gorbatyuk S.M., Polikarpov E.N. Method of calculating the gaps between the rolls of a rotary rolling mill. *Metallurgist*. 2000, no. 44 (9–10), pp. 483–484.
9. Gorbatyuk S.M., Sedykh L.V. Improving the durability of rolling-mill rolls. *Metallurgist*. 2010, no. 54 (5–6), pp. 299–301.
10. Bast J., Gorbatyuk S.M., Kryukov I.Yu. Horizontal HCC-12000 unit for the continuous casting of semifinished products. *Metallurgist*. 2011, no. 55 (1–2), pp. 116–118.
11. Gorbatyuk S.M., Kochanov A.V. Method and equipment for mechanically strengthening the surface of rolling-mill rolls. *Metallurgist*. 2012, no. 56 (3–4), pp. 279–283.
12. Gorbatyuk S.M., Tuktarov E.Z., Rudenskii L.A. Small mill for the high-temperature rotary rolling of semifinished products composed of refractory metals in protective media. *Metallurgist*. 2012, no. 55 (9–10), pp. 673–677.
13. Gorbatyuk S.M., Osadchii V.A., Tuktarov E.Z. Calculation of the geometric parameters of rotary rolling by using the automated design system Autodesk Inventor. *Metallurgist*. 2011, no. 55 (7–8), pp. 543–546.
14. Gorbatyuk S.M. Design of helical rolling stand rolls. *Steel in Translation*. 1999, no. 29 (12), pp. 57–62.
15. Gorbatyuk S.M., Pavlov V.M., Shapoval A.N., Gorbatyuk M.S. Experimental use of rotary rolling mills to deform compacts of refractory metals. *Metallurgist*. 1998, no. 42 (5–6), pp. 178–183.

**Information about the authors:**

*N.V. Telin*, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Thermal Power and Heat Engineering” (telin\_nv@mail.ru)

*N.N. Sinitsyn*, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Thermal Power and Heat Engineering” (sinitsyn@chsu.ru)

Received March 27, 2015