

Таблица 1

Сравнение тепловых балансов до модернизации печи и после модернизации

До модернизации						После модернизации					
Приход теплоты			Расход теплоты			Приход теплоты			Расход теплоты		
Статьи	кВт	%	Статьи	кВт	%	Статьи	кВт	%	Статьи	кВт	%
$Q_{уст}$	230	100	$\Delta Q_m$	96	40	$Q_{уст}$	230	100	$\Delta Q_m$	96	40
			$Q_{5т}$	52	23				$Q_{5т}$	7,4	4
			$Q_{5т.к.з.}$	39	16,8				$Q_{5т.к.з.}$	5,55	2,4
			$Q_{5л}$	1,1	0,1				$Q_{5л}$	1,1	0,5
			$Q_{5возд}$	0,07	0,1				$Q_{5возд}$	0,07	0,1
			$Q_{запаса}$	41,83	20				$Q_{запаса}$	119,88	53
Итого	230	100	Итого	230	100	Итого	230	100	Итого	230	100

### Список использованных источников

1. Rusradius [Электронный ресурс] // Rusradius: интернет-магазин: [web-сайт]. – Режим доступа: <https://rusradius.ru/> (дата обращения 13.04.2021).
2. Керамика гжели [Электронный ресурс] // Группа компаний КЕРАМИКА ГЖЕЛИ: интернет-магазин: [web-сайт]. – Режим доступа: <http://prof-cg.ru/> (дата обращения 09.04.2021).
3. Электрические печи сопротивления: учебное пособие / Е.В. Киселев, В.Б. Кутьин, В.И. Матюхин. – Екатеринбург: УГТУ – УПИ, 2010. 78 с.
4. Свенчанский А.Д. Электрические промышленные печи: учебник для вузов / 2-е изд., перераб. – М.: Энергия, 1975. – 384 с.

УДК 669.04

С. И. Кондрашенко, О. А. Евтехова, И. А. Прибытков

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет (НИТУ) «МИСиС»», г. Москва, Россия

### ОЦЕНКА ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА В УСЛОВИЯХ НАЛИЧИЯ И ОТСУТСТВИЯ РАДИАЛЬНЫХ ПЕРЕТОКОЙ ТЕПЛОТЫ

**Аннотация.** В работе проведено исследование по оценке теплового состояния металла в условиях наличия и отсутствия радиальных перетоков теплоты. Исследования проводились на основании численного моделирования в версии программно-вычислительного комплекса FloEFD, основанного на решении уравнений газодинамики и теплообмена. Решаемая система уравнений состояла из уравнения Навье-Стокса, уравнений энергии и неразрывности и была дополнена  $k-\varepsilon$  моделью турбулентности. Были разработаны две численные модели: в 1 – в металл была добавлена низкотеплопроводная вставка определенного размера; во 2 – исследовался металл без вставок.

*Исследования показали, что при расчете теплового состояния металла плотность теплового потока на поверхности исследуемой вставки стремится к нулю, а температура металла после вставки заметно ниже, чем для случая с ее отсутствием. На расстоянии более пяти диаметров, температура на поверхности металла для двух вариантов исследования уже совпадает. Данное исследование подтверждает утверждение о том, что нагрев металла происходит не только за счет конвекции, но и за счет перетоков теплоты внутри металла.*

**Ключевые слова:** *струйное течение, переток теплоты, турбулизация потока, «атакующие» струи, веерный поток, численное моделирование, поля скоростей, тепловое состояние металла, конвективный нагрев, конвективная теплоотдача.*

**Abstract.** *This paper a study was carried out to assess the thermal state of the metal in the presence and absence of radial heat flows. The studies were carried out on the basis of numerical simulation in the version of the software-computing complex FloEFD, based on the solution of the equations of gas dynamics and heat transfer. The system of equations to be solved consisted of the Navier-Stokes equation, the energy and continuity equations, and was supplemented by the k-ε model of turbulence. Two numerical models were developed: in 1 - a low-heat-conducting insert of a certain size was added to the metal; in 2 - metal without inserts was investigated.*

*Studies have shown that when calculating the thermal state of the metal, the heat flux density on the surface of the insert under study tends to zero, and the temperature of the metal after the insert is noticeably lower than for the case without it. At a distance of more than five diameters, the temperature on the metal surface for the two research options already coincides. This study confirms the statement that metal heating occurs not only due to convection, but also due to heat flows inside the metal.*

**Key words:** *jet flow heat flow, flow turbulence, “attacking” jet, fan flow, numerical simulation, fields of velocity, thermal state of metal, convective heating, convective heat transfer.*

При проектировании струйных нагревательных устройств необходимо обращать внимание не только структуру течения, скоростные поля в струйной части потока, веерный поток при взаимодействии с нагреваемой поверхностью, но и на сам процесс нагрева металла. Очень важную составляющую при оценке теплового состояния металла играет роль наличия или отсутствия радиальных перетоков теплоты [1, 2].

Физически это может проявляться некорректным выбором максимально возможного расстояния между соплами в нагревательном устройстве, что будет способствовать некачественной работе самого нагревательного устройства, и как следствие, неравномерности температурного поля на поверхности нагреваемого металла.

Изменение конструктивных особенностей (расстояния между соплами) нагревательных устройств определяет не только интенсивность конвективной теплоотдачи на границе раздела высокотемпературная струя – твердая поверхность [3], но и особенность теплового состояния металла.

Из вышесказанного следует, что при расчете процессов движения и теплообмена при струйном конвективном нагреве металла необходимо определить, происходит ли нагрев металла только конвекцией от высокотемпературной струи или еще имеется переток теплоты от металла с высокой температурой по мере удаления от критической точки (оси сопла) за счет теплопроводности.

Для исследования наличия или отсутствия радиальных перетоков были разработаны две численные модели, основанного на решении уравнений

газодинамики и теплообмена. Решаемая система уравнений состояла из уравнения Навье-Стокса, уравнений энергии и неразрывности и была дополнена k-ε моделью турбулентности. Система полученных уравнений, описывающая процессы не замкнута и не имеет точного аналитического решения. Для решения данной системы ее необходимо дополнить уравнениями переноса субстанции для кинетической энергии турбулентности k и скорости ее диссипации ε стандартной модели турбулентности k-ε. Выбор именно этой модели турбулентности обусловлен тем, что она является наиболее экономичной в плане компьютерных ресурсов, а также является достоверной в плане полученных результатов.

Принимается стандартная k-ε модель турбулентности с константами:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho k \bar{u}) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho k \bar{v}) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho k \bar{w}) = & \frac{\partial}{\partial x} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial z} \right] \\ & + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho \varepsilon \bar{u}) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho \varepsilon \bar{v}) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho \varepsilon \bar{w}) = & \frac{\partial}{\partial x} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right] \\ & + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\sigma_K$  и  $\sigma_\varepsilon$  – турбулентные числа Прандтля для k и ε;  $\sigma_K = 1,0$  и  $\sigma_\varepsilon = 1,3$ .

Уравнение неразрывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \rho}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \rho}{\partial z} + \rho \left( \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} \right) = 0. \quad (2)$$

Уравнение Навье-Стокса

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(\rho \bar{u}) &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_{eff} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_{eff} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right) \\ \frac{d}{dt}(\rho \bar{v}) &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_{eff} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_{eff} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right) \\ \frac{d}{dt}(\rho \bar{w}) &= -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_{eff} \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_{eff} \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} \right), \end{aligned} \quad (3)$$

где  $\mu_{eff} = \mu + \mu_T$  – эффективный коэффициент динамической вязкости (с учетом турбулентного переноса).

Уравнение энергии

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{T}) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho \bar{u} \bar{T}) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho \bar{v} \bar{T}) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho \bar{w} \bar{T}) = \\ \frac{\partial}{\partial x} \left( \rho a_{eff} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \rho a_{eff} \frac{\partial \bar{T}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \rho a_{eff} \frac{\partial \bar{T}}{\partial z} \right), \end{aligned} \quad (4)$$

где  $a_{eff} = \left( a + \frac{\nu_T}{Pr_T} \right)$  – эффективный коэффициент динамической вязкости (с учетом турбулентного переноса).

Схемы нагрева представлены на рисунке 1. Было рассмотрено два варианта нагрева металла: 1 – с имеющейся низкотеплопроводной вставкой; 2 – без вставки, нагрев чистого металла.

Диаметр сопла  $d_o$  – 50 мм, температура истечения азота  $T_0$  – 700 °С, струя является осесимметричной,  $T_{\text{среды}}$  – 20 °С,  $h/d_o = 10$ ,  $U_o = 30$  м/с.

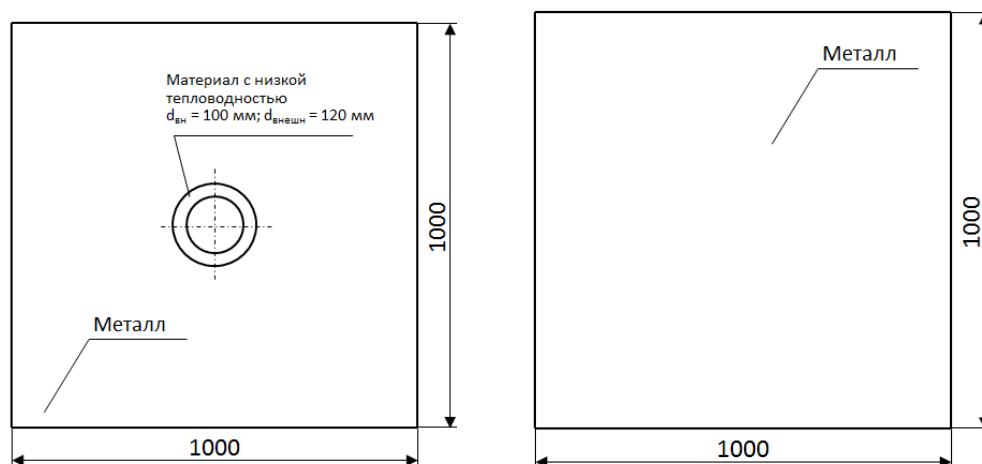


Рис. 1. Вариант нагрева металла с низкотеплопроводной вставкой и без

На рисунке 2 представлена температура поверхности металла с вставкой, а на рисунке 3 температура поверхности металла без вставок.

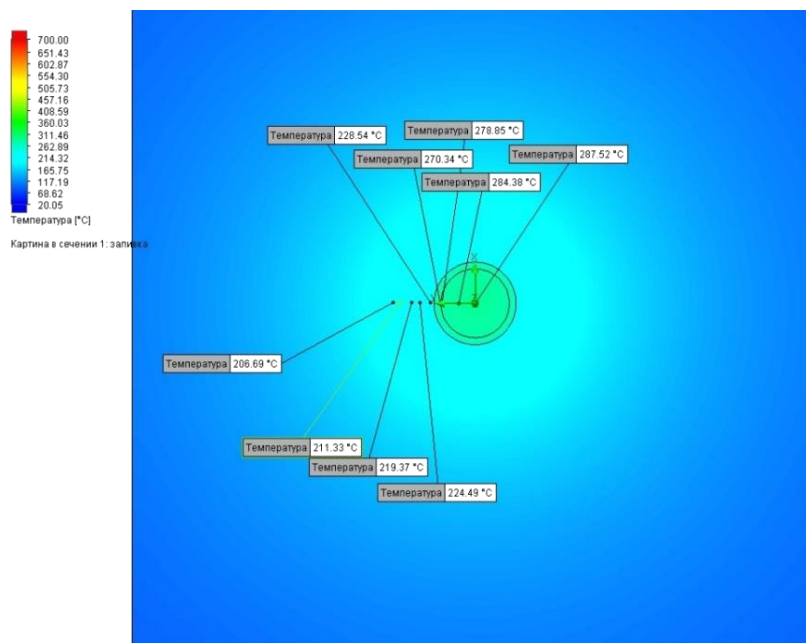


Рис. 2. Температура поверхности металла с низкотеплопроводной вставкой

Ниже на рисунках 4 и 5, представлены графики сравнения температур и плотности теплового потока на поверхности металла от критической точки.

Плотность теплового потока на поверхности исследуемой вставки стремится к нулю, что и иллюстрируется графиком на рисунке 5, а температура металла после вставки заметно ниже, чем при случае с ее отсутствием. На расстоянии  $5d_o$  температура на поверхности металла для двух вариантов исследования уже совпадает.

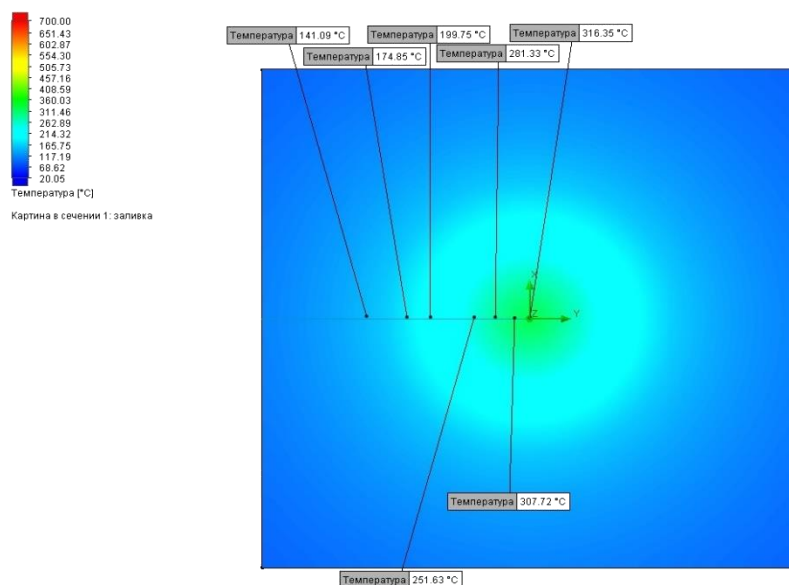


Рис. 3. Температура поверхности металла без низкотеплопроводной вставки

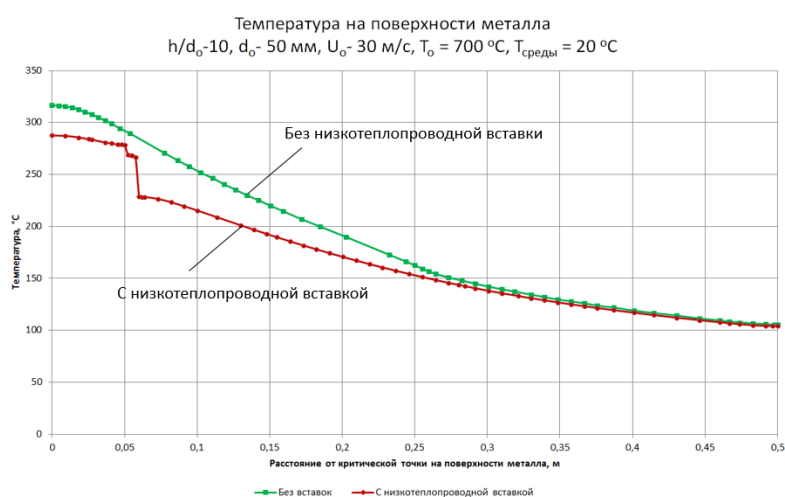


Рис. 4. Температура на поверхности металла для двух вариантов

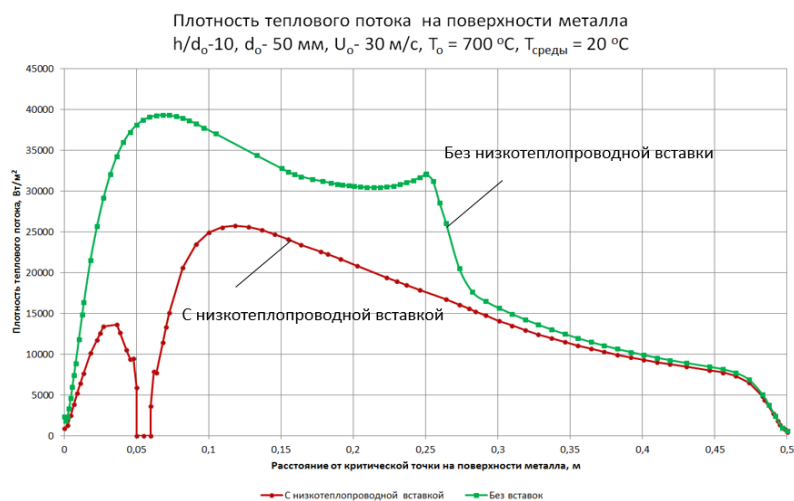


Рис. 5. Плотность теплового потока на поверхности металла для двух вариантов

Проведённые исследования позволяют сделать вывод о том, что нагрев металла происходит не только за счет конвекции, но и за счет перетоков теплоты внутри металла.

### Список использованных источников

1. Юдаев Б. Н. Техническая термодинамика. Теплопередача: учеб. для неэнергетич. спец. Втузов. – М.: Высшая школа, 1988. – 479 с.
2. Асцатуров В.Н., Краснокутский П.Г., Берковская П.С. Скоростной струйный нагрев металла. – Киев: Техника, 1984. – 120 с.
3. Гусовский В.Л., Лифшиц А.Е. Методики расчета нагревательных и термических печей: учебно-справ. издание. – М.: Теплотехник, 2004. – 400 с.

УДК 658.51

**А. Е. Кувалдин, А. А. Рогозинников**

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет

имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

## СОВМЕСТНОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ИНСТРУМЕНТОВ БЕРЕЖЛИВОГО ПРОИЗВОДСТВА И ЭНЕРГОРЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЯ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА СВЕРДЛОВСКОЙ ОБЛАСТИ

**Аннотация.** В работе рассмотрена возможность применения совместного внедрения мероприятий по энергосбережению и инструментов бережливого производства при реализации Национального проекта «Производительность труда» на металлургических предприятиях Свердловской области. Представлены результаты некоторых предприятий области, принявших участие в программе повышения производительности. Предложено внести мероприятия по энерго- и ресурсосбережению в методику внедрения улучшений на предприятиях.

**Ключевые слова:** производительность труда, бережливое производство, национальный проект, термообработка, планирование производства, энерго- и ресурсосбережение.

**Abstract.** The paper considers the possibility of applying joint implementation of energy saving measures and lean production tools in the implementation of the National Project «Labor Productivity» at metallurgical enterprises of the Sverdlovsk region. The results of some enterprises of the region that took part in the productivity improvement program are presented. It is proposed to introduce measures for energy and resource saving in the methodology for implementing improvements at enterprises.

**Key words:** labor productivity, lean production, national project, heat treatment, production scheduling, power and resource saving.

Для повышения конкурентоспособности на рынке современное предприятие должно уделять достаточное внимание эффективности производственного процесса. В последние несколько десятилетий одной из