



Краткое сообщение

УДК 621.785

DOI 10.17073/0368-0797-2022-9-615-618

<https://fermet.misis.ru/jour/article/view/2393>



## ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СТРУЙНОГО НАГРЕВА МЕТАЛЛА

Е. В. Лалетина, К. С. Шатохин

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (Россия, 119049, Москва, Ленинский пр., 4)

**Аннотация.** Международная металлургическая ассоциация World Steel Association (Worldsteel) опубликовала обзор, касающийся ситуации на мировом рынке стали. Согласно данным за 2021 г., производство стали снизилось на 1 % (до 1,83 млрд т). Сокращение объемов производства стали на мировой арене является следствием резких колебаний рыночной конъюнктуры, связанной с пандемией. При необходимости экстренного наращивания объемов производства металлопроката, по-прежнему актуальны вопросы равномерности нагрева металла перед прокаткой, штамповкой и ковкой, а также совершенствование тепловой работы устройств для нагрева поверхности слябов, которые позволят упростить конструкцию нагревательных устройств, уменьшить затраты на нагрев и строительство. Одним из способов совершенствования процесса нагрева и увеличения объемов производства металлопроката является применение струйного нагрева. В данной работе показаны результаты моделирования нагрева металла струями азота в круговой расстановке.

**Ключевые слова:** струйный нагрев, щелевидные сопла, соударение струи, струи азота, угар металла, Ansys Fluent, RNG  $k$ - $\epsilon$  модель

**Для цитирования:** Лалетина Е.В., Шатохин К.С. Возможности применения струйного нагрева металла // Известия вузов. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 9. С. 615–618. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-9-615-618>

Short report

## THE POSSIBILITY OF USING JET METAL HEATING

E. V. Laletina, K. S. Shatokhin

National University of Science and Technology “MISIS” (4 Leninskii Ave., Moscow 119049, Russian Federation)

**Abstract.** The international metallurgical World Steel Association has published new data that reviewing the situation in the global steel market. According to the published data for 2021 the production of steel on the world market decreased by 1 % (to 1.83 billion tons). The reduction in steel production on the world stage is the result of sharp fluctuations in market conditions associated with the pandemic. If it is necessary to urgently increase the volume of rolled metal production, the issues of uniformity of metal heating before rolling, stamping and forging, as well as improving the thermal operation of devices for heating the surface of slabs (which will simplify the design of heating devices, reduce the cost of heating and construction), are still relevant. One way to improve the heating process and increase the production of rolled metal is to use jet heating. This paper shows the results of modeling metal heating with nitrogen jets.

**Keywords:** jet heating, slot-like nozzle, jet collision, nitrogen jets, metal waste, Ansys Fluent, RNG  $k$ - $\epsilon$  model

**For citation:** Laletina E.V., Shatokhin K.S. The possibility of using jet metal heating. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2022, vol. 65, no. 9, pp. 615–618. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-9-615-618>

На сегодняшний день основными проблемами при нагреве слябов остаются угар металла, обезуглероживание, низкая производительность, высокий расход топлива, нерациональное распределение производственных площадей и т. п. [1]. Перечисленные проблемы оказывают сильное влияние на производственные мощности предприятия и конечный результат.

Исследователи по всему миру изучают возможности струйного нагрева, поскольку данный вид нагрева является весьма перспективным способом организации

процесса передачи теплоты от газообразного носителя к нагреваемым изделиям.

Взаимодействие системы струй с поверхностью металла в замкнутом объеме рабочего пространства печи представляет собой сложный процесс: при соударении струй о поверхность нагреваемого материала появляются зоны циркуляции газов, а отраженные газы вовлекаются обратно в набегающие струи. Эта циркуляция способствует повышению равномерности нагрева поверхности металла.

В представленном исследовании предлагается рассмотреть способ нагрева металла струями высокотемпературного азота с помощью плоских настильных струй в круговой расстановке. Для нагрева стального сляба предлагается использовать азот, который будет выполнять функцию защитной атмосферы и теплоносителя [2].

В расчетах использовалось круговое расположение сопел при различном расстоянии от среза сопла до поверхности металла. В представленной конфигурации эта величина являлась определяющей.

Исходные данные, которые применялись в ходе расчетов:

- нагреваемый материал – сляб Ст3;
- расстояние от сечения сопла до поверхности – 700 и 1000 мм;
- температура истекающего азота  $T_0$  – 650 К;
- начальная температура – 20 °С;
- скорость истечения азота – 30 м/с;
- стенки сопел являются адиабатическими;
- давление в камере – 1 атм (0,101 МПа);
- используемая модель турбулентности – RNG  $k$ - $\varepsilon$  модель.

Уравнения RNG модели имеет следующий вид [3 – 4]:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k \bar{u}_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( a_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \\ + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k; \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon \bar{u}_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( a_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + \\ + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon + S_\varepsilon. \end{cases}$$

где  $a_k, a_\varepsilon$  – обратные эффективные числа Прандтля для  $k$  и  $\varepsilon$ ;  $\mu_{eff}$  – эффективная вязкость;  $G_k$  – турбулентная кинетическая энергия, образованная от средних градиентов скорости;  $S$  – инвариант тензора деформаций;  $\rho$  – плотность;  $\bar{u}_i$  – усредненная скорость;  $C_{1\varepsilon} = 1,42$ ;  $C_{2\varepsilon} = 1,68$ ;  $C_{3\varepsilon}$  – константа, определяющая степень воздействия выталкивающей силы на  $\varepsilon$ ,  $C_{3\varepsilon} = 1$  для слоев жидкости, для которых направление скорости жидкости параллельно вектору гравитации,  $C_{3\varepsilon} = 0$  для слоев жидкости, для которых направление скорости жидкости перпендикулярно вектору гравитации;  $k$  – кинетическая энергия;  $G_b$  – кинетическая энергия выталкивающей силы;  $G_k$  – турбулентная кинетическая энергия, образованная от средних градиентов скорости;  $Y_M$  – вклад переменного расширения при турбулентности сжатия в общую скорость диссипации.

Главное отличие RNG модели от стандартной заключается в дополнительном члене в уравнении для  $\varepsilon$ . Показатель  $R_\varepsilon$  вычисляется по формуле

$$R_\varepsilon = \frac{C_\mu \rho \eta^3 \left( 1 - \frac{\eta}{\eta_0} \right) \varepsilon^2}{1 + \beta \eta^3} \frac{\varepsilon^2}{k},$$

где  $\eta = \frac{Sk}{\varepsilon}$ ;  $\eta_0 = 4,38$ ;  $\beta = 0,012$ .

Модель турбулентности RNG  $k$ - $\varepsilon$  создана на базе стандартной  $k$ - $\varepsilon$  модели. Данная модель имеет ряд преимуществ, которые позволяют улучшить точность решения уравнений для потоков с большими касательными напряжениями трения, а также более качественно рассчитывать турбулентные течения с низким числом Рейнольдса [5].

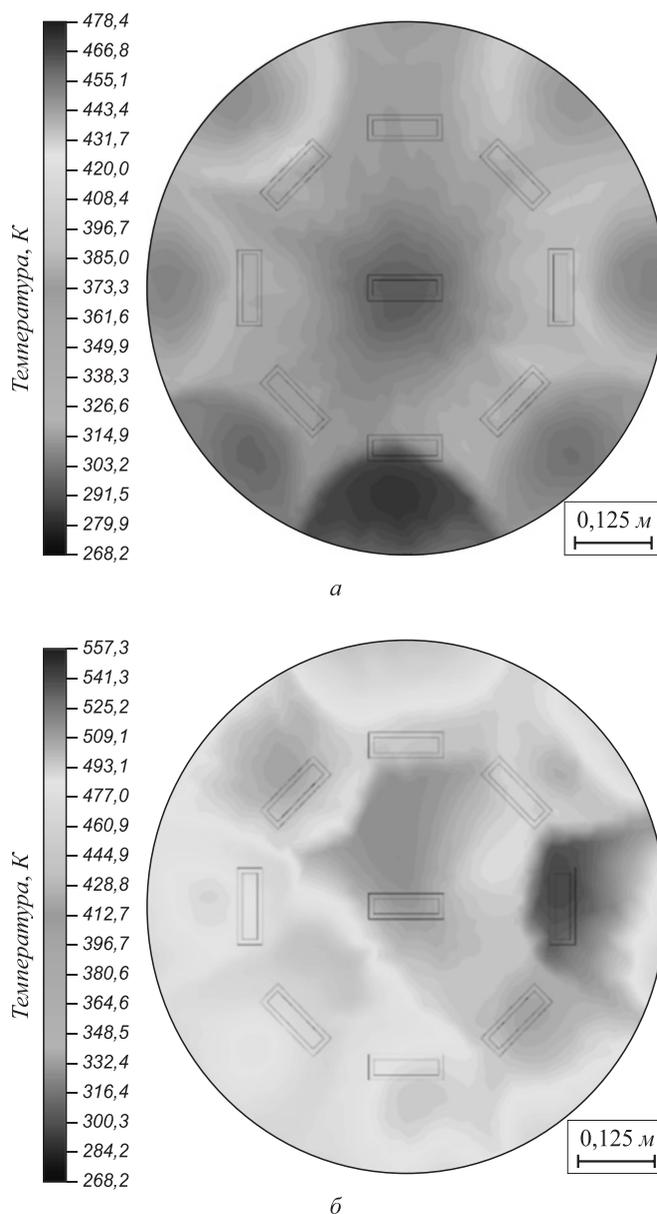


Рис. 1. Распределение температуры на плоской поверхности при расстоянии от среза сопла до поверхности 1000 (а) и 700 (б) мм

Fig. 1. Distribution of temperature on a flat surface at a distance from the nozzle exit to the surface of 1000 (a) and 700 (b) mm

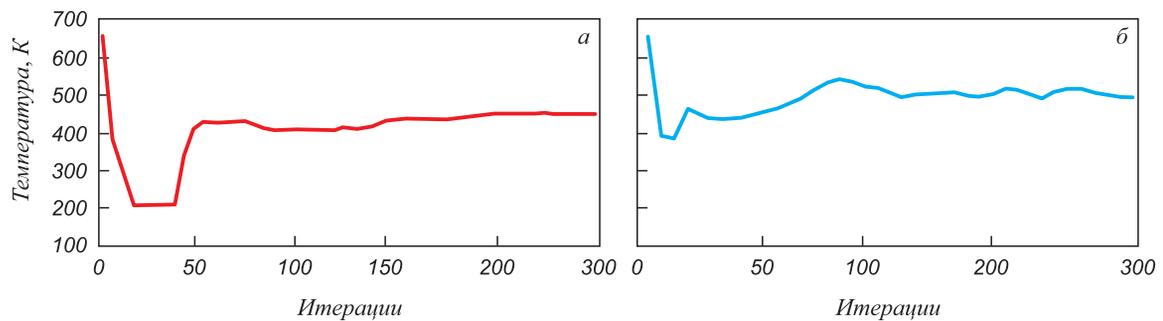


Рис. 2. Средневзвешенная температура на пластине для круговой конфигурации с расстоянием от среза сопла до поверхности в 1000 (а) и 700 (б) мм

Fig. 2. Weighted average plate temperature for circular configuration with a distance from the nozzle exit to the surface of 1000 (a) and 700 (б) mm

На рис. 1 показано расположение сопел, а также распределение температуры при расстоянии от среза сопла до поверхности 1000 и 700 мм.

Данные о распределении контуров температуры в круговой расстановке при расстоянии 700 мм показали, что центральный поток не успевает развиться, и его смещение значительно сказывается на равномерности нагрева на всем участке. Увеличение расстояния от среза сопла до поверхности металла позволяет потоку распределяться более равномерно, не смещая боковые потоки, что продемонстрировано на графике распределения контуров температуры для конфигурации при расстоянии 1000 мм.

На рис. 2 продемонстрированы данные средневзвешенной температуры на поверхности. При достаточном количестве итераций средневзвешенная

температура устанавливается на одном уровне 450 или 500 К. Результаты расчетов средневзвешенной температуры показали, что при расстановке с расстоянием 1000 мм температура быстрее выходит на стационарный режим, чем при расположении сопел с расстоянием до поверхности 700 мм. В первом случае колебания температуры достигают 1,0 К, во втором – 23 К.

## Выводы

Проведенное исследование показывает картину газодинамики при взаимодействии сопел в круговом расположении. Полученные результаты позволяют определить наиболее выгодную конфигурацию сопел для нагрева металла.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

## REFERENCES

1. Кондрашенко С.И. Исследование и разработка способа нагрева стальной ленты струями высокотемпературного азота: Диссертация ... кандидата технических наук. Москва, 2020. 157 с.
2. ГОСТ 9293-74. Азот газообразный и жидкий. Технические условия. Дата введения 1976-01-01. Москва: Стандартинформ, 2007. 15 с.
3. Коркодинов Я.А. Обзор семейства k-ε моделей для моделирования турбулентности // Вестник ПНИ-ПУ. 2013. № 2. С. 5–16.
4. Orszag S.A., Yakhot V., Flannery W.S., Boysan F., Choudhury D., Maruzewski J., Patel B. Renormalization group modeling and turbulence simulation // Proceedings of the Int. Conf. on Near-Wall Turbulent Flows, 15–17 March, 1993, Tempe, Arizona, USA, 1993. P. 1031–1046.
5. Сакорсин Р., Попов С.А. Улучшение аэродинамических характеристик комбинированного крыла путем добавления треугольного выступа // Электронный журнал «Труды МАИ». 2013. № 65. URL: <https://mai.ru/upload/iblock/f69/f69f3f7434eaccf0cec7745356983f9c.pdf>
1. Kondrashenko S.I. *Research and development of a method for heating a steel strip with jets of high-temperature nitrogen: Cand. Tech. Sci. Diss.* Moscow: 2020, 157 p. (In Russ.).
2. *GOST 9293-74. Gaseous and liquid nitrogen. Technical conditions.* Introduced 1976-01-01. Moscow: Standartinform, 2007, 15 p. (In Russ.).
3. Korkodinov Ya.A. Review of a family of k-ε models for turbulence modeling. *Vestnik PNI-PU*. 2013, no. 2, pp. 5–16. (In Russ.).
4. Orszag S.A., Yakhot V., Flannery W.S., Boysan F., Choudhury D., Maruzewski J., Patel B. Renormalization group modeling and turbulence simulation. *Proceedings of the Int. Conf. on Near-Wall Turbulent Flows, 15–17 March, 1993, Tempe, Arizona, USA, 1993*, pp. 1031–1046.
5. Sakornsin R., Popov S.A. Improving the aerodynamic characteristics of a combined wing with addition of triangular protrusion. *Electronic Journal "Trudy MAI"*. 2013, no. 65. Available at URL: <https://mai.ru/upload/iblock/f69/f69f3f7434eaccf0cec7745356983f9c.pdf> (In Russ.).

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Екатерина Витальевна Лалетина**, аспирант кафедры энергоэффективных и ресурсосберегающих промышленных технологий, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

**E-mail:** laletina1992@mail.ru

**Ekaterina V. Laletina**, Postgraduate of the Chair "Energy-Efficient and Resource-Saving Industrial Technologies", National University of Science and Technology "MISIS"

**E-mail:** laletina1992@mail.ru

**Константин Станиславович Шатохин**, к.т.н., доцент кафедры энергоэффективных и ресурсосберегающих промышленных технологий, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»  
**E-mail:** [temp@misis.ru](mailto:temp@misis.ru)

**Konstantin S. Shatokhin**, *Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair "Energy-Efficient and Resource-Saving Industrial Technologies"*, National University of Science and Technology "MISIS"  
**E-mail:** [temp@misis.ru](mailto:temp@misis.ru)

---

Поступила в редакцию 08.06.2022  
После доработки 13.06.2022  
Принята к публикации 20.06.2022

---

Received 08.06.2022  
Revised 13.06.2022  
Accepted 20.06.2022

---