

Рис. 2. Зависимость расхода массы шихты от модуля кислотности

Список использованных источников

1. Жилин А.И. Минеральная вата / Под ред. В.А. Китайцева. – М.: Промстройиздат, 1953. – 236 с.
2. Селянин И.Ф., Феоктистов А.В., Бедарев С.А. Теория и практика интенсификации технологического процесса в шахтных агрегатах малого диаметра. – М.: Теплотехник, 2010. – 379 с.
3. Гордон Я.М. Тепловая работа шахтных печей с плотным слоем / Я.М. Гордон [и др.]. – М.: Metallurgy, 1989. – 120 с.
4. Лисиенко В.Г. Теплофизика металлургических процессов: учебное пособие для вузов / В.Г. Лисиенко, В.И. Лобанов, Б.И. Китаев. – М.: Юрайт, 2021. – 220 с.

УДК: 669.04

О. А. Евтехова, И. А. Прибытков

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

К ВОПРОСУ О ПОСТАНОВКЕ ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СТРУИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО АЗОТА С ПОВЕРХНОСТЬЮ МЕТАЛЛА

Аннотация. Целью работы являлась постановка задачи численного моделирования процесса взаимодействия высокотемпературной струи азота с плоской поверхностью при использовании щелевидного сопла. Проведён анализ исследований данного вопроса, который показал необходимость учёта влияния таких параметров, как расстояние от среза сопла до поверхности металла (h), скорость истечения азота из сопла (U_0), диаметр сопла (d), температура истечения азота (T_0), так как они оказывают существенное влияние на аэродинамические характеристики струй при взаимодействии их с нагреваемой

поверхностью. Определены последующие этапы исследования: экспериментальное исследование распределения плотности теплового потока в области взаимодействия струй с поверхностью стальной ленты и влияния на них основных факторов, определение оптимального расположения сопел по отношению к поверхности нагреваемого материала с помощью программного пакета FloEFD.

Ключевые слова: струйный нагрев, «атакующие струи», конвективный нагрев, численное моделирование, конвективная теплоотдача, поля скоростей.

Abstract. The aim of the work was to formulate the problem of numerical simulation of the interaction of a high-temperature nitrogen jet with a flat surface using a slotted nozzle. An analysis of the studies of this issue was carried out, which showed the need to consider the influence of such parameters as the distance from the nozzle exit to the metal surface (h), the rate of nitrogen outflow from the nozzle (U_0), the nozzle diameter (d), the temperature of the nitrogen outflow (T_0), since they have a significant effect on the aerodynamic characteristics of the jets when they interact with the heated surface. The following stages of the study were determined: an experimental study of the distribution of the heat flux density around interaction of jets with the surface of a steel strip and the influence of the main factors on them, determination of the optimal location of the burners in relation to the surface of the heated material using the FloEFD software package.

Key words: jet heating, "attacking jets", convective heating, numerical simulation, convective heat transfer, velocity fields.

В настоящее время одним из актуальных направлений исследования в металлургии является изучение способов совершенствования тепловой работы устройств, в том числе для нагрева стальной ленты в процессе её термообработки. Несмотря на снижение производства стали по итогам 2020 года, в 2021 году ожидается возобновление роста. Планируется увеличение капитальных затрат на расширение и модернизацию, ожидается приток инвестиций. В связи с этим актуальность данной темы возрастает.

Одним из способов интенсификации тепловой работы печей является струйный нагрев металла. За счёт использования струйного нагрева увеличивается конвективная составляющая. Для достижения целей термообработки, а именно, улучшения микроструктуры, получения однородной структуры металла, снятию внутренних напряжений, требуются высокие энергозатраты, а также защитная атмосфера для предотвращения окисления металла.

На основании результатов экспериментальных исследований и численного моделирования процесса нагрева стальной ленты, было предложено использовать нагретый азот, который выполняет теплотехническую функцию как носитель теплоты для нагрева ленты и технологическую – является защитной атмосферой. Такой способ даёт ряд преимуществ: интенсификация теплообменного процесса, уменьшение времени нагрева, упрощение конструкции нагревательных устройств, снижение затрат на их производство, возможность создания малоинерционного перехода с одного температурного режима на другой.

Исследования теплообмена струй горящего топлива и металла выполнялись как российскими, так и зарубежными учёными. Многочисленные результаты экспериментальных исследований дают информацию о влиянии различных геометрических и режимных параметров струйных систем в различных диапазонах на интенсивность, равномерность и эффективность процесса

конвективной теплоотдачи к поверхности металла. Несмотря на это, потоки, создаваемые соплами с различной формой, в том числе щелевидной, ещё плохо изучены.

На современных промышленных предприятиях для нагрева любых поверхностей используются «атакующие струи». Однако, когда расстояние от сопла до поверхности увеличивается, скорость теплопередачи снижается [1]. Исследования, проведённые на различных моделях и опытных установках, показывают, что отрицательное влияние параметров потока уменьшается для удлиненных отверстий, а расположение сопел в линию может быть более эффективным для передачи тепла, чем шахматное расположение [2]. Существенным для оптимизации нагрева системой струй является минимизация перетока.

Результаты другого исследования показывают, что при уменьшении диаметра поверхности столкновения максимальный тепловой поток увеличивается, и расположение максимального теплового потока движется из точки торможения в область пристенной струи [3].

Для осуществления измерений в процессе эксперимента использовались термопары, а также интерферометрические измерения. В случае проведения интерферометрических измерений для анализа и визуализации газовых потоков используется метод Маха-Цендера. Также для визуализации используют термохромный жидкокристаллический лист (ТЖК) и метод масляной пленки. Обработка данных исследований осуществляется методом стандартного математического анализа. Однако, как показали опыты, любой из способов проведения измерений и обработки результатов может давать значительные ошибки [4].

Опираясь на опыт отечественных учёных, в данной работе для разработки численной модели исследования аэродинамических и теплообменных процессов предполагается использовать программное обеспечение FloEFD, теорию течения свободных, полуограниченных и ограниченных струйных течений [5]. Экспериментальные исследования будут проведены на установке струйного нагрева.

Схема предполагаемой модели представлена на рисунке 1.

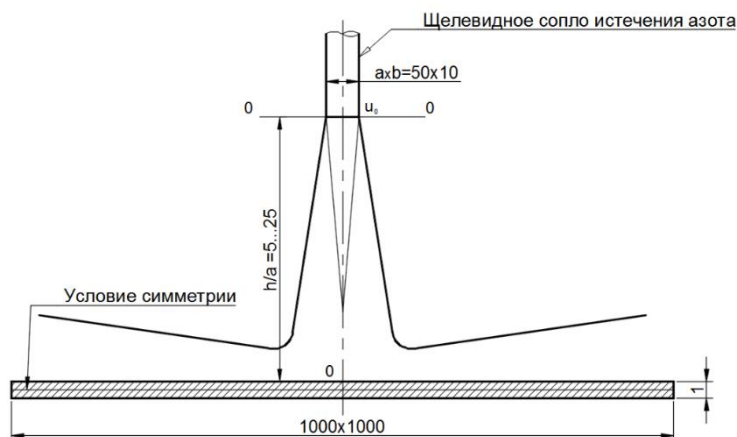


Рис. 1. Схема исследуемой модели аэродинамики и теплового состояния струи, взаимодействующей с плоской поверхностью

Размеры листа нагреваемого металла: длина и ширина 1000 мм, толщина 1 мм. Размеры сопла истечения азота: длина $a=50$ мм, ширина $b=10$ мм. Высота от сопла до нагреваемого металла от 5 до 25 h/a .

Температура азота, истекающего из сопла (T_0), равна 600 °С. Начальная температура металла – 22 °С. Скорость истечения азота 30 м/с и 100 м/с. Материал используемого листа металла – сталь марки Ст3. Коэффициент теплопроводности этой стали при температуре 600 °С равен 34 Вт/м·К. При температуре 600 °С коэффициент теплопроводности, удельная теплоёмкость и коэффициент кинематической вязкости газообразного азота соответственно равны: 44,6 Вт/м·К; 1140 Дж/кг·К; $93,5 \cdot 10^6$ м²/с [6].

Для представления изменения теплофизических свойств металла будет использоваться кусочно-линейная функция. В данной модели не рассмотрен процесс нагрева азота. Его подача осуществляется с определённой заданной температурой.

Модель исследования содержит уравнение неразрывности, уравнение энергии для азота, уравнение теплопроводности нагреваемого металла, уравнения Навье-Стокса для трёх координат, а также дополнена моделью турбулентности.

Истечение азота принимается турбулентным и описывается дифференциальной k - ε моделью турбулентности (предложенной Spalding, Launder в 1972 году). Выбор стандартной (высокорейнольдсовой) модели основывается на том, что она даёт хорошие результаты для струйных и других свободных течений, а также не требует больших вычислительных мощностей. Однако, для расчёта пристенных течений возникает необходимость использования низкорейнольдсовых моделей или k - ε модель с введением пристенных функций. Одной из наиболее удачных модификаций признана модель Лэма-Бремхорста [7].

Принятая стандартная k - ε модель состоит из уравнения для энергии турбулентных пульсаций, уравнения скорости диссипации турбулентной энергии и выражения для кинематической турбулентной вязкости. Модель также содержит константы, которые калиброваны по экспериментальным данным для струйных течений.

Уравнение для энергии турбулентных пульсаций:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \tau_{ij} \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} - \varepsilon. \quad (1)$$

Уравнение скорости диссипации турбулентной энергии:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + c_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \tau_{ij} \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} - c_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k}. \quad (2)$$

Выражение для кинематической турбулентной вязкости:

$$\nu_t = c_\mu k^2 / \varepsilon. \quad (3)$$

Стандартные константы:

$$c_\mu = 0.09; c_{1\varepsilon} = 1.44; c_{2\varepsilon} = 1.92; c_{3\varepsilon} = 0.8; \sigma_k = 1; \sigma_\mu = 1.3$$

Уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \rho}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \rho}{\partial z} + \rho \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} \right) = 0. \quad (4)$$

Уравнение Навье-Стокса:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho \bar{u}) &= -\frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{eff} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_{eff} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right); \\ \frac{\partial}{\partial t} (\rho \bar{v}) &= -\frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{eff} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_{eff} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right); \\ \frac{\partial}{\partial t} (\rho \bar{w}) &= -\frac{\partial \rho}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{eff} \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_{eff} \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} \right). \end{aligned} \quad (5)$$

Уравнение энергии:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho \bar{T}) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho \bar{u} \bar{T}) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho \bar{v} \bar{T}) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho \bar{w} \bar{T}) &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho a_{eff} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} \right) + \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho a_{eff} \frac{\partial \bar{T}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho a_{eff} \frac{\partial \bar{T}}{\partial z} \right). \end{aligned} \quad (6)$$

Результаты, полученные в ходе моделирования и экспериментального исследования, будут обобщены и сопоставлены с результатами, полученными для одиночной круглой струи азота.

Список использованных источников

1. Nuntadusit C., Wae-hayee M., Tekasakul P., & Eiamsa-ard S. (2012). Local heat transfer characteristics of array impinging jets from elongated orifices, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 39, 1154–1164.
2. Vahid Y-A, Houshfar, Beygi-Khosroshahi, & Ashjaee. (2018). Experimental investigation on temperature field and heat transfer distribution of a slot burner methane/air flame impinging on a curved surface, *Applied Thermal Engineering* 129, 761–771.
3. Kiani M., Houshfar E., & Ashjaee M. (2018). An experimental and numerical study on the combustion and flame characteristics of hydrogen in intersecting slot burners, *International Journal of Hydrogen Energy* 43, 3034-3049.
4. Bell J.B., Day M.S., Shepherd I.G., Johnson M., Cheng R.K., Grcar J.F., Beckner V.E., Lijewski M.J., *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 102 (29) (2005) 10006 – 10011.
5. Pribytkov I.A., Kondrashenko S.I. On the calculation of convective heat transfer under mutual-action of a jet with limiting surface. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2019; 62(3) :208-214. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-3-208-214>.
6. Гусовский В.Л., Лифшиц А.Е. Методика расчета нагревательных и термических печей: учебно-справочное издание. – М.: Теплотехник, 2004. – 400 с.
7. Пейтел В.К., Роди В., Шойерер Г. Модели турбулентности для течений в пристеночной области с малыми числами Рейнольдса. Обзор // *Аэрокосмическая техника*. 1986. № 2. С. 183–197.