

УДК 669.02/09:533.6

## АЭРОДИНАМИКА СТРУЙ, ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ С ПЛОСКОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

*Прибытков И.А., к.т.н., профессор кафедры энергоэффективных и ресурсосберегающих  
промышленных технологий (temp@misis.ru)*

*Кондрашенко С.И., ассистент кафедры энергоэффективных и ресурсосберегающих  
промышленных технологий (stas.misis@yandex.ru)*

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

**Аннотация.** Проведено исследование особенностей развития одиночной свободной струи высокотемпературного азота при взаимодействии с плоской поверхностью. Расчет процесса теплообмена при нагреве атакующими струями весьма трудно реализовать аналитически в силу сложности газодинамических процессов, протекающих как в одиночной струе, так и в системе струй, взаимодействующих с металлом. Сложности расчета усугубляются тем, что струя как таковая при взаимодействии с поверхностью исчезает. С поверхностью взаимодействует настильный (веерный) поток, форма, аэродинамические свойства и тепловое состояние которого резко отличаются от таковых для первоначальной струи. Исследования проводились на основании численного моделирования в версии программно-вычислительного комплекса для мультифизического моделирования FloEFD, основанного на решении уравнений газодинамики и теплообмена. Решаемая система уравнений состояла из уравнения Навье-Стокса, уравнений энергии и неразрывности и была дополнена  $k-\epsilon$  моделью турбулентности. Разработана трехмерная модель для моделирования, заданы необходимые свойства, начальные и граничные условия. При исследовании аэродинамики одиночной высокотемпературной струи, взаимодействующей с поверхностью, основными определяющими величинами являлись: скорость истечения азота из сопла  $U_0$ , температура азота  $T$ , внутренний диаметр сопла  $d_0$ , расстояние от среза сопла до поверхности  $h$ , расстояние от критической точки (точки пересечения оси струи с поверхностью) по радиусу потока  $r$ . Представлены данные уменьшения скорости газа по мере развития струи из-за потери начальной энергии на вовлечение в движение неподвижного окружающего газа. Исследования показали, что увеличение начальной скорости истечения газа приближает к поверхности область более высоких скоростей как в самой струе, так и в веерном потоке. Этот фактор способствует интенсификации теплообмена. Кроме того, высокие скорости увеличивают общую толщину веерного потока и снижают толщину гидродинамического пограничного слоя, которая возрастает по мере удаления от критической точки.

**Ключевые слова:** струйный нагрев, струи, веерный поток, конвективный нагрев, численное моделирование, поля скоростей.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-4-263-269

### ВВЕДЕНИЕ

Струйный конвективный нагрев является весьма перспективным способом организации процесса передачи теплоты от газообразного теплоносителя к нагреваемым изделиям. Его использование имеет целый ряд преимуществ по сравнению с другими схемами организации движения газообразного теплоносителя относительно поверхности нагреваемого изделия: высокая интенсивность теплообменного процесса, снижение времени нагрева, уменьшение габаритов нагревательных устройств и затрат на их строительство, облегчение условий работы теплового ограждения этих устройств, возможность создания малоинерционного перехода с одного температурного режима на другой и др. [1 – 5].

Применение высокоскоростных и высокотемпературных горелок (скоростных горелок) рекуперативного и регенеративного типов в нагревательных печах прокатного производства заводов черной металлургии позволило, в частности, снизить угар металла в процессе

нагрева, сократить затраты топливно-энергетических ресурсов и повысить качество нагрева металла [6 – 8].

Вместе с тем струйный конвективный нагрев имеет объективные недостатки: локальность подвода теплоты, опасность перегрева металла, иногда более разветвленную сеть трубопроводов. Однако итоговое сравнение преимуществ и недостатков использования струйного конвективного нагрева указывает на перспективность его применения. К тому же даже для нагрева массивных в тепловом отношении тел разработаны способы снижения и минимизации отрицательного воздействия локальности подвода теплоты [9 – 13].

Из достаточно большого перечня схем струйного конвективного нагрева можно выделить нагрев атакующими (ударными) струями [14], основной особенностью которого является выраженная направленность высокотемпературных и высокоскоростных струй на поверхность нагреваемого металла. В этом случае струи теплоносителя могут выполнять и роль турбулизатора потока греющих газов, движущихся параллельно поверхности.

Расчет процесса теплообмена при нагреве атакующими струями весьма трудно реализовать аналитически в силу сложности газодинамических процессов, протекающих как в одиночной струе, так и в системе струй, взаимодействующих с металлом. Сложности расчета усугубляются еще и тем, что струя как таковая при взаимодействии с поверхностью исчезает. С поверхностью взаимодействует настильный (веерный) поток, форма, аэродинамические свойства и тепловое состояние которого резко отличаются от таковых для первоначальной струи. Как и в случае движения неограниченного потока вдоль плоской поверхности вблизи последней образуется гидродинамический пограничный слой. Однако структура течения в веерном потоке принципиально иная.

Веерный поток, распространяющийся в пространстве с неподвижной средой, должен иметь две границы с нулевой скоростью (рис. 1).

Вблизи поверхности формируется гидродинамический пограничный слой  $\delta(x)$ , однако величина скорости в нем изменяется от нуля на поверхности до некоторого максимального значения. За пределами границы  $\delta(x)$  скорость уменьшается снова до нулевого значения (точка Б), выше которой находится неподвижная среда [15–18]. Толщина веерного потока между точками А и Б характеризуется тем, что, во-первых, она изменяется вниз по течению, во-вторых, в ее пределах происходит перестройка профиля скорости движения газа. Совершенно ясно, что такая структура течения имеет место в области уже сформировавшегося веерного потока. Картина течения является более сложной в переходной области от струйного течения к веерному потоку.

Рассмотренные отличия позволяют сделать по крайней мере два вывода: 1 – расчет конвективной теплоотдачи при взаимодействии струи с граничной поверхностью представляется более сложным; 2 – методика расчета конвективной теплоотдачи в этом случае должна базироваться на факторах (режим движения, толщина гидродинамического и теплового пограничных

слоев и др.), характерных именно для веерного потока. Аналитический расчет характерных для веерного потока величин не представляется возможным из-за сложности характера течения, поэтому актуальной задачей является исследование аэродинамики и теплового состояния газа внутри веерного потока.

Целью настоящей работы является исследование скоростных полей веерного потока численным методом решения основных дифференциальных уравнений движения реальной жидкости с использованием программного комплекса [19, 20]. Расчеты проводили для случая истечения одиночной струи нагретого азота, направленной по нормали к плоской поверхности, величина площади которой существенно превосходит начальную площадь поперечного сечения струи на срезе сопла.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Основными определяющими величинами являлись: скорость истечения азота из сопла  $U_0$ , температура азота  $T$ , внутренний диаметр сопла  $d_0$ , расстояние от среза сопла до поверхности  $h$ , расстояние от критической точки (точки пересечения оси струи с поверхностью) по радиусу потока  $R$ .

Ниже приведены некоторые результаты решения сформулированной задачи. На рис. 2 в качестве примера представлены структура течения струи азота при взаимодействии с поверхностью и поля скоростей для случая:  $U_0 = 30$  м/с,  $T = 700$  °С,  $d_0 = 0,05$  м при относительном расстоянии  $h/d_0 = 10$  и температуре окружающей среды 20 °С.

Наблюдаются (рис. 2, а) две области течения газа: область струйного течения и область веерного потока. Толщина веерного потока меньше диаметра струи на всем расстоянии от среза сопла до поверхности. Скорость газа уменьшается по мере развития струи из-за потери начальной энергии на вовлечение в движение неподвижного окружающего газа. Отчетливо видна область начального участка струи (рис. 2, а), в которой сохраняется наибольшая скорость движения азота. По

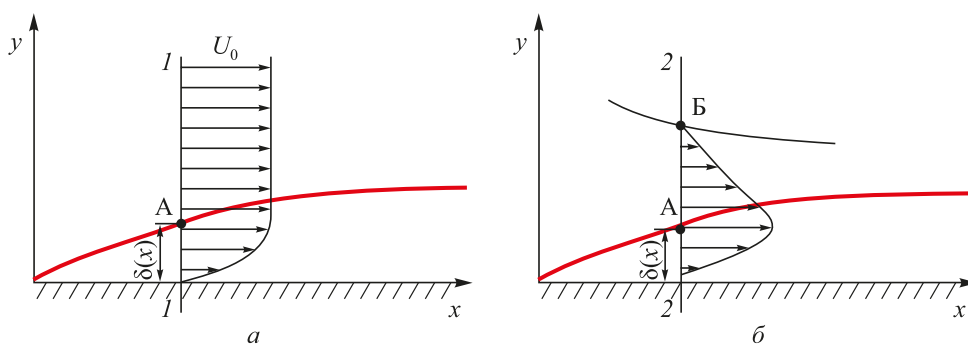


Рис. 1. Структура гидродинамического пограничного слоя:  
а – поток бесконечен в направлении координаты  $y$ ; б – веерный поток

Fig. 1. Structure of the hydrodynamic boundary layer:  
а – the flow is infinite in direction of  $y$  coordinate; б – fan flow

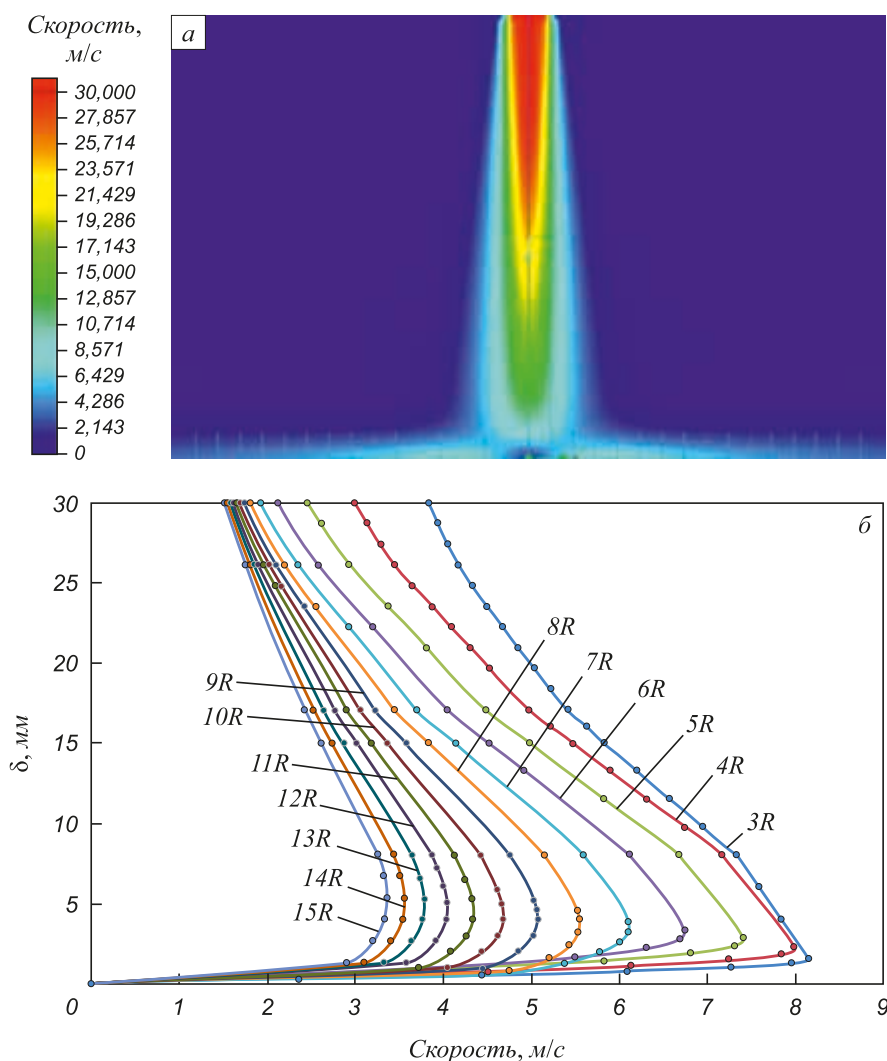


Рис. 2. Структура течения струи азота при взаимодействии с поверхностью (а) и распределение действительной скорости в веерном потоке (б)

Fig. 2. Structure of the nitrogen jet flow during interaction with the surface (a) and distribution of actual velocity in the fan flow (b)

мере растекания веерного потока скорость газа снижается. Следует отметить, что при выбранных условиях скорость веерного потока существенно ниже начальной скорости истечения газа из сопла, что должно отразиться на интенсивности конвективной теплоотдачи. На рис. 2, б представлены кривые распределения скорости газа по толщине веерного потока при различных значениях текущего радиуса потока. Следует отметить, что все кривые имеют максимум, расположенный вблизи поверхности. Расстояние максимума от поверхности вглубь веерного потока при каждом значении текущего радиуса характеризует толщину собственно гидродинамического пограничного слоя, вне пределов которого расположена основная область веерного потока с более низким темпом изменения скорости. Толщина гидродинамического пограничного слоя при выбранных условиях весьма мала, толщина же основного веерного потока соизмерима с внутренним диаметром сопла.

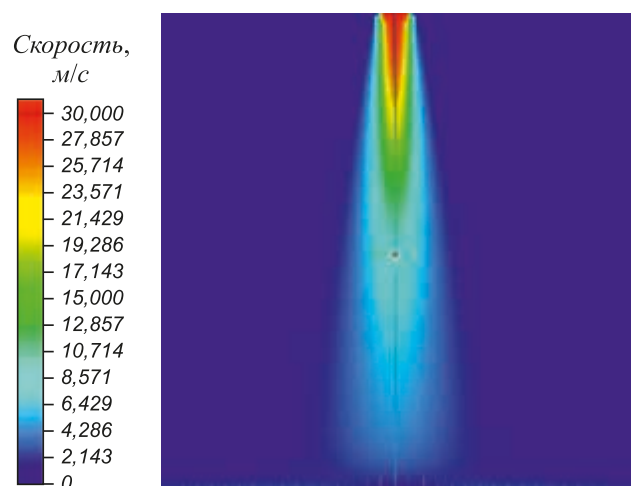


Рис. 3. Структура течения струи азота при взаимодействии с поверхностью при  $U_0 = 30 \text{ м/с}$ ,  $T = 700 \text{ °C}$ ,  $d_0 = 0.05 \text{ м}$ ,  $h/d_0 = 25$

Fig. 3. Structure of the nitrogen jet flow during interaction with the surface at  $U_0 = 30 \text{ м/с}$ ,  $T = 700 \text{ °C}$ ,  $d_0 = 0.05 \text{ м}$ ,  $h/d_0 = 25$

Увеличение относительного расстояния от среза сопла изменяет картину течения. На рис. 3 при  $h/d_0 = 25$  видно, что струя распространяется практически как свободная, веерный поток не имеет выраженного характера.

Картина развития течения при более высокой скорости показана на рис. 4 ( $h/d_0 = 10$ ;  $U_0 = 100$  м/с,  $T = 700$  °С). Увеличение начальной скорости истечения газа приближает к поверхности область более высоких скоростей как в самой струе, так и в веерном потоке. Кроме того, высокие скорости (рис. 4, б) увеличивают общую толщину веерного потока и снижают толщину гидродинамического пограничного слоя, которая возрастает по мере удаления от критической точки.

С точки зрения интенсификации конвективной теплоотдачи рациональнее иметь в зоне пристеночного движения повышенные скорости.

На рис. 5 показана структура течения и поля скоростей при  $h/d_0 = 5$ , то есть в конце начального участка струи. Видно, что высокие скорости течения наблюдаются и в области критической точки.

## Выводы

Аэродинамика веерного потока принципиально отличается от таковой в струе после ее встречи с плоской поверхностью. Расчет конвективной теплоотдачи при струйном конвективном нагреве должен базироваться на факторах, характерных для веерного потока

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Асатуров В.Н., Краснокутский П.Г., Берковская П.С. Скоростной струйный нагрев металла. – Киев: Техника, 1984. – 120 с.
2. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй. – М.: ЭКОЛИТ, 2011. – 720 с.
3. Тимошпольский В.И., Трусова И.А., Ратников П.Э. Возможности применения струйного нагрева металла перед прокаткой // Литье и металлургия. 2007. № 2. С. 63 – 66.
4. Polat S., Huang B., Mujumdar A.S., Douglas W.J.M. Numerical flow and heat transfer under impinging jets // Annual Review of Numerical Fluid Mechanics and Heat Transfer. 1989. No. 2. P. 157 – 197.
5. Асатуров В.Н. Интенсификация тепловой работы нагревательных печей. – В кн.: Материалы 2-й международной кон-

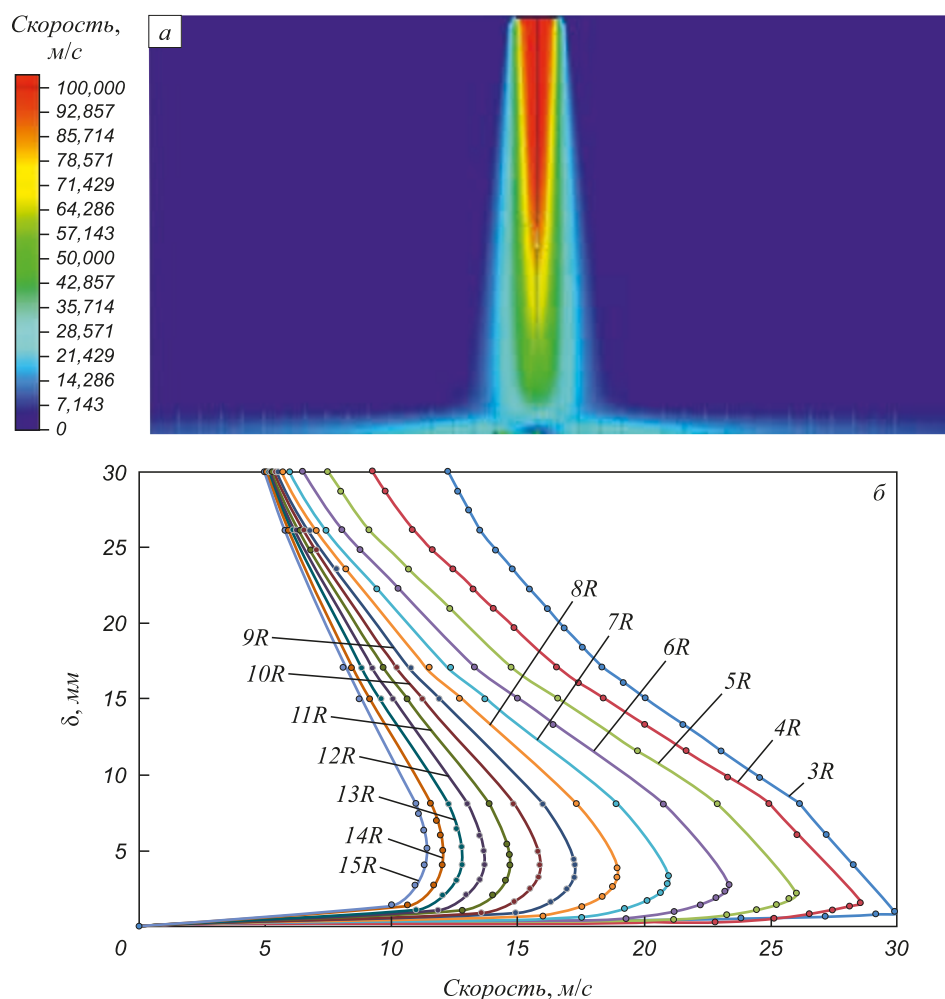


Рис. 4. Структура течения струи азота при взаимодействии с поверхностью (а) и распределение скорости в гидродинамическом пограничном слое (б) при  $U_0 = 100$  м/с,  $T = 700$  °С,  $d_0 = 0,05$  м,  $h/d_0 = 10$

Fig. 4. Structure of the nitrogen jet flow during interaction with the surface (a) and velocity distribution in the hydrodynamic boundary layer (b) with  $U_0 = 100$  m/s,  $T = 700$  °С,  $d_0 = 0.05$  m,  $h/d_0 = 10$

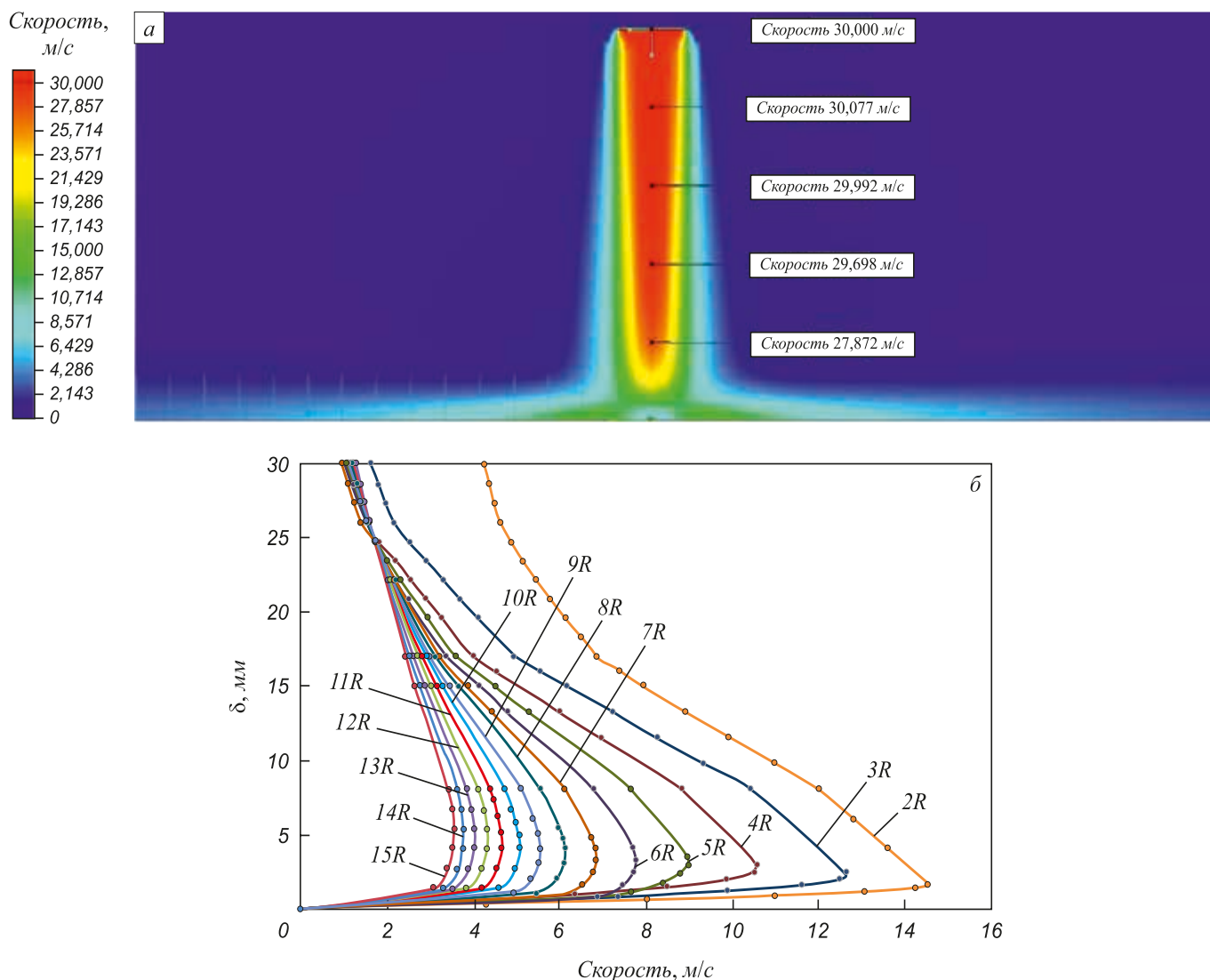


Рис. 5. Структура течения струи азота при взаимодействии с поверхностью (а) и распределение скорости в гидродинамическом пограничном слое (б) при  $U_0 = 30$  м/с,  $T = 700$  °С,  $d_0 = 0,05$  м,  $h/d_0 = 5$

Fig. 5. Structure of the nitrogen jet flow during interaction with the surface (a) and velocity distribution in the hydrodynamic boundary layer (b) at  $U_0 = 30$  m/s,  $T = 700$  °C,  $d_0 = 0.05$  m,  $h/d_0 = 5$

- ференции «Автоматизированные печные агрегаты и энергосберегающие технологии в металлургии». – М.: МИСиС, 2002. С. 36 – 40.
6. Cadena-Ramírez A., Favela-Contreras A., Dieck-Assad G. Modeling and simulation of furnace pulse firing improvements using fuzzy control // Simulation. 2017. Vol. 93. No. 6. P. 477 – 487.
  7. Курносов В.В., Шульц Л.А. Проблемы безокислительного необезуглероживающего высокотемпературного нагрева стали в топливных печах и возможные пути их решения // Изв. вуз. Черная металлургия. 2012. № 11. С. 10 – 14.
  8. Вохмяков А.М., Казяев М.Д., Казяев Д.М. Исследование конвективного теплообмена в проходной печи, оснащенной скоростными горелками // Цветные металлы. 2011. № 12. С. 89 – 93.
  9. Прибытков И.А. Об особенностях импульсно-скоростного нагрева сверхмассивных в тепловом отношении тел. – В кн.: Материалы XVI международной конференции «Теплотехника и энергетика в металлургии», НМетАУ, г. Днепропетровск, Украина. – Днепропетровск: НМетАУ, 2011. С. 74 – 75.
  10. Прибытков И.А. Расчет теплового состояния металла при импульсно-скоростном нагреве // Изв. вуз. Черная металлургия. 1995. № 1. С. 53 – 56.
  11. Прибытков И.А. Энергосберегающие способы нагрева металла на основе использования струй. – В кн.: Сб. науч. трудов конференции «Автоматизированные печные агрегаты и энергосберегающие технологии в металлургии». – М.: МИСиС, 2002. С. 375 – 390.
  12. Курносов В.В., Васильев В.М., Кондрашенко С.И. Исследование системы охлаждения печи обжига огнеупорных изделий. – В кн.: Труды IV Всероссийской научно-практической конференции «Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве (ТИМ-2015)» (г. Екатеринбург, 26-27 марта 2015 г.). – Екатеринбург: УрФУ, 2015. С. 68 – 71.
  13. Lisenko V.G., Shleimovich E.M. Improving the thermal characteristics of furnaces and the operating conditions of the lining by improving direct-flame-impingement methods for intensifying the heating of metal // Refractories and Industrial Ceramics. 2013. Vol. 54. No. 3. P. 188 – 195.
  14. Hu L., Lv Y., Tang K., Richards G. An improved methodology for pulse combustion with programmable timing sequence used in reheating furnaces // ISIJ International. 2017. Vol. 57. No. 12. P. 2266 – 2268.
  15. Bula Antonio J., Rahman Muhammad M., Leland John E. Numerical modeling of conjugate heat transfer during impingement of free



- liquid jet issuing from a slot nozzle // Numerical Heat Transfer, Part A: Applications. An International Journal of Computation and Methodology. 2000. Vol. 38. No. 1. P. 45 – 66.
16. Gardon R., Akfirat J. Heat Transfer Characteristics of Impinging Two-Dimensional Air Jets // Trans. ASME. J. Heat Transfer. 1966. No. 88. P. 101 – 108.
  17. Michalke A. On spatially growing disturbances in an inviscid shear layer // J. Fluid Mechanics. 1965. Vol. 23. No. 3. P. 521 – 544.
  18. Liepmann D., Gharib M. The role of streamwise vorticity in the near-field entrainment of round jets // J. Fluid Mechanics. 1992. Vol. 245. P. 643 – 668.

19. Liu Y.J., Li J.D., Misra R.D.K., Wang Z.D., Wang G.D. A numerical analysis of slab heating characteristics in a rolling type reheating furnace with pulse combustion // Applied Thermal Engineering. 2016. Vol. 107. P. 1304 – 1312.
20. Yue K., Cheng L., Liu H., Wang Y. Analysis of jet blast impact of embarked aircraft on deck takeoff zone // Aerospace Science and Technology. 2015. Vol. 45. P. 60 – 66.

Поступила в редакцию 4 декабря 2018 г.

После доработки 5 февраля 2019 г.

Принята к публикации 7 февраля 2019 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2019. Vol. 62. No. 4, pp. 263–269.

## AERODYNAMICS OF JETS INTERACTING WITH A FLAT SURFACE

I.A. Pribytkov, S.I. Kondrashenko

National University of Science and Technology “MISIS” (MISIS),  
Moscow, Russia

**Abstract.** In this paper, the development features of a single free jet of high-temperature nitrogen interacting with a flat surface were studied. Calculation of the heat exchange process during heating by the attacking jets is very difficult to implement analytically due to complexity of the gas-dynamic processes occurring both in a single jet and in a system of jets interacting with the metal. The computational difficulties are aggravated by the fact that when interacting with the surface the jet as such disappears. The flat (fan) flow interacts with the surface: form, aerodynamic properties and thermal state of the flow strongly differ from those of the original jet. The studies were conducted on the basis of numerical simulation in the FloEFD software and computing complex for multiphysical simulation based on solution of the equations of gas dynamics and heat transfer. The solved system of equations consisted of Navier-Stokes equations, equations of energy and continuity and was supplemented by  $k-\varepsilon$  turbulence model. A three-dimensional model was developed for simulation, the necessary properties, initial and boundary conditions were specified. In the study of aerodynamics of a single high-temperature jet interacting with the surface, the main defining values were: nitrogen flow rate from the nozzle  $U_0$ , nitrogen temperature  $T$ , internal diameter of the nozzle  $d_0$ , distance from the nozzle section to the surface  $h$ , distance from the critical point (point of intersection of the jet axis with the surface) along the flow radius  $r$ . Data on the gas velocity decrease as the jet develops due to the loss of initial energy to engage the motionless surrounding gas in motion, is presented. The studies have shown that increase in the initial velocity of gas outflow brings the area of higher velocities closer to the surface both in the jet itself and in the fan jet. This factor contributes to heat transfer intensification. In addition, high speeds increase the total thickness of the fan flow and reduce the thickness of hydrodynamic boundary layer, which increases with distance from the critical point.

**Keywords:** jet heating, jets, fan flow, convective heating, numerical simulation, fields of velocity.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-4-263-269

## REFERENCES

1. Astsaturov V.N., Krasnokutskii P.G., Berkovskaya P.S. *Skorostnoi struinyi nagrev metalla* [High-speed jet heating of metal]. Kiev: Tekhnika, 1984, 120 p. (In Russ.).
2. Abramovich G.N. *Teoriya turbulentnykh strui* [Theory of turbulent jet]. Moscow: EKOLIT, 2011, 720 p. (In Russ.).
3. Timoshpol'skii V.I., Trusova I.A., Ratnikov P.E. Possibilities of application of metal jet heating before rolling. *Lit'e i metallurgiya*. 2007, no. 2, pp. 63–66. (In Russ.).

4. Polat S., Huang B., Mujumdar A.S., Douglas W.J.M. Numerical flow and heat transfer under impinging jets. *Annual Review of Numerical Fluid Mechanics and Heat Transfer*. 1989, no. 2, pp. 157–197.
5. Astsaturov V.N. Intensification of thermal work of heating furnaces. In: *Materialy 2-i mezhdunarodnoi konferentsii "Avtomatizirovannye pechnye agregaty i energosberegayushchie tekhnologii v metallurgii"* [Coll. of Sci. Works of the Conf. "Automated Furnaces and Energy-Saving Technologies in Metallurgy"]. Moscow: MISiS, 2002, pp. 36–40. (In Russ.).
6. Cadena-Ramírez A., Favela-Contreras A., Dieck-Assad G. Modeling and simulation of furnace pulse firing improvements using fuzzy control. *Simulation*. 2017, vol. 93, no. 6, pp. 477–487.
7. Kurnosov V.V., Shul'ts L.A. High temperature nonoxidizing nondecarburizing heating of steel in combined fuel furnaces: problems and decisions. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2012, no. 11, pp. 10–14. (In Russ.).
8. Vokhmyakov A.M., Kazyayev M.D., Kazyayev D.M. Investigation of convective heat transfer in a through furnace equipped with high-speed burners. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2011, no. 12, pp. 89–93. (In Russ.).
9. Pribytkov I.A. On the features of pulse-fast heating of thermally superheavy bodies. In: *Materialy XVI mezhdunarodnoi konferentsii "Teplotekhnika i energetika v metallurgii"*, NMetAU, g. Dnepropetrovsk, Ukraina [Materials of the XVI Int. Conf. "Heat and Power Engineering in Metallurgy", NMetAU, Dnepropetrovsk, Ukraine]. Dnepropetrovsk: NMetAU, 2011, pp. 74–75. (In Russ.).
10. Pribytkov I.A. Calculation of metal thermal state at pulse-speed heating. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1995, no. 1, pp. 53–56. (In Russ.).
11. Pribytkov I.A. Energy-saving methods of metal heating based on the use of jets. In: *Sb. nauchn. trudov konferentsii "Avtomatizirovannye pechnye agregaty i energosberegayushchie tekhnologii v metallurgii"* [Coll. of Sci. Works of the Conf. "Automated Furnaces and Energy-Saving Technologies in Metallurgy"]. Moscow: MISiS, 2002, pp. 375–390. (In Russ.).
12. Kurnosov V.V., Vasil'ev V.M., Kondrashenko S.I. Investigation of the refractory kiln cooling system. In: *Trudy IV Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Teplotekhnika i informatika v obrabotke i proizvodstve (TIM-2015)"* (g. Ekaterinburg, 26-27 marta 2015 g.) [Proc. of the IV All-Russ. Sci. and Pract. Conf. "Heat Engineering and Computer Science in Education, Science and Production (TIM-2015)" (Ekaterinburg, March 26-27, 2015)]. Ekaterinburg: UrFU, 2015, pp. 68–71. (In Russ.).
13. Lisienko V.G., Shleimovich E.M. Improving the thermal characteristics of furnaces and the operating conditions of the lining by improving direct-flame-impingement methods for intensifying the heating of metal. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2013, vol. 54, no. 3, pp. 188–195.
14. Hu L., Lv Y., Tang K., Richards G. An improved methodology for pulse combustion with programmable timing sequence used in reheating furnaces. *ISIJ International*. 2017, vol. 57, no. 12, pp. 2266–2268.

15. Bula Antonio J., Rahman Muhammad M., Leland John E. Numerical modeling of conjugate heat transfer during impingement of free liquid jet issuing from a slot nozzle. Numerical Heat Transfer, Part A: Applications. *An International Journal of Computation and Methodology*. 2000, vol. 38, no. 1, pp. 45–66.
16. Gardon R., Akfirat J. Heat transfer characteristics of impinging two-dimensional air jets. *Trans. ASME. J. Heat Transfer*. 1966, no. 88, pp. 101–108.
17. Michalke A. On spatially growing disturbances in an inviscid shear layer. *J. Fluid Mechanics*. 1965, vol. 23, no. 3, pp. 521–544.
18. Liepmann D., Gharib M. The role of streamwise vorticity in the near-field entrainment of round jets. *J. Fluid Mechanics*. 1992, vol. 245, pp. 643–668.
19. Liu Y.J., Li J.D., Misra R.D.K., Wang Z.D., Wang G.D. A numerical analysis of slab heating characteristics in a rolling type reheating furnace with pulse combustion. *Applied Thermal Engineering*. 2016, vol. 107, pp. 1304–1312.
20. Yue K., Cheng L., Liu H., Wang Y. Analysis of jet blast impact of embarked aircraft on deck takeoff zone. *Aerospace Science and Technology*. 2015, vol. 45, pp. 60–66.

**Information about the authors:**

**I.A. Pribytkov**, Cand. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Energy-Efficient and Resource-Saving Industrial Technologies” (temp@misis.ru)

**S.I. Kondrashenko**, Assistant of the Chair “Energy-Efficient and Resource-Saving Industrial Technologies” (stas.misis@yandex.ru)

Received December 4, 2018

Revised February 5, 2019

Accepted February 7, 2019