



УДК 621.74:539  
DOI: 10.21122/1683-6065-2018-4-107-113

Поступила 05.11.2018  
Received 05.11.2018

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЫЛЕВЫХ ВЫБРОСОВ В ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРЕ ЦЕХА

*Т. В. МАТЮШИНЕЦ, Ю. В. ЯЦКЕВИЧ, Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: matushtv@bntu.by*

*А. Н. ЧИЧКО, Институт тепло- и массообмена НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь, ул. П. Бровки, 15. E-mail: chichko\_a\_n@mail.ru*

*На основе метода математического моделирования выполнены численные расчеты процесса формирования пылевых выбросов в цеху, содержащем оборудование. Показаны возможности получения расчетной информации о распределении скоростей, температур и пылевых выбросов в 3d-пространственной структуре. Рассчитана трехмерная динамика движения воздуха и пыли в условиях цеха, что можно использовать для разработки мероприятия по улучшению экологии цеха.*

**Ключевые слова.** Математическое моделирование, пыль, экология цеха.

**Для цитирования.** Матюшинец, Т. В. Математическое моделирование распределения пылевых выбросов в пространственной структуре цеха / Т. В. Матюшинец, Ю. В. Яцкевич, А. Н. Чичко // *Литье и металлургия*. 2018. № 4. С. 107–113. DOI: 10.21122/1683-6065-2018-4-107-113.

## MATHEMATICAL MODELING OF THE DISTRIBUTION OF DUST EMISSIONS IN THE SPATIAL STRUCTURE OF THE WORKSHOP

*T. V. MATYUSHINETS, Yu. V. JATSKEVICH, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave. E-mail: matushtv@bntu.by,*

*A. N. CHYCHKO, Institute of Heat and Mass Transfer of National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus, 15, P. Brovki str. E-mail: chichko\_a\_n@mail.ru*

*On the basis of mathematical modeling, numerical calculations of the process of forming dust emissions in the workshop containing equipment are performed. The possibilities of obtaining calculated information on the distribution of velocities, temperatures, and dust emissions in a 3d-spatial structure are shown. Calculated three-dimensional dynamics of air and dust in the conditions of the workshop, which can be used to develop activities to improve the ecology of the workshop.*

**Keywords.** Mathematical modeling, dust, ecology of the workshop.

**For citation.** Matyushinets T. V., Jatskevich Yu. V., Chychko A. N. Mathematical modeling of the distribution of dust emissions in the spatial structure of the workshop. *Foundry production and metallurgy*, 2018, no.4, pp. 107–113. DOI: 10.21122/1683-6065-2018-4-107-113.

### Введение

Известно, что технологии литейного и металлургического производств предполагают использование больших объемов транспортируемого и используемого сырья в виде сыпучих или кусковых материалов. Использование их в технологической цепочке сопровождается интенсивным выделением разнородной пыли, которая служит основной причиной заболеваний дыхательных путей персонала, обслуживающего оборудование. Причем профессиональные заболевания под действием пыли относятся к числу наиболее тяжелых и распространенных во всем мире. Основными пылевыми профессиональными заболеваниями являются пневмокониозы, хронический бронхит и заболевания верхних дыхательных путей. Эффективный метод борьбы с такого рода заболеваниями – применение технических средств очистки воздуха в помещении цеха. Основным способом защиты работающего персонала от воздействия пыли на организм является метод аспирации, позволяющий существенно снизить уровень загрязнения промышленного цеха. При этом важнейшим вопросом остается оптимальный выбор распределения аспира-

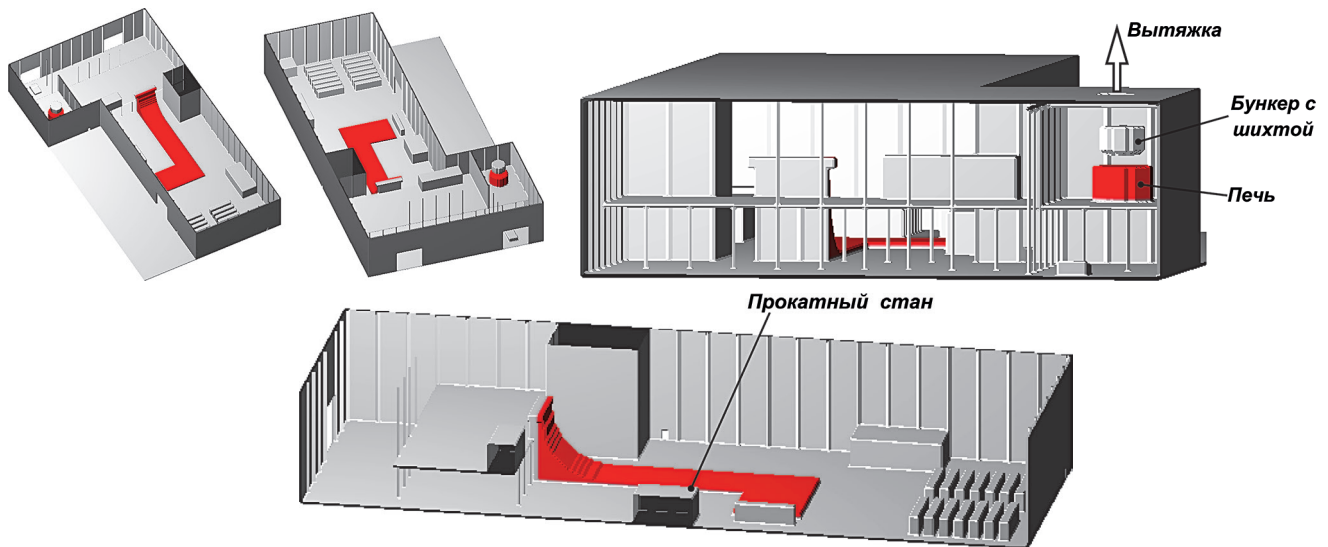


Рис. 1. Исходная 3d-модель, использованная для моделирования эволюции распределения пылевых выбросов в цеху

ционного оборудования в реально функционирующем цеху, включающим систему внутренних помещений цеха, решетки вентиляции, промышленное оборудование.

Цель настоящей работы – моделирование распределения пылевых выбросов в условиях промышленного цеха, заполненного различным оборудованием.

Настоящая работа является развитием и продолжением работ [1–5] в области разработки компьютерных технологий для решения задач литейного и металлургического производств, выполненных по заданиям Государственной научной прикладной программы «Металлургия» НАН Республики Беларусь.

### Общая постановка задачи и исходные данные

В качестве исходных данных была выбрана пространственная 3d-структура, имитирующая распределение в цеху промышленного оборудования (рис. 1).

Исходная 3d-модель была построена в системе SolidWorks. Как видно из рисунка, моделируемое пространство неоднородно и включает характерную для металлургического цеха двухэтажную компоновку здания с системой поддерживающих и несущих колонн, плавильный участок, расположенный на втором этаже цеха с присущим для него технологическим оборудованием, зону управления, многоручьевую установку для непрерывного получения заготовок, участки охлаждения слитков, складирования готовой продукции, вспомогательные помещения цеха. Моделируемое пространство цеха являлось параллелепипедом размером 145×80×25 м и было разбито на сеточные элементы размером 50×50×50 см. Таким образом, в расчетах участвовало 2 320 000 элементов. Для расчетов использовали строительные конструкции с заданными теплопроводностью ( $\lambda = 0,84$  Вт/(м·°C)), удельной теплоемкостью ( $c = 1046$  Дж/(кг·°C)), плотностью ( $\rho = 1800$  кг/м<sup>3</sup>). Размер частиц, генерирующих пылевые выбросы в данной модели, был принят одинаковым.

При проведении моделирования были выбраны два источника пылевых выбросов (рис. 2). Один источник пыли находился на прокатном стане и являлся постоянным (концентрация – 30 ед./см<sup>3</sup>). Другой источник был переменным (концентрация – 100 ед./см<sup>3</sup> с 10-й по 20-ю секунду модельного времени) и находился вблизи печи и был связан с загрузкой шихтовых материалов.

Начальные условия были приняты следующими: начальная температура воздуха в помещении – 20 °C; температура наружного воздуха – 0 °C; температура печи и прокатного стана (постоянная) – 300 °C; давление вытяжки – –10 кПа; толщина стен – 50 см. Использованы теплофизические характеристики воздуха: удельная теплоемкость ( $c = 1006$  Дж/(кг·°C)); теплопроводность ( $\lambda = 0,0257$  Вт/(м·°C)); плотность ( $\rho = 1,19$  кг/м<sup>3</sup>).

В качестве модели для расчета пылевых выбросов была использована система уравнений, включающая уравнение Навье–Стокса; уравнение неразрывности; уравнение Менделеева–Клайперона; уравнение теплопроводности, которые были дополнены уравнением для расчета концентрации пылевых выбросов. Использовали методы, приведенные в [1–5]. В математической модели использовали:

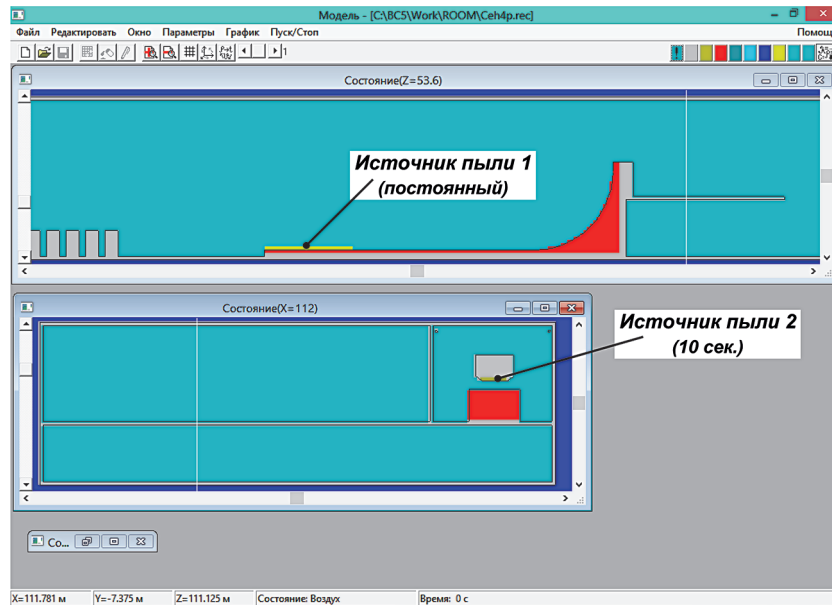


Рис. 2. Расположение источников пыли в 3d-структуре цеха с указанием источников пыли. Источник пыли 1 – постоянный с плотностью 30 частиц/см<sup>3</sup>. Источник пыли 2 – переменный (функционирует с частотой 10–20 с модельного времени) с плотностью 100 частиц/см<sup>3</sup>

- уравнение Навье-Стокса для определения распределения скоростей:

$$\begin{cases} \frac{\partial V_x}{\partial \tau} + V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_x}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_x}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\eta}{\rho} \left( \frac{\partial^2 V_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial z^2} \right), \\ \frac{\partial V_y}{\partial \tau} + V_x \frac{\partial V_y}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_y}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_y}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\eta}{\rho} \left( \frac{\partial^2 V_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_y}{\partial z^2} \right) - g, \\ \frac{\partial V_z}{\partial \tau} + V_x \frac{\partial V_z}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_z}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\eta}{\rho} \left( \frac{\partial^2 V_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial z^2} \right); \end{cases} \quad (1)$$

- уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \left( \frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) \rho = 0; \quad (2)$$

- уравнение Менделеева–Клайперона:

$$P = \frac{\rho}{M} RT; \quad (3)$$

- уравнение теплопроводности:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} + V_x \frac{\partial T}{\partial x} + V_y \frac{\partial T}{\partial y} + V_z \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{1}{c(T)\rho} \left( \frac{\partial \left( \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right)}{\partial x} + \frac{\partial \left( \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right)}{\partial y} + \frac{\partial \left( \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right)}{\partial z} \right); \quad (4)$$

- уравнение изменения концентрации пыли:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} + V_x \frac{\partial C}{\partial x} + (V_y + V_c) \frac{\partial C}{\partial y} + V_z \frac{\partial C}{\partial z} = F_c, \quad (5)$$

где  $\tau$  – время;  $x, y, z$  – декартовы координаты (ось  $Y$  направлена вертикально);  $V_x, V_y, V_z$  – проекции скорости воздуха на координатные оси  $X, Y, Z$  соответственно;  $P(x, y, z, \tau)$  – давление воздуха в точке  $x, y, z, \tau$ ;  $\rho(x, y, z, \tau)$  – плотность материала в точке  $x, y, z, \tau$ ;  $C(x, y, z, \tau)$  – распределение концентрации пылевых выбросов;  $V_c$  – параметр скорости оседания пылевых выбросов (0,04 м/с);  $F_c(x, y, z, \tau)$  – мощность ис-

точника пыли в заданной точке пространства;  $T(x, y, z, \tau)$  – температура в точке  $x, y, z, \tau$ ;  $\eta$  – динамическая вязкость;  $g$  – ускорение свободного падения;  $\lambda(T)$  – коэффициент теплопроводности материала;  $c(T)$  – удельная теплоемкость материала.

### Результаты численного моделирования

На рис. 3 представлено рассчитанное распределение скоростей воздуха в сечениях пространства вблизи печного оборудования. Как видно из рисунка, скорости воздуха в отдельных областях могут достигать 8 м/с. Распределение скорости носит сложный характер, что вызвано существованием в данном случае искусственных источников пыли. Значения скорости в большей части пространства незначительно превышают 1 м/с на момент времени моделирования  $\tau = 40$  с.

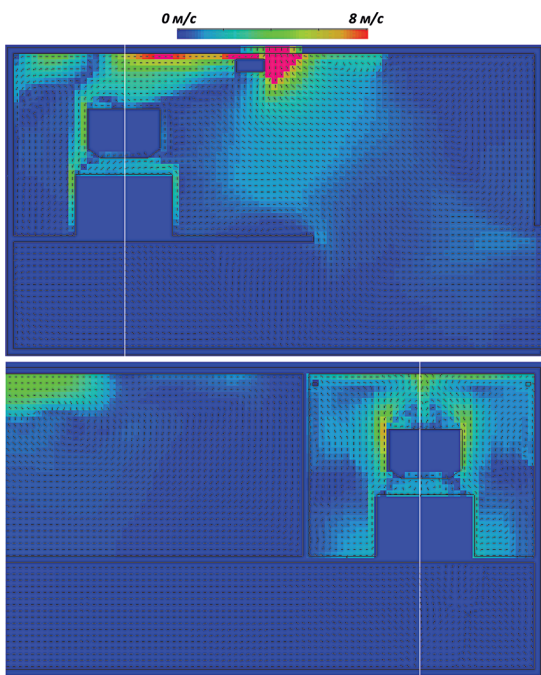


Рис. 3. Распределение скоростей воздуха в основных сечениях области печного оборудования для момента времени моделирования  $\tau = 40$  с

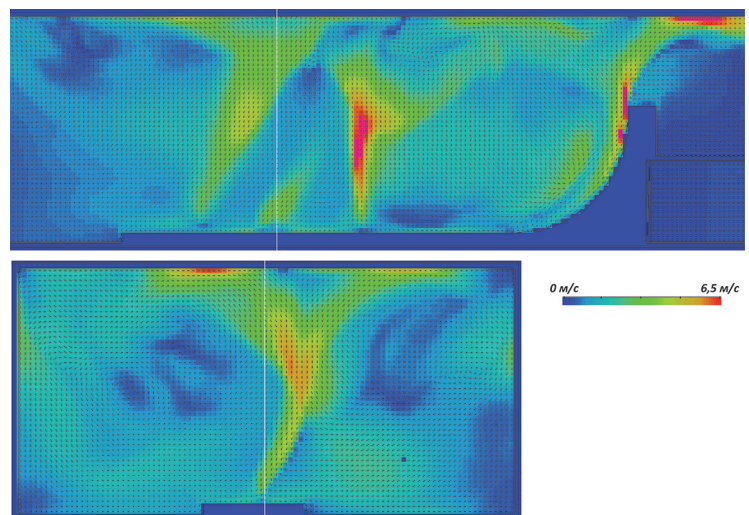


Рис. 4. Распределение скоростей воздуха в области прокатного стана в момент времени  $\tau = 40$  с

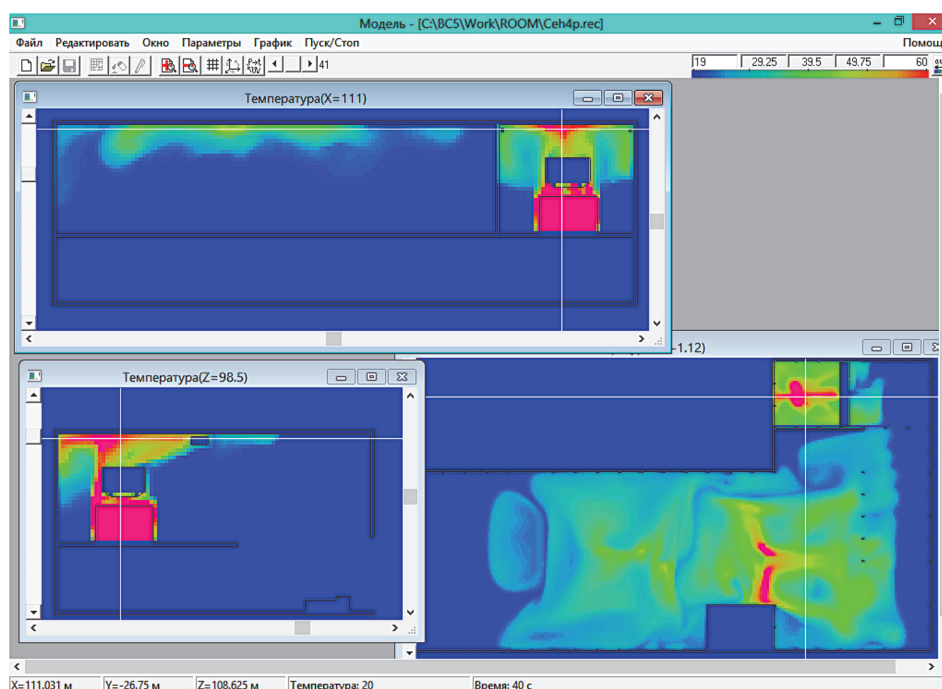


Рис. 5. Распределение температур в различных сечениях печного пространства на момент времени  $\tau = 40$  с



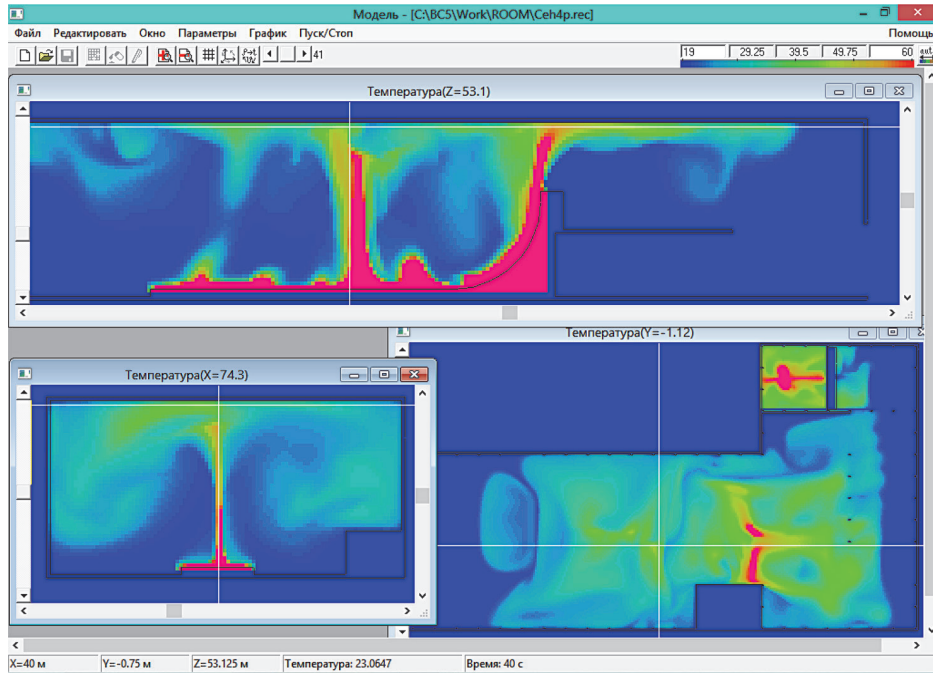


Рис. 6. Распределение температур в различных сечениях пространства прокатного стана на момент времени  $\tau = 40$  с

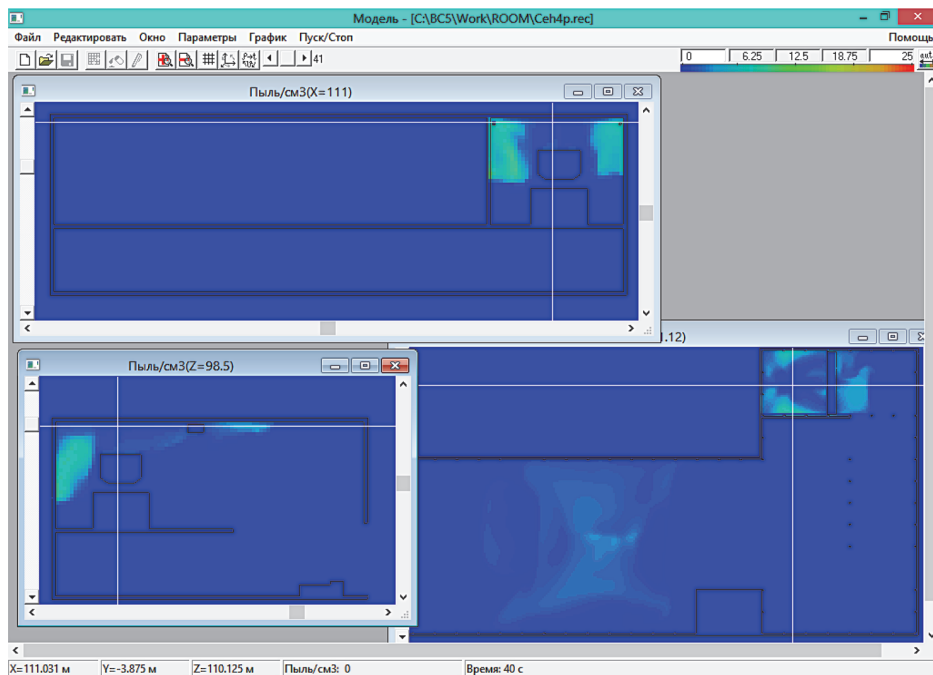


Рис. 7. Распределение пыли в различных сечениях печного пространства на момент времени  $\tau = 40$  с

На рис. 4 показано рассчитанное распределение скоростей воздуха в сечениях пространства вблизи прокатного оборудования. Как видно из рисунка, вблизи прокатного стана образуются циркуляционные потоки воздуха, которые генерируют сложную конвекционную картину по всему моделируемому пространству. В протяженных областях моделируемого пространства скорости воздуха могут достигать 3 м/с, на некоторых участках – 6,5 м/с.

На рис. 5, 6 показаны распределения температуры в различных сечениях печного пространства и прокатного стана. Как видно из рисунков, в некоторых точках выделенных участков температура достигает значения 60 °С. На рис. 7, 8 показаны распределения пылевых выбросов для пространства вблизи печного оборудования и прокатного стана. Как видно из рисунков, пыль распределяется в пространстве неоднородно и не повторяет распределение скоростей и температур.

Таким образом, из рисунков видно, что используя 3d-моделирование, можно получать огромное количество информации об эволюции пылевых выбросов в условиях работающего оборудования цеха.

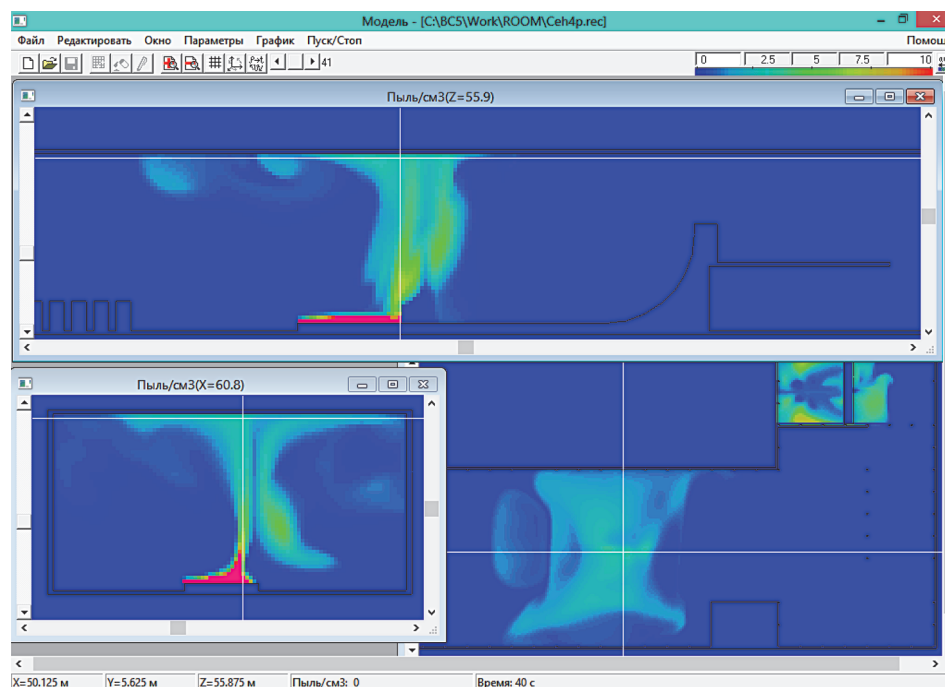


Рис. 8. Распределение пыли в различных сечениях пространства прокатного стана на момент времени  $\tau = 40$  с

### Выводы

Результаты численного моделирования показали, что с помощью клеточно-автоматной модели могут быть определены участки пространственного распределения пылевых выбросов и загрязнения в производственном помещении цеха. Во-первых, изменяя расположение вентиляционных отверстий и нагнетателей воздуха, можно изменять распределение пылевых выбросов. Во-вторых, определяя места повышенной загрязненности в цеху, можно определять места для установки аспирационного оборудования для очистки воздуха, что способствует созданию комфортных условий для работы персонала цеха. В дальнейшем планируется усовершенствовать модель и использовать ее для проведения детальных исследований возможного загрязнения от пылевых выделений конкретных помещений на производственных предприятиях Республики Беларусь.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Чичко А. Н. Автоматизация разработки технологических процессов литейного производства на основе КС «ПроЛит-1с» под суперкомпьютер СКИФ / А. Н. Чичко, С. Г. Лихоузов, В. Ф. Соболев, О. А. Сачек, О. И. Чичко // Автоматический контроль и автоматизация производственных процессов: материалы Междунар. науч. техн. конф. Минск, 28–29 окт. 2009 г. Минск, 2009. С. 252–254.
2. Чичко А. Н. Использование мультипроцессорной вычислительной системы СКИФ для решения некоторых задач металлургического производства / А. Н. Чичко, Д. М. Кукуй, С. Г. Лихоузов и др. // Информационные технологии программы союзного государства «Триада»: основные результаты и перспективы: сб. науч. тр. Минск, 2010. С. 159168.
3. Чичко А. Н. Математическое моделирование усадочных процессов стали на основе уравнений Навье-Стокса и Фурье-Кирхгофа / А. Н. Чичко, С. Г. Лихоузов, В. Ф. Соболев и др. // Литье и металлургия. 2013. № 1. С. 70–78.
4. Чичко А. Н. Компьютерное моделирование пространственного распределения плотности кристаллизующейся стали в системе «отливка-прибыль» / А. Н. Чичко, С. Г. Лихоузов, В. Ф. Соболев, О. А. Сачек, Т. В. Матюшинец, О. И. Чичко // Литье и металлургия. 2013. № 2. С. 46–55.
5. Лихоузов С. Г. О путях системного анализа движения металла в литниковых системах на основе численных решений уравнений Навье-Стокса / С. Г. Лихоузов, А. Н. Чичко, В. Ф. Соболев, О. А. Сачек, Т. В. Матюшинец и др. // Литье и металлургия. 2014. № 1. С. 43–47.

### REFERENCES

1. Chichko A. N., Lihouзов S. G., Sobolev V. F., Sachek O. A., Chichko O. I. Avtomatizacija razrabotki tehnologicheskikh processov litejnogo proizvodstva na osnove KS «ProLit-1s» pod superkomp'yuter SKIF [Automation of works on creation of foundry technologies with help CS «ProLit-1s» under the supercomputer «SKIF»]. *Avtomaticheskij kontrol' i avtomatizacija proizvodstvennyh processov: materialy Mezhdunar. nauch. tehn. konf. = Automatic control and automation of production processes: materials International scientific-technical conference*. Minsk, 28–29 okt. 2009 g. Minsk, 2009. pp. 252–254.
2. Chichko A. N., Kukuј D. M., Lihouзов S. G., Sobolev V. F., Jatskevich Ju. V., Chichko O. I., Sachek O. A., Demin A. V. Ispol'zovanie mul'tiprocessornoj vychislitel'noy sistemy SKIF dlya resheniya nekotoryh zadach metallurgicheskogo proizvodstva [Using

multiprocessor computer SKIF to solve some tasks of metallurgical production]. *Informacionnye tehnologii programmy sojznogo gosudarstva «Triada»: osnovnye rezul'taty i perspektivy = Information technology of the program of the Union State of «Triad»: the main results and prospects*. Collection of scientific papers. Minsk, 2010, pp. 159168.

3. **Chichko A. N., Lihousov S. G., Sobolev V. F., Sachek O. A., Matyushinets T. V., Chichko O. I.** Matematicheskoe modelirovanie usadochnyh processov stali na osnove uravneniy Nav'e-Stoksa i Fur'e-Kirhgofa [Mathematical modeling of shrink processes steel of the Navier-Stokes and Fourier-Kirchhoff equations]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2013, no. 1, pp. 70–78.

4. **Chichko A. N., Lihousov S. G., Sobolev V. F., Sachek O. A., Matyushinets T. V., Chichko O. I.** Komp'yuternoe modelirovanie prostranstvennogo raspredeleniya plotnosti kristallizuyushheysya stali v sisteme «otlivka-pribyl'» [Computer modeling of the spatial distribution of the crystallizing steel density in the system «casting-discard»]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2013, no. 2, pp. 46–55.

5. **Lihousov S. G., Chichko A. N., Sobolev V. F., Sachek O. A., Matyushinets T. V., Chichko O. I., Jatskevich Ju. V.** O putyah sistemnogo analiza dvizheniya metalla v litnikovyh sistemah na osnove chislennyh resheniya uravneniy uravneniya Nav'e-Stoksa [About the ways of the system analysis of metal movement in gating systems based on the numerical solutions of Navier-Stokes equations]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2014, no. 1, pp. 43–47.