УДК 533: 697.986: 502.3

© В. М. Уляшева, д-р техн. наук, профессор
© А. Ю. Мартыанова, канд. техн. наук, доцент
© А. В. Толстик, магистрант
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет)
E-mail: ulyashevavm@mail.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2019-16-6-257-261

© V. M. Ulyasheva, Dr Sci. Tech., Professor
© A. Ya. Martyanova, PhD in Sci. Tech., Associate Professor
© A. V. Tolstik, undergraduate
(Saint Petersburg State University of Architecture
and Civil Engineering)
E-mail: ulyashevavm@mail.ru

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛОМАССОБМЕНА ПРИ СМЕШИВАНИИ ПОТОКОВ В АСПИРАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ

NUMERICAL STUDY OF HEAT AND MASS TRANSFER PROCESS DURING MIXING FLOWS IN THE ASPIRATION SYSTEM

Представлены результаты численного моделирования тепломассообменных процессов при смешивании высокотемпературного газового и низкотемпературного пылевоздушного потоков. Получены поля распределения параметров течения после смешивания для обеспечения эффективного функционирования аспирационной системы.

Ключевые слова: нерудные материалы, известняковая мука, аспирационная система, численное моделирование.

The article presents the results of numerical modeling investigation of the heat and mass transfer processes during mixing of high-temperature gas and low-temperature dust-air flows. There have been obtained distribution fields of flow parameters after mixing to ensure the effective functioning of the aspiration system.

Keywords: non-metallic materials, lime dust, aspiration system, numerical simulation.

Анализу исследований процессов аэродинамики и тепломассообмена в вентиляционных системах, в том числе аспирационных, посвящено значительное количество работ, в частности [1–15]. Многочисленные результаты получены как с использованием лабораторных и натурных исследований в отдельных элементах систем, так и математическими методами [3–5, 8, 9, 13, 14].

Известно [1, 6, 7, 10–12, 14], что при производстве строительных материалов, связанном с дроблением, сортировкой, обжигом и транспортированием, выделяется значительное количество пыли, для удаления которой предусматриваются аспирационные системы преимущественно с технологическими отсосами. Для очистки воздуха и утилизации отходов применяются обычно сухие пылеуловители (циклоны), устанавливаемые открыто на территории производственного предприятия. Учитывая высокую естественную влажность сырья особенно при обработке, например, нерудных материалов, и низкую температуру воздуха, в холодный период

года возможно налипание пыли на внутреннюю поверхность элементов аспирационных систем и циклонов, что снижает эффективность очистки и создает проблемы при функционировании вышеуказанных систем.

В работе [14] описан метод повышения температуры перемещаемой пылевоздушной среды за счет подмешивания отходящих дымовых газов из технологических печей при производстве известняковой муки. В результате численного моделирования с использованием современного гидродинамического комплекса Star-CCM+ получены поля распределения скорости и температуры при смешивании горячего газового и холодного воздушного потоков. Выбранный рациональный вариант узла смешивания (рис. 1) положен в основу данной работы. В качестве рациональной схемы выбрана схема с углом наклона горячего потока 45°, причем в конце участка смешивания предусмотрено сужение основного воздуховода для соединения с входным патрубком циклона.

Численное моделирование турбулентных потоков при наличии источников теплоты и примеси базируется на численном решении системы дифференциальных уравнений неразрывности, сохранения импульса Навье–Стокса, энергии и примесей:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{p}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{p} \bar{u}_i + \bar{p}' u_i') &= S_m; \\ \rho \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) &= - \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_j} + \mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial \tau'_{ij}}{\partial x_j} + S_i; \\ \frac{\partial (\bar{p} \bar{a})}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{p} \bar{a} u_i)}{\partial x_j} &= - \frac{\partial (\rho u_i' a')}{\partial x_j} + \bar{J}_a, \end{aligned} \quad (1)$$

где t — время; ρ — плотность; μ — коэффициент динамической вязкости; $\bar{u}_j$ — компоненты вектора осредненной скорости по осям координат; τ_{ij} — турбулентные напряжения (дополнительные напряжения Рейнольдса); u_i', u_j', T', C' — локальные пульсации скорости, температуры и примеси потока; $\bar{a}$ — осредненные значения удельной плотности скалярной величины; S_m, S_i — интенсивность источников массы и импульса; $\bar{J}_a$ — интенсивность источников примеси.

Программный комплекс STAR-CCM+ позволяет моделировать различные аэродинамические процессы и химические реакции многокомпонентных жидкостей или газов. Для нахождения полей распределения концентраций пыли и выявления взаимного влияния параметров (температуры, скорости и концентрации) в расчете дополнительно использована модель многокомпонентного газа, при этом в качестве примеси в системе (1) принята массовая доля пыли в смеси. В качестве граничных условий дополнительно заданы:

- плотность воздуха при $t_n = -31^\circ\text{C}$,
 $\rho = 1,283 \text{ кг/м}^3$;
- плотность воздуха при $t_r = +120^\circ\text{C}$,
 $\rho = 0,898 \text{ кг/м}^3$;

• коэффициент теплоотдачи в воздуховоде $\alpha = 23,22 \text{ Вт/м}^2\text{K}$;

- динамическая вязкость пыли $\mu_n = 1,5 \text{ Па} \cdot \text{с}$;
- расход пыли $G_n = 1,077 \text{ кг/с}$;
- плотность пыли $\rho_n = 1400 \text{ кг/м}^3$;
- теплоемкость пыли $C_0 = 0,88 \text{ кДж/кг} \cdot \text{K}$;
- молекулярная масса пыли 100.

Построение геометрической модели исследуемого процесса выполнено на основе принципов трехмерного проектирования в системе КОМПАС-3D, описание процесса представлено в работе [14]. В расчете принята к-ε модель турбулентности.

Для многокомпонентной газовой смеси при ее моделировании по отдельным компонентам состав смеси существенно влияет на ее объемные свойства в зависимости от массы компонентов. Таким образом, численное исследование распределения параметров при смешивании потоков с разными температурами и концентрациями основано на известных положениях теории тепломассообмена. Ниже приведены основные зависимости. Так, для нахождения коэффициента диффузии каждого компонента применяется формула¹

$$D_{i,m} = \frac{1-x_i}{\sum \frac{x_j}{D_{i,j}}}, \quad (2)$$

где x_i, x_j — мольные доли компонента, соответственно; $D_{i,m}$ — молекулярная диффузия компонента в смеси; $D_{i,j}$ — взаимный коэффициент диффузии компонентов, определяемый согласно кинетической теории газов.

Для определения молекулярной диффузии используется число Шмидта:

$$Sc_i = \frac{\nu}{D_{i,m}}, \quad (3)$$

где ν — кинематическая вязкость.

¹ Star CCM+. User Guide Version 13.02.011, Siemens, 2017. P. 3395–3410.

Рис. 1. Результаты численного моделирования для рациональной схемы узла смешивания потоков по данным работы [14]

Рис. 2. Распределение температуры в продольном (а) и поперечных (б) сечениях узла смешивания потоков

Рис. 3. Распределение скорости в продольном (а) и поперечных (б) сечениях узла смешивания потоков

Учет взаимного влияния термодиффузии к диффузии выполнен на основе числа Льюиса:

$$Le = \frac{\gamma / \rho c_p}{D_m}, \quad (4)$$

где λ , ρ , c_p — коэффициент теплопроводности, плотность и теплоемкость смеси.

На рис. 2–4 приведены некоторые результаты распределения параметров в продольном и поперечных сечениях узла смешивания потоков.

На рис. 2 представлено распределение температуры многокомпонентной смеси в узле смешивания. При сравнении с данными рис. 1, полученными без учета примеси, имеет место идентичный характер распределения температуры. Однако наличие примеси (пыли) ухудшает показатель равномерности распределения температуры на входе в циклон. Аналогичная картина наблюдается и при анализе распределения скорости потока в сравнении с результатами работы [14]. Тем не менее, температура потока соответствует предельному значению, при котором на стенках узла смешивания не происходит осаждения пыли. Что касается распределения концентрации пыли, то степень равномерности распределения концентрации выше в конце узла смешивания, чем по другим параметрам.

Рис. 4. Распределение концентрации пыли в продольном (а) и поперечных (б) сечениях узла смешивания потоков

Выводы. На основании численного моделирования процесса смешивания высокотемпературного газового и низкотемпературного пылевоздушного потоков получены подробные характеристики тепломассообменных процессов при транспортировании многокомпонентной смеси. Доказана возможность использования выбранной схемы узла смешивания без существенного ухудшения равномерности распределения параметров на входе в циклон.

Библиографический список

1. Азаров В. Н., Боровков Д. П., Редван А. М. Application of Swirling Flows in Aspiration Systems. [Применение закрученных потоков в системах аспирации] // International Review of Mechanical Engineering (IREME). 2014. Vol. 8, № 4. С. 750–753.
2. Алиев Г. М.-А. Техника пылеулавливания и очистки промышленных газов. М.: Металлургия, 1986. 544 с.
3. Варсегова, Е. В., Посохин В. Н. О форме отрывных зон на входе в щелевой всасывающий патрубок. Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета, 2015. № 3 (33). С. 98–102.
4. Ватин Н. И., Гиргидов А. А., Стрелец К. И. Численное моделирование трехмерного поля скорости в циклоне // Инженерно-строительный журнал. 2011. № 5. С. 5–9.
5. Зиганшин А. М., Посохин В. Н., Бадькова Л. Н., Гимадиева Г. А. Численное моделирование течения в двумерном тройнике // Известия вузов. Строительство. 2015. № 5. С. 89–95.
6. Клячко Л. С., Одельский Э. Х., Хрусталева Б. М. Пневматический транспорт сыпучих материалов. Минск: Наука и техника, 1983. 216 с.
7. Коузов П. А., Мальгин А. Д., Скрябин Г. М. Очистка газов и воздуха от пыли в химической промышленности. СПб.: Химия, 1993. 320 с.
8. Логачев А. К. К вопросу о моделировании воздушного течения вблизи приточно-вытяжного устройства // Вестник гражданских инженеров. 2017. № 6. С. 188–193.
9. Логачев И. Н., Логачев К. И., Аверкова О. А., Азаров В. Н., Уваров В. А. Methods of Reducing the Power Requirements of Ventilation Systems: Part 4: Theoretical Prerequisites for the Creation of Dust Localizing Devices with Swirling Air Flows // Refractories and Industrial Ceramics. 2014. № 55 (4). Pp. 365–370.
10. Минко В. А., Логачев И. Н., Логачев К. И. Обеспыливающая вентиляция. М.: Теплотехник, 2009. 464 с.
11. Нейков О. Д., Логачев И. Н. Аспирация и обеспыливание воздуха при производстве порошков. М.: Металлургия, 1981. 192 с.
12. Пирумов А. И. Обеспыливание воздуха. 2-е изд. М.: Стройиздат, 1981. 296 с.
13. Семиненко А. С., Малахов Д. Ю., Попов Е. Н., Алифанова А. И. Учет влияния градиента давления в интегральной модели описания присоединенных струй // Современные наукоемкие технологии. 2013. № 8-1. С. 52–54.
14. Уляшева В. М., Гримитлин А. М., Черников Н. А. Повышение эффективности способов очистки вентиляционных выбросов на предприятиях строитель-

ной индустрии // Вода и экология: проблемы и решения. 2018. № 4. С. 92–98.

15. Шилиев М. И. Аэродинамика и тепломассообмен газодисперсных потоков. Томск, 2003. 272 с.

References

1. Azarov V. N., Borovkov D. P., Redvan A. M. Application of Swirling Flows in Aspiration Systems. *International Review of Mechanical Engineering (IREME)*, 2014, vol. 8, no. 4, pp. 750 –753.
2. Aliev G. M.-A. *Tekhnika pyleulavlivaniya i ochistki promyshlennykh gazov* [The technique of dust collection and purification of industrial gases]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1986, 544 p.
3. Varsegova E. V., Posokhin V. N. *O forme otryvnykh zon na vkhode v shchelevoy vsasyvayushchiy patrubok* [On the form of tear-off zones at the entrance to the crevice suction nozzle]. *Izvestiya Kazanskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Bulletin of Kazan State University of Architecture and Construction*, 2015, no. 3(33), pp. 98–102.
4. Vatin N. I., Girgidov A. A., Strelets K. I. *Chislennoe modelirovanie trekhmernogo polya skorosti v tsiklone* [Numerical modeling of three-dimensional velocity field in the cyclone]. *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal – Engineering and construction journal*, 2011, no. 5, pp. 5–9.
5. Ziganshin A. M., Posokhin V. N., Badykova L. N., Gimadiyeva G. A. *Chislennoe modelirovanie techeniya v dvumernom troynike* [Numerical modeling of flow in a two-dimensional T- tube]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo – News of Higher Schools. Construction*, 2015, no. 5, pp. 89–95.
6. Klyachko L. S., Odel'skiy Eh. Kh., Khrustalev B. M. *Pnevmaticheskiy transport sypushikh materialov* [Pneumatic transport of bulk materials]. Moscow – Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1983, 216 p.
7. Kouzov, P.A., Mal'gin A. D., Skryabin G. M. *Ochistka gazov i vozdukha ot pyli v khimicheskoy promyshlennosti* [Purification of gases and air from dust in the chemical industry]. St. Petersburg, Khimiya Publ., 1993, 320 p.
8. Logachev A. K. *K voprosu o modelirovanii vozdušnogo techeniya vblizi pritochno-vytyazhnogo ustroystva* [To the issue of modeling the air flow near the air intake and extraction unit]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2017, no. 6 (65), pp. 188–193.
9. Logachev I. N., et al. Methods of Reducing the Power Requirements of Ventilation Systems: Part 4: Theoretical Prerequisites for the Creation of Dust Localizing Devices with Swirling Air Flows. *Refractories and Industrial Ceramics*, 2014, no. 55 (4), pp. 365–370.
10. Minko, V. A., Logachev I. N., Logachev K. I. *Obespylivayushchaya ventilyatsiya* [Dedusting ventilation]. Moscow, Teplotekhnika Publ., 2009, 464 p.

11. Neikov O. D., Logachev I. N. *Aspiratsiya i obespylivanie vozdukha pri proizvodstve poroshkov* [Aspiration and dedusting of the air at production of powders]. Moscow: Metallurgy Publ., 1981, 192 p.
12. Pirumov A. I. *Obespylivanie vozdukha* [Dedusting of the air]. 2nd ed. Moscow, Stroizdat Publ., 1981, 296 p.
13. Seminenko A. S., Malakhov D. Yu., Popov E. N., Alifanova A. I. *Uchet vliyaniya gradienta davleniya v integral'noy modeli opisaniya prisoedinennykh struy* [Accounting of pressure gradient influence in integral model of attached jets description]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii – Modern science-intensive technologies*, 2013, no. 8(1), pp. 52–54.
14. Ulyasheva V. M., Grititlin A.M., Chernikov N. A. *Improving the efficiency of methods for cleaning ventilation emissions at the enterprises of the construction industry* [Improving the efficiency of methods for purifying ventilation emissions at the enterprises of the construction industry]. *Water and ecology: problems and solutions*, 2018, no. 4, pp. 92–98.
15. Shilyaev M. I. *Aerodynamics and heat and mass transfer of gas-dispersed flows* [Aerodynamics and heat and mass transfer of gas-dispersed flows]. Tomsk, Tomskiy gosudarstvennyy arkhitekturno-stroitel'nyy universitet Publ., 2003, 272 p.