



УДК 532.5
ББК 22.25

ФОРМИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМОВ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ АСПИРАЦИОННЫХ ТЕЧЕНИЙ: НЕУСТОЙЧИВОСТЬ КЕЛЬВИНА – ГЕЛЬМГОЛЬЦА ¹

А.В. Хоперсков, В.Н. Азаров, С.А. Хоперсков, Е.А. Коротков, А.Г. Жумалиев

В работе представлены результаты численного моделирования сложных аспирационных течений в приложении к очистке воздуха в промышленном цеху при производстве металла. Продемонстрирована возможность формирования условий для развития неустойчивости Кельвина – Гельмгольца, которая на существенно нелинейной стадии приводит к нестационарному режиму течения воздуха.

Ключевые слова: численное моделирование, гидродинамика, аспирационные системы, теплоперенос, неустойчивости.

Введение

Проблема очистки воздуха при производстве металла представляется насущной, и для ее решения рассматриваются различные подходы [4; 9; 11]. Для определения эффективности аспирационной системы, перед изучением динамики примесей, необходимо построить поле скоростей воздуха [3; 10]. В то же время методы анализа аспирационных течений, основанные на газодинамическом подходе, только начинают развиваться [1; 7]. Традиционными являются подходы, основанные на аппарате потенциальных течений [7; 13].

Одним из возможных решений является использование специальных вытяжных устройств, установленных в непосредственной близости от печи (см. рис. 1, устройство *A*). Для повышения эффективности очистки можно установить дополнительный вентилятор (устройство *B* на рисунке 1). Такая конфигурация способна существенно отклонять горячий и загрязненный воздух, поднимающийся от печки, увеличивая долю газа, который засасывается устройством *B*.

Особая сложность моделирования такого рода течений связана с наличием многосвязных двумерных и трехмерных областей с разрезами внутри расчетной зоны. В данной работе, используя прямые методы численного газодинамического нелинейного моделирования, изучены некоторые особенности поля скоростей в воздухе внутри металлургического цеха, где установлена аспирационная система, изображенная на рисунке 1.

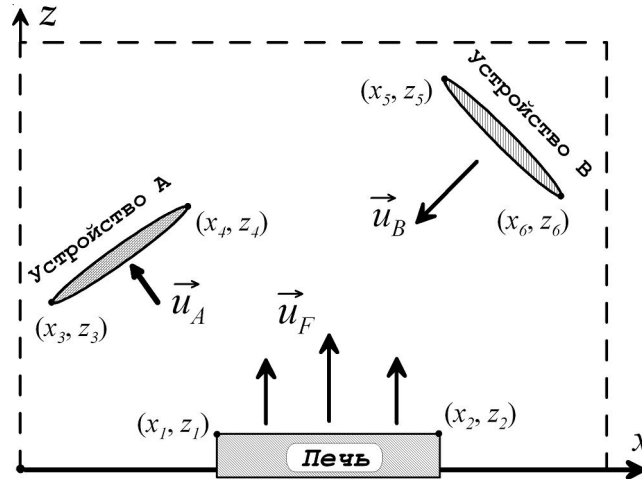


Рис. 1. Схема аспирационной системы:

горячий воздух поднимается от «Печи». «Устройство А» (вентиляционный зонт) вытягивает газ. «Устройство В» (аэрактор) создает дополнительный поток воздуха, повышая эффективность очистки воздуха

Газодинамическая модель воздушных потоков

Будем исходить из нестационарной гидродинамической двумерной модели, описываемой системой уравнений:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \cdot \vec{u}) = Q(x, z), \quad (1)$$

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \cdot \vec{u} = \frac{\nabla p}{\rho} + Q_u, \quad (2)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla p + \gamma \cdot p \nabla \vec{u} = Q_E, \quad (3)$$

где ρ – плотность воздуха;
 p – давление;
 $\vec{u} = \{u_x, u_z\}$ – вектор скорости;
 $\gamma = 1,42$ – показатель адиабаты;
 ∇ – дифференциальный оператор набла;
 Q, Q_u, Q_E – функции источников.

В основе численной модели лежит алгоритм TVD в декартовой системе координат [5], который продемонстрировал свою эффективность для широкого круга задач [2]. Внутри расчетной области задаем положения аспирационных устройств А, В и печи набором координат $\{x_j, z_j\}$, которые определяют отрезки L_F, L_A, L_B , вектора $\vec{u}_F(x, z), \vec{u}_A(x, z), \vec{u}_B(x, z)$ вдоль линий $L_{FAB}(x, z)$ (см. рис. 1). В качестве начального состояния выбираем момент одновременного включения потока воздуха от печи $\vec{u}_F(x, z)$ и устройств А и В.

Результаты численного моделирования

На рисунке 2 показана типичная структура аспирационного течения по результатам численных расчетов. К числу свободных параметров относятся: $\{x_j, z_j\}$, профили скорости $\vec{u}_F(x, z), \vec{u}_A(x, z), \vec{u}_B(x, z)$. В зависимости от параметров системы возможны два режима течения, когда воздух из устройства В затягивается устройством А, и когда этого не происходит.

В расчетной области имеется два четко выделенных потока: 1) устройство А непосредственно перехватывает воздух от печи, что формирует первую струю; 2) второй поток генерируется устройством В. Последний взаимодействует с первым, сильно отклоняя его вправо (см. рис. 1 и 2).

Имеется переходная зона между этими двумя потоками, в которой тангенциальная компонента скорости воздуха сильно меняет свое значение. Типичная ширина зоны составляет 0,5–1,0 м. Именно из-за неустойчивости Кельвина – Гельмгольца, несмотря на стационарный режим работы Печи и Устройств *A, B*, расчеты демонстрируют отсутствие стационарной картины. В более реалистичной модели Печи, где поток не задается, а моделируется свободная конвекция, нестационарные процессы должны усиливаться. Этому будет способствовать переход от 2D-моделей к 3D.

Если устройство *B* не работает, то примерно только половина потока от печи засасывается в устройство *A* (рис. 2, *a*). При включении *B* ситуация качественно меняется, работа устройства способна обеспечить почти полный перехват воздуха от печи (рис. 2, *в, з*). Рисунок 2, *б* демонстрирует наличие вихревых структур в аспирационном течении.

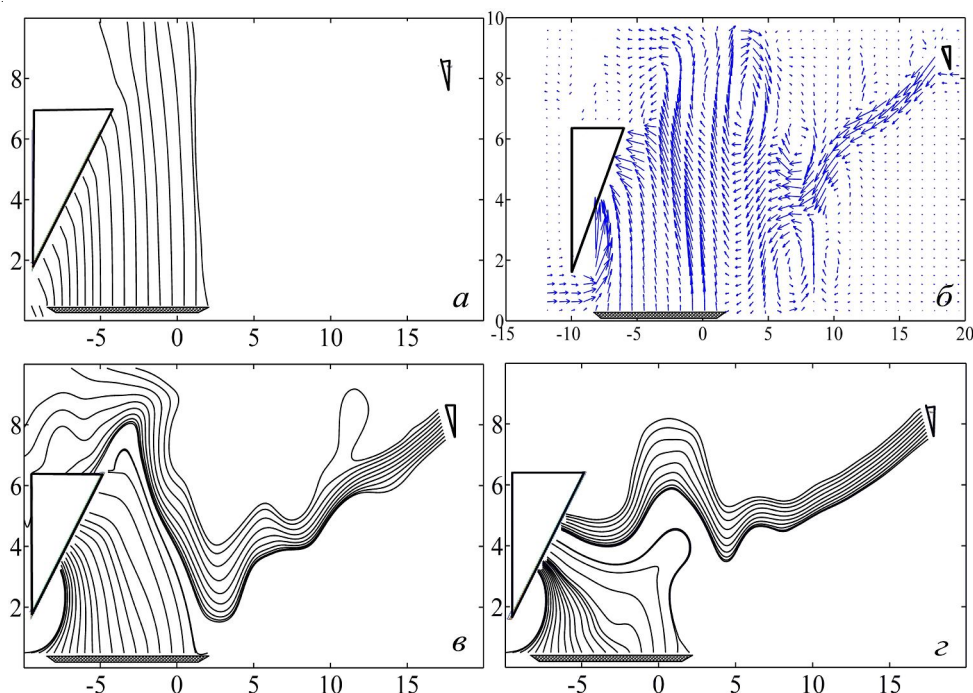


Рис. 2. Структура течения воздуха в различные моменты времени для аспирационной системы, изображенной на рисунке 1. Показаны линии тока (*a, в, з*) и поле скоростей (*б*). Расстояния указаны в метрах

В зоне перехода от потока *A* к потоку *B* запишем уравнения для малых возмущений давления \tilde{p} и смещения $\tilde{\xi}$ вдоль направления *r*

$$\frac{d\tilde{p}}{dr} = (\omega - kV(r))^2 \rho_0 \tilde{\xi}, \quad \frac{d\tilde{\xi}}{dr} = \frac{k_i^2}{\rho_0 (\omega - kV(r))^2} \tilde{p}, \quad (4)$$

где *r* – координата, перпендикулярная переходной зоне («тангенциальному разрыву», ТР);
 ω – собственная частота;
V(r) – профиль скорости в зоне ТР;
k – волновое число вдоль поверхности разрыва. Область тангенциального разрыва скорости является неустойчивой с инкрементом, который пропорционален скачку скорости $\text{Im}(\omega) = |V_1 - V_2| k$ [6]. Наличие в реальной системе конечной переходной зоны шириной ℓ уменьшает инкремент неустойчивости, но для типичных значений параметров рассматриваемой задачи при $k\ell \leq 1$ условия для неустойчивости сохраняются, поскольку по порядку величины имеем $\text{Im}(\omega) \approx k\Delta V(1 - k\ell)$. Возникновение гидродинамической неустойчивости и последующая турбулизация вещества способны существенно усложнять динамику примесей [8; 12].

Заключение

Сформулируем основные выводы:

1. Для расчета аспирационных течений предложен метод прямого гидродинамического моделирования на основе численного интегрирования полной системы уравнений газодинамики, показавший свою эффективность при проектировании аспирационных систем для задач очистки воздуха в промышленных помещениях.
2. Проведенные расчеты показывают, что использование дополнительных аэраторов может увеличить эффективность очистки воздуха от металлургической печи.
3. Месторасположение аспирационных устройств, их геометрия и мощность существенно влияют на долю очищаемого воздуха, что ставит задачу оптимизации параметров системы. Построенная модель ляжет в основу изучения динамики газовых примесей и аэрозолей для задач оптимизации при проектировании аспирационной системы.
4. Характерной особенностью моделируемого течения оказывается нестационарный характер поля скоростей воздуха даже без учета нестационарного конвективного потока горячего воздуха от печи. По-видимому, причина отмеченной нестационарности течения связана с нелинейной стадией развития неустойчивости Кельвина – Гельмгольца.

ПРИМЕЧАНИЕ

¹ Работа частично поддержана грантом РФФИ № 11-07-97025, ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (гос. контракт № 02.740.11.5198).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аверкова, О. А. К вопросу о моделировании пылегазовых потоков в аспирационном укрытии / О. А. Аверкова, В. Ю. Зоря, И. Н. Логачев, К. И. Логачев // Вычислительные методы и программирование: новые вычислительные технологии. – 2009. – Т. 10, № 1. – С. 371.
2. Еремин, М. А. Конечно-объемная схема интегрирования уравнений гидродинамики / М. А. Еремин, А. В. Хоперсков, С. А. Хоперсков // Изв. Волгогр. гос. техн. ун-та. – 2010. – Т. 6, № 8. – С. 24–27.
3. Информационно-компьютерный комплекс для моделирования динамики примесей от предприятий химической промышленности / А. А. Белослудцев, Д. В. Гусаров, М. А. Еремин, Н. М. Кузьмин, С. А. Хоперсков, С. С. Храпов // Вестн. Волгогр. гос. ун-та. Сер. 1, Мат. Физ. – 2009. – № 12. – С. 95.
4. Коротков, Е. А. Совершенствование систем обеспыливающей вентиляции от бункеров сыпучих и установок печь – ковш / Е. А. Коротков, А. В. Долгалев // Вестн. Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Серия «Строительство и архитектура». – 2009. – № 15. – С. 120–122.
5. Куликовский, А. Г. Математические вопросы численного решения гиперболических систем уравнений / А. Г. Куликовский, Н. В. Погорелов, А. Ю. Семенов. – М. : Физматлит, 2001. – 608 с.
6. Ландау, Л. Д. Гидродинамика / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – М. : Физматлит, 2003. – 736 с.
7. Логачев, И. Н. Аэродинамические основы аспирации / И. Н. Логачев, К. И. Логачев. – СПб. : Химиздат, 2005. – 659 с.
8. Логачев, К. И. Компьютерное моделирование пылегазовых потоков в пульсирующих аэродинамических полях / К. И. Логачев, А. И. Пузанок, В. Ю. Зоря // Вычислительные методы и программирование: новые вычислительные технологии. – 2006. – Т. 7, № 1. – С. 195–201.
9. Лозин, Г. А. Совершенствование структуры газоотводящей системы электросталеплавильного производства / Г. А. Лозин // Сталь. – 2008. – № 4. – С. 84–87.
10. Смирнов, Е. Д. Компьютерное моделирование распространения примесей / Е. Д. Смирнов, А. В. Хоперсков // Вестн. Волгогр. гос. ун-та. Сер. 1, Мат. Физ. – 1997. – № 2. – С. 159–163.
11. Фомичев, В. Т. Совершенствование систем вентиляции цехов анодной массы алюминиевых производств / В. Т. Фомичев, В. Н. Азаров, А. С. Лукьянсков // Вестн. Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Серия «Строительство и архитектура». – 2007. – № 7. – С. 164–169.
12. Храпов, С. С. Компьютерное моделирование экологических систем : монография / С. С. Храпов, А. В. Хоперсков, М. А. Еремин. – Волгоград : Изд-во ВолГУ, 2010. – 124 с.

13. Gil'fanov, A. K. Calculation of particle concentration in the problem of aerosol aspiration into a thin-walled tube / A. K. Gil'fanov, Sh. Kh. Zaripov, D. V. Maklakov // Fluid Dynam. – 2009. – V. 44, № 6. – P. 873–881.

**FORMATION OF TRANSIENT REGIMES IN THE SIMULATION
OF ASPIRATION FLOWS: KELVIN – HELMHOLTZ INSTABILITY**

S.A. Khoperskov, V.N. Azarov, S.A. Khoperskov, E.A. Korotkov, A.G. Zhumaliev

The results of numerical simulation of complex flows of aspiration in the metallurgical industrial workshop presented. The possibility of creating conditions for the development of Kelvin – Helmholtz instability demonstrated. Instability leads to the unsteady flow regime of air at a significantly non-linear stage.

Key words: numerical simulation, hydrodynamics, aspiration system, heat transfer, instabilities.