



УДК 532.5  
ББК 22.25

## ФОРМИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМОВ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ АСПИРАЦИОННЫХ ТЕЧЕНИЙ: НЕУСТОЙЧИВОСТЬ КЕЛЬВИНА – ГЕЛЬМГОЛЬЦА <sup>1</sup>

*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.

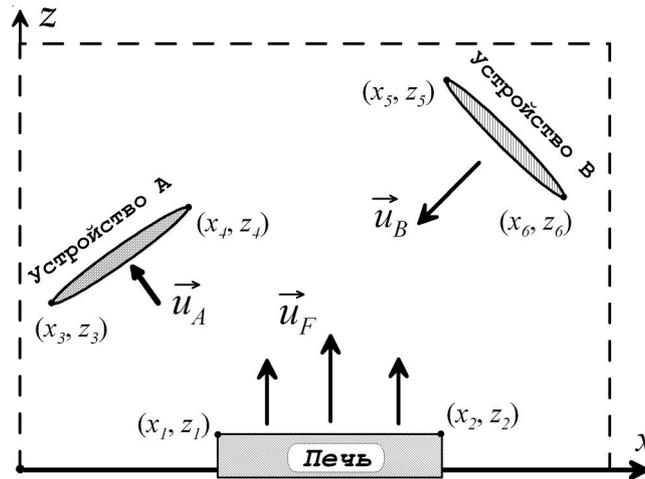


Рис. 1. Схема аспирационной системы:

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  $\rho$  – плотность воздуха;  
 $p$  – давление;  
 $\vec{u} = \{u_x, u_z\}$  – вектор скорости;  
 $\gamma = 1,42$  – показатель адиабаты;  
 $\nabla$  – 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.

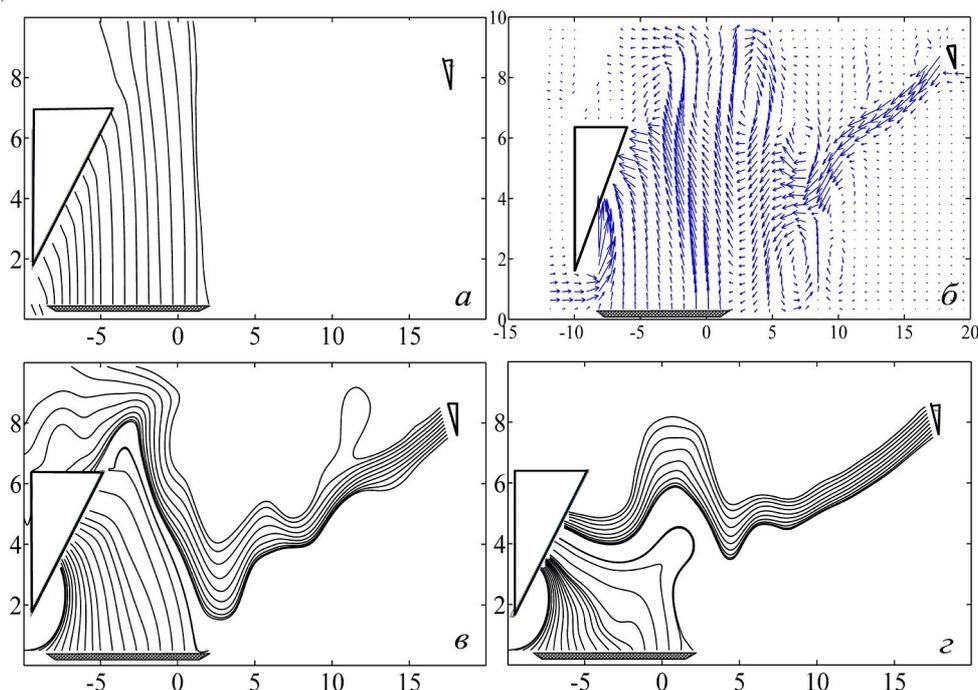


Рис. 2. Структура течения воздуха в различные моменты времени для аспирационной системы, изображенной на рисунке 1. Показаны линии тока (*a, в, з*) и поле скоростей (*б*). Расстояния указаны в метрах

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);  
 $\omega$  – 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  $\ell$  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

<sup>1</sup> 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.*