ТЕПЛОФИЗИКА

УДК 621.928.9(035)

**Ю.А. Алтухов, С.М. Кисляк, А.М. Аль Замили,
П.К. Сеначин, А.Р. Богомолов, П.В. Дадонов**

ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРОДИНАМИКИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ УЛАВЛИВАНИЯ ЛАБИРИНТНОГО ЗОЛОУЛОВИТЕЛЯ

Введение

По прогнозам министерства природных ресурсов РФ с 2030 г. первенство в топливно-энергетическом балансе в России займут уголь и атомная энергетика, что потребует конструктивного и технологического совершенствования золоочистного оборудования.

В котельной технике для сухой очистки газа от твердых частиц в основном используются центробежные и инерционные золоуловители.

Технические, экономические или технологические разработки, направленные на повышение эффективности таких золоуловителей, невозможны без изучения гидродинамических особенностей процесса осаждения частиц и их движения в несущем газовом потоке. Создание математической модели движения аэрозольной частицы в турбулентном потоке позволяет оценить эффективность золоулавливания и выявить влияющие на нее факторы.

В последнее время выполнено много экспериментальных и теоретических исследований [1-3] для разработки индустриальных установок, применяемых для очистки запыленных потоков. Одной из возможных конструкций золоуловителей является лабиринтный золоуловитель (ЛЗУ) с

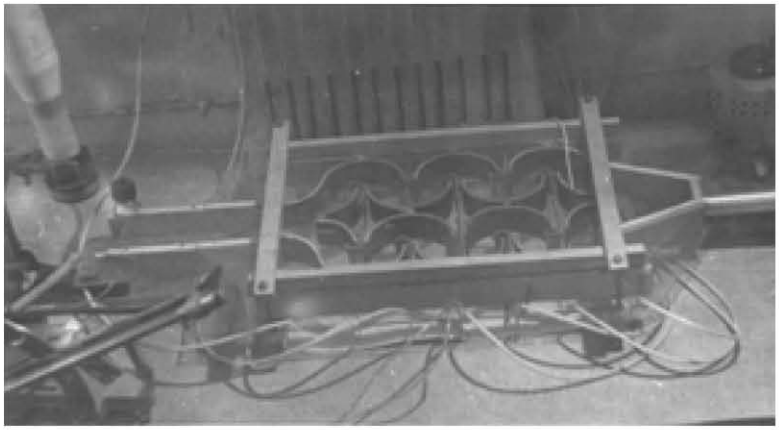

Рис. 1. Модель ЛЗУ (экспериментальное оборудование)

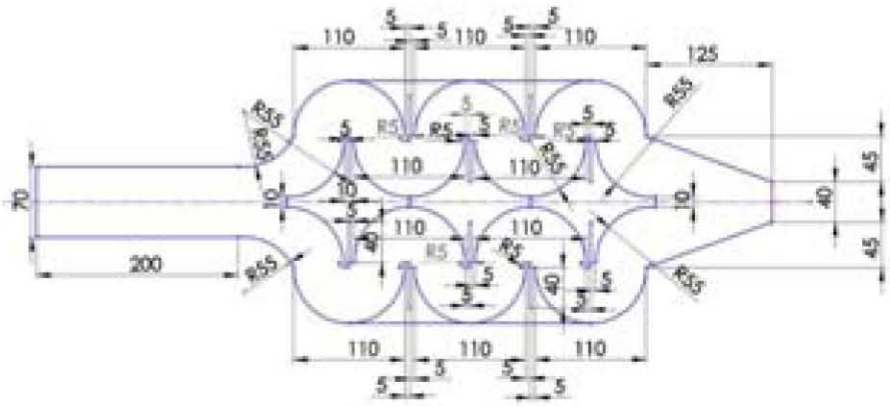

Рис. 2. Схема модели ЛЗУ

Таблица 1 Значения коэффициентов для RNG k-ε модели турбулентности

C_μ	σ_k	σ_ε	σ_h	σ_m	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	$C_{\varepsilon 3}$	$C_{\varepsilon 4}$	k	E	η_o	β
0,085	0,719	0,719	0,9	0,9	1,44	1,92	0 или 1*	0,387	0,4	9,0	4,38	0,012
* $C_{\varepsilon 3}$ = 1,42 при $P_B > 0$ и ноль иначе												

улавливающими карманами [4], обеспечивающими рост КПД улавливания в 1,1-1,4 раза (рис. 1).

Цель настоящего исследования - изучить аэродинамику запыленного потока через улавливающие карманы и определить эффективность в зависимости от геометрии каналов ЛЗУ для разных скоростей потока.

Описание экспериментальной установки

Модель лабиринтного золоуловителя (рис. 1, 2) высотой 40 мм состоит из двух извилистых каналов, образованных пластинами в форме полуокружностей. Входные и выходные щели образованы с помощью перегородок. Перегородки представляют собой пластины, один конец которых загнут с радиусом кривизны r = 10 мм. Пластины и перегородки закреплены между двумя пластинами из оргстекла. Вдоль канала улавливающие карманы изолированы перегородками [4].

Постановка проблемы

Для рассматриваемых несжимаемых потоков жидкости в декартовой системе координат уравнения Навье-Стокса (неразрывности и движения) газового потока, осредненные по Рейнольдсу, имеют вид [5]

$$\sum_{j=1}^{3}\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j}=0;$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\bar{u}_i)+\sum_{j=1}^{3}\frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{u}_j\bar{u}_i)=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i}+\sum_{j=1}^{3}\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\frac{\bar{\tau}_{ij}}{\rho}-\overline{u_i''u_j''}\right);$$

где

$$\bar{\tau}_{ij}=\mu\left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}+\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i}\right);$$

t – время; ρ – плотность; x_i – декартова координата (i = 1, 2, 3), (x , y , z) соответственно; $\bar{u}_i$ – компонента скорости жидкости в направлении x_i, (u, v, w) соответственно; $\bar{p} = \bar{p}_s - \rho_o g_m x_m$; $\bar{p}_s$ – статическое давление; ρ_o – начальная плотность; g_m – проекция вектора ускорения свободного падения; x_m – координаты точки, в которой определена плотность.

Для замыкания системы уравнений динамики несжимаемой жидкости плотность рассчитана с помощью уравнения состояния идеального газа $\rho=\frac{p}{RT}$; где R – универсальная газовая постоянная; T – температура.

RNG (k-ε) - модель турбулентности, использованная для описания турбулентного течения несущей фазы в золоуловителе, имеет стандартный вид [5]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k)+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho\bar{u}_j k-(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k})\frac{\partial k}{\partial x_j}\right)=$$

$$=\mu_t(P+P_B)-\rho\varepsilon-\frac{2}{3}(\mu_t\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i}+\rho k)\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i};$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon)+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho\bar{u}_j\varepsilon-(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon})\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right)=$$

$$=\left[\begin{array}{l} C_{\varepsilon 1}\frac{\varepsilon}{k}\left[\mu_t P-\frac{2}{3}(\mu_t\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i}+\rho k)\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i}\right]+C_{\varepsilon 3}\frac{\varepsilon}{k}\mu_t P_B \\ -C_{\varepsilon 2}\rho\frac{\varepsilon^2}{k}+C_{\varepsilon 4}\rho\varepsilon\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i}-\frac{C_\mu\eta^3(1-\eta/\eta_o)}{1+\beta\eta^3}\frac{\rho\varepsilon^2}{k} \end{array}\right]$$

где турбулентная вязкость связана с k и ε следующим выражением $\mu_t=C_\mu\frac{\rho k^2}{\varepsilon}$; σ – турбулентное число Прандтля; $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$, $C_{\varepsilon 3}$ и $C_{\varepsilon 4}$ – коэффициенты, значения которых приведены в табл. 1.

Расчет движения частиц, взвешенных в турбулентном потоке газа, можно описать в рамках стохастического лагранжевого подхода [6].

Уравнение сохранения для движения твердых частиц в турбулентном газовом потоке имеет вид:

$$m_p\frac{du_p}{dt}=m_p\frac{d^2X_p}{dt^2}=F_{pr}+F_p+F_{am}+F_b;$$

где $F_{pr}=\frac{1}{2}C_D\rho A_p|u-u_p|(u-u_p)$ – сила сопротивления; $F_p=-V_p\nabla p$ – сила давления; V_p – объем частиц; ∇p - градиент давления в жидкости; $F_{am}=-C_{am}\rho V_p\frac{d(u_p-u)}{dt}$; C_{am} – константа; $F_b=m_p\left[g-\vec{\omega}\times(\vec{\omega}\times r)-2(\vec{\omega}\times u_p)\right]$ – сила тяжести, где g – вектор ускорения силы тяжести; $\vec{\omega}$ – вектор угловой скорости; r – вектор расстояния к оси вращения;

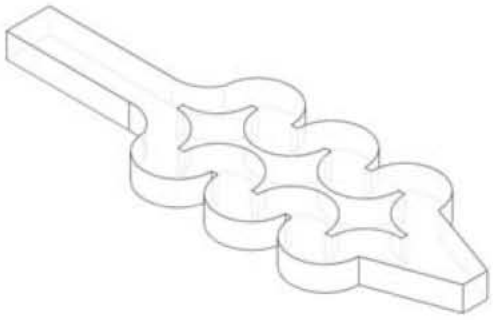

Рис. 3. ЛЗУ без перегородок(высота 40 мм)

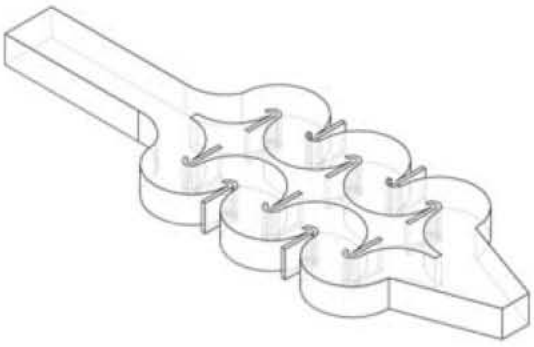

Рис. 4. ЛЗУ с закрытыми щелями (высота 40 мм)

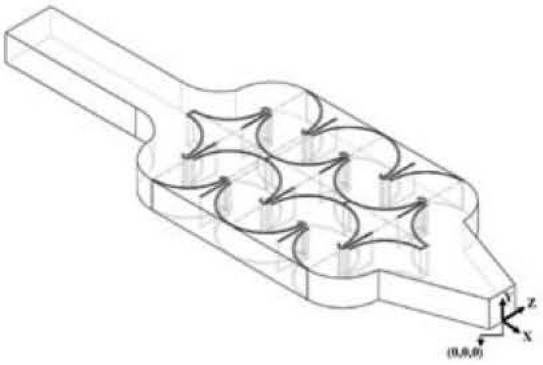

Рис. 5. ЛЗУ с открытыми щелями (высота 40 мм)

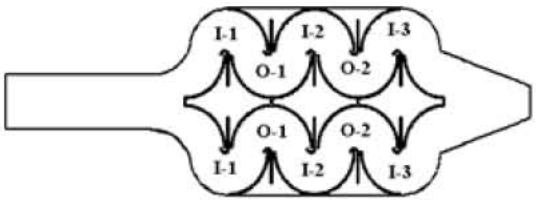

Рис. 6. Схема ЛЗУ с номерами карманов

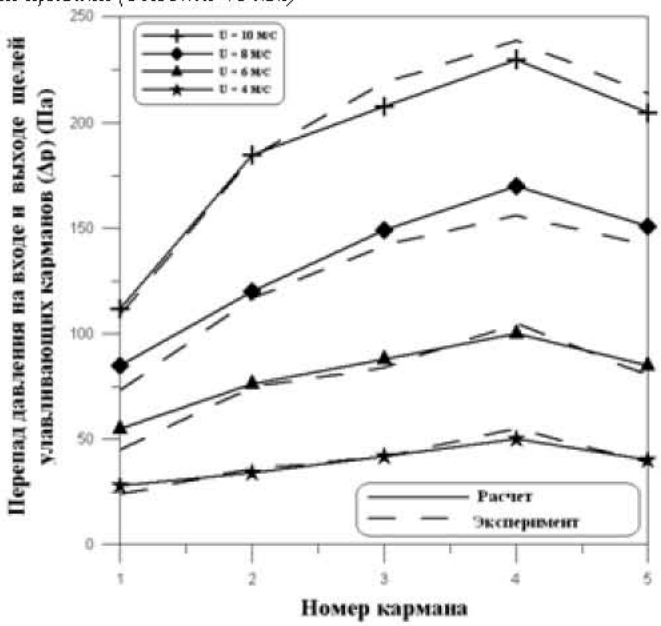

Рис.7. Сравнивание перепада давления на входе и выходе щелей карманов (высота 40 мм)

$$C_D = \begin{cases} 24/\mathrm{Re}_p & \mathrm{Re}_p \le 1 \\ \dfrac{24\,(1+0{,}15\,\mathrm{Re}_p^{0{,}687})}{\mathrm{Re}_p} & 1 < \mathrm{Re}_p \le 10^3 \\ 0{,}44 & \mathrm{Re}_p > 10^3 \end{cases}$$

– коэффициент сопротивления частицы в случае несжимаемого потока является функцией числа Рейнольдса [6]; $\mathrm{Re}_p = \dfrac{d_p \left| u - u_p \right|}{\nu}$; d_p, u_p – диаметр и скорость частицы, u – скорость газовой фазы.

Уравнение движения частиц в несущем газовом потоке решается с использованием численной схемы Рунге-Кутта 2-го порядка точности.

Математическое моделирование

В работе изучены три разных конструкции ЛЗУ: без перегородок (рис. 3); с перегородками и закрытыми щелями (рис. 4); с перегородками и открытыми щелями (рис. 5) – для разных входных скоростей (4, 6, 8 и 10 м/с) и разных высот ЛЗУ (40, 60, 80 и 100 мм). На рис. 6 представлены но-

мера карманов.

Эффективность улавливания дисперсного материала в эксперименте определялась весовым методом с помощью ситового анализа: $\varepsilon = M_{ул} / M_0 \cdot 100\%$, где $M_{ул}$ – масса уловленных частиц, M_0 – масса подаваемых на входе частиц.

Проведение вычислительного эксперимента в данной работе базировалось на использовании метода контрольных объемов (F.V.) и SIMPLE алгоритма (CD- adapco \ STAR-CD 4.06). Система автоматизированного проектирования (CAD) - программа (SolidWorks 2011) использовалась для построения моделей конфигураций.

Для турбулентных течений используются стандартные значения параметров на стенке – "закон стенки", мягкие граничные условия на выходе из канала и соответствующие условия для всех переменных на входе в канал. Для частиц использовался закон упругого соударения со стенками канала.

Обсуждение результатов

Одним из важных аспектов численного моделирования является сравнение результатов вычислений с данными эксперимента. На рис. 7 приведены численные и экспериментальные значения перепада давления между выходными и входными щелями карманов.

Ряд результатов расчетов приведен на рис. 8-11. Подробная картина полей скорости в характерных областях ЛЗУ качественно не противоречит ожидаемой картине течения и служит для расчета эффективности золоулавливания (рис. 9-11).

На рис. 9 приведены зависимости эффективности ЛЗУ для разных входных скоростей. При этом получено, что эффективность ЛЗУ с открытыми щелями больше, чем эффективность ЛЗУ с закрытыми щелями и без перегородок. Отсюда видно, что рециркуляция части потока через входные и выходные щели, образованные перегород-

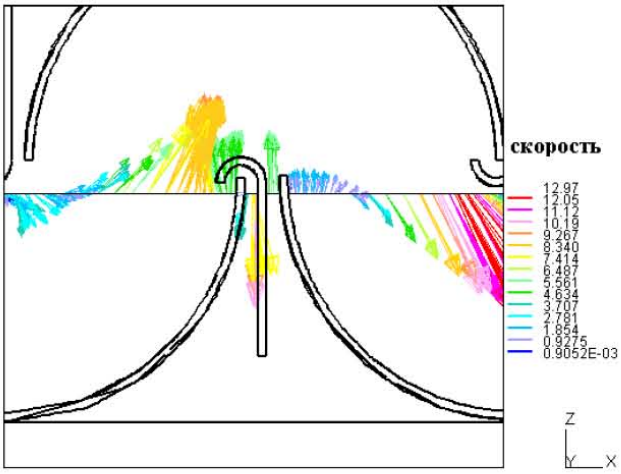

Рис. 8. Поля скорости в сечении кармана О-2 (входная скорость 6 м/с)

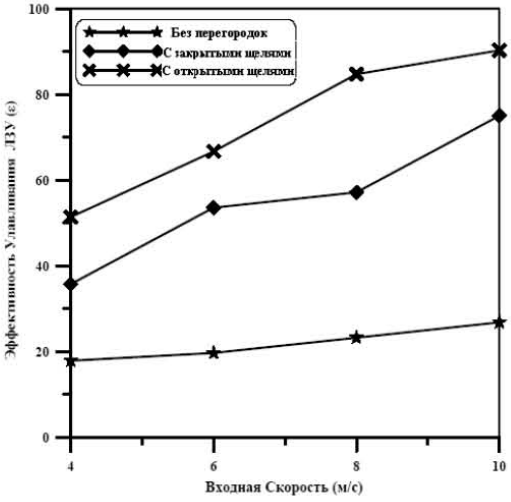

Рис. 9. Эффективности ЛЗУ для разных входных скоростей

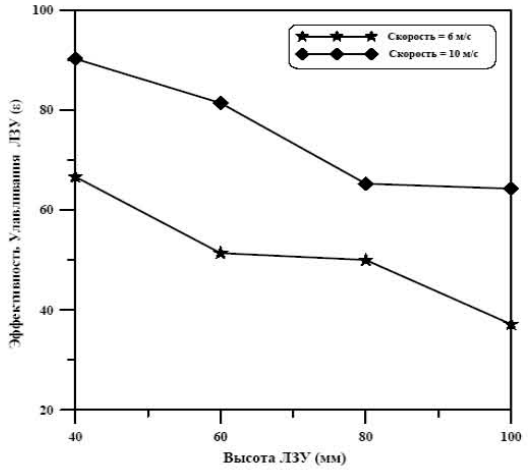

Рис. 10. Эффективность ЛЗУ для разной высоты каналов

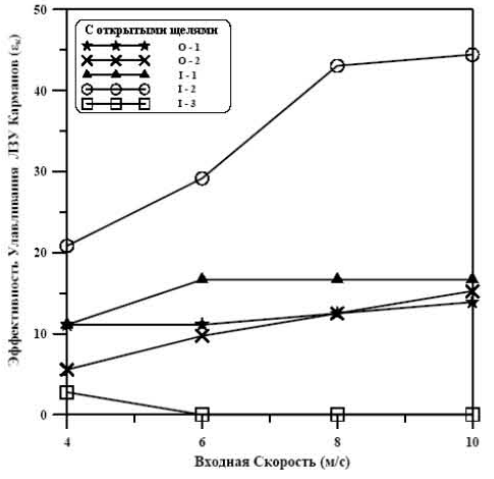

Рис. 11. Эффективность ЛЗУ с открытыми щелями карманов для разных выходных скоростей

ками, играет существенную роль в улавливании частиц. Эффективность ЛЗУ увеличивается с повышением скорости, т.к. траектории движения частиц смещаются к стенке с повышением скорости, что способствует лучшей сепарации частиц.

Влияние высоты каналов на эффективность ЛЗУ при их постоянной ширине показано на рис.10. Эффективность улавливания ЛЗУ снижается с ростом высоты каналов.

Эффективность карманов ЛЗУ с открытыми щелями показана на рис.11,откуда видно, что эффективность внутреннего кармана I-2 больше, чем у других карманов для всех конструкций ЛЗУ. За исключением внутреннего кармана I-3, эффективность карманов растет с повышением скорости. На рис. 12. показаны траектории частиц в ЛЗУ

Рис. 12. Траектории частиц в ЛЗУ

Заключение

Таким образом, в работе экспериментально и теоретически изучено влияние входной скорости и высоты лабиринтного золоуловителя на аэродинамику и эффективность улавливания ЛЗУ. Результаты, приведенные выше, подтверждают, что

– наличие рециркуляционных щелей повышает эффективность ЛЗУ;

– эффективность ЛЗУ снижается с увеличением высоты ЛЗУ при постоянной ширине каналов ЛЗУ;

– эффективность наружных карманов О-1 и О-2 повышается с увеличением высоты ЛЗУ при постоянной ширине каналов;

– рециркуляция части запыленного потока через улавливающие карманы, образованные перегородками значительно повышает эффективность ЗЛУ.

Примененная методика исследования процессов сепарации частиц в ЛЗУ показала свою работоспособность и может быть использована для аналогичных конструкций золоуловителей после соответствующего выбора модели турбулентности, связанной с особенностями течения запыленных потоков в извилистых каналах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Темникова, Е. Ю.* Исследование эффективности пылеулавливания в циклоне с рельефными поверхностями: дис. … к-та техн. наук: 05.26.01: защищена 26.02.10. – Кемерово, 2010. – 175 с.

2. *Bhasker, C.* Flow simulation in industrial cyclone separator / C. Bhasker // Advances in Engineering Software. – 2010. – Vol. 41. – P. 220-228.

3. *Vaitiekūnas P.* Analysis of numerical modelling of turbulence in a conical reverse-flow cyclone / Petras Vaitiekūnas, Inga Jakštonienė // J. Envir. Eng. and Land. Manag. – 2010. – Vol. 18, No. 4. – P. 321–328.

4. Пат. № 2031691 РФ, МПК В 01 D 45/08. Пылеуловитель лабиринтного типа / Е.М. Пузырев, С.М. Кисляк, А.М. Сидоров // Изобретения.– 1995. - № 9. - С. 115.

5. *Carmona M.* A numerical study of the flow in a cyclone separator using the k-ε realizable turbulence model / Mauricio Carmona, Cristobal Cortes, Antonio Ramirez // V European Conference on CFD. – Lisbon. – Portugal. 2010.

6. *Kartushinsky A.* Numerical simulation of uprising gas and solids flow in Cfb by Euler/Euler approach / Alexander Kartushinsky, Andres Siirde, Ülo Rudi, Alexander Shablinsky // 10th International Symposium Pärnu – Estonia. – 2011.

□ Авторы статьи:

Алтухов
Юрий Александрович,
докт.физ.-мат.наук, профессор каф. вычислительной математики и программирования АлтГПА
Email: Yuri_Altukhov@mail.ru

Кисляк
Сергей Марксинович,
канд.техн.наук, доцент каф. теплогазоснабжения и вентиляции АлтГТУ им. И.И. Ползунова
Email ksm58@rambler.ru

Аль Замили Али
Мирали Джасим,
аспирант каф. теплогазоснабжения и вентиляции АлтГТУ им. И.И. Ползунова.
Email: alimeer2004@yahoo.com

Сеначин
Павел Кондратьевич,
докт.техн.наук, профессор каф. двигателей внутреннего сгорания АлтГТУ им. И.И. Ползунова
. Email senachinpk@mail.ru

Богомолов
Александр Романович,
докт.техн.наук, доцент, проф. каф. процессов, машин и аппаратов химических производств КузГТУ,
с.н.с. Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН.
Email: barom@kuzstu.ru, т. 39-63-32

Дадонов
Петр Васильевич,
канд.техн.наук, научн.сотр. Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН.
Тел. 8(3852)39-63-32