

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, невозмож-

ны 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 промышленных установок, применяемых для очистки запыленных потоков. Одной из возможных конструкций золоуловителей является лабиринтный золоуловитель (ЛЗУ) с

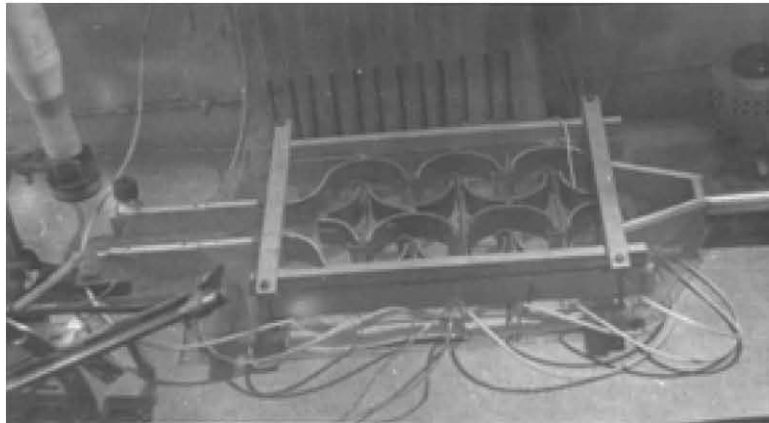


Рис. 1. Модель ЛЗУ (экспериментальное оборудование)

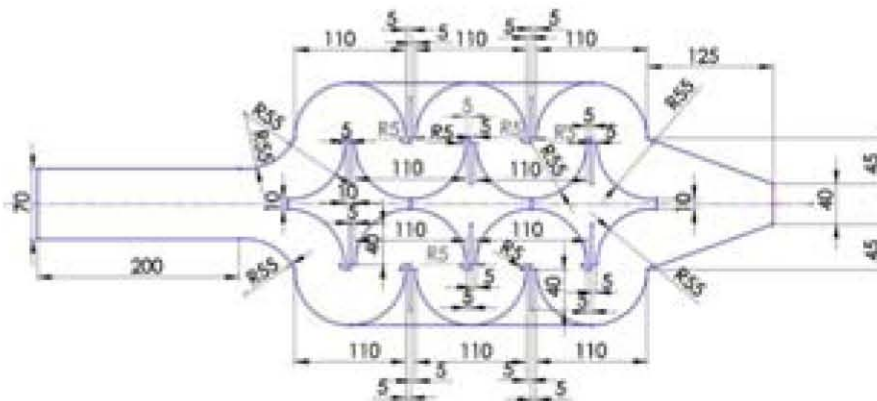


Рис. 2. Схема модели ЛЗУ

Таблица 1 Значения коэффициентов для RNG k - ϵ модели турбулентности

| C_μ | σ_k | σ_ϵ | σ_h | σ_m | $C_{\epsilon 1}$ | $C_{\epsilon 2}$ | $C_{\epsilon 3}$ | $C_{\epsilon 4}$ | k | E | η_0 | 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 |
| * $C_{\epsilon 3} = 1,42$ 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 полукружностей. 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]

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

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

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; $\bar{p} = P_s - \rho_0 g_m x_m$; P_s - статическое давление; ρ_0 - 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]:

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

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

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

$$= \left[C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} \left[\mu_t P - \frac{2}{3} \left(\mu_t \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} + \rho k \right) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} \right] + C_{\epsilon 3} \frac{\epsilon}{k} \mu_t P_B - C_{\epsilon 2} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + C_{\epsilon 4} \rho \epsilon \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} - \frac{C_\mu \eta^3 (1 - \eta / \eta_0) \rho \epsilon^2}{1 + \beta \eta^3} \frac{1}{k} \right]$$

где турбулентная вязкость связана с k и ϵ следующим выражением $\mu_t = C_\mu \frac{\rho k^2}{\epsilon}$; σ - турбулент-

ное число Прандтля; $C_{\epsilon 1}$, $C_{\epsilon 2}$, $C_{\epsilon 3}$ и $C_{\epsilon 4}$ - 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:

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

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;

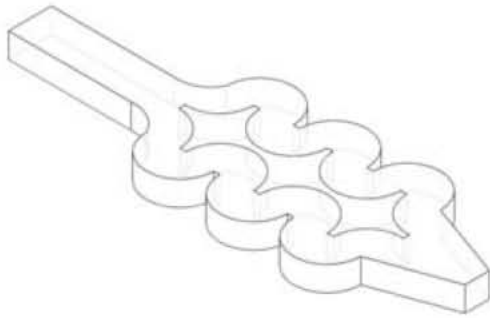


Рис. 3. ЛЗУ без перегородок (высота 40 мм)

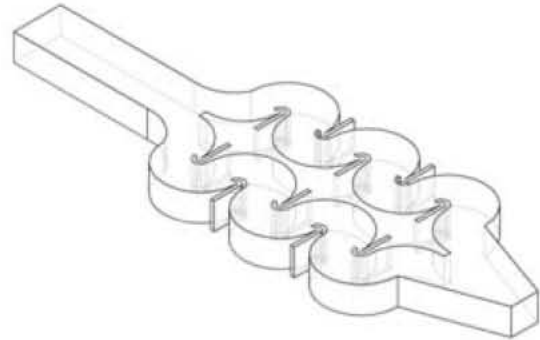


Рис. 4. ЛЗУ с закрытыми щелями (высота 40 мм)

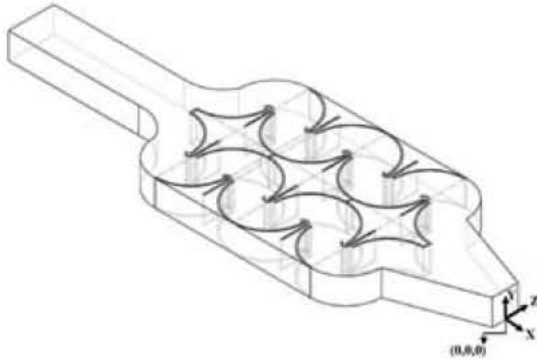


Рис. 5. ЛЗУ с открытыми щелями (высота 40 мм)

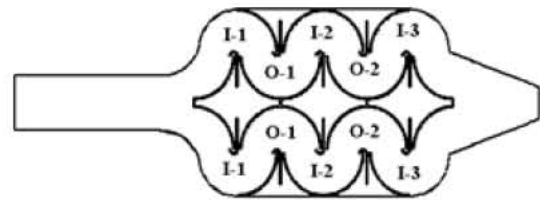


Рис. 6. Схема ЛЗУ с номерами карманов

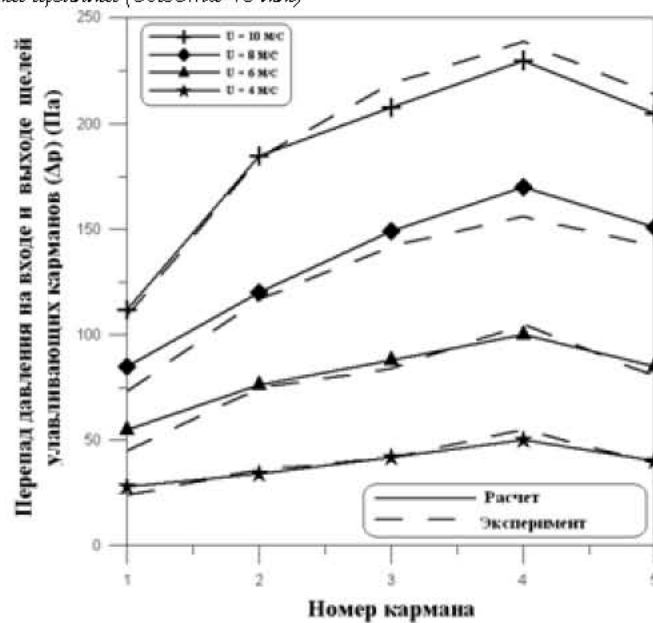


Рис. 7. Сравнение перепада давления на входе и выходе щелей карманов (высота 40 мм)

$$C_D = \begin{cases} 24/Re_p & Re_p \leq 1 \\ \frac{24(1+0,15Re_p^{0,687})}{Re_p} & 1 < Re_p \leq 10^3 \\ 0,44 & Re_p > 10^3 \end{cases}$$

– коэффициент сопротивления частицы в случае несжимаемого потока является функцией числа

Рейнольдса [6]; $Re_p = \frac{d_p |u - u_p|}{\nu}$; d_p , u_p – диа-

метр и скорость частицы, u – скорость газовой фазы.

Уравнение движения частиц в несущем газовом потоке решается с использованием численной схемы Рунге-Кутты 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: $\varepsilon = M_{уд} / M_0 \cdot 100\%$, где $M_{уд}$ – 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.

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-

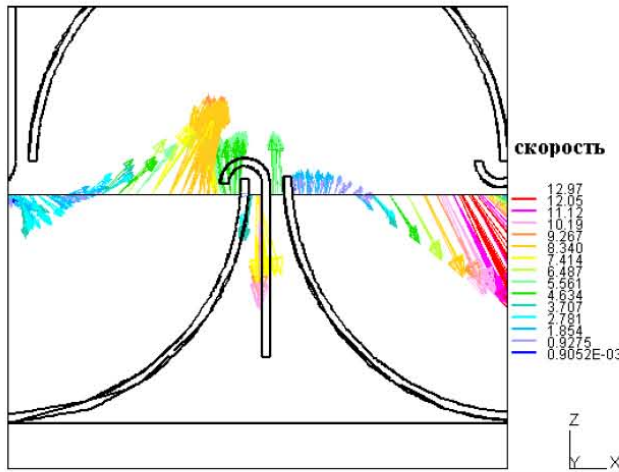


Рис. 8. Поля скорости в сечении кармана O-2 (входная скорость 6 м/с)

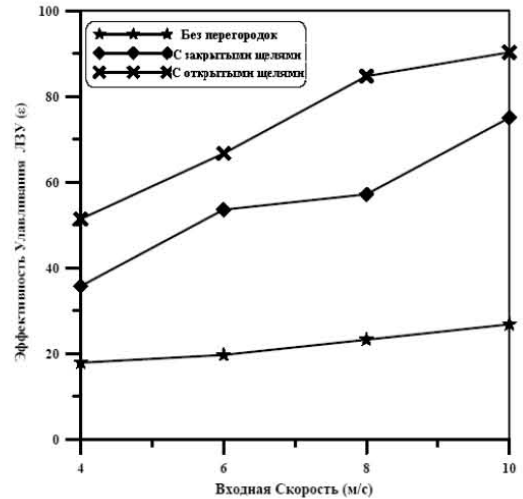


Рис. 9. Эффективности ЛЗУ для разных входных скоростей

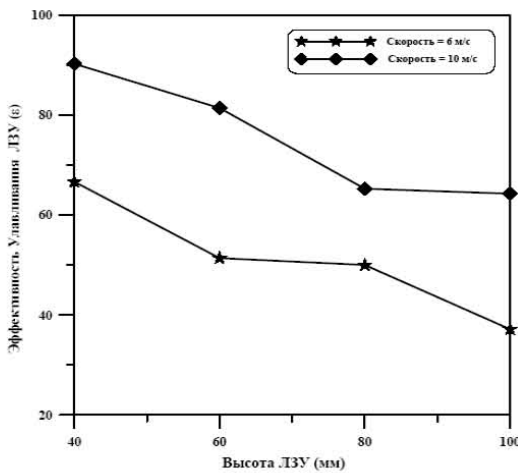


Рис. 10. Эффективность ЛЗУ для разной высоты каналов

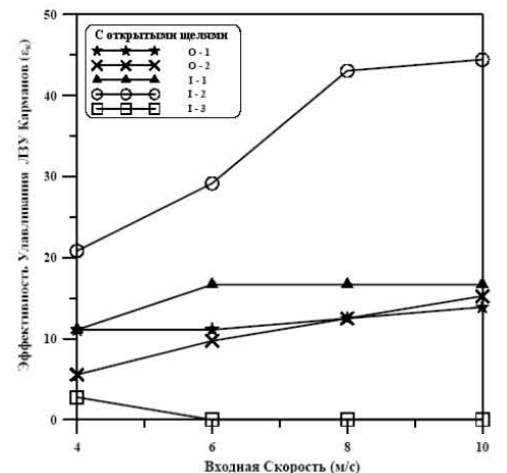


Рис. 11. Эффективность ЛЗУ с открытыми щелями карманов для разных выходных скоростей

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

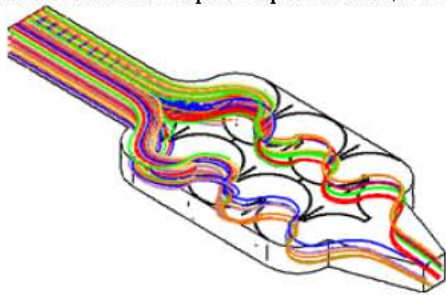


Рис. 12. Траектории частиц в ЛЗУ

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 ЛЗУ.

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 про-
граммирования АлтГПА
Email: Yuri_Altukhov@mail.ru

Сеначин
Павел Кондратьевич,
докт. техн. наук, профессор каф. дви-
гателей внутреннего сгорания АлтГ-
ТУ им. И.И. Ползунова
Email: senachinpk@mail.ru

Кисляк
Сергей Маркинович,
канд. техн. наук, доцент каф. теплога-
зоснабжения и вентиляции АлтГТУ
им. И.И. Ползунова
Email: ksm58@rambler.ru

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

Аль Замилли Али
Мирали Джасим,
аспирант каф. теплогазоснабжения и
вентиляции АлтГТУ им. И.И. Пол-
зунова.
Email: alimeer2004@yahoo.com

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