

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФАКТОРА СЕПАРАЦИИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОЦЕССА ГАЗООЧИСТКИ

Ключевые слова: фактор сепарации; динамический газопромыватель; критерии подобия; Ansys CFX; вторичный унос; эффективность газоочистки.

Разработан научно-обоснованный метод оптимизации процесса газоочистки путем совершенствования гидродинамической обстановки с учетом режимно-конструктивных параметров газопромывателя. Предложены критерии оценки аппаратов с точки зрения теории геометрического подобия с последующим определением критических траекторий движения частиц. Установлены зависимости, позволяющие на стадии проектирования провести подбор оптимальных геометрических и режимных параметров газоочистных установок с учетом целенаправленного использования фактора сепарации.

Keywords: The separation factor; a dynamic spray scrubber; simulation criteria; Ansys CFX; a reentrainment; efficiency of clearing of gas emissions.

The scientifically proved method of optimisation of process of clearing of gas emissions by perfection of hydrodynamic circumstances in terms of regime-design data a scrubber is devised. Criteria of an estimation of apparatuses from the point of view of the theory of a geometrical similarity with the subsequent definition of critical mechanical trajectories of corpuscles are offered. The dependences allowing on a design stage to spend selection optimum geometrical and operating conditions of gas-cleaning installations in terms of of purposeful use of the factor of separation are installed.

1. Состояние вопроса, актуальность

В химической промышленности и смежных с ней отраслях производства используются газоочистные аппараты с закрученным движением дисперсной среды, эффективность которых полностью определяется гидродинамическим совершенствованием процесса сепарации. Из современных газоочистных аппаратов наиболее распространены циклоны, скрубберы, вихревые аппараты. Как правило, эти аппараты отличаются способом организации закрученного потока и устройством узла разделения фаз. Основными недостатками известных устройств являются: низкая эффективность улавливания тонкодисперсных частиц, вторичный унос дисперсной фазы, высокое гидравлическое сопротивление, склонность к залипанию пыли.

Указанные недостатки ставят задачу поиска новых оригинальных конструктивно-схемных и технологических решений на основе перехода к современным газопромывателям нового поколения, в которых низкие энергетические затраты на газоочистку, эксплуатационная надежность и простота конструктивного оформления, сочетаются с высокой эффективностью процесса сепарации дисперсных частиц.

Несмотря на сравнительно большое число исследований в этой области, практически отсутствуют работы, охватывающие принципы расчета газоочистного оборудования с единых методологических позиций. В настоящее время произошли значительные изменения в области математического моделирования, связанные с применением вычислительных технологий и пакетов программ, что позволяет прогнозировать аэрогидродинамические характеристики аппаратов еще на стадии разработки и проектирования.

Цели данной работы:

1. Выполнить моделирование процесса очистки газа от дисперсных примесей и создать на его основе методику и алгоритм для прогнозирования эффективности процесса сепарации и аэрогидродинамических характеристик.
2. Спланировать и провести численный эксперимент.
3. На основе численных данных эксперимента построить функциональные зависимости, описывающие процесс очистки газовых выбросов.

2. Моделирование движения газодисперсных потоков

Основными механизмами осаждения частиц пыли в газопромывателе являются: осаждение под действием центробежных сил, инерционное соударение, перехват и диффузионное осаждение [1]. Для описания гидродинамики используется физико-математическая модель, которая включает: уравнения Навье – Стокса, осредненные по Рейнольдсу, и уравнения неразрывности;

$$\begin{aligned}
 & \frac{1}{r} \left[\frac{\partial}{\partial r} (r\rho v_r v_r) + \frac{\partial}{\partial r} (r\rho v_r v_z) \right] = \\
 & = \frac{1}{r} \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(r\mu_r \frac{\partial v_r}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(r\mu_r \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) \right] - \frac{\partial P}{\partial r} - \mu_r \frac{\rho v_z}{r^2} + \frac{\rho v_z^2}{r} \\
 & \frac{1}{r} \left[\frac{\partial}{\partial r} (r\rho v_r v_\varphi) + \frac{\partial}{\partial z} (r\rho v_z v_\varphi) \right] = \\
 & = \frac{1}{r} \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(r\mu_r \frac{\partial v_\varphi}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(r\mu_r \frac{\partial v_\varphi}{\partial z} \right) \right] - \mu_r \frac{\rho v_\varphi}{r^2} - \frac{\rho v_\varphi v_r}{r} \\
 & \frac{1}{r} \left[\frac{\partial}{\partial r} (r\rho v_r v_z) + \frac{\partial}{\partial z} (r\rho v_z v_z) \right] = \\
 & = \frac{1}{r} \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(r\mu_r \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(r\mu_r \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \right] - \frac{\partial P}{\partial z}
 \end{aligned}$$

$$\operatorname{div} \rho \vec{v} = 0$$

(1)

где v_z - скорость потока вдоль оси; v_r - скорость потока в радиальном направлении; v_φ - тангенциальная скорость потока; ρ - плотность смеси; μ - коэффи-

циент турбулентной вязкости; P - давление; \vec{u} - вектор скорости.

Для замыкания системы уравнений используется двухпараметрическая модель турбулентности $\kappa - \varepsilon$ [8], для неё решаются два дополнительных уравнения переноса с целью определения κ - турбулентной кинетической энергии и ε - турбулентной энергии диссипации.

Модель турбулентности:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \rho_c k_c}{\partial t} \alpha_c + \frac{\partial \rho_c u_j k_c}{\partial x_j} \alpha_c \\ & = \tau_{ij} \frac{\partial u_c}{\partial x_j} \alpha_c - \alpha_c \cdot \rho_c \cdot \varepsilon_c + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_c \left(\mu_c + \frac{\mu'_c}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k_c}{\partial x_j} \right] \\ & \frac{\partial \rho_c \varepsilon_c}{\partial t} \alpha_c + \frac{\partial \rho_c u_j \varepsilon_c}{\partial x_j} \alpha_c = \\ & = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon_c}{k_c} \tau_{ij} \frac{\partial u_c}{\partial x_j} - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon_c^2}{k_c} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_c \left(\mu_c + \frac{\mu'_c}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon_c}{\partial x_j} \right] \\ & \mu'_c = C_\mu \cdot \rho_c \cdot \frac{k_c^2}{\varepsilon} \end{aligned} \quad (2)$$

где k_c - турбулентная кинетическая энергия газовой фазы; σ_k - турбулентное число Прандтля для уравнения кинетической энергии; μ_c и μ'_c - молекулярная и турбулентная вязкость газовой фазы; ε_c - скорость диссипации турбулентной кинетической энергии; σ_ε - турбулентное число Прандтля; τ_{ij} - декартовы компоненты тензора напряжений: $C_\mu = 0,09$; $C_{\varepsilon 1} = 1,44$; $C_{\varepsilon 2} = 1,92$; $\sigma_k = 1,0$; $\sigma_\varepsilon = 1,3$.

Решение математической модели выполнялось в пакете вычислительной гидродинамики Ansys CFX.

Полагается, что на боковых стенках выполняется условие прилипания $U_{wall} = 0$. Задача решалась в осесимметричной постановке, течение предполагалось турбулентным. В численных экспериментах оценивалось влияние интенсивности закрутки потока на структуру течения, число Рейнольдса варьировалось от $1 \cdot 10^2$ до $60 \cdot 10^4$. Результаты численного расчета распределения составляющих скоростей по сечению аппарата представлены на рис. 1.

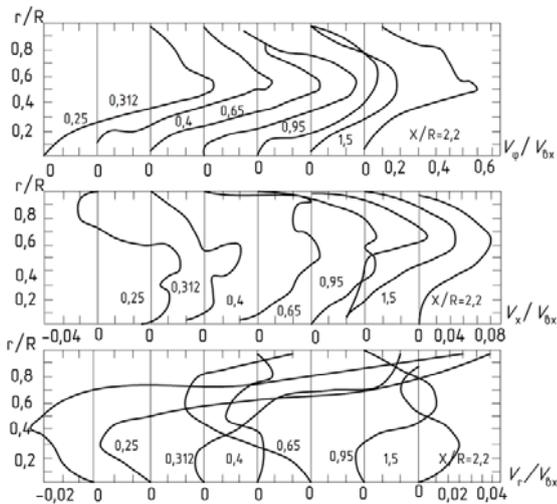


Рис. 1 – Проекция тангенциальных, осевых и радиальных скоростей $Re = 6 \cdot 10^4$

Качественно выделяются следующие три типа течения: слоистое течение, течение с приосевым

вихрем, течение с приосевым и пристенным присоединенными вихрями. При значительной интенсивности процесса, $Re = 6 \cdot 10^4$, у образующей возникают большие тангенциальные скорости, это приводит к значительным градиентам давления, вызывающим обратное течение вдоль оси.

При увеличении числа Рейнольдса структура течения изменяется от слоистого до усложненного развитыми вторичными вихрями.

3. Численный эксперимент и определение фактора сепарации

Для расчета движения частиц в закрученном потоке была составлена математическая модель процесса сепарации дисперсных частиц на капли орошающей жидкости. Учитывались следующие силы, действующие на частицу: сила тяжести, сила Кориолиса, сила аэродинамического сопротивления среды и центробежная сила [5, 6].

Система уравнений движения частицы может быть записана в виде:

$$\begin{cases} \frac{d U_x}{dt} = \frac{3}{4} \cdot \frac{\rho_r}{\rho_q} \cdot \frac{\xi_{sq}}{d_q} \cdot U_{отн} \cdot (V_x - U_x) + g; U_x = \frac{dx}{dt} \\ \frac{d U_\phi}{dt} = \frac{3}{4} \cdot \frac{\rho_r}{\rho_q} \cdot \frac{\xi_{sq}}{d_q} \cdot U_{отн} \cdot (V_\phi - U_\phi) + \frac{\omega \cdot r}{t}; U_\phi = \omega \cdot r = r \frac{d\phi}{dt} \\ \frac{d U_r}{dt} = \frac{3}{4} \cdot \frac{\rho_r}{\rho_q} \cdot \frac{\xi_{sq}}{d_q} \cdot U_{отн} \cdot (V_r - U_r) - \frac{\omega \cdot r}{t} + \omega^2 r; U_r = \frac{dr}{dt} \end{cases} \quad (3)$$

Аналогично записывается система уравнений движения капель жидкости:

$$\begin{cases} \frac{d W_x}{dt} = \frac{3}{4} \cdot \frac{\rho_{жк}}{\rho_{ж}} \cdot \frac{\xi_{жк}}{d_q} \cdot W_{отн} \cdot (V_x - W_x) + g; W_x = \frac{dx}{dt} \\ \frac{d W_\phi}{dt} = \frac{3}{4} \cdot \frac{\rho_{жк}}{\rho_{ж}} \cdot \frac{\xi_{жк}}{d_q} \cdot W_{отн} \cdot (V_\phi - W_\phi) + \frac{\omega \cdot r}{t}; W_\phi = \omega \cdot r = r \frac{d\phi}{dt} \\ \frac{d W_r}{dt} = \frac{3}{4} \cdot \frac{\rho_{жк}}{\rho_{ж}} \cdot \frac{\xi_{жк}}{d_q} \cdot W_{отн} \cdot (V_r - W_r) - \frac{\omega \cdot r}{t} + \omega^2 r; W_r = \frac{dr}{dt} \end{cases} \quad (4)$$

Из системы уравнений движения частицы следует, что её траектория зависит от следующих факторов: d_q -диаметра частиц (капель $d_{жк}$); ρ_q -плотности частицы (жидкости $\rho_{жк}$); μ_c -динамической вязкости газа (жидкости $\mu_{жк}$); r -радиуса (характерного размера) аппарата; $U_{0\phi}$ -начальной тангенциальной скорости газа, а также от геометрии завихрителя α , \check{D} , \check{z} .

Формальный анализ зависимостей (4) показывает, что строгое соблюдение подобия движения в геометрически подобных аппаратах требует сохранения следующих безразмерных параметров: d_q/D_0 ; ρ_q/ρ_r ; $Re = v_q d_q / \nu_r$; $Sh = \omega D_0 / \nu_r$.

Если ввести параметр аппарата R_z , характеризующий геометрию аппарата в рассматриваемой точке траектории, то систему дифференциальных уравнений (4) можно переписать:

$$\begin{cases} \frac{d U_x}{dt} = \frac{18 \mu_r}{\rho_q d_q^2} \left(\frac{R_z}{r_q} U_{\tau 0} - U_x \right) - \frac{U_x V_x}{r_q} + g \\ \frac{d U_\phi}{dt} = \frac{18 \mu_r}{\rho_q d_q^2} \left(\frac{G_0}{R_0^2} \cdot U'_r \left(\frac{\alpha}{R_z}; \frac{z}{R_z}; \frac{r}{R_z}; \frac{D}{R_z}; \dots \right) - V_\phi \right) + \frac{U_\phi^2}{r_q} + \frac{\omega \cdot r}{t} \\ \frac{d U_r}{dt} = \frac{18 \mu_r}{\rho_q d_q^2} \left(\frac{G_0}{R_0^2} \cdot U'_r \left(\frac{\alpha}{R_z}; \frac{z}{R_z}; \frac{r}{R_z}; \frac{D}{R_z}; \dots \right) - V_r \right) - \frac{\omega \cdot r}{t} + \omega^2 r \end{cases} \quad (5)$$

Заменим реальные величины безразмерными:

$$\frac{R_z^2 \cdot U_x}{G_0} = \frac{R_z^2}{S}; U_x' = \frac{R_z^2}{G_0} \cdot U_x, U_\phi' = \frac{R_z^2}{G_0} \cdot U_\phi,$$

$$U_r' = \frac{R_z^2}{G_0} \cdot U_r, t' = \frac{G_0}{R_z^3} \cdot t, z' = \frac{z}{R_z}, \phi' = \phi$$

$$U_x' = \frac{dr'}{dt'}, U_\phi' = \frac{dz'}{dt'}, U_r' = \frac{d\phi'}{dt'} \cdot r'$$

Структура зависимости (5) показывает целесообразность введения двух комплексов, один из которых

$$C_p = \frac{\mu_r R_z^3}{\rho_v G_0 d_4^2},$$

характеризует влияние режима течения и диаметра частиц, а другой: $C_r = R_z^2/S$, является геометрической характеристикой аппарата и учитывает переменную площадь сечения его проточной части. Решение системы (5) при начальных условиях:

$$r'_u|_{t=0} = r'_{u0}, z'_u|_{t=0} = z'_{u0}, \phi'_u|_{t=0} = 0$$

– для цилиндрических координат, и

$$U_x'|_{t=0} = U'_{x0}, U_\phi'|_{t=0} = U'_{\phi0}, U_r'|_{t=0} = U'_{r0}.$$

– для определения скорости, позволяет построить траектории движения частиц (рис. 2).

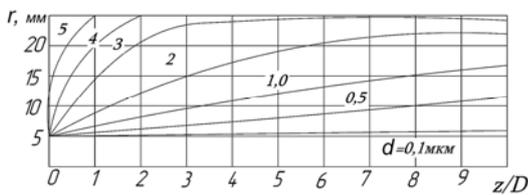


Рис. 2 – Траектории движения частиц различного диаметра

При рассмотрении движения частиц в газопромывателе встает вопрос об исходе её движения: вынесет ли газовый поток частицу в выхлопную трубу, или же под действием сил инерции она отлетит к стенкам аппарата и отсепарируется.

При $C_p = C_2$ траектория частицы будет одинаковой, следовательно, C_p и C_2 являются критериями подобия движения частиц.

Для определения влияния критериев подобия на пылеулавливание был проведен численный эксперимент для двух геометрически подобных газопромывателей, выявляющий соотношение между C_p и C_2 , при котором происходит оседание частиц на стенку аппарата.

Методом последовательных приближений значений C_p и C_2 при различных начальных условиях, была составлена регрессионная модель для оценки влияния на вторичный унос пыли критериев C_2 и C_p . Зависимость адекватно описывается степенной функцией, что представлено на рис.3, где линия регрессии описывается формулой $y = 0,482x^{0,615}$.

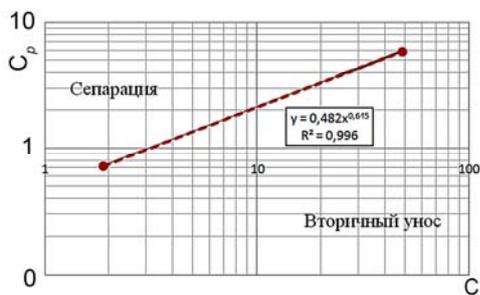


Рис. 3 – Критическая траектория движения частиц

Аналогичным образом был исследован ряд геометрически подобных аппаратов других авторов, при этом, независимо от начальных условий, выражение $C_p \approx f(C_2)$ аппроксимируется степенной функцией:

$$C_p \approx \Phi \cdot C_2^{0,6} \quad (6)$$

Для определения величины Φ (фактора сепарации) были спланированы и проведены численные эксперименты, позволившие выявить зависимость Φ от входной скорости газодисперсного потока (z_1), угла наклона лопастей завихрителя (z_2), расхода орошающей жидкости (z_3), координаты ввода дисперсных частиц (z_4). Искомая зависимость хорошо описывается полиномом второй степени:

$$\begin{aligned} \Phi = & b_0 + b_1 z_1 + b_2 z_2 + b_3 z_3 + b_4 z_4 + b_{12} z_1 z_2 + b_{13} z_1 z_3 + \\ & + b_{14} z_1 z_4 + b_{23} z_2 z_3 + b_{24} z_2 z_4 + b_{34} z_3 z_4 + b_{11} z_1^2 + b_{22} z_2^2 + \\ & + b_{33} z_3^2 + b_{44} z_4^2. \end{aligned} \quad (7)$$

Таблица 1 – Параметры плана эксперимента

	z_1 (м/с)	z_2 (°)	z_3 (м ³ /с)	z_4 (м)
Основной уровень, Z_j^0	20	30	6	3
Интервал варьирования, ΔZ_j	2	10	1	0,5÷5,5

В табл. 1 z_1, z_2, z_3 и z_4 – натуральные переменные, соответствующие безразмерным переменным x_1, x_2, x_3 и x_4 ; Z_j^0 – основной уровень,

$$Z_j^0 = \frac{z_j^{\max} + z_j^{\min}}{2};$$

ΔZ_j – интервал варьирования,

$$\Delta Z_j = \frac{z_j^{\max} - z_j^{\min}}{2}.$$

Данные таблицы 1 были приведены к форме, используемой при постановке математико-статистических исследований, также была составлена матрица планирования, в соответствии с которой поставлен эксперимент. Количество опытов принималось равным 250.

Исключая незначимые коэффициенты, для которых t - критерий Стьюдента меньше табулированного, получено адекватное уравнение регрессии в безразмерном виде:

$$\begin{aligned} \Phi = & 48,53 + 9,34x_1 - 7,24x_2 - 3,04x_3 + 2,7(x_1^2 - 0,7) - \\ & - 3,99(x_2^2 - 0,7) - 1,37(x_3^2 - 0,7) + 1,6(x_4^2 - 0,7) + 1,48x_2x_3 = \\ & = 55,292 + 9,34x_1 - 7,24x_2 - 3,04x_3 + 2,7x_1^2 - 3,99x_2^2 - \\ & - 1,37x_3^2 + 1,6x_4^2 + 1,5x_2x_3. \end{aligned} \quad (8)$$

Проверка значимости уравнения (8) показала, что оно адекватно описывает процесс сепарации и дает качественно верное представление о характере влияния основных параметров на траекторию движения частиц. Уравнение (8) позволяет рассчитать безразмерный фактор сепарации Φ и прогнозировать эффективность газоочистки.

Результаты расчета представлены в виде графических зависимостей на рис. 4 и 5.

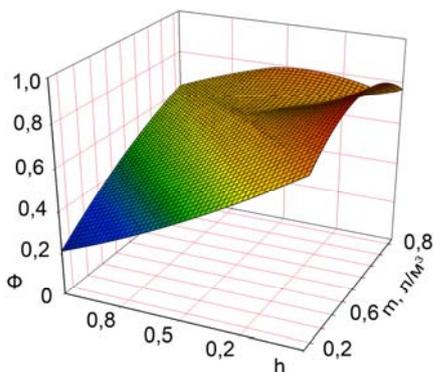


Рис. 4 – Зависимость фактора сепарации Φ от координаты ввода дисперсных частиц и удельного орошения

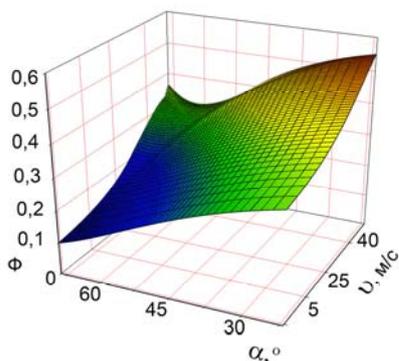


Рис. 5 – Зависимость фактора сепарации Φ от скорости газодисперсного потока и наклона лопастей вихрителя

4. Расчет эффективности газоочистки

Определение эффективности газоочистки сводится к определению эффективного диаметра частиц $d_{эф}$, полностью улавливаемых аппаратом. С учетом принятых ранее соотношений (6) получено выражение для определения эффективного диаметра частиц $d_{эф}$.

$$d_{эф} = \sqrt{\frac{\mu_i R_z^3 G^{0,6}}{\rho_i G \Phi R^{1,2} g^{0,6}}}, \quad (9)$$

Вероятность сепарации частиц заданного дисперсного состава выражается величиной коэффициента очистки η . Характеристики дисперсного состава пыли талька представлены на рис. 6. Эффективность очистки с учетом содержания частиц диаметром $d \leq d_{эф}$ ($N_{эф}$) определяется по формуле:

$$\eta = (100 - N_{эф}) / 100.$$

Важно отметить, что эффективный диаметр частиц значительно меньше их медианного диаметра, обычно вводимого в расчет, что и обуславливает неточность известных зависимостей. Введение эффективного диаметра частиц позволило значительно сблизить экспериментальные и расчетные данные. Ошибка прогноза эффективности очистки находится в пределах $\delta_i = (0,5...+4,5) \%$.

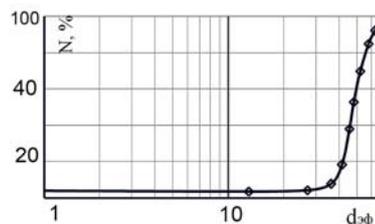


Рис. 6 – Содержание частиц диаметром $d \leq d_{эф}$

Выводы

1. Разработана аналитическая модель течения газодисперсной среды, позволяющая рассчитать распределения всех компонент скорости U'_φ , U'_r , U'_x , а также функции тока $\psi(r, z)$ и построить характерную гидродинамическую картину течения в программном комплексе Ansys CFX.

2. Установлена однозначность влияния на вторичный унос пыли критериев геометрического подобия C_T и C_p , определяющих конструктивные и режимные параметры аппарата. Введено понятие "фактор сепарации Φ ", связывающий оба критерия и позволяющий разделить процесс газоочистки на две области: вторичного уноса пыли и зоны полной сепарации.

3. Результаты исследований положены в основу нового метода расчета эффективности газоочистки, отличающегося хорошей точностью прогнозируемых значений, простотой получаемых на его основе решений, а также возможностью оценки эффективности газоочистки при отсутствии сведений о дисперсном составе пыли.

Литература

1. D. C. Wilcox *Multiscale Model for Turbulent Flows* // In AIAA 24th Aerospace Meeting / American Institute of Aeronautics and Astronautics. (1986).
2. F. R. Menter, T. Esch *Advanced Turbulence Modelling in CFX* // CFX Update; Spring 2001. 20. 4-5. (2001).
3. Пат. РФ 2339435 (2008).
4. А. Ю. Варакин *Турбулентные течения газа с твердыми частицами*. ФИЗМАТЛИТ, Москва, 66-170. (2003).
5. М. Г. Лагуткин, Д. А. Баранов. *Оценка действия силы Кориолиса в аппаратах с закрученным потоком*. ТОХТ.1. 9-13. (2004).
6. А. В. Старченко, А.М. Бубенчиков, Е.С. Бурлуцкий. *Математическая модель неизоэтермического турбулентного течения газозвеси в трубе*. Теплофизика и аэромеханика, 1. 59-70. (1999).
7. M. Boivin, O. Simonin, K. D. Squires. *Direct numerical simulation of turbulence modulation by particles in turbulence*. Fluid Mech. Vol.375. 235-263. (1998).
8. M. Boivin, O. Simonin, K. D. Squires. *On the prediction of gas-solid flows with two-way coupling using large eddy simulation*. Phys. Fluids. Vol. 12. 8. 2080-2090. (2000).
9. C. T. Crowe, T. R. Troutt, J. N. Chung. *Numerical models for two-phase turbulent flows*. Annual Review Fluid Mech. Vol.28. 11-43. (1996).
10. O. Simonin, P. Fevrier, J. Lavieville. *On the spatial distribution of heavy particle velocities in turbulent flow: From continuous field to particulate chaos*. Turbulence. Vol. 3. 40-57. (2002).