

УДК 621.6.311

Миргалиева О.С. – аспирант

E-mail: olga-mirgalieva@yandex.ru

Зиганшин М.Г. – кандидат технических наук, профессор

E-mail: mjihan@rambler.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1

Моделирование фильтрации двухфазного аэрозоля с золой энергетических углей и способы учета электростатических сил

Аннотация

Для определения характера движения гетерогенного потока и улавливания взвешенных частиц проведены численные исследования модели обтекания препятствия при помощи программного комплекса, реализующего методы вычислительной гидродинамики. Смоделирован двухфазный поток, состоящий из 60 инертных частиц. В результате исследования выявлены параметры частиц, задерживающихся на элементах фильтра и достигающих физической границы. Рассмотрены соотношения, позволяющие учитывать при улавливании взвешенных частиц в двухфазном потоке наряду с механическими и электростатические силы. Выявлены возможные варианты и способы учета электрических сил в уравнении Навье-Стокса.

Ключевые слова: электростатическое осаждение, фильтрация, численные исследования, электрическое поле, вычислительная гидродинамика.

Структура любого пористого слоя представляет для фильтрующегося в нем потока систему каналов и препятствий. Пористые среды для фильтрации определенных видов гетерогенных выбросов предприятий, генерирующих тепловую и электроэнергию, могут формироваться из волокнистых материалов. При достижении фильтровального волокна, расположенного поперек течения, поток разделяется и огибает его. При этом суммарное сечение потока уменьшается. Находящиеся в нем взвешенные частицы могут столкнуться с волокном вследствие эффектов касания, диффузии, приблизившись под действием гравитационных, инерционных, электростатических сил.

Считается, что поверхностью волокна за счет касания захватываются частицы, траектории центров которых окажутся на расстоянии меньше радиуса. За счет диффузионной подвижности вследствие ударов молекул потока могут сталкиваться с волокном маленькие частицы. С увеличением температуры дымовых газов диффузионная подвижность частиц увеличивается и растет степень диффузионного осаждения. Гравитационному осаждению (под действием силы тяжести) можно подвергнуть только крупные компоненты, а частицы меньше 1 мкм практически не осаждаются вследствие большой диффузионной подвижности. При инерционном улавливании молекулы потока легко меняют направление движения и огибают возникающие препятствия, что невозможно для массивных и/или крупных взвешенных частиц, которые по инерции продолжают движение в прежнем направлении до столкновения с фильтровальным волокном.

Частицы аэрозоля и/или структурные элементы фильтра по тем или иным причинам могут еще обладать электрическими зарядами. Поэтому между фильтровальными волокнами и частицами имеет место электростатическое взаимодействие. Если заряды противоположные, то электростатические силы увеличивают долю осаждаемых на волокнах частиц, внося свой вклад в итоговую эффективность очистки гетерогенного выброса всеми другими способами, в том числе с помощью диффузии и зацепления. Между тем для многих конкретных случаев определение значимости вклада электростатического взаимодействия представляет весьма сложную задачу, т.к. в целом процесс осаждения частиц на волокнах зависит от большого числа факторов, складывающихся из различных сочетаний физико-химических

характеристик потоков, частиц и волокон. Пока непосредственному расчету поддаются только случаи сочетания крайних (предельных) параметров.

Для элементов фильтра и частиц аэрозоля с зарядами противоположного знака коэффициент электростатического захвата η_Q частиц поверхностью волокна (на единицу длины) за счет кулоновских сил может быть определен из выражения ([1]):

$$\eta_Q = \frac{Q_v q R}{4\pi\epsilon_0 \eta u r}, \quad (1)$$

где Q_v – объемная плотность заряда волокна (цилиндра), Кл/м³; $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная; η – динамический коэффициент вязкости среды, Па·с; q – заряд частицы, Кл; R, r – соответственно радиусы волокна и частицы, м; u – скорость потока.

Если заряжены только волокна, то:

$$\eta_Q = \frac{Q \pi r^2 R}{6\epsilon_0 \eta u}, \quad (2)$$

где Q – заряд волокна, Кл.

На практике эффективность осаждения η_Q здесь может быть ощутимой, если волокна специально заряжаются от высокопотенциального источника постоянного тока. Но одного этого еще недостаточно даже для однозначной оценки результата взаимодействия. В предположении, что оптимальная скорость обтекания волокна потоком известна и соблюдается, η_Q будет зависеть как минимум от электростатических свойств материала улавливаемых частиц. Так, например, зола от сжигания углей марки Б1Р Башкирского, Б2 Райчихинского, СС Экибастузского, бурых углей Гусиноозерского месторождений при температуре дымовых газов после парогенератора 130...200°C имеет значение удельного электрического сопротивления УЭС от $2 \cdot 10^{10}$ до $2 \cdot 10^{11}$ Ом·м [2]. Следовательно, приобретение зарядов частицами золы будет протекать не интенсивно, и в итоге эффективность осаждения окажется незначительной. В то же время зола от сжигания каменных углей марок Г, Т Донецкого месторождения, также высокоомная при температуре дымовых газов непосредственно после парогенератора, имеет приемлемое УЭС $< 10^{10}$ Ом·м при температуре ниже 100°C. И наоборот, зола от сжигания углей марки ПЖ Воркутинского месторождения имеет максимум УЭС $= 5 \cdot 10^{10}$ Ом·м при 100°C и практически оптимальное УЭС $= 3,5 \cdot 10^9$ Ом·м при 200°C. Поэтому в первом случае охлаждение дымовых газов перед электросепарацией может дать ощутимый эффект очистки, а во втором – только заметно ухудшить его.

Слишком низкие значения УЭС (порядка 10^5 Ом·м менее – такие, как у угольной пыли при сушке размолотого угля Карагандинского бассейна, Ирша-Бородинского месторождения и др.) также ухудшают степень улавливания взвеси. Индуцированные отображенные заряды создают возле себя соответствующие электрические поля. Оценочно при вязком обтекании волокна их кулоновское взаимодействие с собственным электрическим полем частицы:

$$\eta_Q = \frac{2K^{0,5}}{(2 - \ln \text{Re})^{0,5}}. \quad (3)$$

Число Рейнольдса в выражении (3) относится к режиму движения потока в целом и, соответственно, определяется по его характерному линейному размеру.

Безразмерный параметр K в этом же выражении, показывающий соотношение гидродинамических и электрических сил, зависит от заряда частицы, ее размера и размера волокна. По [1], его величина может быть оценена как:

$$K = \frac{(\epsilon_{rl} - 1)}{(\epsilon_{rl} + 1)} \frac{q^2}{96\pi^2 \epsilon_0 \eta u r R^2}, \quad (4)$$

где ϵ_{rl} – электрическая проницаемость материала волокна относительно вакуума.

Еще более неоднозначна картина взаимодействия нейтральных низкоомных частиц с заряженным волокном. На поверхности частицы, оказавшейся в его поле, будет создан, с какой-то степенью искажения, зеркально отображенный заряд. Это приведет к ускоренному перемещению частицы к волокну за счет кулоновских сил. В

непосредственной же близости от волокна достаточно низкоомная частица может перезарядиться, и ее дальнейшее перемещение будет зависеть от параметра K . Определенно здесь можно только сказать, что при очень маленьких значениях частица достигнет волокна за счет инерционных сил, а при очень больших – оттолкнется от него за счет кулоновских сил. Если искусственная зарядка волокон не производится, то рассмотренные виды электростатического захвата в пористых фильтрах могут заметно повлиять на общий процесс осаждения мелких частиц (диаметром порядка нескольких микрометров и менее) при скорости потока u не более 0,1...0,2 м/с [1]. Для детального изучения движения потока в пористом фильтре методами CFD была выполнена двумерная модель пористого фильтра, состоящая из 11 препятствий круглой формы и канала с непроницаемыми сверху и снизу стенками. Препятствия диаметром 500 мкм располагаются в шахматном порядке, с расстояниями по рядам 500 мкм.

На первоначальном этапе для расчета потока применено моделирование по RANS с пристенными функциями и замыканием системы уравнений Навье-Стокса k - ϵ уравнениями генерации и диссипации турбулентной энергии. Моделирование на базе системы уравнений Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу (RANS), воспроизводит средние значения вектора скорости потока, а влияние флуктуаций воспроизводится через замыкающие уравнения с эмпирическими характеристиками. Для решения задачи использовано моделирование по RANS с пристенными функциями и замыканием системы уравнений Навье-Стокса k - ϵ уравнениями генерации и диссипации турбулентной энергии [3]. Для определения характера движения гетерогенного потока и улавливания взвешенных частиц на препятствии (волокне фильтра) методами вычислительной гидродинамики (CFD) выполнялось численное исследование взаимодействия элементов фильтра с осаждаемыми частицами. Геометрия (физические границы $2d$ модели) и расчетная сетка в области прохождения запыленной среды созданы средствами предпроцессора Gambit. Численные исследования характеристик обтекания препятствий радиусом $R_{ob}=50$ мкм при числах Рейнольдса для препятствий Re_{ob} от 0,1 до 100 проведены с помощью программного комплекса Fluent.

Поток рассматривается как несжимаемая ньютоновская жидкость и описывается уравнением неразрывности (или сохранения массы):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \bar{\nabla}(\rho \bar{V}) = 0, \quad (5)$$

где ρ – плотность жидкости, кг/м³; \bar{V} – осредненная скорость потока, м/с.

Численные расчеты для потока газа осуществляются путем решения осредненного по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса:

$$\rho \bar{V} \bar{\nabla} \bar{V} = -\bar{\nabla} p + \eta \bar{\nabla}^2 \bar{V} + S, \quad (6)$$

где p – давление газа, Па; S – дополнительные силы, возникающие в газовом потоке при действии электрического поля, Н/м³.

Для учета эффекта электростатических сил в процессе моделирования фильтрации необходимо в уравнение потока газа добавить дополнительный термин, который получают путем решения систем уравнений электрического поля и переноса заряда [4]. Силы S , связанные с электрическим полем, выражаются в виде:

$$S = \rho_{ion} \bar{E}, \quad (7)$$

где ρ_{ion} – объемная ионная плотность заряда, Кл/м³; $\bar{E} = -\nabla \phi$ – напряженность электрического поля, В/м; ϕ – электростатический потенциал, В.

Для описания распределения потенциала электрического поля здесь используется уравнение Пуассона:

$$\nabla^2 \phi = -\rho_{ion} / \epsilon_0. \quad (8)$$

Аналитическое решение уравнения Пуассона (8) можно получить лишь для задач с несложной геометрией. Поэтому, как правило, его решают численно. В настоящее время большинством программных средств, позволяющих рассчитывать электростатические поля, используется метод конечных элементов. В данной работе численные исследования выполнены с помощью комплексов ANSYS.

Расчеты гидродинамических задач выполнялись на основе модуля ANSYS CFX общего назначения. Он содержит расширенный набор математических моделей для широкого круга задач, связанных с течением и тепломассообменом жидкостей и газов. Для расчетов турбулентных течений промышленных потоков модуль имеет ряд новых расширений к общим RANS-моделям ($k-J$, $k-CO$, SST , модель турбулентных напряжений Рейнольдса), LES-моделям расчета крупных вихрей и некоторым другим. В модуле ANSYS CFX «Моделирование многофазных потоков» можно моделировать многофазные сплошные, пузырьковые и распыленные потоки, частицы и потоки со свободной поверхностью. Модель переноса Лагранжа позволяет рассчитывать одну или несколько дискретных примесей, капельных фаз в рамках непрерывной жидкой фазы. Также имеются статистическая модель столкновения частиц и квазистатическая модель тонкого слоя. Многофазная модель Эйлера включает в себя широкий набор функций для расчетов обмена импульсом, энергией, массой, в т.ч. модели с учетом сил межфазного взаимодействия. Модель групп разных размеров (MUSIG model) позволяет рассчитывать разрыв и слияние дисперсных фаз в полидисперсных многофазных потоках. В модуле ANSYS CFX реализуется моделирование влияния твердого тела на течение. Имеется модернизированная технология деформируемых сеток с повторным управляемым созданием сетки. Такое движение может быть либо задано явно, либо выражено в неявном виде как результат расчета при помощи встроенного в ANSYS CFX решателя твердых тел, имеющего шесть степеней свободы. Это обеспечивает развитие техник, моделирующих полностью сцепленное движение частицы с использованием перемещающихся сеток конечных элементов (таких как техника произвольных функций Лагранжа-Эйлера ALE [5]), что позволяет не вычислять в явном виде гидродинамические силы и моменты на каждой частице. Метод погруженных в текучую среду тел позволяет описывать неограниченное движение твердого тела в потоке без необходимости деформирования сетки.

Наряду с этим, в наборе доступных стратегий ANSYS CFX отсутствуют инструменты, которые могли бы учитывать влияние электростатических сил непосредственно в процессе вычислений. Расчеты параметров электростатического поля должны проводиться в отдельном модуле ANSYS Maxwell, а в ANSYS CFX предусмотрена возможность использования полученных результатов в качестве нагрузок.

ANSYS Maxwell позволяет создавать 2d- и 3d-модели электромагнитных полей электродвигателей, трансформаторов и др. электрических устройств. Источниками электрического поля могут быть точечные, линейные, поверхностные и объемные заряды, а также объекты с заданным потенциалом. Maxwell базируется на методе конечных элементов (Finite Element Method – FEM) и рассчитывает статические, гармонические электромагнитные и электрические поля, а также переходные процессы в полевых задачах. Для моделирования электромагнитного поля предусмотрен ряд солверов: электромагнитный решатель для переменного тока, электростатический и магнитостатический решатели, электрический решатель для переходных процессов. Решатели позволяют точно рассчитывать силу, момент, емкость, индуктивность, сопротивление, импеданс, а также создавать модели в пространстве состояний.

В стационарных условиях электрическая плотность потока бездивергентна:

$$\nabla \bar{J} = 0, \quad (9)$$

где \bar{J} – плотность ионного тока, А/м².

Когда диффузия ионов незначительна по сравнению с проводимостью, то:

$$\bar{J} = \rho_{ion} b_{ion} \bar{E}, \quad (10)$$

где b_{ion} – ионная подвижность, м²/(с·В).

Отсюда:

$$\nabla(\rho_{ion} b_{ion} \nabla \phi) = 0. \quad (11)$$

Уравнение (11) может быть решено численно с учетом переменных b_{ion} и ρ_{ion} .

Движение частицы в лагранжевых координатах с учетом действия внешних электростатических сил \bar{F}_i , Н/кг, определяемых на единицу массы частицы:

$$\frac{d\bar{u}_{p,i}}{dt} = F_D(\bar{u}_i - \bar{u}_{p,i}) + \frac{g_i(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + \bar{F}_i, \quad (12)$$

где \bar{u}_i , $\bar{u}_{p,i}$ – скорости потока и частицы, м/с; $i=x,y$ – координаты; ρ_p – плотность частиц, кг/м³; $F_D(\bar{u}_i - \bar{u}_{p,i})$ – сила трения на единицу массы частицы, Н/кг.

Внешние электростатические силы \bar{F}_i :

$$\bar{F}_i = \bar{E}_i \cdot q_p / m_p, \quad (13)$$

где q_p – электрический заряд частицы, Кл; m_p – масса частицы, кг.

Параметр F_D :

$$F_D = \frac{3\eta C_D \cdot \overline{Re}}{4\rho_p d_p^2}, \quad (14)$$

где C_D – коэффициент динамического сопротивления, зависящий от числа Рейнольдса \overline{Re} , определяемого по относительной скорости частицы ($\overline{Re} \equiv \rho \cdot d_p |\bar{u}_{p,i} - \bar{u}_i| / \eta$); d_p – диаметр частицы, м.

Для решения поставленной в данной работе задачи необходимо исследование движения частиц в потоке, ввиду чего использовался метод Эйлера-Лагранжа. Поток газа рассматривается как непрерывная фаза путем решения усредненных по времени уравнений Навье-Стокса. Дисперсная фаза решается путем отслеживания траекторий определенного числа частиц, диспергированных в непрерывной фазе, через расчетные поля течения. Был выбран вариант нестационарного отслеживания Unsteady Tracking – частицы выдвигались по потоку каждый раз, когда поток продвигался во времени.

Создана группа инъекций из 60 инертных частиц, определены свойства частиц по заданному материалу. Заданы начальное и конечное положение, скорость частиц, начальный диаметр, температура, массовый расход, продолжительность впрыска для нестационарного отслеживания, т.е. время начала и окончания инъекций. Поведение частиц, достигших физических границ потока, может быть представлено несколькими вариантами; для рассматриваемой задачи представляли интерес моменты отскока от стенок канала и столкновения с препятствием. Поведение частиц задано в граничных условиях для стенок и препятствий.

В результате численного эксперимента получена уточненная схема фильтрации частиц в пористой среде, моделируемой 11 препятствиями диаметром 100 мкм, расположенными в шахматном порядке (рис.). Установлено, что зона максимальной скорости располагается вблизи стенок канала, что обусловлено отсутствием препятствий в этой зоне. Частицы беспрепятственно пролетают канал в данной области и по этой причине имеют наиболее прямолинейные траектории. Время достижения выходной границы канала в среднем $1,81 \cdot 10^{-4}$ с. В центральной части канала, где располагаются препятствия, скорость потока заметно снижается. За препятствиями получены области с отрицательными величинами векторов скорости. По ним можно идентифицировать зоны турбулентных течений $Re_{об} = 100$ с обратными токами, образующимися вследствие образования зон разрежения по месту срыва потока на препятствиях. Размер зон обратных токов зависит от расположения препятствий. Для первого и второго ряда зоны составляют от 35 до 55 % от размера препятствий. У последнего ряда размер зоны обратных токов увеличивается в 2...3 раза и становится примерно равным размеру препятствия. Причина в том, что за последним рядом отсутствуют объекты, которые могли бы помешать развитию зоны обратных токов, что наблюдается за первым и вторым рядом препятствий.

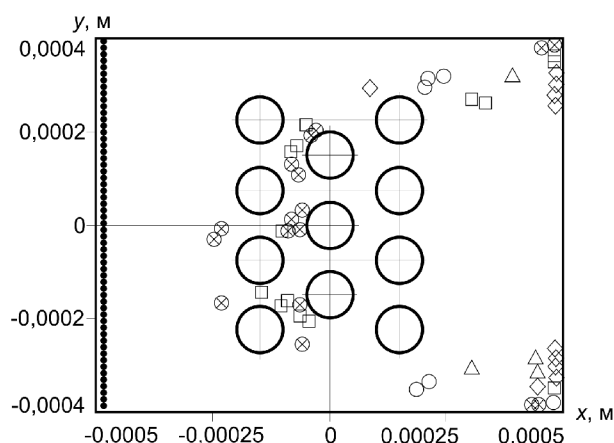


Рис. Результаты численного расчета. Скорости частиц, м/с: • – 0 (исходная позиция всех частиц);
⊗ – до 3; □ – от 3,5 до 5,5; ◇ – от 6 до 7; Δ – от 7,5 до 8 м/с; ○ – от 8,5 до 10

Основной поток частиц задерживается на втором ряду препятствий, что говорит о достаточно высокой эффективности улавливания частиц данной моделью фильтра. Согласно с [6], для частиц диаметром $(0,5...200) \cdot 10^{-6}$ м рассчитаны безразмерные параметры Re_p , Stk , Re_r при скорости невозмущенного потока в пределах от 0,03 до 30 м/с, с целью определения эффективности их улавливания. Значения безразмерных параметров показали, что действие сил инерции частиц размером более 5 мкм уже при минимальной скорости потока превосходит величину действия межмолекулярных сил. Следовательно, для частиц размером крупнее 5 мкм захват касанием не будет регламентировать процесс фильтрации.

Таким образом, на основании проведенных исследований получена физически непротиворечивая численная модель процесса фильтрации двухфазного потока. В результате расчетов определены характеристики его движения – поля скоростей, давлений, время прохождения загрязненного потока через модель фильтра. Подобраны приемлемые по электронному ресурсу алгоритмы, позволяющие учитывать влияние электростатических сил в процессе фильтрации двухфазного потока, необходимые для оптимизации конструирования и эксплуатации систем фильтрации.

Список литературы

1. Защита атмосферы от промышленных загрязнений: Справ. Изд.: В 2-х ч. Ч. 1 / Под ред. Калверт С., Инглунд Г.М. – М.: Металлургия, 1988. – 760 с.
2. Скрыбина Л.Я. Атлас промышленных пылей: Ч. 1. Летучая зола тепловых электростанций // Обзорная информация: Серия ХМ-14. – М.: ЦИНТИХимнефтемаш, 1980. – 48 с.
3. Зиганшин М.Г., Миргалиева О.С., Шаймуллина Э.А. Замыкание уравнений движения турбулентного гетерогенного потока при фильтрации // Сб. научных трудов КазГАСУ. – Казань: КГАСУ, 2010. – С. 206-212.
4. Shah M.E., Rasul M.G., Khan M.M., Deev A.V., Subaschandar N. A Numerical Model of an Electrostatic Precipitator // 16th Australasian fluid mechanics conference Crowne Plaza, Gold Coast, Australia, 2007. – Gold Coast, 2007 – P. 1050-1054.
5. Hu H.H., Patankar N.A., and Zhu M.Y. Direct numerical simulation of uid-solid systems using the arbitrary Lagrangian-Eulerian technique. J. Comput. Phys. (2001), 169 (2). – P. 427-462.
6. Еремкин А.И., Зиганшин М.Г., Миргалиева О.С. Безразмерные параметры очистки потока газа при фильтрации // Материалы 7-ой международной практической конференции «Образование и наука XXI век-2011», 17-25 октября 2011. – София: Бял Град-БГ, 2011. – С. 102-104.

Mirgalieva O.S. – post-graduate student

E-mail: olga-mirgalieva@yandex.ru

Ziganshin M.G. – candidate of technical sciences, professor

E-mail: mjihan@rambler.ru

Kazan State University of Architecture and Engineering

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

Simulation of filtration of two-phase of aerosol with ash of power coals and ways to address the electrostatic forces

Resume

For flow filter structure of the porous filter layer in all cases is a system of channels and obstacles.

When approaching the particle to the fiber, there are several mechanisms that can result in trapping: gravitational deposition effect touch inertial capture, capture diffusion, electrostatic deposition.

Between the aerosol particles and structural elements of the porous filter layer may be an electrostatic interaction, if for some reason will have electrical charges. If the filter fiber particles appear oppositely charged, there is an attraction of particles to the fibers. The mechanism of electrostatic deposition of particles can also be improved by other means including diffusion and by engagement.

ANSYS CFX software module allows the calculation of steady and unsteady fluid dynamics problems. Opportunities software package ANSYS CFX do not allow to take into account the effect of electrostatic forces in the calculation. To solve this problem requires the involvement of multiple modules in series, resulting in the calculated results of one module to the next module is used as a load. The calculation of the electrostatic field to produce a module ANSYS Maxwell.

To solve the problem, taking into account the influence of electrostatic forces, the flow must be represented as a two-phase flow, through which it is possible to calculate and visualize the movement of the dust.

The numerical experiment was to sharpen the flow diagram of the obstacles diameter of 100 microns. Created a group of 60 injections of inert particles, defined particle properties, wondering material. The behavior of particles reaching the physical boundary may be represented by several embodiments. The behavior of particles in the set of boundary conditions for the walls and obstacles.

The calculations took into account all the mechanisms of recovery with the exception of electrostatic forces. Identifies possible options and ways to incorporate electric forces in the Navier-Stokes equations.

Keywords: electrostatic, precipitators, the numerical study, the electric field, computational fluid dynamics.

References

1. Protection of the atmosphere from industrial pollution: Ref. Ed.: In 2 parts. Part 1 / Under the editorship of Calvert S., Englund G.M. – M.: Metallurgy, 1988. – 760 p.
2. Scryabina L.Ya. Atlas of industrial dusts: Part 1. Fly ash of thermal power plants // Background information: Series XM-14. – M.: TsINTIKhimneftemash, 1980. – 48 p.
3. Jihanshin M.G., Mirgalieva O.S., Shaymullina E.A. – The closure of the equations of motion of turbulent flow in heterogeneous filtering // The collection of proceedings KazSUAE. – Kazan: KSUAE, 2010. – P. 206-212.
4. Shah M.E., Rasul M.G., Khan M.M., Deev A.V., Subaschandar N.A. Numerical model of an electrostatic precipitator // 16th Australasian fluid mechanics conference Crowne Plaza, Gold Coast, Australia, 2007. – Gold Coast, 2007. – P. 1050-1054.
5. Hu H.H., Patankar N.A., and Zhu M.Y. Direct numerical simulation of uid-solid systems using the arbitrary Lagrangian-Eulerian technique. J. Comput. Phys. (2001), 169 (2). – P. 427-462.
6. Eremkin A.I., Jihanshin M.G., Mirgalieva O.S. The dimensionless parameters in the gas cleaning filter // Proceedings of the 7th International practical conference «Education and Science of the XXI Century-2011», 17-25 October 2011. – Sofia: Byal Grad-BG, 2011. – P. 102-104.