На правах рукописи

Пикущак Елизавета Владимировна

Моделирование седиментации частиц полидисперсной суспензии в классификационных аппаратах

01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Томск – 2009

Работа выполнена на кафедре математической физики Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Томский государственный университет»

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук, доцент
Миньков Леонид Леонидович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор
Воеводин Анатолий Федорович,

доктор физико-математических наук, профессор
Глазунов Анатолий Алексеевич

Ведущая организация: Институт прикладной механики УрО РАН, г. Ижевск

Защита состоится «25» декабря 2009 года в 14-30 на заседании диссертационного совета Д 212.267.13 при ГОУ ВПО «Томский государственный университет» по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, 10 корпус.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке ГОУ ВПО «Томский государственный университет» по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 34а.

Автореферат разослан «____» _____ 2009 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук Ю.Ф. Христенко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертационная работа посвящена моделированию седиментации частиц полидисперсной суспензии в классификационных аппаратах.

Актуальность темы. Для рационального использования центробежных классификаторов в различных производственных процессах (очистка почв, отделение требуемых минералов от пустых пород и т.д.) нужно иметь надежные расчетные методы, позволяющие еще на стадии проектирования с достаточной точностью прогнозировать основные показатели разделения. Чтобы понять основы седиментационного процесса, происходящего в аппаратах подобного типа (работающих с полидисперсными суспензиями), требуется достаточное количество информации о поведении оседающих частиц в жидкости с учетом их взаимодействия с другими частицами.

На практике для многих классификационных аппаратов было многократно замечено, что мелкие частицы, несмотря на свой небольшой размер, оказываются в выводимом потоке крупных частиц. Это явление до настоящего времени не нашло однозначного объяснения в научной литературе. Чтобы избавиться от данного нежелательного содержания мелких частиц в потоке крупных фракций в гидроциклонах, зачастую используют дополнительную инжекцию жидкости перед сливным отверстием. Но для эффективности использования впрыска необходимо знать оптимальные параметры инжекции: объем впрыскиваемой жидкости, скорость инжекции, размер отверстия. В настоящее время исследование влияния инжекции на эффективность разделения твердой фазы в суспензии в основном проводятся экспериментальным методом. Четкой теоретической модели данного явления до сих пор не существует.

Цели и задачи исследований. Целью данной научной работы является изучение процесса седиментации частиц полидисперсной суспензии в классификационных аппаратах методами математического и численного моделирования. Задачи исследования состоят в следующем:

1. Создание физико-математической модели оседания частиц полидисперсной суспензии в тарельчатой центрифуге с учетом взаимодействия частиц между собой. Обоснование формулы для экспериментального определения скорости оседания частиц в тарельчатой центрифуге;
2. Разработка физико-математической модели седиментации частиц полидисперсной суспензии в классификационном аппарате с учетом взаимодействия частиц между собой. Обоснование механизма

попадания частиц мелких фракций в выводимый поток крупного продукта.

3. Исследование влияния начальной общей концентрации твердой фазы, гранулометрических свойств исходной суспензии и геометрических параметров аппарата на процесс классификации;
4. Получение приближенных аналитических решений определения концентраций частиц в классификационном аппарате;
5. Моделирование классификационного аппарата с инжектором. Исследование влияния скорости инжекции жидкости и размера инжекционных сопел на характеристики классификации.

Методы исследований. Поставленные задачи были решены с помощью аналитических методов, методов математического и численного моделирования. Моделирование оседания частиц в тарельчатой центрифуге проводилось с использованием численного метода Годунова. Численное решение задачи о седиментации частиц в классификационном аппарате было получено с использованием разностной схемы Патанкара.

Научная новизна работы заключается в следующем:

Построена физико-математическая модель седиментации частиц полидисперсной суспензии в тарельчатой центрифуги с учетом увлечения мелких частиц крупными.

Обосновано попадание частиц мелких фракций в поток крупного продукта, выводимого через нижний слив классификационного аппарата, типа гидроциклон.

Построена математическая модель седиментации частиц в классификационном аппарате с дополнительной инжекцией жидкости, предназначенной для удаления мелкодисперсных фракций из потока крупнодисперсного материала. Проведено исследование влияния параметров инжекции (скорости, размера инжекционного отверстия) на характеристики классификационного процесса.

Основные положения, выносимые на защиту*:*

1. Физико-математическая модель оседания частиц полидисперсной суспензии в тарельчатой центрифуге с учетом их взаимодействия. Обоснование применения формулы для экспериментального определения скорости оседания твердых частиц полидисперсной суспензии в тарельчатой центрифуге;
2. Физико-математическая модель оседания частиц полидисперсной суспензии в классификационном аппарате. Объяснение аномального поведения сепарационной кривой для частиц мелкоразмерных фракций. Результаты численного

моделирования оседания частиц полидисперсной суспензии в классификационном аппарате;

3. Модель классификационного аппарата с дополнительной инжекцией жидкости. Результаты численного моделирования оседания частиц полидисперсной суспензии в классификационном аппарате с инжектором.

Достоверность полученных результатов работы обеспечивается корректностью используемых математических постановок задач, непротиворечивостью результатов и выводов. Достоверность численных результатов в данной работе обеспечивается путем проведения исследований решения на сеточную сходимость и сравнений их с экспериментальными данными и аналитическим решением для случая слабоконцентрированной полидисперсной суспензии.

Практическая значимость диссертационной работы заключается в возможности использования полученного выражения для определения скорости оседания частицы, в зависимости от ее размера, концентрации твердой фазы и учитывающей ее взаимодействие с другими частицами при инженерных расчетах классификационных аппаратов. Проведено обоснование механизма попадания мелкоразмерных частиц в поток крупного материала. Модель классификационного аппарата с дополнительной инжекцией жидкости позволяет определить оптимальные параметры инжекции (скорость, размер отверстия) для повышения эффективности разделения частиц (т.е. снижению содержания мелких частиц в выводимом потоке крупных фракций).

Апробация работы. Основные результаты научных исследований были доложены на следующих конференциях:

а) *Международных:* Международная школа-конференция молодых ученых «Физика и химия наноматериалов», (Томск, ТГУ, 2005); 5th International conference on Transport Phenomena in Multiphase Systems, 2008 (HEAT 2008, Bialystok, Poland, June 30 – July 3, 2008); International conference on Physical Separation’09 (Falmouth, UK, June 16-17, 2009).

б) *Всероссийских:* IX Всероссийская научно-техническая конференция «Физика и химия высокоэнергетических систем», (Томск, ТГУ, 2003); Научная сессия молодых ученых научно-образовательного центра «Физика и химия высокоэнергетических систем» (Томск, ТГУ, 2004); XI Всероссийская научно-техническая конференция «Физика и химия высокоэнергетических систем», (Томск, ТГУ, 2005); Первая Всероссийская конференция молодых ученых «Физика и химия высокоэнергетических систем», (Томск, ТГУ, 2005); Всероссийская научная конференция молодых ученых «Наука. Технологии.

Инновация», (Новосибирск, НГТУ, 2006); II Всероссийская конференция молодых ученых «Физика и химия высокоэнергетических систем», (Томск, ТГУ, 2006); IX Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике, (Нижний Новгород, НГУ, 2006); V Всероссийская научная конференция «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики», (Томск, НИИПММ, 2006); III Всероссийская конференция молодых ученых «Физика и химия высокоэнергетических систем», (Томск, ТГУ, 2007); IV Всероссийская конференция молодых ученых «Физика и химия высокоэнергетических систем», (Томск, ТГУ, 2008); VI Всероссийская научная конференция «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики», (Томск, НИИПММ, 2008).

Результаты диссертационной работы докладывались устно на научных семинарах технического факультета Университета Эрланген-Нюрнберг (г. Эрланген, Германия, в 2003 и 2008 гг.).

Публикации. Основные результаты работы опубликованы в 6 научных статьях в ведущих научных журналах. Из них три статьи опубликованы в журналах, входящих в перечень ведущих научных журналов и изданий, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией для опубликования результатов диссертаций.

В целом по теме диссертации опубликовано 20 работ [1-20].

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4-х глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 124 с., содержит 48 рисунков. Список источников литературы включает 97 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность моделирования седиментации частиц полидисперсной суспензии в классификационных аппаратах, формулируется цель и задачи исследования, показывается научная новизна работы и практическая значимость полученных результатов, приводятся положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведен литературный обзор по возмущенному оседанию частиц полидисперсной суспензии, способам классификации частиц и основным характеристикам процесса классификации.

Во второй главе проведено моделирование оседания частиц полидисперсной суспензии в тарельчатой центрифуге.

В п. 2.1 и 2.2 приводится математическая постановка задачи. Описание эволюции каждой фракции частиц твердого материала проводится в предположении, что она является отдельной фазой,

концентрация которой подчиняется уравнению сохранения объемной доли твердых частиц:

$$\frac{\partial c_i}{\partial t}+\frac{1}{r}\frac{\partial\, r c_i U_{s,i}}{\partial r}=0\,, \qquad (1)$$

$r_{in}<r<r_{out}$, $i=\overline{1,N}$, N - количество фракций.

Здесь $U_{s,i}$ - скорость оседания частиц i -ой фракции в суспензии, c_i – объемная концентрация частицы i-ой фракции, r_{in} и r_{out} - внутренний и внешний радиусы центрифуги, соответственно.

В начальный момент распределение частиц по объему центрифуги близко к однородному, т.е.

$$c_i(0,x)=c_{i0}=\Delta m_{i0}c_{V0}\,. \qquad (2)$$

Здесь $\Delta m_{i0}=\dfrac{c_i}{c_{V0}}$ - начальная относительная объемная доля i-ой фракции частиц, c_{V0} - начальная концентрация твердой фазы в суспензии.

На левой и правой границах области задается равенство потока частиц нулю:

$$c_i U_{s,i}(t,r_{in})=0\,,\ c_i U_{s,i}(t,r_{out})=0\,. \qquad (3)$$

В пункте 2.3 представлены выражения для определения скорости в эксперименте и при численном моделировании.

Скорость частиц фракции диаметром d_i в эксперименте определяется по следующей формуле:

$$U_{s,i}(r_p,t)=-\frac{r_p}{2}\frac{\Delta\ln c_i(r_p,t)}{\Delta t}\,. \qquad (4)$$

Здесь r_p – координата точки отбора пробы.

При моделировании седиментации частиц суспензии и определении скорости оседания частиц, следуя (Дик И.Г., Миньков Л.Л., Неессе Т. Гидродинамическая модель ускорения седиментации мелких частиц в бидисперсной суспензии // Теплофизика и аэромеханика. 2001. Т.8, №2. С. 283-294; Minkov L., Dueck J. Collective Effects by Settling of Polydisperse Dense Suspension // Eurasian Physical-Technical Journal. 2005. V. 2, No. 1(3). P. 47-63.), учитываются три основных явления:

1) Изменение свойств среды, в которой оседают частицы (изменение плотности и вязкости среды).

2) Генерация течений крупными частицами вблизи собственной поверхности, которая приводит к тому, что мелкие частицы увлекаются крупными и движутся быстрее, чем по формуле Стокса.

Этот механизм существенен при незначительных концентрациях крупных частиц.

3) Течение жидкости из-за ее вытеснения потоком оседающей твердой фазы, которое проявляется за пределами гидродинамического пограничного слоя на частице. По этому механизму (существенному, если концентрация суспензии достаточно высока) мелкие частицы могут увлекаться противотоком жидкости, вытесняемой оседающими частицами.

В итоге, результирующая формула для определения скорости имеет следующий вид:

$$V_{S,i} = \frac{V_{H,i}}{d_i^2}\left[d_i^2 + A(c_V) f_e(d_i) - c_V \sum_{j=1}^{n} \left(d_j^2 + A(c_V) f_e(d_j) \right) \Delta m_j \right], \qquad (5)$$

где $V_{H,i} = V_{St,i}(1-c_V)(1-c_V/0.6)^{1.5}$ - скорость стесненного оседания частицы в полидисперсной суспензии, $f_e(d_i) = \left(\sum_{d_j > \beta d_i}^{n} d_j^6 \Delta m_j \right)^{1/3}$ - функция увлечения, $A(c_V) = 2.5 c_V^{1/3} \exp\left(-\left[5c_V\right]^3\right)$ - поправочная функция, полученная экспериментально (Дик И.Г., Килимник Д.Ю., Миньков Л.Л., Неессе Т. Измерение скорости седиментации мелкодисперсных частиц в тарельчатой центрифуге // ИФЖ. 2003. Т.76, №4. С. 7-17.). Здесь β - параметр, характеризующий размер частицы, которая может увлекать более мелкие частицы, $V_{St,i} = b\frac{g d_i^2}{18\mu_L}\left(\rho_p - \rho_L\right)$- скорость Стокса оседания частицы, b - центробежное число (отношение центробежного ускорения к гравитационному, g), μ_L - вязкость жидкости, ρ_p - плотность твердой фазы, ρ_L - плотность жидкости.

Первое слагаемое в (5) соответствуют скорости стесненного оседания частицы, второе слагаемое соответствует увеличению скорости частицы за счет увлечения ее более крупными частицами, третье слагаемое отвечает за влияние на скорость оседания частицы потока жидкости, вытесненной оседающей твердой фазой.

В п. 2.5 проводится анализ результатов численного решения поставленной задачи (1)-(3) по методу Годунова при следующих значениях исходных данных: $r_{out} = 0.08$ м, характерное время $t_m = 0.85$

сек, $d_m = 56$ мкм, начальная функция распределения частиц по размерам бралась из экспериментальных данных работы (Hararah M.A. Settling of fine particle in dense polydisperse suspensions. Doctoral dissertation. Erlangen. 2004. 100 pp.) (рис.1а), Было взято 67 фракций**.** Начальное значение суммарной объемной концентрации частиц $c_{V0} = 0.2$.

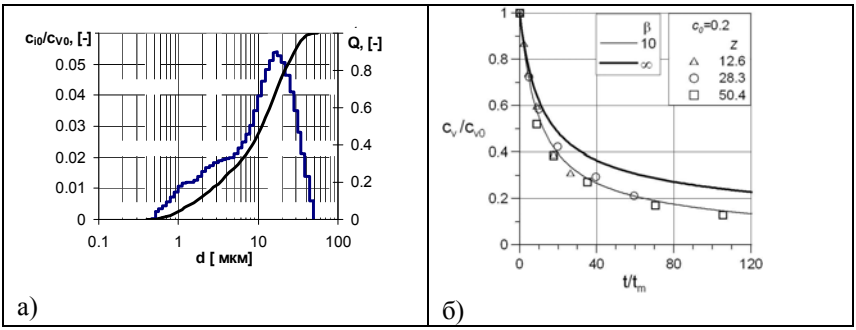

Рисунок 1. а) Функция исходного распределения частиц по размерам
б) Изменение полной концентрации частиц. Точки – экспериментальные данные

На рис. 1б показана зависимость от времени отношения полной концентрации частиц к начальному значению в точке наблюдения $r_p = 0.045$ м. Видно, что неучет эффекта увлечения мелких частиц крупными ($\beta = \infty$, сплошная жирная кривая) дает завышенные значения c_V / c_{V0} по сравнению с измеренными (точки), тогда как решение системы уравнений (1) с использованием модели увлечения частиц ($\beta = 10$, сплошная тонкая кривая) с хорошей точностью согласуется с экспериментальными данными. (параметр $z = r_{out}\omega^2 / g$, представляющий отношение центробежного ускорения на расстоянии r_{out} к ускорению свободного падения).

Рис. 2 содержит сравнение рассчитанных относительных концентраций c_i / c_{i0} для отдельных фракций с экспериментальными данными для тарельчатой центрифуги, изложенными в (Hararah M.A. Settling of fine particle in dense polydisperse suspensions. Doctoral dissertation. Erlangen. 2004. 100 pp.).

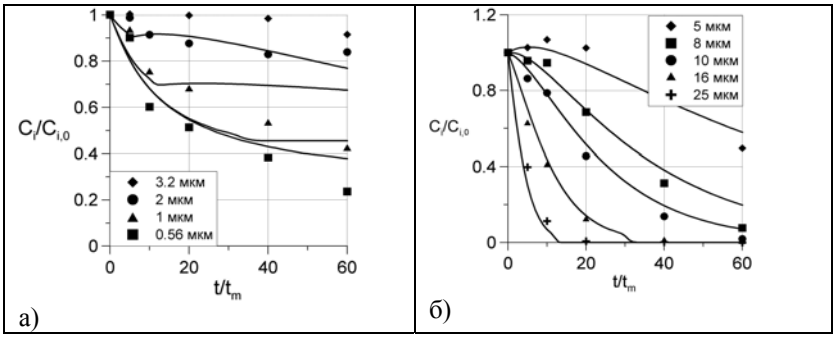

Рисунок 2. Сравнение вычисленной относительной концентрации c_i/c_{i0} для отдельных фракций мелких и крупных частиц с экспериментальными данными.

Видно, что экспериментальные значения до 20% могут превышать рассчитанные значения (линии). Особенно это относится к фракциям с частицами диаметром 2 и 3.2 мкм (рис. 2а). Для этих фракций следует ожидать и наибольшего расхождения измеренных скоростей оседания с теоретическими значениями. Для фракций с частицами 5 мкм и выше рассчитанные кривые изменения концентраций и качественно, и количественно согласуются с экспериментальными данными.

Поскольку скорости седиментации в полидисперсной суспензии в некоторой точке центрифуги зависят от гранулометрического состава и полной концентрации твердой фазы в этой точке, которые меняются во времени, то седиментационные скорости различных фракций зависят от времени.

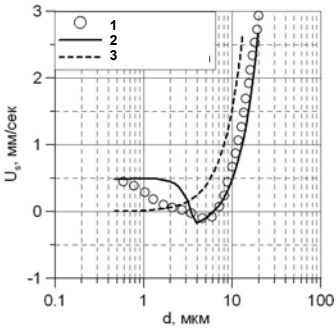

Рисунок 3. Зависимость седиментационной скорости от размера частиц в полидисперсной суспензии в точке отбора пробы r_p =0.045 м при *t*= 2.5 сек. 1 – измерения, 2 – расчет, 3 – Стоксова скорость

На рис. 3 дано сравнение рассчитанной, измеренной в экспериментах и соответствующей формуле Стокса кривых зависимости седиментационной скорости от размера частиц в точке забора проб для момента времени 2.5 сек.

Выделяются три интервала размеров частиц, каждый из которых можно охарактеризовать одним из описанных выше механизмом межчастичного взаимодействия. В интервале самых мелких частиц диаметром примерно до 2 мкм основную роль играет эффект ускорения мелких частиц крупными. Здесь при качественном согласии между экспериментом и теоретическими формулами (5) наблюдается достаточно сильная количественная разница. Отчасти она может быть связана с дискретным описанием гранулометрического состава (рис. 1а). В интервале частиц диаметром от 2 мкм и 7 мкм и теория и эксперимент показывают отрицательную скорость седиментация из-за встречного потока воды, вытесняемой оседающими крупными частицами. И, наконец, для частиц размером от 7 мкм и выше скорость седиментации растет примерно пропорционально квадрату диаметра частиц, оставаясь существенно ниже значений, соответствующих формуле Стокса. Здесь существенным механизмом, влияющим на скорость оседания, является увеличение плотности и вязкости суспензии.

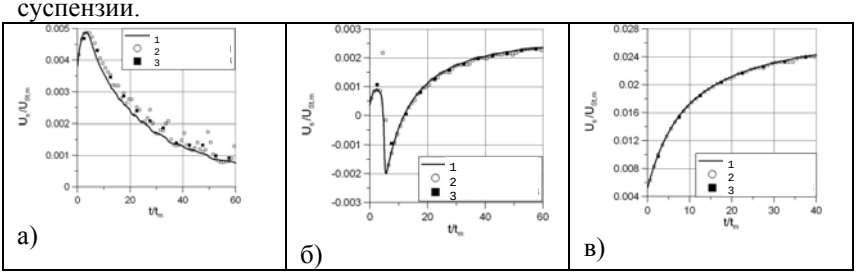

Рисунок 4. Сравнение скорости оседания частиц по формуле (5) (линия 1) со значением по формуле (4) (точки - 2 для $\Delta t/t_m = 1$, 3 для $\Delta t/t_m = 5$) для частиц а) $d = 0.56$ мкм; б) $d = 3.2$ мкм; в) $d = 10$ мкм.

На рис. 4 показаны зависимости относительной скорости оседания $U_{s,i}(r_p)/U_{St,i}(r_p)$ для частиц различных фракций от времени на расстоянии $r_p = 0.045$ м от центра. Сплошная линия 1 соответствует «теоретической» скорости, вычисленной по формуле (5), а точки – «измеренным» скоростям, вычисленным по (4), для чего использовалась центрально-разностная формула численного дифференцирования с шагами по времени $\Delta t/t_m = 1$ (2, кружочки) и 5 (3, квадратики).

Поскольку значения скоростей, вычисленные двумя указанными способами, имеют хорошее совпадение, то методика получения экспериментальных значений, используя уравнение (4) и измеренные в ходе эксперимента концентрации, получает оправдание.

Третья глава посвящена моделированию седиментации частиц полидисперсной суспензии в классификационном аппарате.

В данной главе рассматривается классификационный аппарат типа гидроциклон высотой h, изображенный на рис. 5, в который слева втекает суспензия с начальной постоянной скоростью U_{inl_0}, а справа вытекает через верхнее и нижнее выходные отверстия. При этом исходим из представлений диффузионно-турбулентной модели процесса в аппарате, согласно которой переносу частиц к внешней стенке за счёт центробежной силы противостоит диффузионный поток, вызванный высоким уровнем турбулентности. Каждая частица j-ой - фракции под действием массовой силы (гравитационной или центробежной) оседает вниз с некоторой скоростью $V_{S,j}$. Более крупные частицы покидают аппарат через нижний слив, а более мелкие частицы – через верхний слив. Данное схематичное представление процесса разделения в классификационном аппарате было предложено Г. Шубертом в 80-х годах прошлого века.

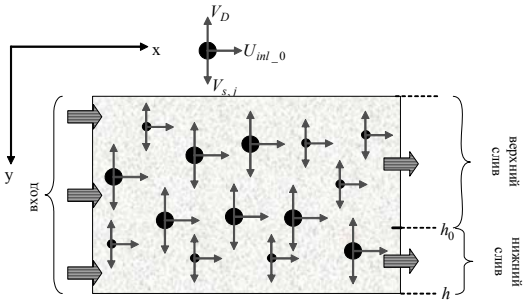

Рисунок 5. Схема классификационного аппарата.

В п. 3.1 и 3.2 приводится постановка задачи седиментации частиц полидисперсной суспензии в классификационном аппарате для случая слобоконцентрированной и плотноконцентрированной суспензий, соответственно.

Задача решалась в безразмерных переменных:

$\theta_j = \dfrac{c_j}{c_{j,0}}$, $\xi = \dfrac{x}{x_*}$, $x_* = \dfrac{h^2 U_{inl_0}}{D}$, $\eta = \dfrac{y}{h}$, $\varphi_j = \dfrac{d_j}{d_*}$, $W_{s,j} = \dfrac{V_{s,j}}{V_{St,*}}$, где $V_{St,*}$ - скорость Стокса для оседания частиц масштабного диаметра.

Уравнение изменения концентрации частиц j-ой фракции:

$$\frac{\partial \theta_j}{\partial \xi} + \frac{\partial}{\partial \eta}\left(Pe_* W_{s,j} \theta_j - \frac{\partial \theta_j}{\partial \eta} \right) = 0 \qquad (9)$$

условие на входе:

$$\theta_j \Big|_{\xi=0} = 1 , \qquad (10)$$

граничные условия:

$$\left(Pe_* W_{s,j} \theta_j - \frac{\partial \theta_j}{\partial \eta} \right) \Bigg|_{\substack{\eta=0 \\ \eta=1}} = 0 . \qquad (11)$$

Безразмерный параметр $Pe_* = \dfrac{h V_{St,*}}{D}$ характеризуется высотой классификатора, Стоксовской скоростью оседания масштабной частицы и коэффициентом турбулентной диффузии.

В отсутствии твёрдой фазы соотношение расходов жидкости через верхнее и нижнее отверстия аппарата (соотношение размеров верхнего и нижнего отверстий) $S = h_0/(h - h_0) = \eta_0/(1 - \eta_0)$ называется сплит-параметром, значение которого обычно порядка 10. Здесь $\eta_0 = h_0/h$.

Расход частиц j -ой фракции через верхнее и нижнее отверстия, соответственно, определяются следующими функциями:

$$R_{ov,j} = \int_0^{\eta_0} \theta_j(\xi,\eta) d\eta , \; R_{un,j} = \int_{\eta_0}^{1} \theta_j(\xi,\eta) d\eta \qquad (12)$$

Основная характеристика процесса классификации - сепарационная функция, показывающая долю частиц данной фракции, отводимую через нижнее отверстие, описывается следующей зависимостью:

$$T(\varphi_j) = \frac{R_{un,j}}{R_{un,j} + R_{ov,j}} \qquad (13)$$

В данной работе использовалась двухпараметрическая функция RRSB (Розен–Раммлер–Спенлинг–Беннет) распределения частиц по размерам, которая имеет следующий интегральный вид:

$$Q = 1 - \exp\left[-(\varphi_j)^m \right] \qquad (14)$$

Здесь m - параметр, характеризующий остроту распределения частиц по размерам в суспензии, $m = 1.7$.

Уравнение для скорости оседания в безразмерном виде будет иметь следующий вид:

$$W_{s,j} = W_{h,j}\left[1 + A(c_V) f_e(\varphi_j) - c_V \sum_{i=1}^{N} \left(\varphi_i^2 + A(c_V) f_e(\varphi_i)\right) \Delta m_i\right]. \qquad (15)$$

В п. 3.2 представлены результаты численного моделирования (с использованием разностной схемы Патанкара) классификации частиц плотноконцентрированной суспензии.

На рис. 6 показано поведение сепарационных кривых (13), рассчитанных на выходе из классификационного аппарата при разных значениях начальной концентрации твердой фазы суспензии, полученных для следующих значений $Pe_* = 10$, $S = 9$.

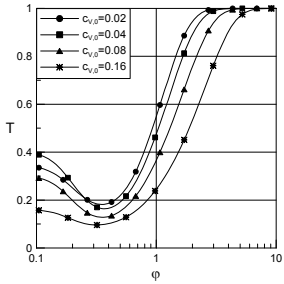

Рисунок 6. Влияние концентрации твердой фазы на сепарационную функцию в выходном сечении, $Pe_* = 10$, $S = 9$.

Видно, что для частиц с размером больше, чем $\varphi \approx 0.5$ сепарационная функция имеет монотонно растущий характер. В интервале частиц с размерами соответствующими $0 < \varphi < 0.5$ их доля, отводимая через нижнее отверстие, монотонно падает с увеличением φ. Т.е. с уменьшением размера частиц происходит подъем сепарационной кривой, что объясняется выносом мелких частиц через нижнее отверстие за счет их увлечения более крупными частицами (т.н. «fish-hook» эффект). Увеличение начальной концентрации твердой фазы в суспензии ведет к монотонному снижению значений сепарационной функции в области φ от 0.5 до 10, что вызвано замедлением скорости седиментации частиц в силу стесненных условий оседания, ведущего к уменьшению относительной концентрации крупных частиц в нижнем выходном отверстии.

В качестве характеристики “fish-hook” эффекта вводится разница $\Delta h = T(\varphi_{\min}) - \frac{1}{1+S}$. Величина $\frac{1}{1+S}$ определяет значение $T(0)$ в случае сильно разбавленной суспензии (когда нет эффекта увлечения) и для бесконечно длинного аппарата (можно получить аналитическое решение поставленной задачи).

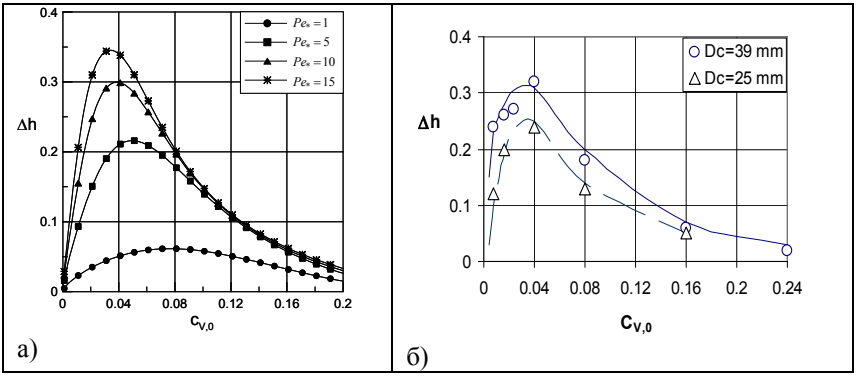

Рисунок 7. Зависимость глубины увлечения от начальной концентрации твердой фазы в суспензии: а) численные результаты, полученные при различных значениях Pe_* . б) экспериментальные данные для гидроциклонов с диаметром цилиндра 25мм и 39 мм.

На рис.7 показана зависимость Δh от начальной концентрации твердой фазы при разных значениях числа Pe_* . Глубина эффекта имеет немонотонный характер с ярко выраженным максимумом. Такое поведение кривых объясняется двумя противоборствующими факторами – увлечением мелких частиц крупными с одной стороны, и замедлением процесса оседания в силу стесненности, связанной с возрастанием вязкости и плотности суспензии – с другой стороны. Из рис.7а также видно, что увеличение числа Pe_* , которое соответствует уменьшению коэффициента диффузии частиц или увеличению их собственной скорости седиментации, приводит к возрастанию глубины увлечения и смещению ее максимума в область низких значений начальной концентрации. Здесь видна роль функции распределения частиц по размерам на характеристики сепарации.

Зависимость Δh от начальной концентрации твердой фазы при разных значениях числа Pe_* возникающая в расчётах качественно полностью соответствует измерениям, приведённым в (Gerhart Ch.

Untersuchungen zum Trennverhalten in Hydrozyclonen niedriger Trennkorngrößen: Dissertation. Universität Erlangen-Nürnberg. 2001.) (рис. 7б). Для двух используемых аппаратов с диаметрами рабочего цилиндра 25 и 39 мм устойчиво наблюдался максимум Δh при $c_{V,0} = 0.04$. Поведение экспериментальных кривых качественно соответствует поведению кривой глубины увлечения, полученной при численном решении поставленной задачи.

В четвертой главе рассматривается модель классификационного аппарата с инжектором.

Схематично один из способов впрыска воды через инжекционное отверстие в нижней части гидроциклона показан на рис. 8а.

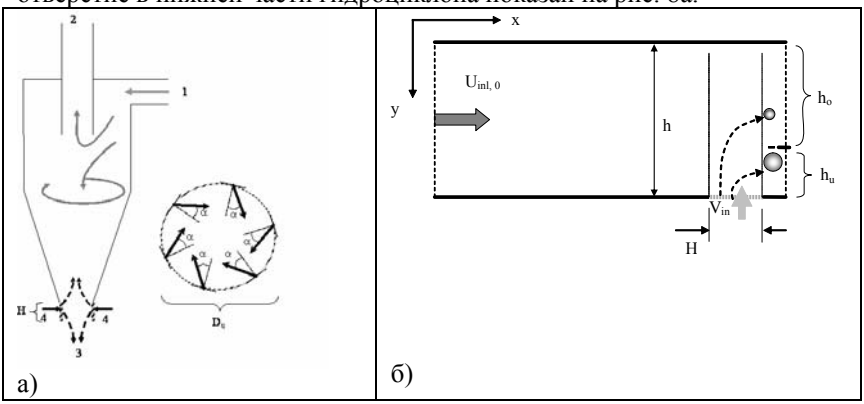

Рисунок 8. а) Схема впрыска воды в нижней части конуса гидроциклона. 1 – входное сопло, 2 – верхний слив, 3 – нижний слив, 4 – инжектор. б) Схема анализируемого классификационного аппарата с инжекцией воды.

В п. 4.1. рассматривается схематичный классификатор, типа гидроциклон (рис. 8б). При моделировании мы отказались от сложной гидродинамики центробежного классификатора, ограничившись простейшим построением скоростного поля, но отражающим основные черты классификационного процесса. На участке длиной H непосредственно перед истечением суспензии из классификатора производится поперечная основному потоку инжекция воды, таким образом, чтобы устремить (в основном мелкие) частицы от стенки вверх. Этого впрыска должно быть достаточно, чтобы «перебросить» мелкие частицы в верхнее выводное сечение. Но впрыск должен быть достаточно слаб, так чтобы более крупные частицы все же были выведены через нижний слив.

Функцию разделения (13) и процесс классификации характеризуют, в основном, следующие параметры:
а) доля мелких частиц в потоке крупных, выгружаемых через нижний слив классификатора (определяется значением сепарационной функции для самой мелкой фракции, T_0); б) параметр $d_j^{[50]}$ - диаметр разделения частиц, поступающих на 50% в нижний слив (т.н. зерно разделения).

В п. 4.2 приводится безразмерный вид поставленной задачи.

Система уравнений изменения концентраций,

$$\frac{\partial \overline{U_{inl}}(\xi)\theta_j}{\partial \xi} + \frac{\partial}{\partial \eta}\left[\left(W_{s,j} + W_{in}\right)Pe_m\theta_j - \frac{\partial \theta_j}{\partial \eta}\right] = 0, \qquad (16)$$

Граничные условия:

$$Pe_m\left(W_{s,j} + W_{in}\right)\theta_j - \frac{\partial \theta_j}{\partial \eta} = 0 \text{ при } \eta = 1,$$

$$Pe_m W_{s,j}\theta_j - \frac{\partial \theta_j}{\partial \eta} = 0 \text{ при } \eta = 0.$$

Условие на входе классификатора: $\theta_j\big|_{\xi=0} = 1$.

Здесь $W_{in} = \dfrac{V_{in}}{V_{St,m}}$.

Модель инжекционной струи имеет следующий вид:

$$W_{in}(\eta) = \begin{cases} 0, \ 0 < \xi \le \overline{L} - H_{in}, \\ -\eta W_{in0}, \ \overline{L} - H_{in} < \xi \le \overline{L} \end{cases} \qquad (17)$$

$$\overline{U_{inl}}(\xi) = \begin{cases} 1, \ 0 < \xi \le \overline{L} - H_{in} \\ 1 + Pe_m W_{in0}\left(\xi - \left(\overline{L} - H_{in}\right)\right), \ \overline{L} - H_{in} < \xi \le \overline{L} \end{cases} \qquad (18)$$

Решение исходной задачи будет определяться следующими параметрами: $Pe_m = \dfrac{hV_{St,m}}{D}$ - параметр Пекле; $W_{in0} = \dfrac{V_{in,0}}{V_{St,m}}$ - отношение скорости инжекции к скорости Стокса для масштабной частицы; $H_{in} = \dfrac{H}{x_m}$ - ширина отверстия для дополнительной инжекции жидкости.

В п. 4.3. представлен анализ численных результатов седиментации частиц суспензии с функцией распределения исходного материала по размерам (14) в классификаторе с инжектором.

Увеличение скорости инжекции ведет к снижению содержания мелких частиц в потоке крупных, выгружаемых через нижний слив классификатора и, следовательно, качество разделения повышается (рис.9). Для случая разжиженной суспензии значения T_0 лежат ниже из-за уменьшения эффекта увлечения мелких частиц крупными. Зависимость зерна разделения от начальной скорости дополнительной инжекции жидкости также показана на рис.9. Возрастание скорости инжекции ведет к увеличению размера зерна разделения, что является нежелательным для эффективного классификационного процесса. Размер зерна разделения меньше для более разжиженных суспензий.

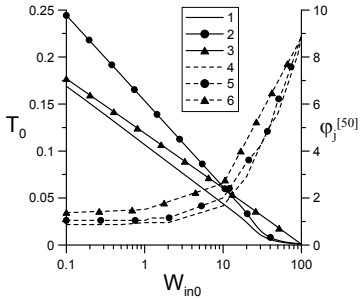

Рисунок 9. Зависимость T_0 (сплошные линии); $\varphi_j^{[50]}$ (пунктирные линии) (кривая 1,4 – $c_{V0} = 0.01$, кривая 2,5 – $c_{V0} = 0.04$, кривая 3,6 – $c_{V0} = 0.1$) от скорости инжекции, $Pe_m = 10$, $m = 1.7$.

Для эффективного разделения частиц также важен оптимальный размер отверстия H_{in} для допольнительной инжекции жидкости в классификатор.

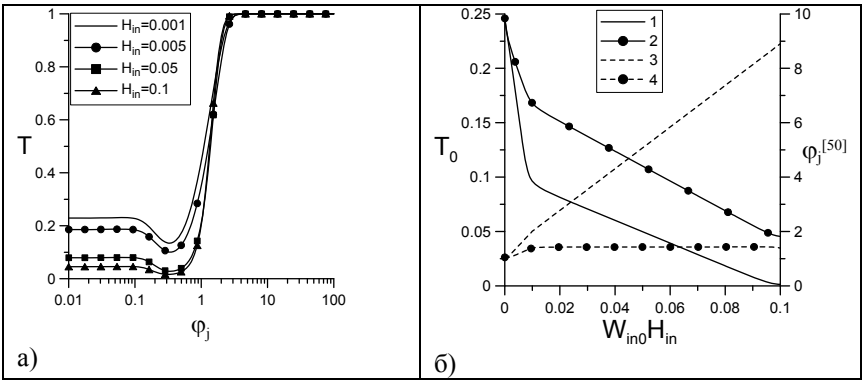

Рисунок 10. а) Зависимость сепарационной функции от размера частиц сечении при различных значениях размера инжекционного отверстия, $W_{in0} = 1,\ c_{V0} = 0.04,\ Pe_m = 10,\ m = 1.7$. б) Зависимость T_0 (кривая 1 – при изменении W_{in0}, кривая 2 – при изменении H_{in}); $\varphi_j^{[50]}$ (кривая 3 – при изменении W_{in0}, кривая 4 – при изменении H_{in}) от объема инжектируемой жидкости.

Увеличение размера отверстия для инжекции (рис.10а) приводит к тому, что содержание мелких частиц в нижнем сливе классификатора снижается, а размер зерна разделения почти не изменяется.

На практике полагают, что количество инжектируемой воды является основным параметром, определяющим эффективность инжекции. На рис. 10б показано поведение характеристик сепарационной кривой в зависимости от количества инжектируемой воды при двух указанных способах его изменения. Видно, что такая характеристика как T_0 качественно одна и та же, но количественно разная при обоих способах варьирования $Q_{in} = W_{in,0} H_{in}$. В то же время $d^{[50]}$ качественно зависит от того, как менялось Q_{in} .

Сравнение вычисленных и измеренных значений T_0 и зерна разделения $d^{[50]}$ (экспериментальные данные (J. Dueck, E. Pikushchak, L. Minkov, M. Galal, Th. Neesse. Simulation of Water Injection in Hydrocyclones // Proceedings of physical separation’09 (Falmouth, UK, June 16-17). 2009. p. 1-13.) показано на рис. 11.

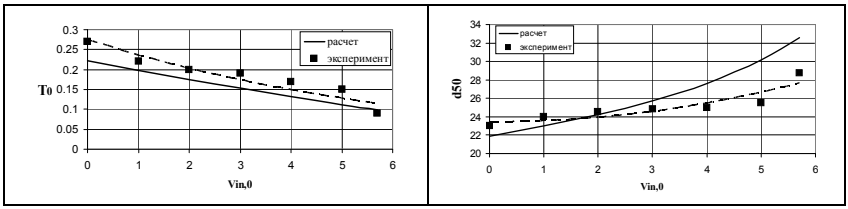

Рисунок 11. Сравнение вычисленных значений T_0 (а), зерна разделения (б) с измеренными значениями в эксперименте в зависимости от скорости инжекции воды.

При численном моделировании поставленной задачи количество фракций бралось равным 51, начальная объемная концентрация частиц твердой фазы $c_{V0} = 0.094$, $S = 9$, $U_{inl,0} = 600$ л/час, $d_{in} = 2.5$ мм, $n = 5$ - количество инжекционных отверстий, $Pe_m = 10$ (высота классификатора $h = 50$ мм, коэффициент турбулентной диффузии $D \approx 10^{-3}$ м^2/с).

Из рис. 11 видно хорошее согласие между расчетными и экспериментальными данными. Тем не менее, увеличение вычисленного значения размера зерна разделения при возрастании скорости инжекции больше, чем в эксперименте. Данное обстоятельство можно объяснить неучетом в численных расчетах разжижения суспензии перед нижним сливом, что приводит к более быстрому оседанию частиц крупных фракций.

В заключении сформулированы основные научные результаты и выводы, полученные в диссертационной работе:

1. На основе построенной физико-математической модели оседания частиц полидисперсной суспензии в тарельчатой центрифуге выявлен безградиентный характер концентрационных профилей, что позволяет использовать формулу $U_{s,i}(r_p,t) = -\frac{r_p}{2}\frac{\Delta \ln c_i(r_p,t)}{\Delta t}$ для экспериментального определения скорости седиментации частиц.

2. В данной работе построена упрощенная модель работы классификационного аппарата. Получено автомодельное решение поставленной задачи. Показано, что на некотором расстоянии от входа в аппарат устанавливается автомодельный профиль концентрации частиц, переходящий к предельному, зависящему лишь от расстояния до стенок. Для крупных частиц в проточном аппарате седиментационный и диффузионный потоки уравновешивают друг

друга на меньшем расстоянии от входа в аппарат, чем для мелких частиц.

3. Показано, что для классификационного аппарата размер зерна разделения и острота разделения растут с увеличением сплит-параметра. Кривая разделения смещается в область более мелких частиц при удлинении аппарата. Качество разделения при этом падает за исключением очень коротких аппаратов.

4. С помощью полуфеноменологической модели увлечения мелких частиц крупными, объяснено аномальное поведение сепарационной кривой при малых значениях размеров частиц, так называемый «fish-hook» эффект. Показано, что глубина «fish-hook» эффекта сепарационной кривой, как функция концентрации частиц на входе, имеет немонотонный характер; глубина «fish-hook» эффекта сепарационной кривой возрастает при увеличении параметра Пекле, длины классификационного аппарата L и уменьшении сплит-параметра S, что находится в согласии с имеющимися экспериментальными данными.

5. Показано, что сепарация в гидроциклоне с дополнительным впрыском воды может быть описана с использованием модифицированной модели поперечно-поточной классификации, содержащей две основные характеристики инжекции – скорость инжектируемой воды и размер сопла инжектора.

6. Показано, что увеличение скорости инжектируемой воды ведет к увеличению зерна разделения и уменьшению минимального значения функции сепарации. Изменение размера сопла инжектора при фиксированной скорости инжектируемой воды влияет лишь на минимальное значение функции сепарации, оставляя неизменным зерно разделения.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Пикущак Е.В. Модель «fish-hook» эффекта в классификационном аппарате / Е.В. Пикущак, И.Г. Дик, Л.Л. Миньков // Физика и химия высокоэнергетических систем: доклады IX Всерос. научно-технической конф. Томск, 2003 г. - Томск: ТГУ, 2003. – С. 39-40.

2. Пикущак Е.В. Моделирование классификационного аппарата для случая слабоконцентрированной суспензии / Е.В. Пикущак // Физика и химия высокоэнергетических систем: материалы научной сессии молодых ученых. Томск, 17-20 марта 2004 г. – Томск: ТГУ, 2004. – С. 51-52.

3. Пикущак Е.В. Исследование основных сепарационных характеристик в классификационном аппарате для упрощенной постановки задачи / И.Г. Дик, Л.Л. Миньков, Е.В. Пикущак // Физика и химия высокоэнергетических систем: доклады XI Всероссийской научно-технической конф. Томск, 08-09 апр. 2005 г. – Томск: ТГУ, 2005. – С. 21-22.

4. Пикущак Е.В. Исследование влияния начальной концентрации твердой фазы на «fish-hook» эффект в классификационном аппарате / Е.В. Пикущак // Физика и химия высокоэнергетических систем: сб. материалов первой Всероссийской конф. молодых ученых. Томск, 26-29 апр. 2005 г. – Томск: ТГУ, 2005. – С. 213-215.

5. Пикущак Е.В. Седиментация бидисперсной суспензии в тарельчатой центрифуге / Е.В. Пикущак // Наука. Технологии. Инновация: материалы всероссийской научной конф. молодых ученых. Новосибирск, 08-11 дек. 2005 г. – Новосибирск: НГТУ, 2006. - Часть 1. – С. 159-161.

6. Пикущак Е.В. Влияние концентрации твердой фазы полидисперсной суспензии на ускоренное оседание мелких частиц в тарельчатой центрифуге / Е.В. Пикущак // Физика и химия наноматериалов: сб. материалов Международной школы-конф. молодых ученых. Томск, 13-16 дек. 2005 г. – Томск: ТГУ, 2005. – С. 431-433.

7. Пикущак Е.В. О сепарационных кривых проточного классификационного аппарата конечной длины / И.Г. Дик, Л.Л. Миньков, Е.В. Пикущак // Инженерно-физический журнал. – 2006 – Т. 79, № 3 - С. 171-178.

8. Пикущак Е.В. Эффекты полидисперсности при оседании суспензии в тарельчатой центрифуге / Е.В. Пикущак // Физика и химия высокоэнергетических систем: сб. материалов II Всероссийской конф. молодых ученых. Томск, 04-06 мая 2006 г. – Томск: ТГУ, 2006. – С. 265-268.

9. Пикущак Е.В. Коллективные процессы при седиментации частиц в плотной полидисперсной суспензии / И.Г. Дик, Л.Л. Миньков, Е.В. Пикущак // Аннотации докладов IX Всероссийского съезда по теоретической и прикладной механике. Нижний Новгород, 22-28 авг. 2006 г. – Нижний Новгород: НГУ им. Н.И. Лобачевского, 2006. - Том II – С. 73-74.

10. Пикущак Е.В. Обоснование метода измерения скорости седиментации частиц отдельных фракций в плотной полидисперсной суспензии / Л.Л. Миньков, Е.В. Пикущак, И.Г. Дик // Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики: материалы 5 Всероссийской научной конференции. Томск, 03-05 окт. 2006 г. – Томск: ТГУ, 2006. – С. 394-395.

11. Пикущак Е.В. Возможности прикладного пакета программ FLUENT для расчета двухфазных течений в каналах сложных форм / Е.В. Пикущак // Физика и химия высокоэнергетических систем: сб. материалов 3 Всероссийской конф. молодых ученых. Томск, 24-27 апр. 2007 г. – Томск: ТМЛ-Пресс, 2007. – С. 200-202.

12. Пикущак Е.В. Моделирование “fish-hook” эффекта в классификационном аппарате / И.Г. Дик, Л.Л. Миньков, Е.В. Пикущак // Инженерно-физический журнал. – 2007. - Т. 80, № 1. - С. 60-69.

13. Пикущак Е.В. Влияние функции распределения частиц по размерам в полидисперсной суспензии на сепарационный процесс в классификационном аппарате / И.Г. Дик, Л.Л. Миньков, Е.В. Пикущак // Вестник ТГУ. Математика и механика. – 2008. - № 1. – С. 63-71.

14. Пикущак Е.В. Моделирование оседания частиц полидисперсной суспензии в тарельчатой центрифуге / Е.В. Пикущак // Физика и химия

высокоэнергетических систем: сб. материалов IV Всероссийской конф. молодых ученых. Томск, 22-25 апр. 2008 г. – Томск: ТМЛ-Пресс, 2008. – С. 272-273.

15. E.V. Pikushchak. Origin of the “Fish-hook” effect / J.G. Dueck, L.L. Minkov, E.V. Pikushchak, Th. Neese // Transport Phenomena in Multiphase System, HEAT: proceeding of the 5th International conference. Bialystok, June 30–July 3, 2008. - Bialystok, Poland, 2008. - P. 205-212.

16. Пикущак Е.В. Упрощенная модель классификатора с дополнительны впрыском жидкости на выходе / Е.В. Пикущак, И.Г. Дик, Л.Л. Миньков // Известия ВУЗов. Физика. – 2008. - Т. 51, № 8/2 - С. 201-206.

17. Е.В. Пикущак. Особенности течения в гидроциклоне со встроенным инжектором / Л.Л. Миньков, И.Г. Дик, М. Джалал, Е.В. Пикущак // Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики: материалы VI Всерос. науч. конф. Томск, 30 сент.-02 окт. 2008 г. – Томск: ТГУ, 2008. – С. 381-383.

18. Пикущак Е.В. Моделирование седиментации частиц полидисперсной суспензии в тарельчатой центрифуге / Л.Л. Миньков, Е.В. Пикущак, И.Г. Дик // Теплофизика и аэромеханика. – 2009. - Т. 16, № 1. - С.79-88.

19. Пикущак Е.В. Моделирование изменения характеристик разделения классификатора путем инжекции воды в аппарат / И.Г. Дик, Е.В. Пикущак, Л.Л. Миньков // Теплофизика и аэромеханика. – 2009. - Т. 16, № 2. - С.261-273.

20. E. Pikushchak. Simulation of Water Injection in Hydrocyclones / J. Dueck, , E. Pikushchak, L. Minkov, M. Galal, Th. Neesse // Physical separation’09: proceedings of International conf. Falmouth, UK, June 16-17 2009. - P. 1-13.