

ФАНО РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ

ИНСТИТУТ ГИДРОДИНАМИКИ
им. М.А. Лаврентьева

СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

Проспект Академика Лаврентьева, 15, Новосибирск, 630090
Для телеграмм: Новосибирск-90, Гидродинамика
Тел./факс: (8-383) 333-16-12. E-mail: igil@hydro.nsc.ru

23.11.2016 № 15320 – 01/2149

На № _____

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИГиЛ СО РАН

д.ф.-м.н., профессор РАН

Головин С.В.



2016 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу Евсеева Николая Сергеевича «Исследование гидродинамики и процессов классификации мелкодисперсных порошков в воздушно-центробежных аппаратах», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

Актуальность темы выполненной работы

На сегодняшний день мелкодисперсные порошки применяются во многих отраслях промышленности. Основная проблема порошковой технологии связана с получением мелкодисперсных порошков с высокой эффективностью разделения их на заданные фракции по размеру. Применение вихревых камер, сепараторов, воздушно-центробежных классификаторов (ВЦК) для разделения порошковых материалов на фракции по размеру частиц, является наиболее перспективным. К настоящему времени проведено недостаточно фундаментальных исследований в области двухфазных закрученных течений с точки зрения процессов сепарации и фракционной классификации частиц по размерам, и актуальным является проведение фундаментальных исследований, касающихся вопросов аэродинамики закрученных турбулентных течений, а также процессов сепарации и классификации частиц по размерам в воздушно-центробежных классификаторах. Представленные в работе математические модели динамики двухфазного закрученного турбулентного течения в сепарационных элементах ВЦК помогут более подробно изучить сложный физический процесс фракционного разделения твёрдых частиц по размерам и разработать новые идеи для совершенствования оригинальных способов и конструкций воздушно-центробежных классификаторов.

В связи с вышесказанным, можно утверждать, что **научная проблема**, сформулированная в диссертации, и диссертационная работа в целом, направленная на изучение

процессов классификации мелкодисперсных порошков в воздушно-центробежных аппаратах, несомненно, является **актуальной**.

Структура и содержание работы.

Диссертационная работа включает в себя введение, четыре главы, заключение, список литературы и приложение. Работа представлена на 139 страницах, содержит 41 рисунок. Список литературы содержит 111 наименований.

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, изложены цели исследования, отражены теоретическая и практическая значимость, новизна представленных результатов, представлены методы исследования, приведены положения, выносимые автором на защиту, раскрыта структура диссертации.

Первая глава содержит обзор научно-технической литературы, посвященной исследованию аэродинамики одно- и двухфазных закрученных турбулентных потоков, нестационарных и периодических течений газовых сред, а также литературы, касающейся вопросов сепарации и классификации частиц по размерам в пневматических центробежных аппаратах. Показано, что на сегодняшний день проведено недостаточно фундаментальных исследований в области двухфазных закрученных течений с точки зрения процессов сепарации и фракционной классификации частиц по размерам.

Вторая глава отражает физическую и математическую постановки задач осесимметричных закрученных турбулентных течений несущей среды в сепарационных элементах ВЦК. В разделе рассматриваются новые постановки задач для закрученного турбулентного течения в предложенной модифицированной сепарационной зоне ВЦК при установившемся режиме течения, а также в сепарационной камере ВЦК, разработанного в НИ ТГУ, при нестационарном и периодическом режиме течения.

Оригинальным в физической постановке задачи для закрученного турбулентного течения в модифицированной сепарационной зоне ВЦК является применение разделительного кольца на выходе из камеры. Положение выходного кольца оказывает влияние на граничный размер разделяемых дисперсных частиц. Вторая особенность – расширение выходного канала сепарационной зоны, которое приводит к уменьшению концентрации дисперсной фазы, и положительно влияет на процесс сепарации. Данная конструкция сепарационной зоны позволяет снизить содержание крупного продукта в мелкой фракции, получив более однородный по составу продукт, что повышает эффективность процесса фракционного разделения частиц.

Новым в физической постановке для закрученного турбулентного течения в вихревой камере ВЦК ТГУ, представляющей собой канал, расширяющийся от периферии к центру, и, как частный случай, плоскопараллельные дисковые элементы, является применение нестационарного периодического режима течения с колебаниями радиальной, или окружной компоненты скорости на входе в область сепарации. Данный режим течения позволяет сократить время нахождения частиц граничного размера в сепарационной ка-

мере центробежного аппарата и уменьшить вероятность появления областей с повышенной концентрацией частиц граничного размера.

Моделирование закрученного турбулентного течения в представленных сепарационных элементах ВЦК производится с использованием системы уравнений Рейнольдса, которые, в представленной работе, замыкаются с помощью « $k-\omega$ » модели турбулентности Уилкокса. В работе система уравнений Рейнольдса представлена в цилиндрической системе координат и ортогональной криволинейной системе координат вращения. Численное решение полученной системы уравнений, описывающей турбулентное закрученное течение, проводится в переменных «скорость-давление» методом расщепления полей скорости и давления. Уравнения решаются известным обобщенным неявным методом переменных направлений в « Δ -форме». Конвективные и диффузионные слагаемые уравнений переноса расписываются при помощи известной экспоненциальной схемы.

В третьей главе отражены результаты численных исследований однофазного закрученного турбулентного течения в исследуемых сепарационных камерах.

В данном разделе представлены новые оригинальные результаты исследования аэродинамики закрученного турбулентного течения в представленных камерах пневматического центробежного аппарата. Рассмотрено влияние режимных и геометрических характеристик на распределения составляющих вектора скорости несущего потока газа в сепарационных элементах. Проведено исследование влияния периода колебаний, амплитуды на движение мелкодисперсных твёрдых частиц в вихревой камере центробежного классификатора. В результате проведенных численных расчетов были получены поля скоростей несущей среды и кинетической энергии турбулентности. Для модифицированной зоны ВЦК исследовался неизотермический режим течения несущей среды.

Данная глава содержит исследования на достоверность численного решения закрученного турбулентного потока в сепарационных элементах пневматических центробежных аппаратов, которые включают в себя тестовые расчеты, сравнения с известными экспериментальными данными и работами других исследователей.

В четвертой главе представлены новые результаты численного расчёта движения твёрдых мелкодисперсных частиц в рассматриваемых сепарационных камерах при установившемся, нестационарном и периодическом режимах течения, а также результаты расчёта процесса классификации мелкодисперсных порошков в рассматриваемых сепарационных камерах. В разделе показано влияние турбулентной диффузии на миграцию твёрдых частиц в сепарационных камерах ВЦК.

Для оригинальной модифицированной сепарационной зоны ВЦК рассчитаны кривые разделения Тромпа, определяющие эффективность процесса классификации частиц, а также исследована теплоотдача между твердыми частицами и несущей средой. В данной главе показано, что предложенная сепарационная камера позволяет существенно снизить содержание крупного продукта в мелкой фракции, что приводит к повышению эффективности процесса разделения на 10-20% в зависимости от режимных параметров.

Для сепарационных областей, представляющих собой плоскопараллельные дисковые элементы и расширяющийся к центру канал, найдены траектории движения твёрдых частиц различных размеров в различных точках запуска с учетом турбулентной диффузии при стационарном режиме течения. Анализ проведённых численных исследований показал, что использование периодического колебательного режима движения радиальной или окружной составляющих вектора скорости несущего потока газа, позволяет уменьшить время нахождения частиц, близких к граничному размеру в рабочей зоне аппарата. Это, в свою очередь, приводит к повышению эффективности процесса классификации, что согласуется с результатами проведённых экспериментов.

Научная новизна работы

В работе впервые проведено моделирование и получены новые результаты для установившегося закрученного турбулентного течения, а также впервые проведён расчёт двухфазного закрученного турбулентного течения с учётом влияния турбулентных пульсаций несущей среды на траектории движения твёрдых частиц в оригинальной модифицированной сепарационной зоне ВЦК. На основе численных данных построены кривые разделения Тромпа, характеризующие эффективность процесса классификации частиц по размерам. Показано, что разработанная модифицированная сепарационная зона позволяет повысить эффективность процесса фракционного разделения, за счёт уменьшения доли крупного продукта в мелкой фракции. Разработана математическая модель нестационарного и периодического закрученного турбулентного течения в вихревой камере, представлены новые результаты по влиянию амплитуды и частоты колебаний и других параметров на динамику твёрдой примеси в вихревой камере ВЦК. Представлены новые результаты расчёта динамики мелкодисперсных частиц в зоне сепарации ВЦК с учётом влияния турбулентных пульсаций несущей среды на распределение скоростей и траекторий движения твёрдой фазы. Показано, что колебательный режим расхода несущей среды позволяет уменьшить время нахождения частиц граничного размера в сепарационной зоне и увеличить эффективность процесса классификации.

Обоснованность и достоверность научных положений, сформулированных в диссертации, подтверждается применением апробированных вычислительных методов, проведением тестовых расчётов, сравнением результатов расчётов с аналитическим решением и известными экспериментальными данными, а также сравнением полученных результатов с результатами других исследований.

Теоретическая и практическая значимость результатов диссертационной работы

Полученные численные результаты двухфазных закрученных потоков могут применяться при исследовании процессов сепарации и классификации частиц порошковых материалов по размеру, при оптимизации геометрических и режимных характеристик существующих ВЦК, и быть полезны при разработке новых способов и конструкций пнев-

матических центробежных аппаратов. Представленные в диссертации результаты могут быть использованы при моделировании установившегося, нестационарного и периодического режимов течения двухфазных закрученных турбулентных потоков в сепараторах, классификаторах, циклонах и других центробежных аппаратах. Результаты исследования, представленные в диссертации, использовались при выполнении гранта РФФИ №13-08-00367 - А «Моделирование нестационарного двухфазного закрученного турбулентного потока в пневматических центробежных аппаратах». Результаты численных расчётов диссертационного исследования нашли применение при разработке аппаратов воздушно-центробежного типа и систем пылеулавливания в ООО «НПО Мипор» (г. Томск), а также в работах в рамках договора между физико-техническим факультетом ТГУ (г. Томск) и НИИПММ ТГУ (г. Томск), что подтверждается актами внедрения методик расчёта. Результаты численного исследования способствовали подаче заявки на изобретение № 2015131388. Получено положительное решение о выдаче патента РФ от 30.05.2016.

Замечания

1. В работе для описания турбулентных течений применяется модель Буссинеска, что позволяет сократить число неизвестных (рейнольдсовских напряжений) с 6 до одного коэффициента «кажущейся» вязкости. При этом в соотношении (2.2.16) для её определения отсутствует физическое и математическое определение величины K .
2. В работе рассматриваются только шарообразные частицы и не отражено влияние формы частиц на процесс разделения.
3. В работе не показано влияние изменения поля температуры несущей среды на процесс классификации частиц.

Заключение

Диссертация Н.С. Евсеева является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи, касающейся динамики установившегося, нестационарного и периодического двухфазного закрученного турбулентного течения и процессов фракционного разделения частиц в воздушно-центробежном классификаторе, имеющей значение для развития прикладной аэромеханики.

Результаты проведенной автором научной работы можно охарактеризовать как теоретически обоснованное исследование, представляющее интерес для специалистов в указанной области. Полученные автором результаты достоверны, выводы и заключения обоснованы.

Автореферат выполнен в соответствии с предъявляемыми требованиями и **соответствует** основному содержанию диссертации.

Результаты исследований, представленных в диссертации, опубликованы в 20 печатных работах, в том числе 5 статей в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук (из них 1 статья в журнале, ин-

дексируемом Scopus, 1 статья в журнале, переводная версия которого индексируется WebofScience), 1 статья в зарубежном электронном научном журнале, 1 статья в российском научном журнале, 13 публикаций в сборниках материалов научного семинара, международных и всероссийских (в том числе с международным участием) научных и научно-практических конференций. Опубликованные работы отражают основное содержание диссертации.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук считает, что диссертационная работа «Исследование гидродинамики и процессов классификации мелкодисперсных порошков в воздушно-центробежных аппаратах» отвечает требованиям п.9 «Положения о присуждении Ученых степеней», предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Евсеев Николай Сергеевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы.

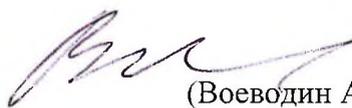
Диссертационная работа, автореферат и отзыв обсуждены и одобрены на научном семинаре «Прикладная гидродинамика» Отдела прикладной гидродинамики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук (протокол № 23 от «16» ноября 2016 г.).

Отзыв составили

Заведующий лабораторией вихревых движений жидкости и газа,
доктор физико-математических наук
(01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы)
Раб.тел.: (383)3332589
Mail: nikulin@hydro.nsc.ru

 Никулин В.В.
(Никулин Виктор Васильевич)

Г.н.с. лаборатории прикладной и вычислительной гидродинамики,
доктор физико-математических наук
(01.01.07 – Вычислительная математика),
профессор
Раб.тел.: (383)3331782
Mail: voevodin@hydro.nsc.ru

 Воеводин А.Ф.
(Воеводин Анатолий Федорович)