

## **Отзыв официального оппонента**

на диссертационную работу Евсева 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 диссертации.**

В последние годы достаточно популярным стал термин «наукоемкие» технологии. Такими принято называть технологии, основой которых являются результаты фундаментальных экспериментальных и теоретических исследований, без которых создание «наукоемких» технологий было бы невозможно. Доминирование на мировых рынках изделий и продуктов промышленных производств группы всем известных государств (Япония, Германия, Южная Корея, Франция) во многом обусловлено работой именно в этом направлении. В России до последнего времени достижений в разработке «наукоемких» технологий, к сожалению, пока мало. Поэтому Президент страны В.В. Путин неоднократно обращался и к ученым России и к руководству РАН с призывами усилить работу по созданию «прорывных» технологий.

Одной из тенденций развития современной промышленности является использование мелкодисперсных порошков различных материалов как полуфабрикатов в определенных технологических циклах. И несколько последних десятилетий исследователи многих стран ведут работы по созданию теории процессов изготовления и применения порошковых материалов (диспергирование, измельчение, классификация, сушка, смешение, компактирование и др.). Но пока нет оснований для вывода о том, что такая теория разработана. Так в частности не разработаны в полной мере теоретические основы процессов классификации мелкодисперсных порошков в воздушно-центробежных аппаратах.

Диссертация Евсева Н. С. посвящена моделированию установившегося, нестационарного и периодического закрученного турбулентного течения и процессов классификации частиц по размерам в сепарационных элементах пневматических центробежных аппаратов.

Пневматические центробежные аппараты широко используются в промышленности для получения тонкодисперсных частиц с заданным гранулометрическим составом. Создание новых более эффективных центробежных классификаторов невозможно без фундаментальных исследований аэродинамики двухфазных закрученных турбулентных течений в сепарационных элементах центробежных аппаратов и процессов разделения частиц по размерам. Тема диссертации Н. С. Евсева, несомненно, является актуальной, так

как в диссертационной работе рассматриваются математические модели закрученного турбулентного течения в вихревых камерах центробежного аппарата при установившемся, нестационарном и периодическом режимах течения гетерогенных сред и анализируются процессы классификации фракционного разделения частиц.

### **Общая характеристика работы.**

Работа состоит из введения, четырех глав, списка использованных источников, включающего 111 наименований, и приложения. Текст диссертационной работы изложен на 139 страницах и содержит 41 рисунок.

*Во введении* обоснована актуальность диссертационного исследования, сформулированы цели работы, ее новизна, значимость полученных результатов, приведены положения, выносимые на защиту.

*В первой главе* приведен аналитический обзор литературы, по проблеме аэродинамики закрученных турбулентных течений, а также процессов сепарации и классификации частиц по размерам в воздушно-центробежных классификаторах. Показана перспективность использования пневматических центробежных аппаратов порошковой технологии.

*Во второй главе* приведены физическая и математическая постановки задач закрученных турбулентных течений несущей среды в рабочих зонах центробежного классификатора. Глава включает новую постановку задачи для закрученного турбулентного течения в оригинальной модифицированной сепарационной камере центробежного аппарата, конструкция которой позволяет увеличить эффективность процесса классификации частиц по размерам, а также использовать дополнительный параметр, позволяющий влиять на граничный размер частиц и, как следствие, на «остроту» сепарации.

В этой же главе обоснована возможность применения периодического режима течения, являющегося следствием управляемых колебаний расхода газовой среды во входном сечении области сепарации с целью воздействия на граничные размеры твердых частиц. Результатом такого воздействия является уменьшения времени пребывания таких частиц в сепарационной зоне и, следовательно, снижения вероятности появления областей с повышенной концентрацией твердой фазы.

Этот раздел диссертации также содержит описание методов численного решения поставленных во введении задач закрученного турбулентного течения несущей среды в вихревых камерах. В диссертации численное моделирование закрученного турбулентного потока основывалось на решении системы уравнений Рейнольдса с применением модели турбулентности Уилкокса. Решение основной системы уравнений с соответствующими краевыми условиями проводилось методом физического расщепления полей скорости и давления. Уравнения переноса импульса, кинетической энергии турбулентных пульсаций и

удельной скорости диссипации кинетической энергии турбулентности решались при помощи известного обобщенного неявного метода переменных направлений с использованием метода контрольного объема на разнесенной, шахматной разностной сетке. Диффузионные и конвективные слагаемые уравнений переноса расписывались с применением известной экспоненциальной схемы.

*В третьей главе* приведены полученные автором диссертации результаты численного решения задачи закрученного турбулентного потока несущей среды для оригинальной модифицированной области сепарации и вихревой камеры ВЦК, разработанной в НИ ТГУ. На основании выполненных численных исследований автором диссертационной работы установлены основные закономерности закрученного турбулентного установившегося и периодического течений. Показано влияние режимных и геометрических параметров на аэродинамическую картину течения в рассматриваемых сепарационных камерах. В диссертационной работе также получены распределения радиальной, окружной и аксиальной составляющих вектора скорости несущей среды и вычислены характеристики турбулентности. Для случая периодического режима турбулентного течения, возникающего за счет колебаний расхода несущей среды, показано характерное влияние периода и амплитуды колебаний на картину течения. В этом же разделе на основе тестовых исследований и сравнений с опытными и численными данными других авторов показана достоверность полученных Н.С. Евсеевым результатов численного моделирования закрученного турбулентного течения несущей среды в сепарационных камерах центробежного аппарата.

*В четвертой главе* приведены новые результаты численного решения задачи движения тонкодисперсных твердых частиц в исследуемых сепарационных элементах классификатора при установившемся, нестационарном и периодическом режимах течения несущей среды и результаты исследования процесса разделения частиц по размерам. Автором установлено влияния пульсаций несущей среды и местоположения во входном сечении твердой частицы на траектории движения последних, что существенно сказывается на снижении «остроты» сепарации. Для оценки эффективности процесса фракционного разделения частиц построены кривые разделения, которые показали, что модифицированная геометрия области сепарации, позволила уменьшить долю крупного продукта разделения в мелкой фракции. В работе также установлено, что применение периодического колебательного режима течения способствует уменьшению времени пребывания частиц граничного размера в зоне сепарации. Последнее препятствует образованию «жгутов» из полидисперсных частиц и увеличивает «остроту» сепарации частиц.

*В заключении* диссертации приведены выводы по работе.

### **Общая методология и методика исследования.**

Методика исследования, применяемая в рецензируемой диссертации, включает в себя совокупность теоретических подходов к изучению установившихся и нестационарного (в том числе и периодического) закрученного турбулентного течения в сепарационных камерах центробежных аппаратов. Автор диссертации модернизировал известные постановки задач о движении гетерогенных сред в воздушно-центробежных аппаратах. Им разработаны математические модели процессов движения гетерогенных сред и разделения по фракциям частиц в модифицированных сепарационных камерах центробежных аппаратов. Автор диссертации использовал хорошо апробированные при решении большого числа достаточно сложных задач динамики вязкой жидкости модели турбулентности и численные методы, показавшие в последние годы высокую работоспособность и надежность при решении нелинейных задач математической физики.

*Достоверность* полученных в диссертационной работе результатов подтверждается применением апробированных вычислительных методов, проведением тестовых расчетов, сравнением полученных данных с известными численными и экспериментальными результатами.

### **Научная новизна полученных результатов.**

Н.С. Евсеев получил группу результатов теоретических исследований соответствующих критерию новизны. Наиболее значимыми, по мнению оппонента, следующие.

*Впервые* проведено моделирование установившегося закрученного турбулентного потока в оригинальной сепарационной камере. Для выбранной геометрии выполнено моделирование траекторий частиц с оценкой влияния турбулентных пульсаций несущей газовой среды и показано, что предложенная сепарационная зона увеличивает «остроту» процесса фракционного разделения частиц за счет сокращения доли крупной фракции в мелком продукте разделения. Автором диссертации проведено моделирование нестационарного и периодического закрученного турбулентного течения в сепарационном элементе и установлены *новые* закономерности по влиянию частоты и амплитуды колебаний на движение частиц в области сепарации. Также показано, что периодический колебательный режим течения несущей среды сокращает время пребывания граничного размера частиц в сепарационной камере, что способствует минимизации размеров областей с повышенной концентрацией твердых частиц, увеличивая «остроту» сепарации.

### **Значимость результатов диссертационной работы для науки и практики.**

Автором диссертационной работы получены новые результаты по аэродинамике установившегося и периодического закрученного турбулентного течения, которые можно

квалифицировать как новое решение научной задачи, имеющей существенное значение для теории закрученных гетерогенных потоков.

Оценка турбулентной диффузии частиц в закрученном турбулентном потоке несущей среды, приведенная автором, может найти применение при изучении процессов сепарации и классификации частиц по размерам в технологиях производства порошков материалов многих отраслей промышленности (химической, строительных материалов, машиностроения и др.).

Результаты диссертационного исследования могут быть полезны при оптимизации рабочих параметров действующих центробежных установок, а также при совершенствовании новых аппаратов центробежного типа.

Результаты диссертации нашли применение при разработке аппаратов воздушно-центробежного типа в ООО «НПО Мипор» (г. Томск), и в рамках договора между физико-техническим факультетом НИ ТГУ (г. Томск) и НИИ прикладной математики и механики ТГУ (г. Томск), при выполнении гранта РФФИ №13-08-00367 - А «Моделирование нестационарного двухфазного закрученного турбулентного потока в пневматических центробежных аппаратах».

На основе результатов численных исследований автором была подана заявка на изобретение № 2015131388 и получено положительное решение о выдаче патента РФ от 30.05.2016.

*Автореферат* диссертации полностью отражает ее содержание, научную новизну представленных исследований, результаты и выводы.

Текст рукописи и автореферата написаны правильным русским языком. Рукопись и автореферат диссертации хорошо иллюстрированы.

По материалам диссертации Евсеева Н. С. опубликовано 20 работ, в том числе 5 статей в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук (из них 1 статья в журнале, индексируемом Scopus, 1 статья в журнале, переводная версия которого индексируется Web of Science). Результаты диссертационной работы прошли апробацию на конференциях всероссийского и международного уровней.

По работе имеются следующие замечания.

1. Проблемами классификации мелкодисперсных порошков занимались исследователи многих университетов и институтов РАН. В списке литературы приведены не все авторы, считающие, что они достигли значимых результатов в этой области. Кроме того в тексте рукописи недостаточно конкретно описаны признаки того, чем

отличаются постановки задач автора диссертации от известных. И это, наверное, главное – чем конкретно отличаются результаты исследований автора диссертации от полученных другими учеными.

2. Не приведена методика выбора численных значений кинетической энергии турбулентности и турбулентной вязкости на входе в сепарационную камеру. В тоже время эти параметры во многом определяют интенсивность протекающих в дальнейшем процессов классификации в условиях существенно турбулентного течения.
3. В рецензируемой диссертации достаточно фундаментально исследуются процессы миграции мелкодисперсных частиц в сепарационной камере, и анализируется влияние группы значимых факторов. Но из рассмотрения почему-то исключен анализ влияния конфигурации частиц (коэффициента сопротивления) на характеристики исследуемых процессов классификации. В реальных технологиях частицы не являются сферами, а представляют собой, как правило, неправильные многогранники. Соответственно, их коэффициент сопротивления может значительно отличаться от коэффициента сопротивления сферы.
4. В диссертационной работе не исследовано влияние концентрации твердых частиц на процесс фракционной классификации, хотя этот фактор может играть важную роль во многих практически значимых случаях.

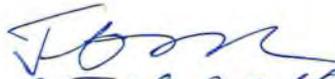
Сформулированные замечания не снижают высокий уровень оценки представленной Евсеевым Н. С. диссертационной работы.

#### **Заключение.**

Диссертационная работа Евсеева Николая Сергеевича «Исследование гидродинамики и процессов классификации мелкодисперсных порошков в воздушно-центробежных аппаратах» представляет собой законченную научную квалификационную работу, выполненную на высоком научном уровне. Диссертация соответствует паспорту специальности 01.02.05, а именно пунктам: 3 – «Ламинарные и турбулентные течения», 6 – «Течения многофазных сред (газожидкостные потоки, пузырьковые среды, газовзвеси, аэрозоли, суспензии и эмульсии)», 18 – «Аналитические, асимптотические и численные методы исследования уравнений кинетических и континуальных моделей однородных и многофазных сред (конечно-разностные, спектральные, методы конечного объема, методы прямого моделирования и др.)». По содержанию, объему выполненных исследований, научной и практической значимости результатов диссертационная работа полностью соответствует требованиям «Положения о присуждении ученых степеней» (п. 9), предъявляемым к кандидатским диссертациям на соискание ученой степени кандидата

физико-математических наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы, а ее автор, Евсеев Николай Сергеевич, заслуживает присуждения искомой ученой степени.

Официальный оппонент,  
Заведующий кафедрой теоретической  
и промышленной теплотехники  
Федерального государственного автономного  
образовательного учреждения высшего образования  
Национального исследовательского  
Томского политехнического университета,  
доктор физико-математических наук,  
профессор

  
25.11.2016

Кузнецов Гений Владимирович

Адрес: 634050, г. Томск, пр. Ленина, д.30,  
ФГАОУ ВО НИ ТПУ  
E-mail: [marisha@tpu.ru](mailto:marisha@tpu.ru)  
Сайт: <http://tpu.ru/>  
тел.: 8(3822)606-248

Подпись Г.В. Кузнецова удостоверяю:

Ученый секретарь Национального  
исследовательского Томского  
политехнического университета





Ананьева Ольга Афанасьевна