

В диссертационный совет Д 212.079.02 при  
ФГБОУ ВО «Казанский национальный  
исследовательский технический университет  
им. А.Н. Туполева-КАИ»

420111, г. Казань, ул.К.Маркса, д.10

**ОТЗЫВ**

официального оппонента на диссертационную работу  
Булова Артема Сергеевича «Численное исследование двухфазного  
закрученного течения в прямоточном циклоне», представленную на  
соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности  
01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

**Актуальность работы.** В большинстве случаев для промышленной очистки газов от пыли и жидких частиц применяются циклоны. Область их применения весьма широка и охватывает авиационную технику, добывающую промышленность, энергетику, химическую, нефтехимическую, пищевую и смежные отрасли промышленности. К сожалению существующие в настоящее время методики расчета циклонов основываются на эмпирических формулах, справедливых только для значений конструктивных и режимных параметров, при которых они получены.

С широким развитием в настоящее время компьютерных методов расчета сложных многофазных течений сред появилась возможность создания надежной и универсальной методики расчета циклонных аппаратов. В связи с этим, актуальность представленной работы не вызывает сомнений.

**Целью** диссертационной работы Булова А.С. является разработка метода расчета течения и разделения двухфазной смеси газ–дисперсные частицы в прямоточных циклонов на основе их численных и экспериментальных исследований.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературных источников, включающего 104 наименования.

**В первой главе** представлен обзор областей применения пылеочистительных устройств, а также существующих способов и конструктивных решений для очистки газов от взвешенных в них частиц. Автором обоснована предпочтительность применения прямоточных циклонов, обладающих **повышенной эффективностью**

стью, сравнительно малыми гидравлическим сопротивлением и габаритными размерами, простотой конструкции, работающих при высоких скоростях газа. Рассмотрены основные методы расчета циклонов и отмечено, что в настоящее время наиболее перспективным является использование численных методов решения с помощью современных программных продуктов, в частности ANSYS Fluent. В этой же главе сформулированы конкретные задачи исследования.

**Вторая глава** содержит описание численных методов расчета, реализованных в используемом автором программном продукте ANSYS Fluent. Рассмотрены варианты дискретизации и алгебраизации дифференциальных уравнений, модели турбулентности, описаны основные методы описания поведения дисперсной фазы. Отмечено, что выбранный пакет удовлетворяет потребностям автора при расчете двухфазного течения в прямоточном циклоне.

**Третья глава** посвящена описанию экспериментального стенда и расчетной схемы. В результате анализа достоинств и недостатков различных конструкций завихрителей для закрутки потока в циклоне был выбран аксиальный завихритель. Рабочий участок установки представлял собой горизонтальный прямоточный циклон диаметром 80 мм и длиной 3,5 калибра. В качестве дисперсной фазы использовались тальк с диаметром частиц менее 25 мкм и песок с диаметром частиц менее 250 мкм. Численное моделирование проводилось с помощью программного комплекса ANSYS Fluent.

**В четвертой главе** представлены результаты численного исследования структуры потока и разделения двухфазной смеси в прямоточном циклоне. Сравнение профилей скорости, полученных при использовании различных моделей турбулентности, показало их близкое совпадение. В связи с этим для расчетов была выбрана модель RNG как наименее затратная по использованию компьютерных ресурсов. Исследовано влияние формы частиц на эффективность очистки газа. Получено хорошее соответствие расчетной и экспериментальной эффективностей для более крупных частиц песка, чего не наблюдается для мелких частиц талька. Численным путем получены значения эффективности очистки и радиальные профили осевой и окружной компонент скорости при различных перепадах давления в циклоне.

Рассчитаны поля концентрации частиц в проточной части циклона, в бункере и сепарационной щели. Показано, что применение рециркуляции газа из бункера на вход циклона позволяет повысить эффективность очистки газа.

Представлены результаты численного исследования структуры течения в прямоточном циклоне. Показаны радиальные и продольные профили избыточного статического давления на оси и стенки трубы. Получены данные об изменении величины и положения максимума тангенциальной скорости по длине циклона и при различных степенях закрутки потока, определены величины отставания частиц от течения газа.

Разработана методика определения наименьшего диаметра частиц, которые способен отделить прямоточный циклон. Выявлены условия попадания частицы из бункера на вход циклона, а также влияние начального радиуса положения частицы на ее сепарационную способность. Определено влияние степени закрутки потока, диаметра вихревой трубы, плотности несущей фазы и начальных скоростей частиц на эффективность очистки и гидравлическое сопротивление циклона.

Выводы диссертации являются обоснованными и отражают основные результаты, полученные соискателем.

**Научная новизна работы** заключается в том, что в результате численного решения уравнений движения для двухфазного закрученного потока получена информация по структуре течения фаз в прямоточном циклоне. Определено влияние на степень очистки газа от дисперсных частиц геометрических и режимных параметров в циклоне, а также формы частиц. На основании расчетного исследования предложено для увеличения эффективности применить рециркуляцию газа из бункера в приосевую зону завихрителя. Предложена методика определения наименьшего диаметра частиц, отделяемых в прямоточном циклоне.

**Достоверность полученных результатов** подтверждается использованием в численных исследованиях фундаментальных законов гидромеханики и признанных численных методов, применением в экспериментальных исследованиях современной измерительной аппаратуры, а также удовлетворительным совпадением расчетных и экспериментальных данных.

**Практическая значимость** работы подтверждается тем, что результаты работы были внедрены в ООО «НПП «Авиагаз-Союз+»», что подтверждается имею-

щимся в диссертации актом об использовании результатов. Полученные в диссертации материалы могут быть использованы при проектировании прямооточных циклонов для процессов очистки газа в различных отраслях промышленности.

#### **Рекомендации по использованию результатов диссертации.**

Представляет большой интерес дальнейшее проведение исследований процессов в прямооточных циклонах, а именно методов организации плавного безотрывного ввода газа для снижения гидравлического сопротивления, интенсивности турбулентности и ее распределение в рабочей зоне циклона. Представляется целесообразным также создания инженерного пакета прикладных программ для расчета циклонов.

Полученные в диссертации результаты могут оказаться полезными для инженеров и научных работников, занимающихся разработкой и проектированием очистного оборудования. Материалы диссертации могут быть переданы в следующие организации: ОАО «НИИОГАЗ» (г. Москва), ЗАО «Сов Плим» (г. Санкт-Петербург), Московский энергетический институт (Технический университет), Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана, Московский авиационный институт (МАИ).

Результаты диссертации широко опубликованы в печати. По теме диссертации опубликовано 7 печатных работ, в том числе 2 статьи в журнале, рекомендованном ВАК. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на III Международной научно-практической конференции «Инновационные технологии в проектировании и производстве изделий машиностроения» (Казань, 2008 г.); на XXI Всероссийской межвузовской научно-технической конференции «Электромеханические и внутрикамерные процессы в энергетических установках, струйная акустика и диагностика, приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий» (Казань, 2009 г.); на XXXXII Всероссийском симпозиуме в «Механика и процессы управления» (Миасс, 2012 г.); на XXXIV Всероссийской конференции, посвященной 90-летию со дня рождения академика В.П. Макеева «Наука и технология» (Миасс, 2014 г.).

#### **Замечания по работе:**

- 1) Целью работы является получение метода расчета газодинамических процессов и основных параметров, необходимых при проектировании прямо-

точных циклонов. В этой связи было бы полезно обработать результаты численных исследований в виде аппроксимаций, удобных для использования инженерами при проведении проектных работ.

- 2) В разделе 4.8 не указаны длины циклонов с различным диаметром. Не ясно, была ли их длина одинаковой или пропорциональной диаметру.
- 3) При расчете движения частиц для определения коэффициента аэродинамического сопротивления частиц использовались эмпирические зависимости вида (2.30). В этом случае нет необходимости учета силы инерции присоединенной массы, т.к. действие этой силы не вычиталось при получении зависимости (2.30) по опытным данным.
- 4) Использование среднего диаметра  $d_{43}$  вместо дисперсного состава размеров частиц при описании процесса требует дополнительного обоснования.
- 5) При описании профилей составляющих скорости газа полезнее было бы воспользоваться не абсолютными значениями скорости, а относительными значениями. Часто это позволяет выявить автомодельность профилей скорости.

Указанные замечания не влияют на общую положительную оценку работы. Автореферат и список публикаций по работе полностью соответствуют диссертации.

#### **Заключение.**

В диссертационной работе проведено численное и экспериментальное исследование структуры двухфазного течения и закономерностей разделения газа и дисперсных частиц в прямоточном циклоне.

В целом, по объему и научному уровню, актуальности и научной новизне полученных результатов, их практической ценности диссертационная работа Бурова А.С. «Численное исследование двухфазного закрученного течения в прямоточном циклоне» полностью соответствует требованиям п.9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 года № 842 Высшей аттестационной комиссии Российской Федерации, предъявляемым к кандидатским диссертациям, являясь научно-квалификационной работой, в которой изложены новые научно обоснованные решения и разработки в области расчета течения многофазных сред, имеющие существенное значение для совершенствования систем очистки газов в авиацион-

ной технике, энергетике, добывающей, химической и смежных отраслях промышленности. Автор представленной диссертации Буров Артем Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Официальный оппонент,  
заведующий кафедрой  
«Оборудование пищевых  
производств» ФГБОУ ВО  
«Казанский национальный  
исследовательский  
технологический университет»,  
доктор технических наук,  
профессор

Николаев Андрей Николаевич

420015, РФ, Республика Татарстан,  
г. Казань, ул. К.Маркса, 68  
тел.сл. : (843)231-43-61,  
e-mail: andr\_nik\_nik@rambler.ru

23.05.2016 г.

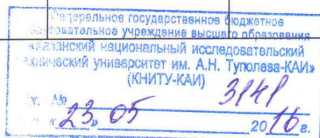
Подпись Николаев АН



## СВЕДЕНИЯ ОБ ОФИЦИАЛЬНОМ ОППОНЕНТЕ

по диссертационной работе Бурова Артема Сергеевича на тему «Численное исследование двухфазного закрученного течения в прямоточном циклоне» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

№	Фамилия, Имя, Отчество	Ученая степень, ученое звание	Сведения о работе		Список основных публикаций по теме диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет (но не более 15 публикаций)
			Полное наименование организации, почтовый адрес (индекс, город, улица, дом), телефон, адрес электронной почты	Должность с указанием структурного подразделения	
1	2	3	4	5	6
1	Николаев Андрей Николаевич	Доктор технических наук, профессор	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет»  420015, г.Казань, ул.К.Маркса, 68, (843) 238-56-94  office@kstu.ru	Заведующий кафедрой «Оборудование пищевых производств»	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Madyshev I.N., Dmitrieva O.S., Dmitriev A.V., Nikolaev A.N. Assessment of change in torque of stream-bubble contact mass transfer devices // Chemical and Petroleum Engineering, 2015, V.51, № 5, P. 383-387.</li> <li>2. Харьков В.В., Николаев А.Н. Расчет конвекционного аппарата с закрученным потоком теплоносителя для концентрирования соков // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология, 2015, № 1, С.94-97.</li> <li>3. Николаев А.Н., Нуртдинов Н.М., Харьков В.В. Эффективность инерционного осаждения частиц на каплях жидкости в полых вихревых аппаратах при очистке выбросов пищевых производств // Вестник Казанского технологического университета. 2015. Т.18, №3, С.294-296.</li> <li>4. Николаев А.Н., Харьков В.В. Интегральные характеристики закрученных течений в газоочистном оборудовании вихревого типа // Вестник Казанского технологического университета. 2015. Т.18, №18, С.130-132.</li> <li>5. Николаев А.Н., Харьков В.В. Перепад статического давления в газоочистном оборудовании вихревого типа // Вестник Казанского технологического университета. 2015. Т.18, №18, С.136-138.</li> <li>6. Дубков И.А., Дубкова Н.З., Николаев А.Н. Способ очистки пылегазовых выбросов энергетических установок // Вестник Казанского технологического университета. 2015. Т.18, №20, С.80-82.</li> <li>7. Dmitrieva O.S., Dmitriev A.V., Nikolaev A.N. Distribution of circulating water in the work area of a vortex chamber with disk atomizer for the purpose of increasing the efficiency of the cooling process // Chemical and Petroleum Engineering, 2014, V. 50, № 3, P. 169-175.</li> <li>8. Вахитов М.Р., Николаев А.Н. Рекуперация паров органических растворителей в аппаратах вихревого типа // Вестник Казанского технологического университе-</li> </ol>



				<p>та. 2014. Т. 17. № 24. С. 185-186.</p> <p>9. Гумерова Г.Х., Николаев А.Н. К вопросу об эффективности вихревых аппаратов для обезвреживания крупнотоннажных газовых выбросов // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17. № 22. С. 274.</p> <p>10. Иванова Г.И., Николаев А.Н., Нурдинов Н.М., Вахитов М.Р. Сепарация частиц высушенного продукта в рабочей зоне вихревой сушилки-мельницы // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17. № 21. С. 278-280.</p> <p>11. Николаев А.Н., Вахитов М.Р., Нурдинов Н.М. Центробежное осаждение частиц в полых вихревых аппаратах при очистке газовых выбросов пищевых производств // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17. № 22. С. 254-256.</p> <p>12. Харьков В.В., Николаев А.Н. Численное исследование траекторий движения капель в вихревом аппарате для концентрирования фруктовых соков // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17. № 16. С. 191-193.</p> <p>13. Дмитриев, А. В., Николаев А.Н. Очистка газовых выбросов в аппаратах вихревого типа. – Saarbrücken : LAP Lambert Academic Publishing, 2012. 264с.</p> <p>14. Дмитриев А.В., Дмитриева О.С., Николаев А.Н. Повышение эффективности очистки газовых выбросов путем установки пневмогидравлических распылителей в аппараты с интенсивным взаимодействием фаз // Экология и промышленность России. 2012. № 5. С. 16-18.</p> <p>15. Дмитриев А.В., Макушева О.С., Калимуллин И.Р., Николаев А.Н. Вихревые аппараты для очистки крупнотоннажных газовых выбросов промышленных предприятий // Экология и промышленность России. 2012. № 1. С. 4-7.</p>
--	--	--	--	---

Зав. кафедрой оборудования пищевых производств ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет»,  
доктор технических наук, профессор

23.05.2016 г.



А.Н. Николаев

Подпись

*Николаев*

удостоверяется.

Начальник ОИД ФГБОУ ВО «КНИТУ»

*Перлыгина*

О.А. Перлыгина

«23 05

2016.