

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

ЛАШКОВ Валерий Александрович

**КОЭФФИЦИЕНТЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ СКОРОСТИ ПРИ УДАРЕ
ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ ГАЗОВЗВЕСИ О ПОВЕРХНОСТЬ ТЕЛА**

01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Санкт-Петербург
2012

Работа выполнена на кафедре гидроаэромеханики математико-механического факультета Санкт-Петербургского государственного университета.

Научный консультант:

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор
ЦИРКУНОВ Юрий Михайлович,
(Балтийский государственный технический университет
им. Д.Ф.Устинова, Санкт-Петербург)

доктор технических наук, профессор
СТАСЕНКО Альберт Леонидович,
(Федеральное государственное унитарное предприятие
«Центральный аэрогидродинамический институт им.
профессора Н.Е.Жуковского», г. Жуковский)

доктор физико-математических наук, профессор
ПАВЛОВСКИЙ Валерий Алексеевич,
(Санкт-Петербургский государственный морской
технический университет, Санкт-Петербург)

Ведущая организация:

Институт теоретической и прикладной механики им.
С.А.Христиановича СО РАН, Новосибирск

Защита состоится « 31 » мая 2012 г. в 14-00 часов на заседании совета Д 212.232.30 по защите докторских и кандидатских диссертаций при Санкт-Петербургском государственном университете по адресу: 198504, г. Санкт-Петербург, Старый Петергоф, Университетский пр., 28, математико-механический факультет, ауд.405.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке им. М.Горького Санкт-Петербургского государственного университета по адресу: 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2012 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор физико-математических наук, профессор

Кустова Е.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Дисперсные системы, состоящие из взвешенных в газообразной среде твердых частиц, играют весьма значительную роль в природе и жизни человека. Особый интерес к двухфазным потокам возник в связи с бурным развитием авиации, ракетной и космической техники.

У нас в стране и за рубежом опубликовано большое количество монографий, обзоров и статей, посвященных различным аспектам газодинамики многофазных сред. Одними из известных, например, являются работы Н.А.Фукса, В.М.Волощука, Соу С., Р.И.Нигматулина, В.М.Фомина, С.К. Матвеева, А.Н.Крайко, Ю.М.Циркунова, Ю.В.Полежаева, А.Л.Стасенко, В.А.Цибарова, А.А.Шрайбера и др.

Для решения многих практических задач необходимо знать воздействие газозвеси на различные элементы конструкции летательного аппарата, например, определение эрозионной, силовой и тепловой нагрузок в условиях полета в запыленной атмосфере. При решении таких задач требуется описать параметры фаз на поверхности обтекаемого тела. При постановке граничных условий для твердой фазы на поверхности тела, для определения взаимодействия твердых частиц газозвеси с поверхностью тела, как правило, используются коэффициенты восстановления скорости. Коэффициенты восстановления скорости значительно упрощают получение решения и поэтому широко применяются в инженерных задачах о соударении тел.

Для определения динамики соударяющихся тел привлекают методы механики контактного взаимодействия деформируемых твердых тел, которая представляет интенсивно развивающееся направление механики сплошных сред. Этой проблеме посвящены работы А.Ю.Ишлинского, Е.М.Морозова, В.З.Портона, В.М.Фомина, Н.Ф.Морозова, Ю.В.Петрова, С.А.Зегжды, Н.А.Златина, Ф.Ф.Витмана, В.Е.Панина и др. Одной из основных проблем в задаче о соударении тел является установление зависимости между деформациями и контактной силой взаимодействия.

Задачи прямого удара тел при наличии местных пластических деформаций имеют удовлетворительное решение. Однако определение меры взаимодействия тел при ударе под углом к поверхности представляет значительную математическую трудность и еще требует своего решения.

Задачи взаимодействия газозвеси с поверхностью высокоскоростного летательного аппарата имеют свои особенности. Скорость движения смеси может составлять сотни, а то и тысячи метров в секунду. Твердые частицы газозвеси обычно представляют собой обломки неправильной формы, поэтому использование результатов расчета коэффициентов восстановления скорости сферических частиц при определении характера соударения с поверхностью частиц неправильной формы требует экспериментального подтверждения. К тому же угол, под которым частицы соударяются с

поверхностью тела, как правило, отличается от прямого. Очевидно, надежные статистические данные по коэффициентам восстановления скорости для частиц неправильной формы, падающих под углом к поверхности, могут быть получены только эмпирическим путем. Все это требует развития экспериментальных исследований ударного взаимодействия частиц газозвеси с поверхностью тела.

Следует также заметить, что знание только коэффициентов восстановления недостаточно для описания динамики взаимодействия частицы газозвеси с телом, т.к. коэффициенты восстановления скорости характеризуют изменение линейной скорости частицы при ударе. Важно также знать, как меняется вращательная скорость частицы при ударе, т.к. вращение частицы значительно сказывается на поведении ее после удара, на последующей траектории. Измерение скорости вращения частицы в эксперименте весьма затруднительно.

Анализ опубликованных работ, посвященных экспериментальному изучению коэффициентов восстановления скорости частиц, показывает, что определяют характер взаимодействия твердых частиц газозвеси с поверхностью обтекаемого тела разными методами на разных типах установок. Исследования разных авторов показывают, что коэффициент восстановления скорости зависит от скорости и угла соударения, от формы соударяемых тел, шероховатости поверхности и физико-механических свойств их материалов. В литературе можно найти отдельные зависимости коэффициента восстановления скорости от разных параметров (скорость и угол удара, конкретные материалы частиц и поверхности и т.д.). Таким образом, результаты этих исследований относятся к конкретным условиям эксперимента и неудобны для практического применения. Следовательно, в настоящее время отсутствуют надежные критерии, позволяющие определить характер взаимодействия частиц твердой фазы с поверхностью тела и обобщить экспериментальные данные по коэффициентам восстановления скорости. Разработка адекватной модели взаимодействия твердых частиц газозвеси с поверхностью и определение граничных условий для твердой фазы на поверхности тела являются актуальными и требуют своего решения.

Цель работы и задачи исследования. Обзор публикаций, посвященных изучению взаимодействия двухфазных потоков с телом, позволяет сформулировать основные цели научно-исследовательской работы.

Диссертационная работа направлена на:

- исследование основных закономерностей и особенностей силового взаимодействия газозвеси с телом в широком диапазоне изменения основных параметров (размера частиц, концентрации твердой фазы, скорости потока, формы тела);

- получение новых экспериментальных данных по коэффициентам восстановления скорости частиц газозвеси в зависимости от скорости, угла удара, физико-механических свойств материалов частицы и поверхности;

- обобщение полученных и имеющихся в литературе экспериментальных данных и определение критериев, влияющих на коэффициенты восстановления скорости;

- разработку модели взаимодействия частиц газозвеси с поверхностью тела при ударе под углом, позволяющей рассчитать линейную и угловую скорости частицы после удара.

Методы исследования. В диссертационной работе на основе разработанных автором оригинальных методик и устройств проведены экспериментальные исследования аэродинамического сопротивления тел классической формы в потоке газа, содержащего твердые частицы. Выполнены экспериментальные исследования коэффициентов восстановления скорости твердых частиц газозвеси. На основе анализа данных, опубликованных в литературе и полученных автором работы, предложены основные критерии, которые определяют характер ударного взаимодействия твердых частиц с поверхностью. Разработана полуэмпирическая модель ударного взаимодействия недеформируемой сферы с металлическим полупространством, которая позволяет определить кинематические параметры (линейную и угловую скорости) частицы после удара о поверхность.

Научная новизна. В результате выполнения работы автором:

- получены новые результаты экспериментального исследования аэродинамического сопротивления простых (клин, конус, цилиндр, сфера) тел в потоке газозвеси;

- получены данные, которые показали, что введение твердой примеси в поток газа может приводить к значительному уменьшению сопротивления кругового цилиндра и сферы на режимах обтекания близких к критическому (по числу Рейнольдса);

- разработана оригинальная методика экспериментального определения коэффициентов восстановления нормальной и касательной составляющих скорости по интегральному силовому воздействию твердых частиц на пластину, установленную под углом к направлению потока;

- получены новые экспериментальные данные по коэффициентам восстановления скорости в широком диапазоне скоростей, углов удара, размеров частиц, для разных материалов поверхности;

- определены критерии, позволяющие обобщить известные экспериментальные данные по коэффициентам восстановления скорости, и получены эмпирические зависимости, описывающие поведение коэффициентов восстановления скорости в широком диапазоне изменения параметров;

- разработана методика расчета параметров отскочившей частицы при ударе под углом к поверхности.

Достоверность полученных результатов. Основные соотношения для описания коэффициентов восстановления скорости получены при

использовании экспериментальных данных, полученных многими авторами на различных типах экспериментальных установок при разных условиях экспериментов. Измерение коэффициентов восстановления скорости частиц проведено автором с привлечением современных диагностических методик и приборов. Полученные экспериментальные данные коэффициентов восстановления скорости частиц использовались для расчета коэффициента сопротивления простого тела (сферы, цилиндра) от воздействия только твердых частиц. Результаты расчета сравнивались с данными экспериментальных измерений. Сравнение полученных данных говорит о высокой достоверности результатов исследований.

Результаты, выносимые на защиту.

1. Методика и результаты экспериментального исследования аэродинамического сопротивления простых (клин, конус, цилиндр, сфера) тел в потоке газозвеси.

2. Методика и результаты экспериментального исследования коэффициентов восстановления скорости в широком диапазоне скоростей, углов удара и размеров частиц.

3. Критерии, позволяющие обобщить имеющиеся экспериментальные данные по коэффициентам восстановления скорости и определяющие характер ударного взаимодействия твердой частицы газозвеси с поверхностью обтекаемого тела.

4. Полуэмпирическая модель ударного взаимодействия твердой дисперсной частицы с поверхностью обтекаемого тела в диапазоне высоких скоростей удара (100-1000 м/с).

Практическая значимость. На основании результатов проведенных исследований разработана методика по определению параметров отскочившей от поверхности частицы. Это позволяет сформулировать граничные условия на поверхности обтекаемого тела для расчета динамики твердой фазы газозвеси. Результаты исследований могут быть использованы при определении силового воздействия газозвеси на летательные аппараты, элементы конструкций, работающие в таких условиях, при расчете движения газа с твердыми частицами в каналах сложной формы. Результаты исследований могут найти применение в отраслевых институтах и специализированных конструкторских бюро при конструировании современных высокоскоростных летательных аппаратов.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных и национальных конференциях: VI Всесоюзном съезде по теоретической и прикладной механике. АН УзССР. Ташкент. 1986, XV Всесоюзном семинаре по газовым струям. ЛМИ. Ленинград. 1990, 1-й Всесоюзной конференции "Оптические методы исследования потоков". Институт теплофизики СО АН СССР. Новосибирск. 1991, Международной школе-семинаре «Внутрикамерные процессы, горение и газовая динамика дисперсных систем». С.-Петербург.

1995, Международной конференции по проблемам физической метрологии. С.-Петербург. 1996, 2-й Международной конференции по проблемам физической метрологии "ФИЗМЕТ'96". С.-Петербург. 1996, 27 Всероссийском семинаре «Течения газа и плазмы в соплах, струях и следах». С.-Петербург. 1997, Второй международной школе-семинаре «Внутрикамерные процессы, горение и газовая динамика дисперсных систем». С.-Петербург. 1997, IV научно-технической конференции «Оптические методы исследования потоков». Москва. 1997, V международной научно-технической конференции «Оптические методы исследования потоков». Москва. МЭИ. 23-25 июня 1999, X конференции по лазерной оптике (отделение молодых исследователей). С.-Петербург. СПбГУ. 2000, Всероссийском семинаре "Лазерная диагностика и аналитика в науке и технологиях". С.-Петербург, СПбГУ. 2000, XXI Всероссийском семинаре «Струйные, отрывные и нестационарные течения». Новосибирск. 2007, международной конференции «Шестые Окуневские чтения». СПб. 2008, «Всероссийском семинаре по аэрогидродинамике», посвященном 90-летию С.В.Валландера. Санкт-Петербург. 5-7 февраля 2008, международной научной конференции по механике «Пятые Поляховские чтения». Санкт-Петербург. 3-6 февраля 2009.

Публикации.

По теме диссертационной работы опубликовано 30 печатных работ, включая 1 авторское свидетельство на изобретение. В журналах, рекомендованных ВАК, опубликовано 8 работ ([1-8] по автореферату).

В работах, выполненных в соавторстве, соискателю принадлежит:

В статье [4] соискателю – разработка и программирование системы сбора экспериментальной информации, Анисимову Ю.И., Машеку И.Ч. – подготовка, проведение и обработка результатов исследований. В статье [6] соискателю – разработка полуэмпирической модели взаимодействия недеформируемой частицы с поверхностью тела, Матвееву С.К. – вывод формулы вероятности попадания частицы в лунку на поверхности, оставленную предыдущими частицами. В статьях [9, 27] соискателю – расчеты внутренней и внешней баллистики, разработка конструкции устройства, исследование его работы, Матвееву С.К. – разработка математической модели и проведения расчетов образования аэрозольных облаков, Соловьеву В.Ю. – разработка элементов устройства и проведение исследований их работы, Шмитту А.А., Баглаеву С.Б., Жуковцу Ю.Л. – конструирование узлов устройства. В статьях [10-15, 17-21, 23-25] соискателю – разработка и совершенствование цифровой системы сбора данных, ее аппаратной и программной части, применение корреляционного метода для определения доплеровского сдвига частоты при измерении скорости частиц, Анисимову Ю.И. – разработка оптических и электронных узлов лазерного измерителя скорости, Зеленкову О.С. – программирование работы лазерного измерителя скорости, Машеку И.Ч. – разработка и

совершенствование световодной системы передачи излучения, разработка новых методов измерения доплеровского сдвига частоты. Агапову А.А. – изготовление узлов установки, Ивановой Е.И. (Ефремовой Е.И.), Максимову С.В. – обработка результатов исследований. В статье [22] соискателю – разработка и монтаж узлов экспериментальной установки, постановка задач, разработка и обоснование методики эксперимента, изготовление и подготовка необходимых измерительных средств, проведение экспериментальных исследований аэродинамического сопротивления тела в потоке газозвеси и коэффициентов восстановления скорости частиц твердой фазы, обработка результатов исследований, анализ и обобщение результатов измерений, Матвееву С.К. – остальные результаты. В статьях [16, 26] соискателю – проведение и обработка результатов экспериментального исследования газоабразивного износа поверхности, исследование параметров двухфазного потока, остальные результаты принадлежат соавторам. В статье [29] соискателю – постановка и проведение экспериментальных исследований, обработка результатов, Матвееву С.К. – разработка модели и расчет течения газозвеси в устройстве, Машеку И.Ч. – проведение и обработка результатов исследований параметров течения газозвеси.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных литературных источников и приложения. Работа изложена на 379 страницах, включая 108 рисунков, 6 таблиц и библиографию из 327 источников.

Поддержка. Исследования автора на разных этапах работы поддерживались при выполнении следующих научно-исследовательских работ: НИР «Исследование турбулентных течений жидкости и газа в пограничном слое, струях, донных и срывных зонах. Взаимодействие струй. Экспериментальное и теоретическое исследование обтекания тел газом в диапазоне от сплошной среды до свободномолекулярного режима течения». №76070312, 1976-1980гг.; тема координационного плана АН СССР «Разработка динамических моделей механики многофазных сред и неравновесные процессы; инженерные приложения», 1986г.; г/б тема Б.02.37, 1985-1989гг.; г/б тема Б.02.19, 1990-1995гг.; грант Госкомвуза №94-8.1-5 «Исследование способов защиты от эрозии с помощью специальных форм поверхности», 1996г.; грант РФФИ №96-01-00387 «Теоретическое и экспериментальное исследование методов управления газоабразивным износом поверхности с помощью экранирующего слоя отраженных частиц», 1996-1997гг.; НИР «Теоретическое и экспериментальное исследование эрозионного воздействия двухфазного потока на конструктивные материалы», №10.18.96, 1997-1999гг.; НИР «Создание и исследование гидродинамических моделей контактных и многофазных течений», №10.11.00, 2001-2003гг., Гос. рег. №01200102256; научно-техническая программа Минобразования РФ «Научные исследования высшей школы по приоритетным направлениям науки и техники» (подпрограмма «Транспорт»),

код НИР 205.01.01.023, 2002г.; х/д с ФГУП ВИАМ, 2002, 2004г.; х/д «Часослов» с в/ч №87415, 2000-2005гг.; научно-техническая программа Минобразования РФ «Научные исследования высшей школы по приоритетным направлениям науки и техники» (подпрограмма «Транспорт»), код НИР 205.01.02.028, 2004г.; х/д с ФГУП ЦНИИКМ «Прометей», 2004г.; г/б тема №30.17.33; 30.51.29 «Создание математических моделей и исследование течений сжимаемых и неоднородных сред», 2005-2009гг.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Введение. Дано краткое изложение рассматриваемой проблемы. Рассмотрен весь спектр вопросов, связанных с решением задачи обтекания тела газозвесью и определением силового воздействия этой среды на поверхность. Отмечается связь таких аспектов взаимодействия частиц с поверхностью как эрозия, силовое взаимодействие и нагрев. Обоснована актуальность выбранной темы. Сформулированы цели и задачи научного исследования. Приведены основные положения, выносимые на защиту. Отражена научная новизна и практическая значимость результатов.

Первая глава. В первой главе содержится обзор научной литературы, посвященной различным проявлениям взаимодействия твердых частиц газозвеси с поверхностью тела: эрозии, силовому воздействию и нагреву поверхности. Проведен обзор и критический анализ опубликованных экспериментальных и теоретических работ, относящихся к теме диссертации.

Основное отличие решения задач двухфазной газодинамики состоит в том, что возникает необходимость учитывать взаимодействие поверхности тела не только с газовой, но и твердой фазой. Сложность процессов, происходящих при обтекании тела газом, содержащим твердые частицы, приводит к необходимости первоначального рассмотрения и изучения более простых явлений, наблюдаемых при течении газозвеси.

Известны факторы, которые оказывают влияние на силовое, эрозионное и тепловое воздействие газозвеси на тело:

- взаимное влияние фаз на параметры движения друг друга;
- образование «защитного слоя» из отраженных от поверхности тела частиц и соударение частиц между собой;
- взаимодействие твердых частиц с поверхностью тела.

Как видно, без решения сложной проблемы течения газозвеси около тела нельзя подойти к определению динамики процессов, происходящих на его поверхности, т.е. необходимо определить в каком физическом состоянии, с какими кинематическими параметрами твердые частицы подлетят к поверхности.

Для описания характера взаимодействия твердых частиц с поверхностью тела, для определения кинематических параметров отскочившей частицы используются коэффициенты восстановления скорости. Под

коэффициентами восстановления нормальной a_n и касательной a_τ составляющих скорости частиц понимается

$$a_n = -\frac{U_{n2}}{U_{n1}}, \quad a_\tau = \frac{U_{\tau2}}{U_{\tau1}},$$

где U_n , U_τ – компоненты соответственно нормальной и тангенциальной составляющих скорости частиц; индексы 1 и 2 обозначают условия до и после взаимодействия соответственно.

Проблема взаимодействия частиц двухфазного потока с поверхностью тела включает в себя, по меньшей мере, три аспекта: эрозия, силовое воздействие и нагрев. Очевидно, что все эти процессы связаны между собой, т.к. являются сторонами одного явления – удара твердой частицы по поверхности, следовательно, можно предположить, что эти функционалы имеют общие аргументы. Поэтому поиск критериев определяющих коэффициенты восстановления скорости твердых частиц, следует искать при рассмотрении закономерностей всех физических явлений, происходящих при соударении частиц газозвеси с поверхностью тела.

В п.1.1 рассмотрены основные работы, посвященные эрозии материала поверхности. Разрушению материала тела под воздействием высокоскоростного двухфазного потока уделяется значительное внимание. Большое значение, придаваемое решению этой проблемы, можно видеть хотя бы по количеству публикуемых статей, монографий и обзоров.

Проведенные обзор работ, посвященных износу поверхности налетающими твердыми частицами, и анализ отдельных физических параметров и выработанных критериев, которые определяют интенсивность разрушения поверхности тела, показывают, что основными величинами, которые влияют на этот процесс, являются:

- скорость деформации и угол атаки;
- плотность материала преграды и ударника;
- концентрация твердой фазы в потоке;
- твердость материала преграды на вдавливание;
- форма, размер, твердость и ориентация частиц;
- модуль упругости материала преграды;
- температура материала преграды;
- эффективная энтальпия эрозионного разрушения;
- удельная энергия разрушения.

Одна группа этих параметров описывает кинематические характеристики взаимодействия ударника с преградой, другая – определяет физико-механические свойства материалов взаимодействующих тел и, наконец, третья – характеризует эрозионную стойкость материала преграды с энергетической точки зрения.

Особенно следует отметить такой параметр как твердость материала на вдавливание. Дело в том, что при лабораторном измерении этого параметра происходят те же физические процессы, что и при ударе частицы о поверхность тела. Основное отличие состоит в скорости нагружения.

Ю.В.Полежаев и др. [1] для описания процесса эрозионного разрушения материала использует понятие эффективной энтальпии эрозионного разрушения $H_{эр}$. Предпринята попытка проследить динамику изменения механизма разрушения материала, начиная от области влияния упругих сил и кончая эффектами высокоскоростного удара. Предложенный закон эрозионного разрушения представляет соотношение, учитывающее скорость соударения, а также ряд физических параметров, характеризующих материал преграды и частицы

$$\bar{G} = \frac{V_p^2}{2 \cdot H_{эр}} \cdot \left(1 - \exp \frac{V_{кр} - V_p}{0.5 \cdot V_{кр}} \right), \quad (1)$$

где \bar{G} - интенсивность разрушения, V_p - скорость частицы, $H_{эр}$ - эффективная энтальпия эрозионного разрушения.

Согласно экспериментальным данным по высокоскоростному соударению одиночных частиц с металлическими преградами [2] $H_{эр}$ не зависит от скорости V_p , а в основном определяется отношением твердости H_B материала преграды к его плотности ρ_0

$$H_{эр} \approx \frac{H_B}{\rho_0}. \quad (2)$$

То, что при высокоскоростном ударе из всех параметров материала преграды первостепенное значение имеют твердость и плотность, отмечается многими авторами.

Подставив соотношение для эффективной энтальпии эрозионного разрушения (2) в выражение (1), нетрудно видеть, что интенсивность эрозионного разрушения определяется безразмерным параметром

$$\frac{\rho_0 V_p^2}{H_B}. \quad (3)$$

В экспериментальной работе [3] изучался энергетический баланс при ударе твердой частицы в достаточно широком диапазоне изменения механических свойств материала преграды. Сделана оценка энергии, поглощаемой материалом при ударе. Вводится понятие коэффициента потерь

$$\xi = 1 - \frac{v_1^2}{v_0^2},$$

где v_0 и v_1 - соответственно скорости частицы до и после удара.

Тут важно отметить очевидную связь коэффициента потерь с коэффициентом восстановления скорости.

Экспериментально [4] установлено, что коэффициент потерь монотонно возрастает с увеличением угла атаки при любой твердости материала. Для твердых материалов величина износа пропорциональна коэффициенту потерь при любом угле атаки. Утверждается, что коэффициент потерь является критерием износостойкости для материалов любой твердости при скользящих углах атаки.

Если коэффициент потерь тесно связан с коэффициентами восстановления скорости частиц, а газообразивная эрозия хорошо описывается с помощью безразмерного параметра (3), то можно предположить, что коэффициенты восстановления скорости частиц будут зависеть от этого же критерия.

В п.1.2 дан обзор работ, посвященных изучению силового взаимодействия ударника и преграды. Рассмотрены модели, используемые для описания ударного взаимодействия частицы с поверхностью тела, проведен их анализ. Рассмотренные модели предполагают точечный контакт между частицей и поверхностью при ударе. Однако с увеличением скорости удара происходит большее внедрение частицы в материал поверхности, и контакт между частицей и поверхностью нельзя считать точечным.

В теоретической работе Ю.М.Циркунова и др. [5] предлагается модель ударного взаимодействия, которая строится на том, что контакт между частицей и поверхностью рассматривается не точечным. Предполагается, что точка приложения силы находится в границах пятна контакта и не смещается в процессе удара. Однако последнее предположение требует подтверждения. Модель позволяет определить угловую скорость вращения частицы после удара.

Экспериментальный факт, что величина коэффициента восстановления касательной составляющей скорости для твердых частиц при ударе о поверхность находится ниже единицы, означает, что на частицу действуют касательные силы, которые приводят не только к уменьшению касательной составляющей скорости, но и к изменению угловой скорости вращения частицы. Определение в эксперименте изменения угловой скорости вращения частицы в процессе удара весьма затруднительно. В то же время учет вращения частицы важен при расчете ее траектории.

Известно, что характер взаимодействия частиц с поверхностью существенно зависит от шероховатости поверхности. Статистическая модель столкновения частиц со случайно-шероховатой поверхностью [6, 7] показывает, что коэффициент восстановления нормальной составляющей скорости частиц на шероховатой поверхности при малых углах падения может быть больше единицы. Приведены результаты исследования влияния вращения частиц на характеристики их отскока от поверхности мишени. В теоретическом исследовании Ю.М.Циркунова и С.В.Панфилова [8] показано, что сила сопротивления на клине с шероховатой поверхностью может в два раза превышать силу сопротивления «гладкого» клина.

В теоретической работе А.Л.Стасенко [9] предложены безразмерные параметры, которые определяют коэффициенты восстановления нормальной и касательной составляющих скорости частиц. На основе экспериментальных данных разных авторов получены интерполяционные выражения для коэффициентов восстановления скорости частиц. Вводится понятие критической нормальной к поверхности скорости удара. Предполагается, что критическая скорость определяется условием, когда вся кинетическая энергия частицы расходуется на работу деформирования соударяющихся тел. Однако требует обоснования то, что коэффициент восстановления касательной составляющей скорости частиц при прямом ударе приравнивается единице, а также апробация предложенных критериев в более широком диапазоне изменения параметров удара.

Основной проблемой в задаче о соударении тел является установление зависимости между деформациями и контактной силой взаимодействия. Если связь между местным смятием и контактной силой установлена, то описание динамики взаимодействия ударника с преградой не вызывает особых трудностей. Н.А.Златин, Ф.Ф.Витман и др. [10] провели исследование соударения конуса с металлическим полупространством в широком диапазоне скоростей (100-1000 м/с). На основании большого количества экспериментов установлена зависимость от мгновенной скорости силы сопротивления металла полупространства внедрению в него недеформируемого конуса. Рассмотрена система критериев, которая описывает процесс удара.

Разными исследователями накоплен значительный экспериментальный материал по коэффициентам восстановления скорости. Коэффициенты восстановления скорости определялись путем измерения кинематических параметров твердой частицы до и после удара о поверхность. При этом скорость отраженных частиц измерялась как с помощью высокоскоростной фотокамеры, так и с использованием лазерных доплеровских измерителей скорости. В работе [12] скорость отскока сферической частицы определялась по размерам лунки, оставленной после удара. Оценка характера взаимодействия твердых частиц с поверхностью производилась по измеренной с помощью аэродинамических весов интегральной силе, с которой твердые частицы воздействовали на тело. Эксперименты проводились на разных типах установок. Использовались аэродинамические трубы, роторные установки, пневматические пушки, при небольших скоростях удара (до 30 м/с) частицы просто бросались на поверхность мишени. Проводились исследования коэффициентов восстановления скорости при прямом ударе и ударе под углом к поверхности. Исследовались частицы сферической и неправильной формы, использовались разные материалы частиц и мишени. Диапазон скоростей варьировался от единиц до сотен метров в секунду. В тоже время имеющиеся в литературе данные по коэффициентам восстановления скорости относятся к конкретным условиям

эксперимента, что затрудняет их практическое использование. Это приводит к тому, что при расчете силового воздействия твердых частиц на тело приходится делать не всегда обоснованные предположения о характере ударного взаимодействия твердых частиц, что, в свою очередь, снижает надежность выполняемых расчетов силовых нагрузок.

В п.1.3 проведен анализ работ, посвященных изучению тепловых потоков на теле в условиях обтекания газозвесью.

Нарушение поля течения газа около тела рассматривается одной из причин повышения уровня тепловых потоков. Эксперименты показали, что присутствие твердых частиц в потоке может значительно менять тепловые потоки на теле. Тепловые потоки могут быть в несколько раз выше рассчитанных по теории турбулентного пограничного слоя [13]. Основной причиной возрастания тепловых нагрузок является увеличение конвективного теплового потока. Второй причиной повышения тепловых потоков является процесс преобразования кинетической энергии частиц в тепловую при их ударе о поверхность.

Однако процесс преобразования кинетической энергии в тепловую при ударе частицы о поверхность преграды изучен не достаточно, и требуется проведение дальнейших исследований.

Анализ научной литературы показал, что для описания граничных условий для твердой фазы газозвеси на поверхности тела необходимо определить коэффициенты восстановления скорости твердых частиц. Имеющиеся данные по коэффициентам восстановления скорости не обобщены, не определены критерии, описывающие поведение коэффициентов восстановления скорости в широком диапазоне скоростей и углов удара. Отсутствуют методики и рекомендации по определению коэффициентов восстановления скорости и скорости вращения твердых частиц газозвеси при ударе на скоростях, характерных для авиационной и космической техники.

Вторая глава. Вторая глава работы посвящена экспериментальному изучению силового взаимодействия газозвеси с телом.

В п.2.1 представлено описание экспериментальной установки для проведения исследований разных аспектов взаимодействия (сопротивления, эрозии и тепловых потоков) газозвеси с телом.

В п.2.2 приведено обоснование выбора материала, выступающего в экспериментах в качестве твердой фазы. Дано описание характеристик используемых порошков.

В п.2.3 дано описание средств диагностики и приведены результаты исследований основных параметров двухфазных струй.

В п.2.3.1 рассмотрены методические и технические вопросы, связанные с измерением параметров газовой фазы газозвеси. Описаны особенности измерений в высокоскоростных потоках газозвеси.

Приведены результаты исследований распределения скорости газовой фазы по сечению рабочей струи для разных режимов работы экспериментальной установки (от малых дозвуковых до сверхзвуковых скоростей).

В п.2.3.2 приведено описание технических средств и методик, используемых в работе для измерения скорости и плотности твердой фазы в двухфазном потоке.

Представлены результаты исследований распределения скорости твердых частиц в рабочем потоке экспериментальной установки. Проведены исследования скоростного скольжения фаз для широкого диапазона скоростей несущей фазы и размеров частиц твердой фазы.

Приведены результаты исследований распределения плотности твердой фазы по сечению струю в области расположения экспериментальных моделей.

Определены кинематические параметры твердой фазы рабочего потока, которые использовались при обработке результатов исследования силового и эрозионного воздействия газозвеси на тело.

Описаны работы, которые проводились по совершенствованию экспериментальной установки с целью получения двухфазных струй с более равномерным распределением параметров на выходе из сопла.

Приведены результаты исследований распределения плотности твердой фазы около экспериментальной модели. При приближении к поверхности торца плотность частиц увеличивается в несколько раз по сравнению с плотностью в свободном потоке.

В п.2.4 рассмотрены вопросы, связанные с экспериментальным исследованием силового воздействия двухфазного потока на различные тела.

В п.2.4.1 описана разработанная методика, позволяющая оценить вклад в общую аэродинамическую силу сопротивления модели каждой из фаз газозвеси. Предполагалось, что сила лобового сопротивления в двухфазном потоке является суммой двух сил: силы X_s , вызванной воздействием на лобовую поверхность только твердых частиц, и силы лобового сопротивления X_0 в потоке только газовой фазы. Для определения силы X_s использовалось соотношение

$$X_s = X_\Sigma - X_0 - S_m(p - p_b),$$

где X_Σ - общая сила сопротивления модели; S_m - площадь миделевого сечения модели (в экспериментах площадь основания модели равнялась площади миделевого сечения); p - статическое давление набегающего потока; p_b - донное давление на модели.

В общем случае сила сопротивления модели от воздействия только газовой фазы зависит от концентрации и размера частиц твердой фазы в потоке. Для исследования зависимости силы сопротивления модели X_0 от параметров твердой фазы K измерялось распределение давления по лобовой

поверхности. Опыты показали, что сила сопротивления X_0 уменьшается с увеличением концентрации твердой фазы в потоке. Причем при скоростях несущей фазы потока до 300 м/с падение силы X_0 при $K=0.1$ составляет не более 2%. В таких условиях эксперимента изменением силы, очевидно, можно пренебречь. При сверхзвуковой скорости несущей фазы ($M=1.62$) уменьшение силы сопротивления модели от воздействия только газовой фазы при $K=0.1$ составляет величину 10-15%, что необходимо было учитывать.

В п.2.4.2 приведены результаты исследований аэродинамического сопротивления клина и конуса в двухфазном потоке. Целью исследований было определение коэффициента аэродинамического сопротивления тела, обусловленного воздействием только твердых частиц потока

$$C_{xs} = \frac{2X_s}{\rho_{sm} U_m^2 S},$$

где индекс m обозначает параметры невозмущенного потока твердых частиц, ρ_{sm} - плотность, U_{sm} - скорость, осредненные по миделю модели.

Анализ ошибок показал, что в основном точность измерения коэффициента C_{xs} составляла 12-14%.

Исследовано влияние на силу сопротивления модели размера и скорости твердых частиц в диапазонах соответственно 16-138 мкм и 80-350 м/с. Показано, что основными параметрами, влияющими на величину коэффициента силы сопротивления клина и конуса от воздействия только твердых частиц, является угол при вершине модели и скорость частиц.

На рис.1 показана характерная зависимость коэффициента C_{xs} от полуугла при вершине модели клина.

Проведенные экспериментальные исследования сопротивления клина и конуса в двухфазном потоке позволили сделать следующие выводы:

- сила лобового сопротивления, обусловленная воздействием на модель только твердых частиц, прямо пропорциональна концентрации твердой фазы в потоке (эксперименты проводились в диапазоне изменения концентрации твердой фазы до $K=0.3$);

- во всем исследованном диапазоне скоростей твердых частиц коэффициент силы лобового сопротивления от воздействия только твердой фазы монотонно возрастает с увеличением угла при вершине модели (клин

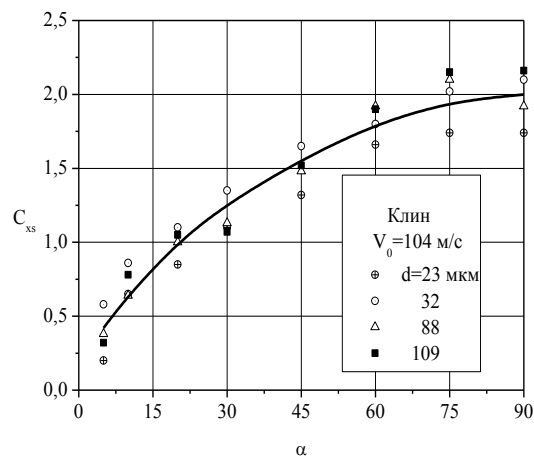


Рис. 1 - Коэффициент сопротивления клина от воздействия только твердых частиц. d – среднемассовый размер частиц твердой фазы.

или конус), причем характер этой зависимости одинаков как для клина, так и для конуса;

- одним из основных параметров, определяющих величину коэффициента C_{xs} , является угол при вершине модели (или угол падения частиц на поверхность тела);

- влияние размера частиц на величину коэффициента C_{xs} практически отсутствует.

Полученные в эксперименте коэффициенты сопротивления клина и конуса от твердых частиц включают в себя эффекты межфазного взаимодействия в возмущенной зоне течения смеси около тела, образования защитного слоя из отраженных частиц. Поэтому они не могут претендовать на универсальность при практическом использовании.

В п.2.4.3 рассмотрены разработанные способ и устройство для измерения силового воздействия на модель только твердых частиц газозвеси. Суть способа состоит в том, что газовая фаза потока затормаживается в непосредственной близости от модели, а твердые частицы, обладая значительной инерцией, достигают поверхности испытываемого тела и передают ему свой импульс.

Проведен теоретический анализ и экспериментальное исследование работы устройства. Расчеты позволили выбрать такие условия эксперимента, когда отклонением движения твердых частиц от своего первоначального невозмущенного направления можно пренебречь. Произведены расчеты скоростного напора твердой фазы на поверхности модели. Определена систематическая ошибка метода. Выработаны рекомендации по практическому использованию разработанного устройства.

Применение устройства позволило прямым методом измерять силу, с которой частицы воздействуют на модель, за счет использования более чувствительных весов увеличить точность этих измерений, при сверхзвуковых режимах работы экспериментальной установки отказаться от проведения трудоемких дренажных испытаний.

В п.2.4.4 обсуждаются особенности обтекания газозвесью цилиндра и сферы. Экспериментальные исследования показали, что на режимах обтекания, близких к критическому числу Рейнольдса, присутствие твердых частиц в потоке может приводить к значительному падению сопротивления тела. Падение сопротивления тела связано с дестабилизирующим воздействием частиц на течение воздуха в пограничном слое

По результатам экспериментальных исследований получена эмпирическая формула, с помощью которой с ошибкой не хуже 10% можно описать коэффициент сопротивления цилиндра от воздействия только газовой фазы C_g

$$C_g = C_0 \left\{ 1 - 0,55 \left(\frac{Re}{1,6 \cdot 10^5} \right)^{-1,831 \cdot \ln \left(\frac{Re}{1,6 \cdot 10^5} \right)} \left[1 - \exp(-0,25 Sh^{0,67} K^{0,33}) \right] \right\}.$$

Приведенная зависимость для C_g охватывает следующие диапазоны изменения параметров: $0,4 \times 10^5 < Re < 4 \times 10^5$; $0 < Sh < 7 \times 10^5$; $10 < St < 1,5 \times 10^3$; $M < 0,3$; $K < 0,3$. Здесь Re – число Рейнольдса, Sh – число Струхала, St – число Стокса, K – концентрация твердой фазы в потоке.

Подобные явления наблюдались при обтекании сферы газозвесью. Следует ожидать, что двухфазный поток будет оказывать аналогичное воздействие на положение точки отрыва потока на других телах.

Третья глава. Третья глава работы посвящена экспериментальному исследованию коэффициентов восстановления скорости частиц.

В п.3.1 представлено обоснование методики измерения коэффициентов восстановления скорости по интегральному силовому воздействию твердых частиц на тело. Рассмотрена задача определения силового воздействия на тело потока твердых частиц. Задача разрешима, если известны распределения по поверхности тела плотности ρ_w , вектора скорости \bar{U}_w твердой фазы перед ударом, а также определены коэффициенты восстановления скорости a_n и a_τ . Показано, что при определенных условиях возможно решение обратной задачи: по силовому воздействию твердых частиц на пластину, установленную под углом α к направлению движения газозвеси, найти коэффициенты восстановления скорости частиц. Коэффициенты восстановления скорости определяются

$$a_n = \frac{|X_s| + |Y_s| \operatorname{ctg} \alpha}{\rho_{wm} U_w^2 S_m} - 1, \quad a_\tau = \frac{|Y_s| \operatorname{tg} \alpha + |X_s|}{\rho_{wm} U_w^2 S_m} + 1,$$

где X_s – сила сопротивления и Y_s – боковая сила, действующие на пластину со стороны твердых частиц газозвеси, ρ_{wm} – средняя по миделевому сечению плотность твердой фазы, S_m – площадь миделевого сечения.

Задача состоит в том, чтобы при измерении коэффициентов восстановления обеспечить условия, при которых коэффициенты постоянны по всей поверхности пластины, то есть выдержать постоянными на всей пластине угол встречи частицы α_w и скорость U_w перед ударом, а также физические и геометрические параметры частиц и тела.

Основными факторами, нарушающими эти условия, являются:

- взаимодействие фаз друг с другом;
- наличие защитного слоя перед телом, образованного из отраженных от тела частиц и продуктов эрозии пластины;
- разброс частиц по размерам и вследствие этого разброс по скоростям удара;
- вращение частиц.

Вследствие взаимодействия твердой и газовой фаз в зоне возмущенного течения около тела, частицы увлекаются газом, это значит, вектор скорости частиц у поверхности тела перед ударом изменяется по сравнению с вектором скорости частиц в невозмущенном течении на бесконечности.

Защитный слой из отразившихся от тела частиц рассеивает импульс налетающих частиц, то есть часть налетающих частиц, взаимодействуя с отраженными, долетает до поверхности тела под различными углами встречи и скоростями.

Чтобы уменьшить разброс скоростей удара в эксперименте, очевидно, следует использовать узкие фракции твердых частиц. Управление и измерение скорости вращения частиц в рабочем потоке экспериментальной установки представляет собой на данный момент сложную не решенную задачу.

Таким образом, под воздействием перечисленных факторов скоростной напор твердых частиц на теле будет отличаться от скоростного напора частиц на бесконечности. Для экспериментального определения коэффициентов восстановления важно оценить изменение скоростного напора твердых частиц на теле и выбрать такие условия эксперимента, когда можно пренебречь взаимным влиянием фаз и действием защитного слоя отраженных частиц.

В п.3.2 рассмотрен случай стационарного движения несжимаемой жидкости, несущей твердые частицы, около конечного клина, установленного под нулевым углом атаки. При расчете движения частиц учитывались только вязкие силы несущего газа. Решение задачи зависит от двух безразмерных параметров: числа Стокса St и Φ :

$$St = \frac{d^2 \rho_p V_\infty}{18\mu R}, \quad \Phi = \frac{18\rho^2 V_\infty R}{\mu \cdot \rho_p},$$

где d – размер частиц; ρ_p – плотность материала частиц; V_∞ - скорость газа на бесконечности; μ – коэффициент динамической вязкости воздуха; R - радиус камеры торможения, и параметром, ρ – плотность воздуха.

Для того чтобы описать изменение скоростного напора твердых частиц на поверхности тела по сравнению со значением на бесконечности, был введен коэффициент скоростного напора

$$q = \frac{\int_{S_m} \rho_w U_w^2 dS}{\rho_\infty U_\infty^2 S_m}.$$

В п.3.2.1 представлены результаты расчетов движения частиц в возмущенной зоне течения смеси около клина. Проведены расчеты коэффициентов осаждения η и коэффициента скоростного напора q для твердых частиц в диапазоне изменений параметров $50 < St < 4000$, $100 < \Phi < 4100$, углы клина $\alpha = 15, 30, 45, 60$ и 90° . Коэффициент осаждения определялся как

отношение площади поперечного сечения набегающего двухфазного потока, в котором частицы данного размера сталкиваются с телом, к площади миделевого сечения этого тела.

Результаты численного исследования показали, что частицы твердой фазы испытывают большее торможение около пластины, поставленной поперек потока, и степень торможения растет с уменьшением числа St и увеличением Φ . Под воздействием газовой фазы частица отклоняется от своего первоначального направления движения. Во всем исследованном диапазоне параметров St , Φ , и α угол отклонения вектора скорости частицы на поверхности клина от первоначального направления увеличивается с ростом расстояния от оси потока. За характерную величину отклонения движения частицы взята максимальная величина угла $\Delta\alpha$ наклона вектора скорости на поверхности клина.

На рис.2 показаны результаты расчетов зависимости угла отклонения $\Delta\alpha$ от параметров St и Φ для случая пластины, установленной поперек потока. Если удовлетвориться, точностью угла падения частиц на поверхность модели $\Delta\alpha=0.1$, то область допустимых значений параметров St и Φ находится под линией Φ_{max} , показанной на рис. 3. В этом случае можно полагать, что $\alpha_w \approx \alpha$, и частицы летят, не изменяя своего направления движения.

Однако скоростной напор твердых частиц на поверхности тела уменьшается за счет торможения частиц в возмущенной зоне течения. Это иллюстрирует рис. 4, где показана рассчитанная зависимость коэффициента скоростного напора частиц от параметров St и Φ для бесконечной ленты, установленной поперек потока.

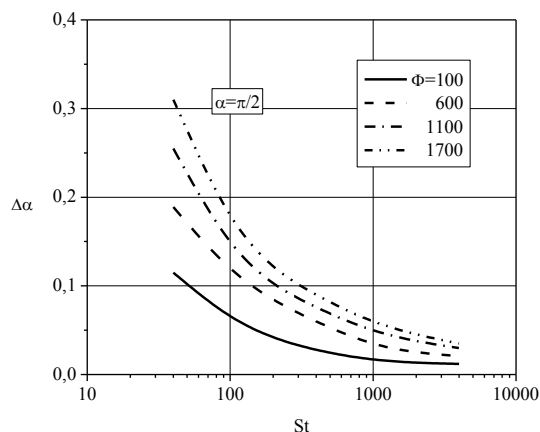


Рис.2 - Влияние газовой фазы на рассеяние частиц около бесконечной полосы, установленной поперек потока.

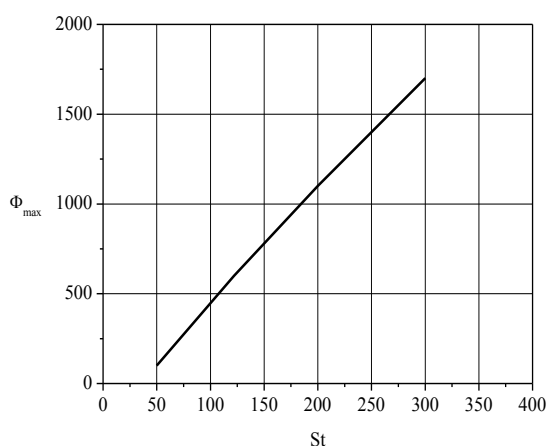


Рис. 3 - Область допустимых значений параметра Φ_{max} для $\Delta\alpha=0,1$.

Результаты расчета движения газозвеси около клина позволили определить степень влияния газовой фазы на дискретную, допустимые области изменения чисел St и Φ , при которых выполняется условие постоянства скорости и угла встречи частиц на всей поверхности клина, и найти поправку на изменение скоростного напора потока твердой фазы в возмущенной зоне течения около тела.

В п.3.3 рассмотрены вопросы, связанные с образованием защитного слоя из отраженных от поверхности модели частиц. С использованием уравнений элементарной кинетической теории материи определена вероятность того, что частицы налетающей на тело дискретной фазы дойдут до поверхности без столкновений с отраженными частицами. Проведенные расчеты показали, чтобы вероятность была не ниже 0.9, необходимо эксперименты по измерению коэффициентов

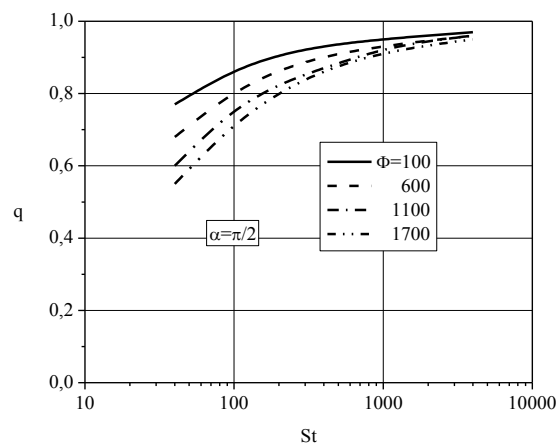


Рис. 4 - Влияние параметров St и Φ на коэффициент q .

восстановления скорости проводить в условиях, когда плотность твердой фазы в потоке не превышает 0.1 кг/м^3 (расходная среднемассовая концентрация твердой фазы $K < 0.05$).

В п.3.4 проведен анализ влияния шероховатости и особенностей формы поверхности тела на передачу импульса от частиц телу. Численные расчеты, представленные в п.3.4.1, которые были подтверждены результатами экспериментальных исследований, показали, что при расчете силового воздействия частиц потока газозвеси на тело, имеющего сложный профиль поверхности, следует учитывать многократность соударения частиц. При скользящих углах удара коэффициент восстановления нормальной составляющей скорости частиц на поверхности со сложным профилем может превышать единицу.

В п.3.4.2 на основе полуэмпирической теории внедрения сферического ударника в поверхность мишени, сделана оценка глубины лунки, остающейся на поверхности после удара, а также найдена величина вероятности падения частиц потока газозвеси в лунки, оставленные предыдущими частицами. При определении глубины внедрения сферической частицы в металлическое полупространство была высказана гипотеза применимости теории локального взаимодействия, которая затем была подтверждена сравнением расчетных и экспериментальных данных.

В п.3.5 определены условия, в которых следует использовать предложенную методику измерения коэффициентов восстановления

скорости частиц. Обсуждаются возможности выполнения в физическом эксперименте требований, которые приняты в теоретической постановке задачи определения коэффициентов восстановления скорости.

В п.3.6 описаны эксперименты, в которых использовалась разработанная методика, и приведены полученные экспериментальные данные по коэффициентам восстановления скорости частиц. На рис. 5 показаны результаты измерения коэффициента восстановления нормальной составляющей скорости, на рис. 6 – касательной составляющей скорости частиц при скорости двухфазного потока $V_0=104$ м/с. Точками обозначены следующие материалы: 1 – стекло К8; 2 – свинец; 3 – стеклотекстолит; 4 – алюминиевый сплав Д16; 5 – бензостойкая резина; 6 – белая вакуумная резина; 7 – сталь Ст.3; 8 – медь МЗ.

Исследования проводились в широком диапазоне изменения скоростей удара – до 350 м/с. Стандартное отклонение при измерении коэффициента восстановления a_n составляет в основном 0.14-0.2, для коэффициента a_t – 0.05-0.08. Показаны экспериментальные зависимости коэффициента восстановления от угла и скорости удара.

В п.3.8 в качестве примера показано использование полученных данных по коэффициентам восстановления скорости частиц для расчета коэффициента сопротивления сферы от воздействия только твердых частиц. Совпадение результатов расчета и опытных данных по коэффициенту сопротивления сферы (см. рис. 7) можно признать удовлетворительным. Совпадение подтверждает высокую надежность результатов измерений коэффициентов восстановления.

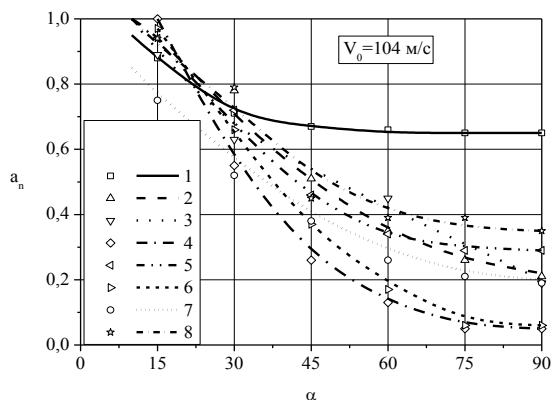


Рис. 5 – Влияние угла атаки поверхности на коэффициент восстановления нормальной составляющей скорости.

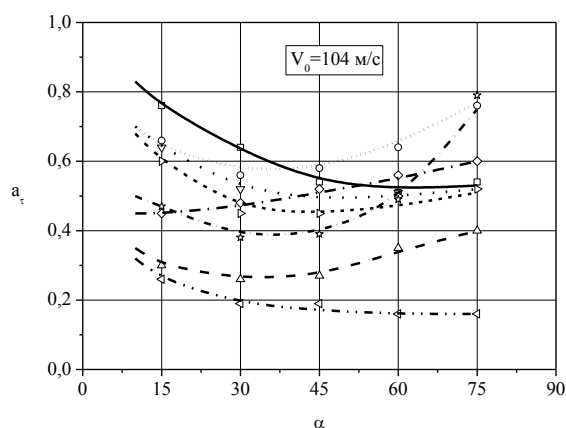


Рис. 6 – Влияние угла атаки поверхности на коэффициент восстановления касательной составляющей скорости.

Четвертая глава. В главе рассмотрены вопросы, связанные с обобщением полученных в работе и имеющихся в литературе экспериментальных данных по коэффициентам восстановления скорости.

В п.4.1 проведен анализ опубликованных работ, посвященных газоабразивной эрозии, силовому воздействию газовой взвеси на тело, соударению тел, на предмет поиска основных критериев, которые характеризуют указанные процессы. Анализ работ показывает, что основными критериями, определяющими указанные процессы, являются:

- отношение плотностей материалов

частицы и преграды $K_p = \frac{\rho_1}{\rho_2}$;

- отношение твердости материалов частицы и преграды $\frac{H_2}{H_1}$;

- соотношение сил инерции частицы и сил сопротивления внедрению преграды $E_H = \frac{\rho_2 V_0^2}{H_1}$.

Сделана оценка диапазона изменения параметров E_H и K_p для случая полета летательного аппарата в пылевом облаке.

В п.4.2 проведено обобщение имеющихся в печати и полученных автором работы коэффициентов восстановления скорости при прямом ударе частиц сферической и неправильной формы.

На рис. 8 показана зависимость коэффициента восстановления сферических частиц при прямом ударе от параметров E_H и K_p . Используются результаты исследований разных авторов, которые применяли разные методики измерений. Представлены данные по широкому кругу материалов преграды: свинец, медь, алюминий, сталь закаленная и т.д. Коэффициент восстановления стремится к единице при малых значениях параметра E_H .

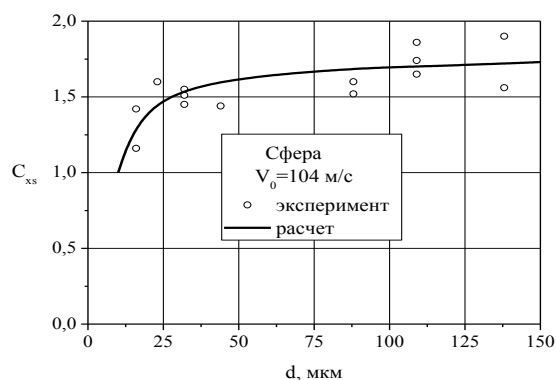


Рис. 7 - Коэффициент силы лобового сопротивления сферы от воздействия только твердых частиц.

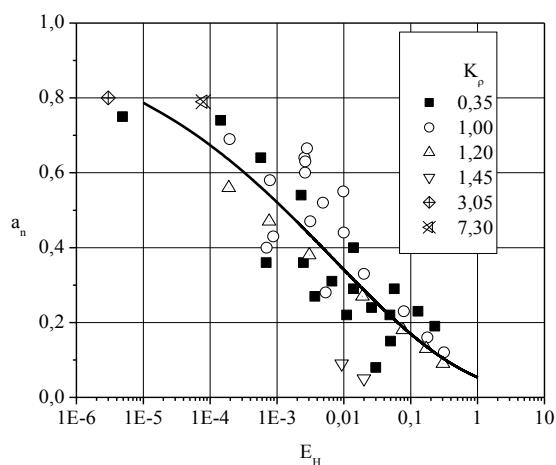


Рис. 8 - Коэффициент восстановления скорости для сферических частиц.

При значении E_H , близком к единице коэффициент восстановления уменьшается до нуля. Влияние параметра K_p на величину коэффициента восстановления не обнаружено в довольно широком диапазоне изменения (от 0.35 до 7.3).

Зависимость коэффициента восстановления частиц неправильной формы при прямом ударе от параметров E_H и K_p показана на рис. 9. Представлены результаты экспериментальных измерений коэффициента восстановления скорости при прямом ударе по плоскости, изготовленной из разных материалов. Частицы из антрацита, корунда, феррохрома, кварца, электрокорунда и золы.

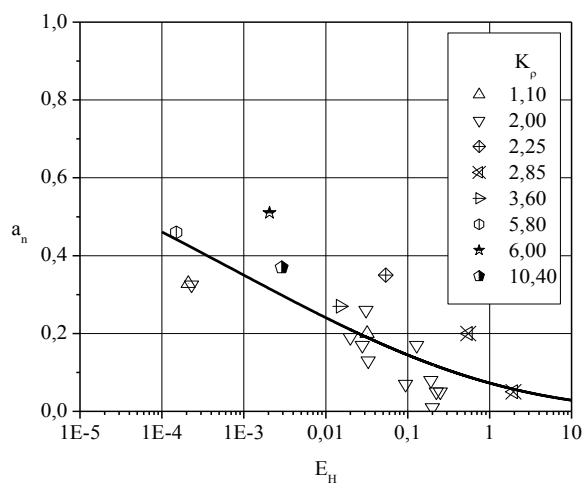


Рис. 9 - Коэффициент восстановления скорости для частиц неправильной формы.

Для сферы зависимость коэффициента восстановления проходит выше, чем для частиц неправильной формы, что говорит о влиянии формы частиц на характер их соударения с поверхностью.

В п.4.3 рассмотрена полуэмпирическая модель соударения недеформируемой сферы с металлическим полупространством.

Уравнения динамики сферы при ее внедрении в полупространство имеют вид

$$M_s \frac{dV_{cx}}{dt} = -R^2 \int_S \left(N \sin \theta \cos \varphi + T \frac{V_{tx}}{V_t} \right) \sin \theta d\theta d\varphi,$$

$$M_s \frac{dV_{cy}}{dt} = -R^2 \int_S \left(N \cos \theta + T \frac{V_{ty}}{V_t} \right) \sin \theta d\theta d\varphi,$$

$$\frac{2}{5} M_s \frac{d\omega_z}{dt} = R \int_S \left(T \frac{V_{tx}}{V_t} \cos \theta - T \frac{V_{ty}}{V_t} \sin \theta \cos \varphi \right) \sin \theta d\theta d\varphi,$$

где M_s - масса сферы, R - радиус сферы, V_c - скорость центра масс, V_t - касательная скорость на контактной поверхности, N - нормальные и T - касательные напряжения на контактной поверхности, ω - угловая скорость вращения.

Нормальные и касательные напряжения на контактной поверхности

$$N = \frac{H_1 + \rho_1 V_n^2}{1 + f(V_t) \cdot \operatorname{tg}(\phi)}, \quad T = \frac{f(V_t)(H_1 + \rho_1 V_n^2)}{1 + f(V_t) \cdot \operatorname{tg}(\phi)},$$

где $f(V_t)$ – функция коэффициента трения, аргументом которой является модуль касательной скорости V_t , ϕ – угол между вектором скорости, с которой движется точка на контактной поверхности, и нормалью к сфере в этой точке.

Методика позволяет рассчитать параметры внедрения (глубину и ширину лунки) и отскока (угол, линейную и угловую скорости) ударника. Проведено сравнение результатов расчета соударения сферы с преградой и имеющихся в литературе экспериментальных данных. Результаты расчета глубины внедрения, геометрических параметров лунки на поверхности преграды имеют удовлетворительное совпадение с данными экспериментов.

Произведены расчеты коэффициентов восстановления скорости для частиц при ударе под углом к поверхности тела. Показано, что при скоростях удара, превышающих 100 м/с, когда можно пренебречь упругими силами взаимодействия, результаты расчетов удовлетворительно совпадают с данными экспериментальных исследований.

На рис. 10 показаны результаты экспериментальных исследований коэффициента восстановления нормальной составляющей скорости для частиц неправильной формы при высокоскоростном ударе. Скорость удара составляла 85 м/с (квадратики) и 160 м/с (треугольниками). Материал преграды – сталь Ст.3. Расчет: сплошная линия – скорость удара 85 м/с, штриховая линия – 160 м/с. Несовпадение опытных и расчетных данных находится в пределах стандартного отклонения физических измерений коэффициента восстановления.

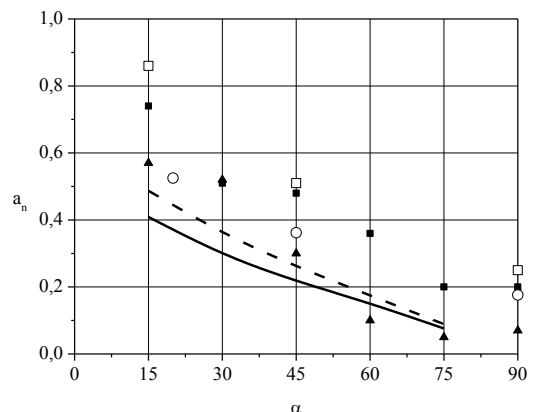


Рис. 10 - Коэффициент восстановления нормальной составляющей скорости частиц при высокоскоростном ударе.

На величину коэффициентов восстановления оказывает влияние скорость вращения частицы перед ударом. Поэтому учет вращения частиц при расчете движения твердой примеси является важным. Не вращающаяся сфера в конце удара за счет действия сил трения приобретает угловую скорость вращения. Сделан анализ распределения механической энергии движения отразившейся сферы по степеням свободы.

Приведены, расчетная зависимость коэффициента восстановления касательной составляющей скорости сферы при прямом ударе от критерия

E_H , рассчитанная для случая нулевого коэффициента трения, см. рис. 11 сплошная линия.

Под коэффициентом восстановления касательной составляющей скорости при прямом ударе понимается величина коэффициента a_τ при стремлении угла удара к прямому. Коэффициент восстановления касательной составляющей скорости сферы при прямом ударе уменьшается от 1 до 0 при увеличении скорости удара. Угол удара в расчетах принимался $\alpha=85^\circ$. Штриховая линия – результат расчета с использованием формулы трения Вихерта. Штриховая тонкая линия обозначает аппроксимацию результатов расчета коэффициента восстановления в отсутствие сил трения.

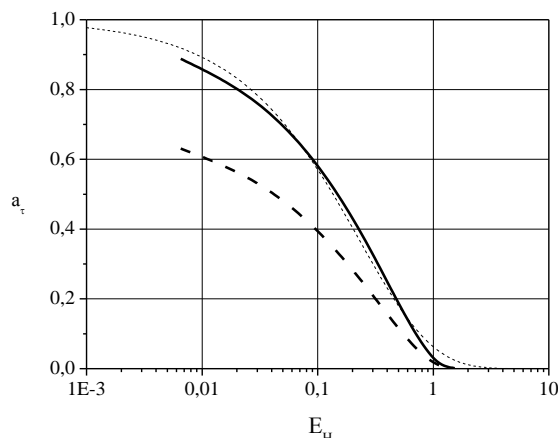


Рис. 11 – Коэффициент восстановления касательной составляющей скорости сферы при прямом ударе.

Получены интерполяционные соотношения для коэффициентов восстановления скорости частиц неправильной формы, удобные для практического использования.

Основные выводы и результаты работы

Диссертационная работа по исследованию коэффициентов восстановления скорости твердых частиц газозвеси при их взаимодействии с поверхностью обтекаемого тела получила цельное концептуальное завершение. Получен ответ на важную научную проблему, которая имеет большое значение при решении практических задач двухфазной аэро- и газодинамики – определение граничных условий для твердой фазы на поверхности обтекаемого тела. Рассмотрен широкий круг вопросов, связанных с освещением механизмов, определяющих характер соударения твердых частиц газозвеси с поверхностью тела. В результате законченного теоретического и экспериментального исследования получены практические рекомендации по определению коэффициентов восстановления скорости частиц и угловой скорости вращения частиц.

Коэффициент восстановления скорости является величиной, которая определяет передачу импульса и энергии от частицы к телу. Это значит, что коэффициент восстановления скорости связан со всеми аспектами (силовое, эрозионное, тепловое) ударного взаимодействия частицы с телом и позволяет их охарактеризовать. Что также говорит о важности полученных в диссертационной работе новых данных по коэффициентам восстановления скорости твердых частиц газозвеси.

Для проведения экспериментальных исследований силового воздействия газозвеси на тело разработаны и созданы экспериментальный стенд, средства измерения необходимых параметров: аэродинамические тензосенсоры, способные работать в тяжелых условиях двухфазного эксперимента, цифровая система управления и сбора экспериментальных данных в процессе эксперимента, оптические средства измерения параметров твердой фазы в потоке. Подготовлены и исследованы методики проведения экспериментов по изучению силового взаимодействия двухфазного потока с телом. Предложен способ определения силового воздействия на испытываемое тело каждой из фаз в отдельности. Устройство и способ определения силового воздействия на модель только твердой фазы в двухфазном потоке защищены авторским свидетельством. Разработана и реализована методика обработки сигнала лазерного доплеровского измерителя скорости с целью повышения надежности и точности измерения скорости твердых частиц. Проведены исследования параметров рабочей двухфазной струи: измерены плотность твердой фазы и скорость твердых частиц в двухфазном потоке. Таким образом, создан уникальный экспериментальный стенд, позволяющий проводить испытания по взаимодействию двухфазных потоков с поверхностью тела, и исследованы параметры его работы.

Проведены большие по объему экспериментальные исследования аэродинамического сопротивления классических тел (клин, конус, цилиндр, сфера) в двухфазном потоке в широком диапазоне изменения размеров частиц и концентрации и скорости твердой фазы в двухфазном потоке. Среднемассовый размер частиц 16-138 мкм, массовая расходная концентрация твердой фазы 0-0.3, скорость частиц от 50 до 350 м/с. Получены данные по коэффициентам сопротивления исследуемых тел от воздействия только твердых частиц. Коэффициент аэродинамического сопротивления клина и конуса от воздействия только твердых частиц зависит в основном от угла модели при вершине, а также от скорости твердых частиц. Влияния размера твердых частиц (при размере частиц более 40 мкм) и среднемассовой расходной концентрации твердой фазы в потоке в диапазоне от 0 до 0.2 на величину коэффициента сопротивления от воздействия только твердых частиц не выявлено. Проведены экспериментальные исследования аэродинамического сопротивления цилиндра и сферы в двухфазном потоке, которые показали, что введение твердой примеси в поток газа на режимах обтекания, близких к «критическому», приводит к значительному уменьшению сопротивления кругового цилиндра. Падение сопротивления цилиндра и сферы связано с дестабилизирующим воздействием твердых частиц на пограничный слой газа на теле.

Разработана и обоснована методика экспериментального измерения коэффициентов восстановления скорости при ударе твердых частиц газозвеси о поверхность пластины, установленной под углом к оси потока.

Рассмотрены факторы, которые приводят к снижению точности измерения коэффициентов восстановления: межфазное взаимодействие в возмущенной зоне течения смеси около модели, защитный слой отраженных от модели частиц, разброс частиц по размерам. Определены условия эксперимента (область допустимого изменения основных параметров), при которых влияние этих факторов сведено к допустимой величине.

Экспериментально получены новые данные по коэффициентам восстановления скорости частиц для различных материалов поверхности в широком диапазоне изменения размеров и скорости частиц. Показано, что основными параметрами, характеризующими величину коэффициентов восстановления скорости, является угол удара частицы о поверхность, их скорость, а также физико-механические свойства материала поверхности.

На основе обзора работ, посвященных исследованию различных сторон (силовое, эрозионное) взаимодействия двухфазных гетерогенных потоков с телом, предложены критерии, описывающие характер взаимодействия твердых частиц с поверхностью, определяющие величину коэффициентов восстановления скорости. Исследования показали, что основным критерием, который позволяет обобщить экспериментальные данные по коэффициентам восстановления скорости, является величина, определяющая отношение инерционных сил ударника к силам сопротивления внедрению

$$E_H = \frac{\rho_2 V_0^2}{H_1}.$$

При обобщении данных по коэффициенту восстановления скорости при прямом ударе использованы результаты исследований, полученные разными авторами на разных типах установок, с использованием различных методов и средств измерения. Предложены эмпирические соотношения для коэффициента восстановления нормальной составляющей скорости частиц сферической и неправильной формы при прямом ударе, удобные для практического использования в широком диапазоне изменения параметра E_H (10^{-6} -10). Исследования также показали важность учета формы твердых частиц при определении коэффициентов восстановления скорости.

Предложена полуэмпирическая модель ударного взаимодействия недеформируемой сферы, внедряющейся в металлическое полупространство под произвольным углом к поверхности, в диапазоне скоростей удара 100-1000 м/с. Использование этой модели для расчета взаимодействия твердой дисперсной частицы с поверхностью обтекаемого тела позволяет обоснованно рассчитать кинематические параметры отскочившей частицы для каждого конкретного случая. Проведены расчеты коэффициентов восстановления нормальной и касательной составляющих скорости частицы при ударе под углом и сравнение с полученными экспериментальными данными. Данные расчета и результаты измерений коэффициентов восстановления скорости частиц находятся в удовлетворительном согласии.

Предложенная модель позволяет получить данные по угловой скорости вращения отраженной частицы. Отмечается значительное влияние скорости вращения налетающей частицы на коэффициенты восстановления скорости. Причем это влияние сказывается как на величине коэффициентов восстановления скорости, так и на характере зависимости коэффициента восстановления от угла удара. Изменение направления вращения падающей частицы может кардинально поменять характер поведения зависимости коэффициента касательной составляющей скорости от угла удара. Величина коэффициента восстановления касательной составляющей скорости при углах удара близких прямому с увеличением скорости удара уменьшается и стремится к нулю. Получены интерполяционные соотношения для коэффициентов восстановления нормальной и касательной составляющих скорости частиц неправильной формы, удобные для практического применения.

Список цитированной литературы

- 1 Полежаев Ю.В., Романченков В.П., Чирков И.В., Шебеко В.Н. Расчетная модель процесса эрозионного разрушения композиционного материала // Инж.-физ. журн. 1979. Т.37. №3. С.395-404.
- 2 Эйчельбергер Р., Кайнике Дж. Высокоскоростной удар // Физика быстропротекающих процессов. М.: Мир. Т.2. 1971. С.204-246.
- 3 Назаров С.И., Червяков И.Б. Энергетический баланс контактного взаимодействия твердой сферической частицы с поверхностью материала // Трение и износ. 1982. №5. С.903-909.
- 4 Виноградов В.Н., Бирюков В.И., Назаров С.И., Червяков И.В. Экспериментальное исследование кинематических параметров удара шара о плоскую поверхность материала // Трение и износ. 1981. №4. С.584-588.
- 5 Циркунов Ю.М., Панфилов С.В., Клычников М.Б. Полуэмпирическая модель ударного взаимодействия дисперсной частицы примеси с поверхностью, обтекаемой потоком газовой среды // Инж.-физич. журнал. 1994. Т.67. №5-6. С.379-386.
- 6 Sommerfeld M., Huber N. Experimental analysis and modeling of particle-wall collisions // International journal of multiphase flow. 1999. V.25. P.1457-1489.
- 7 Деревич И.В. Вероятностная модель столкновения частиц с шероховатой поверхностью // Прикладная математика и техническая физика. 1999. Т.40. №5. С.239-244.
- 8 Tsirkunov Yu.M., Panfilov S.V. Particles scattering in particle-wall collisions and its effect on the particle-phase flow // EUROMECH Colloquium 447 "Interaction Phenomena in Turbulent Particle-Laden Flows", 18-20 June 2003. Tallinn, Estonia. Abstracts. – Tallinn, Estonian Energy Research Institute at Tallinn Technucal University. 2005. P.125-138.
- 9 Стасенко А.Л. Коэффициенты восстановления скорости частицы при отражении от поверхности твердого тела // Инженерно-физический журнал. Минск. 2007. Т.80. №5. С.38-44.

- 10 Витман Ф.Ф., Степанов В.А. Влияние скорости деформирования на сопротивление деформированию металлов при скоростях удара $10^2 - 10^3$ м/с // Некоторые проблемы прочности твердого тела. АН СССР. 1959. С.207-221.
- 11 Витман Ф.Ф., Златин Н.А. О процессе соударения деформируемых тел и его моделировании. I // Журнал технической физики. 1963. Т.XXXIII. №8. С.982-989.
- 12 Кангур Х.Ф., Клейс И.Р. Экспериментальное и расчетное определение коэффициента восстановления при ударе // Изв. АН СССР. МТТ. 1988. №5. С.182-185.
- 13 Коуз, Ли. Тепловой поток от падающей на поверхность струи ракетного двигателя // Ракетная техника и космонавтика. 1965. №1. С.255-257.

Публикации по теме диссертации:

1. Лашков В.А. Инерционное осаждение твердых частиц на симметричном клине, обтекаемом дозвуковым двухфазным потоком // Вестник Ленинградского университета. Сер.1. Вып.4. 1988. С.58-61.
2. Лашков В.А. Об экспериментальном определении коэффициентов восстановления скорости частиц потока газозвеси при ударе о поверхность // Инженерно-физический журнал. Т. 60. №2. 1991. С.197-203.
3. Лашков В.А. Аэродинамическое сопротивление цилиндра в двухфазном потоке // Изв. АН РАН. Механика жидкости и газа. №1. 1992. С.123-129.
4. Анисимов Ю.И., Лашков В.А., Машек И.Ч. Спонтанное рассеяние Мандельштамм-Бриллюэна в лазерной доплеровской диагностике высокоскоростных газовых потоков // Автометрия. №5. Новосибирск, 2000. С.15-17.
5. Лашков В.А. Взаимодействие твердых частиц газозвеси с поверхностью сложного профиля // Вест. С.-Петербур. ун-та. Сер.1. 2008. Вып.4. С.125-130.
6. Лашков В.А., Матвеев С.К. Изменение шероховатости поверхности под воздействием облака частиц // Вестн. С.-Петербур. ун-та. Сер.1. 2009. Вып.1. С.76-82.
7. Лашков В.А. Коэффициент восстановления скорости при прямом ударе // Вестник СПбГУ. Сер.1. 2010. Вып.4. С.127-136.
8. Лашков В.А. Коэффициент восстановления скорости при ударе под углом // Вестник СПбГУ. Сер.1. 2010. Вып.2. С.31-38.
9. Лашков В.А., Соловьев В.Ю., Шмитт А.А., Баглаев С.Б., Жуковец Ю.Л. Газодинамическое устройство доставки. Патент на полезную модель РФ №68677 // 27 ноября 2007.
10. Анисимов Ю.И., Зеленков О.С., Лашков В.А. Автоматизированный ЛДИС двухфазных потоков со световодной системой передачи излучения // Тезисы докладов на XV Всесоюзном семинаре по газовым струям. ЛМИ. Ленинград. 1990. С.5.

11. Анисимов Ю.И., Зеленков О.С., Лашков В.А., Машек И.Ч. Дистанционный ЛДИС высокоскоростных турбулентных потоков // Тез. докл. 1-й Всесоюзной конференции по оптическим методам исследования потоков. Новосибирск. 1991. С11.

12. Анисимов Ю.И., Зеленков О.С., Лашков В.А., Машек И.Ч. Помехоустойчивые лазерные доплеровские методы диагностики высокоскоростных двухфазных потоков // Санкт-Петербург. Деп. ВИНТИ №15-В92 от 30.01.92.

13. Зеленков О.С., Лашков В.А. Автоматизированная система обработки сигнала ЛДИС // Санкт-Петербург. Деп ВИНТИ №405-В95 от 13.02.95.

14. Анисимов Ю.И., Лашков В.А., Машек И.Ч. Лазерный доплеровский волоконно-оптический измеритель параметров высокоскоростных двухфазных течений // Материалы Международной школы-семинара «Внутрикамерные процессы, горение и газовая динамика дисперсных систем». С.-Петербург. 1995. С.76-77.

15. Анисимов Ю.И., Лашков В.А., Машек И.Ч. Лазерный доплеровский анализатор двумерных полей скорости и концентрации высокоскоростных двухфазных потоков // Сб. мат. Международной школы-семинара «Внутрикамерные процессы, горение и газовая динамика дисперсных систем». С.-Петербург. 1995. С.78-79.

16. Матвеев С.К., Зеленков О.С., Кочерыженков Г.В., Лашков В.А., Максимов В.Ф., Машек И.Ч., Соловьев В.Ю., Чунаев А.В. Теоретическое и экспериментальное исследование методов управления газообразным износом поверхности с помощью экранирующего слоя отраженных частиц // Информационный бюллетень РФФИ. 4(1996). 1(январь). 160.

17. Агапов А.С., Анисимов Ю.И., Лашков В.А., Машек И.Ч. Многочастотный лазер в интерферометрическом измерителе скорости сверх- и гиперзвуковых потоков // Тр. «Международной конференции по проблемам физической метрологии». С.-Петербург. 1996. С.11.

18. Анисимов Ю.И., Лашков В.А., Машек И.Ч. Визуализация полей скоростей пространственно сложных потоков с помощью абсорбционного доплеровского детектора // Тез. докл. Второй Международной конференции по проблемам физической метрологии ФИЗМЕТ-96. С.-Петербург. 1996. С.18-21.

19. Анисимов Ю.И., Агапов А.А., Лашков В.А., Машек И.Ч., Машек А.Ч. Лазерная доплеровская система для диагностики высокоскоростных кинетических потоков // Сб. мат. Второй Международной школы-семинара «Внутрикамерные процессы, горение и газовая динамика дисперсных систем». С.-Петербург. 1997. С110-111.

20. Анисимов Ю.И., Агапов А.А., Лашков В.А., Машек И.Ч., Машек А.Ч. Экспериментальная установка для исследования процессов взаимодействия высокоскоростных импульсных плазменных струй с

дисперсными взвесями // Тез. докл. XVI Всероссийского семинара «Течения газа и плазмы в соплах, струях и следах». С.-Петербург. 1997. С.93.

21. Анисимов Ю.И., Агапов А.А., Лашков В.А., Машек И.Ч., Машек А.Ч. Лазерная доплеровская диагностика микрометеоритных потоков // Тез. докл. IV Научно-технической конференции «Оптические методы исследования потоков». Москва. 1997. С.25-26.

22. Лашков В.А., Матвеев С.К. Исследования двухфазных течений в Лаборатории газовой динамики // Гидроаэромеханика. (Под ред. В.Г.Дулова) СПб.: Изд-во С.-Петербургского ун-та. 1999. С.186-215.

23. Анисимов Ю.И., Иванова Е.И., Лашков В.А., Максимов С.В., Машек И.Ч. Лазерный доплеровский измеритель скорости потоков чистого газа на рассеянии Мандельштам-Бриллюэна // Тез. докл. 5-й Международной конференции по оптическим методам исследования потоков ОМИП-99. МЭИ. Москва. 1999. С7-9.

24. Анисимов Ю.И., Ефремова Е.А., Лашков В.А., Машек И.Ч. Исследование Мандельштам-Бриллюэновского рассеяния в сверхзвуковых газовых потоках методами лазерной доплеровской спектроскопии // Тезисы докладов X конференции по лазерной оптике (отделение молодых исследователей). С.-Петербург. СПбГУ. 26-30 июня 2000. С.29.

25. Анисимов Ю.И., Лашков В.А., Машек И.Ч. Оптический доплеровский процессор абсорбционного типа для лазерной диагностики высокоскоростных кинетических потоков // Тезисы доклада на Всероссийском семинаре "Лазерная диагностика и аналитика в науке и технологиях". С.-Петербург. СПбГУ. 2000.

26. Лашков В.А., Матвеев С.К., Машек И.Ч. О разгоне частиц в длинных соплах и насадках // XXI Всероссийский семинар «Струйные, отрывные и нестационарные течения». Новосибирск. 2007. С.145-146.

27. Лашков В.А., Матвеев С.К., Баглаев С.Б., Соловьев В.Ю., Шмитт А.А. Разработка пневматического метательного устройства для создания аэрозольных образований // Международная конференция «Шестые Окуневские чтения». С.-Петербург. 2008. Том 3. С.4-8.

28. Лашков В.А. Коэффициент восстановления скорости при соударении частиц твердой фазы с поверхностью тела // «Всероссийский семинар по аэрогидродинамике», посвященный 90-летию С.В.Валландера. Санкт-Петербург. 5-7 февраля 2008. С.129.

29. Лашков В.А., Матвеев С.К., Машек И.Ч. Теоретическое и экспериментальное исследование двухфазных течений в технических устройствах // Аэродинамика (К 90-летию со дня рождения С.В.Валландера): Сб. статей под ред. Р.Н.Мирошина. – М.: Издатель И.В.Балабанов, 2008. – 256с. С.34-45.

30. Лашков В.А. Взаимодействие твердых частиц газозвеси с поверхностью тела // Международная научная конференция по механике «Пятое Поляховские чтения». Санкт-Петербург. 3-6 февраля 2009.