

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

ПЕТРОВ ДМИТРИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

ТЕЧЕНИЯ ВРАЩАЮЩИХСЯ ГАЗОВЗВЕСЕЙ

01.02.05 — механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург
2008 г.

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

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор Цибаров Валерий Афанасьевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Стасенко Альберт Леонидович

кандидат физико-математических наук,
доцент Рябикова Татьяна Владимировна

Ведущая организация: Санкт-Петербургский государственный
технологический институт (технический
университет).

Защита состоится “ ” 2008 г. в часов на заседании совета Д 212.232.30 по защите докторских и кандидатских диссертаций при Санкт-Петербургском государственном университете по адресу: 198504, Санкт-Петербург, Петродворец, 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 “ ” 2008 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор физико-математических наук, профессор

С.А.Зегжда

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Актуальность рассмотрения газовзвесей и их течений, в том числе вращательных, обусловлена тем, что вблизи поверхности Земли саму атмосферу, вообще говоря, нужно рассматривать как газовзвесь из-за наличия взвешенных частиц разных типов — частичек почвы, капель конденсировавшейся влаги, аэрозольных частиц, образующихся в результате человеческой деятельности. Атмосферные аэрозоли важны для понимания механизмов изменений погоды и климата. Облака, туманы и дымы, смог — вот лишь несколько примеров природных аэрозолей, играющих важнейшую роль в создании облика Земли, в жизни на ней. Несколько более концентрированные искусственно созданные аэрозоли человек использует в своей повседневной жизни и деятельности. В аэрозольной форме выпускаются лекарства и удобрения, создается оружие. Газовзвесью является и загрязненная воздушная среда с частицами ядовитых веществ в твердом и жидком состояниях, которая, конечно, отрицательно влияет на здоровье человека. С этим связано отнесение обеспечения чистоты воздуха, вдыхаемого человеком, к одной из наиболее важных проблем экологии. Следует иметь в виду, что взвешенные частицы обладают «сильно развитой» поверхностью, на которой могут протекать химические реакции, процессы горения и адсорбции, а также взаимодействия с электрическим полем. «Развитость» поверхности влияет на гигроскопичность вещества. Поэтому газовзвеси активно используются в химической промышленности. Многие промышленные выбросы также имеют аэрозольную форму. При этом поведение аэрозолей и вообще газовзвесей остается недостаточно изученным, наука о течениях взвесей частиц продолжает развиваться.

Вращательные (вихревые, циркуляционные) течения являются одним из основных видов движения жидких и газообразных сред. В частности, для метеорологии весьма важной задачей является исследование структуры и поведения атмосферных смерчей.

Вращательные течения газовзвесей могут быть использованы для сепарации частиц. На таких принципах работают, в частности, аэрозольные центрифуги. Возможно использование в технике

закручивания потока за счет столкновения встречных течений, как это происходит в природе при образовании мезоциклонов и смерчей на атмосферных фронтах. Пузыреобразование в псевдооживленном слое также может привести к циркуляционным течениям взвесей.

При построении в диссертации моделей рассматриваемой среды учитываются процессы испарения — конденсации и агрегирования — распада взвешенных частиц. Учет испарения и конденсации важен не только для описания природных процессов (круговорот воды в природе, облачность, туманы). Он требуется для использования результатов работы в химической промышленности. В качестве примеров промышленного применения испарения и конденсации можно привести производство порошкового молока и кофе. Процессы испарения и конденсации приводят к изменению распределения аэрозолей по размерам. На практике атмосферные аэрозоли обычно описывают с помощью некоторой средней величины размера частиц, но не всегда такое описание достаточно точно. Процессы агрегирования и распада, учитываемые в диссертации при построении моделей газозвеси, важны при решении экологических задач, при исследовании динамики явлений в атмосфере (например, град), изучении течений коллоидных растворов, а в промышленности — процессов спекания взвешенных частиц при высокой температуре. Проблема сочетания простоты и точности при описании таких процессов в природе и в промышленности пока далека от завершения.

Актуальность математического описания течений вращающихся газозвесей связана с необходимостью расчета и предсказания значений макропараметров. Это особенно важно для прогноза погодных явлений. Применение кинетического подхода позволяет получить замыкающие соотношения и граничные условия для уравнений переноса, а его область применимости существенно шире области применимости традиционно используемых гидродинамических подходов.

Цель работы. Целью работы является построение модели газозвеси (двухфазной в гидродинамическом смысле среды) с учетом процессов испарения — конденсации и агрегирования —

распада, выделяя для описания взвешенной фазы как одну, так и две компоненты. Закрытая модель газозвеси должна быть построена на кинетическом уровне с последующим переходом на сокращенное гидродинамическое описание и упрощением получившейся на континуальном уровне системы уравнений для описания атмосферного смерча (торнадо) в предельном приближении с учетом крупномасштабности явления. Целью моделирования смерча является нахождение формы поверхности его идеального ядра, полей скоростей, плотности и давления среды внутри воронки смерча.

Основной метод исследования. Для описания газозвеси используется кинетический подход и его реализация из монографии В.А. Цибарова «Кинетический метод в теории газозвесей» (СПб: Изд-во СПбГУ, 1997. - 192 с.). При этом подходе явление моделируется на «микроуровне», а замыкающие соотношения для уравнений переноса получаются в результате приближенного решения кинетических уравнений по модифицированному аналогу асимптотического метода Чепмена — Энскога, что позволяет получить замыкающие соотношения для системы гидродинамических уравнений сплошных сред на уровне минимального числа макропараметров.

Применяемое обобщение метода Чепмена — Энскога, в отличие от традиционного метода, приводит к зависимости коэффициентов переноса не только от частот соударений частиц фаз, но и к их зависимости от гидродинамических полей.

Научная новизна. В рамках кинетического описания всех фаз газозвеси с принятой схемой рассеяния молекул несущей фазы на поверхностях включений путем проведения последовательного учета испарения и конденсации с получением соответствующих замыкающих соотношений для кинетических уравнений построена новая замкнутая кинетическая модель среды со взвешенными частицами. Впервые выписан оператор обводнения — сушки включений. Новыми являются и замыкающие соотношения для макроскопических уравнений переноса в первых двух

приближениях по модифицированному методу Чепмена — Энскога, а также расширение замкнутой макроскопической системы уравнений переноса при рассматриваемых в диссертации процессах. Получено обобщение классического точного локально равновесного решения кинетического уравнения применительно к уравнению взвешенной фазы в условиях слабой неравновесности и нестационарности течения, наличия процессов испарения — конденсации, агрегирования — распада и обводнения — сушки включений, а также с учетом конечности размеров включений. Впервые полностью кинетическое описание всех фаз газозвеси применено к решению задачи об атмосферном смерче.

Достоверность полученных результатов обусловлена достоверностью результатов кинетического подхода в теории газозвесей, применением апробированного асимптотического метода решения кинетических уравнений, положительным опытом применения данного подхода к широкому кругу явлений, а также качественным совпадением полученных результатов с известными экспериментальными данными и особенностями явлений.

Практическая ценность. Построенные в данной работе кинетические модели могут быть применены для описания ряда течений любых газозвесей с наличием испарения и конденсации на взвешенных в потоке частицах, а также агрегирования и распада самих этих частиц. Полученные из них газодинамические системы (сокращенные описания) позволяют непосредственно рассчитывать такие течения в случае слабого отклонения от равновесия. Они применимы в задачах метеорологии и химической промышленности, в других областях науки и техники.

Апробация результатов работы. Результаты данной диссертации были доложены на конференции «Третьи Поляховские чтения» (СПб, СПбГУ, 2003), XX Международном семинаре по струйным, отрывным и нестационарным течениям (СПб, СПбГУ, 2004), конференции «Четвертые Поляховские чтения» (СПб, СПбГУ, 2006), IV Международной конференции по неравновесным

процессам в соплах и струях (NPNJ-2006, СПб, СПбГУ, 2006), Всероссийском семинаре по аэрогидродинамике, посвященном 90-летию со дня рождения Сергея Васильевича Валландера (СПб, СПбГУ, 2008), а также на научных семинарах кафедры гидроаэромеханики и лаборатории аэродинамики СПбГУ.

Публикация результатов. По теме диссертации имеется десять опубликованных работ, которые содержатся в списке на стр. 14 – 15. В совместной публикации [1] диссертанту принадлежат результаты по модели торнадо: обзор приводимых в литературе данных о параметрах атмосферных смерчей, постановка задачи, формула для радиуса идеального ядра смерча в зависимости от расстояния по высоте (форма поверхности ядра смерча), выражения для тангенциальной и угловой скоростей на поверхности воронки смерча.

В статье [4] диссертанту принадлежат: исторический обзор и участие в отработке физической и математической постановки задачи.

В совместной публикации [5] диссертанту принадлежат: подборка материала по смерчам и их особенностям; участие в отработке постановки задачи; численные оценки вклада вязких членов в уравнения переноса; решение для компонент скорости течения в воронке смерча.

В статье [7] диссертанту принадлежит: постановка задачи о течении трехкомпонентной газозвеси при описании на уровне функций распределения в рамках предложенных соавтором схемы рассеяния молекул газа и пара на включениях, а также рассмотрения операторов парных взаимодействий между молекулами газа и пара, молекулами пара друг с другом и молекулами газа друг с другом как операторов быстрой стадии процесса.

В совместной публикации [9] диссертанту принадлежат: постановка задач о течении трех- и четырехкомпонентной газозвеси на кинетическом и континуальном уровнях описания, оценка вклада различных членов в кинетические уравнения, получение вида источников в уравнениях диффузии и уравнении для функции распределения по размерам включений в соответствии с предложенной соавтором схемой взаимодействия между

молекулами газовой фазы и включениями. Модификация формы записи оператора агрегирования — распада при одно-двухчастичных взаимодействиях произведена совместно обоими авторами.

Остальные результаты в статьях [1, 4, 5, 7, 9] принадлежат соавторам. В подготовке 5 докладов и материалов на различных конференциях (см. [2 — 3, 6, 8, 10]) вклад соавторов одинаковый. Статьи [5] и [9] опубликованы в рецензируемом научном журнале, входящем в перечень ВАК на момент публикации.

Структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Она изложена на 129 страницах текста. Список литературы содержит 79 наименований. Работа содержит 1 таблицу и 13 рисунков.

Положения, выносимые на защиту:

1. Модификация и конкретизация кинетической модели газозвеси В.А. Цибарова, позволяющая учесть процессы испарения и конденсации, обводнения и сушки в рамках принятого закона рассеяния на частицах и эффективных корреляционных функций, зависящих от объемной доли всех включений.
2. Классификация режимов течения газозвесей в зависимости от эффективного диаметра включений и их объемной доли.
3. Замкнутая на основе принятой кинетической модели постановка о “макроскопическом” (континуальном) течении газозвеси, учитывающая процессы испарения и конденсации, агрегирования и сушки в приближении идеальных фаз (включая предельную задачу) и вязкой взвешенной фазе.
4. Точное слабо неравновесное решение кинетических уравнений взвешенной фазы, обобщающее классические результаты для точного локально равновесного режима на нестационарные и рассматриваемые в диссертации процессы.

5. Решение приближенной (предельной) задачи о течении газозвеси внутри идеального ядра смерча, включая нахождение его границы.

2. КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении содержатся сведения о структуре текста диссертации, определения основных используемых понятий. Здесь же размещены замечания об актуальности исследования и различных его моментов, целях работы, основаниях достоверности полученных результатов и об их практической ценности. В заключительном параграфе введения приводится краткий обзор истории исследований газодисперсных сред, процессов испарения и конденсации, применяемого метода исследования — моделирования на кинетическом уровне.

Полностью кинетический подход к описанию всех фаз газозвеси не является единственным. С 1960-х развивался полукинетический подход (кинетическое моделирование взвешенной фазы и континуальное описание несущей среды), в становлении которого можно отметить работы В.П. Мясникова и его школы, Ф.Е.С. Culic, Г.Л. Бабухи, А.А. Шрайбера, В.С. Галкина, Ю.М. Циркунова и др. Описанием газозвесей на континуальном уровне с применением феноменологического подхода занимались Х.А. Рахматулин, Н.А. Слезкин, Р.И. Нигматулин, А.Л. Стасенко и др. Такой подход внутренне не замкнут. Метод осреднения в теории гетерогенных сред развивался, в основном, в работах Р.И. Нигматулина. Но его также нельзя отнести к замкнутым методам. Впервые подход, основанный на кинетическом описании всех фаз газозвеси, был предложен в 1974 г. В.А. Цибаровым. Полностью кинетический подход также разрабатывался В.В. Струминским и Ю.П. Лунькиным. В настоящее время он продолжает развиваться в трудах их школы и в работах В.Я. Рудяка с соавторами. Эти результаты относятся к кинетическому описанию мелкодисперсных слабо концентрированных газозвесей. Применительно к задачам химической технологии кинетическое описание концентрированных газозвесей продолжает развиваться в работах И.О. Протодюконова, В.А. Цибарова, Ю.Г. Чеснокова и их учеников.

В диссертационной работе производится попытка описания гетерогенных процессов конденсации и испарения в газозвеси. Очень сложным проблемам нуклеации и конденсации — испарения посвящено значительное число работ в нашей стране и за рубежом. В частности, применительно к задачам аэродинамики таким проблемам уделялось большое внимание в ЦАГИ и МФТИ (Б.В. Егоров, А.Л. Стасенко и др.)

В диссертации тонкие вопросы теории нуклеации не рассматриваются. В ней процессы испарения и конденсации учитываются в операторе взаимодействия газ — взвешенные частицы в сравнительно огрубленном приближении в рамках принятой схемы рассеяния газа и пара включениями.

В первой главе на основе кинетического подхода, примененного к описанию всех фаз газозвеси, строятся 5 моделей газозвеси, каждая из которых детальнее и сложнее предыдущей. После рассмотрения монодисперсной газозвеси без учета обмена веществом между ее компонентами, последовательно подключаются сначала только процессы испарения и конденсации, затем — только процессы агрегирования и распада взвешенных в потоке частиц. При этом взвесь уже описывается как трехкомпонентная среда. Затем выписывается модель трехкомпонентной среды с учетом как испарения и конденсации одной из компонент несущей фазы, так и агрегирования — распада взвешенных частиц. Наконец, строится кинетическая модель двухфазной четырехкомпонентной агрегирующей газозвеси с учетом испарения и конденсации пара, а также вызванных испарением и конденсацией спонтанных переходов включений из одного сорта в другой. После этого проводится анализ вклада различных членов в кинетические уравнения наиболее общей, четырехкомпонентной модели. При этом производится классификация режимов течения газозвесей в зависимости от эффективного диаметра включений и их объемной доли. Выписываются локально-равновесные функции распределения. Завершает главу параграф о применении принципа отбора к построенным кинетическим моделям, т.е. учет граничных условий и «микродинамических» законов сохранения.

Вторая глава посвящена построению сокращенного гидродинамического описания для рассматривавшихся в первой главе моделей, описания сред на континуальном уровне. Для каждой модели выписываются системы газодинамических уравнений, замкнутые с помощью соотношений, получаемых из соответствующих кинетических моделей. Рассмотрение непрерывного распределения включений по размерам и массам приводит к иным, чем в работах В.А. Цибарова выражениям для коэффициентов переноса. В формуле для коэффициента псевдотеплопроводности коэффициент сдвиговой вязкости, вычисленный по модели Больцмана, теперь следует делить на поправочный коэффициент χ_q . Во всех остальных коэффициентах переноса для учета отклонения от монодисперсности взвешенной фазы коэффициент сдвиговой вязкости, вычисленный по модели Больцмана, делится на χ_v . Вычисленные значения поправочных коэффициентов приведены в тексте диссертации. Затем уравнения для четырехкомпонентной модели, описывающие 2 взаимопроникающих континуума, преобразуются в эквивалентную систему для среды в целом и межфазовой диффузии. Выписывается решение для разности скоростей фаз. При условии малости этой величины (соблюдение этого условия затем проверяется) по сравнению с характерными скоростями взвешенных частиц с указанной степенью точности система уравнений подвергается дальнейшему упрощению для непосредственного использования в третьей главе с целью моделирования смерча и решения задачи о сепарации взвешенных частиц. Завершает вторую главу анализ преимуществ полученных из кинетического подхода газодинамических систем уравнений перед уравнениями, записанными феноменологически или полученными методом осреднения.

Третья глава содержит примеры применения построенных моделей газозвеси. В ней строится точное слабо неравновесное решение кинетических уравнений взвешенной фазы, обобщающее классические результаты для точного локально равновесного

режима на нестационарные и рассматриваемые в диссертации процессы. Затем рассмотрена задача о моделировании атмосферного смерча (торнадо).

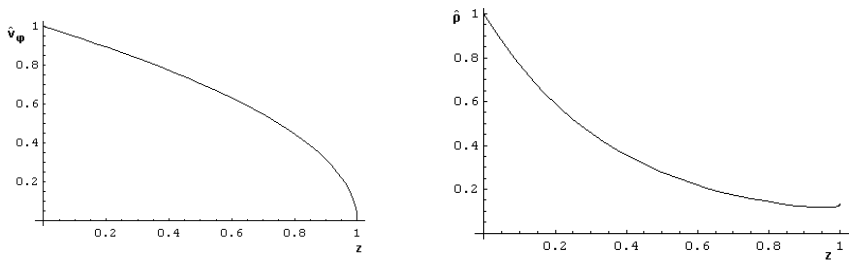


Рис. 1 Зависимости безразмерных тангенциальной скорости (на графике слева) вдоль внутренней поверхности смерча и плотности среды (справа) внутри воронки смерча от безразмерной высоты (отнесенной к высоте смерча).

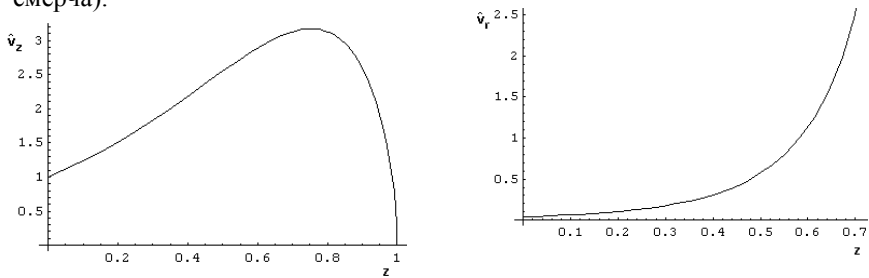


Рис. 2 Зависимости безразмерных вертикальной (на графике слева) и радиальной (справа) компонент вектора скорости внутри воронки смерча от безразмерной высоты (отнесенной к высоте смерча). Для радиальной скорости построена зависимость вдоль траектории.

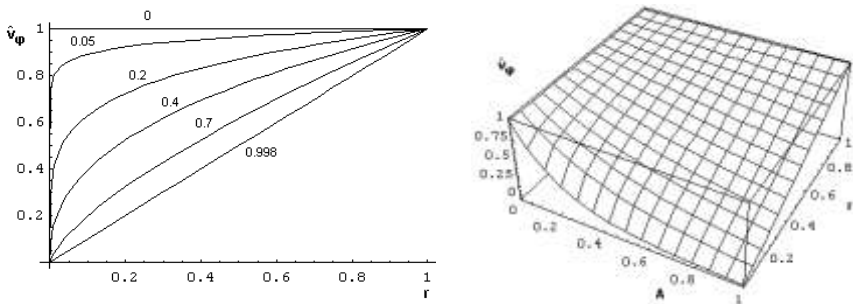


Рис. 3 Зависимости безразмерной (отнесенной к значению при $z=0$ и $r=R_0$) тангенциальной скорости внутри смерча от безразмерного радиуса смерча (отнесенного к радиусу воронки смерча) и параметра A_{eff} (слева построено

несколько кривых при указанных около них значениях A_{eff}) в плоскости $z=0$.

Задача о смерче изложена в двух постановках: в «классической» параметры в наименьшем (нижнем) сечении воронки смерча считаются известными. В приближении крупномасштабного квазистационарного течения идеальной газозвеси (с эффективными, учитывающими примесь, параметрами) по ним строится форма границы воронки, отыскиваются параметры течения внутри смерча. Затем рассматривается «неклассическая» постановка задачи, в которой решение для тангенциальной скорости ищется на основании решения в вязком слое на неизвестной границе воронки смерча с учетом антисимметричных напряжений в среде, вызванных наличием примеси. «Неклассическая» постановка позволяет определять параметры течения в атмосферном вихре без наличия данных измерений под воронкой, в зоне вызываемых смерчем разрушений. По построенному решению найдены линии тока.

После этого указываются возможности применения полученных в ходе моделирования смерча результатов к промышленным задачам, связанным с сепарацией взвешенных частиц, устанавливается применимость результатов к задаче о выбросах загрязнений.

Заключение. В диссертации построена конкретизация кинетической модели газозвеси, разработанной В.А. Цибаровым. Модернизированная модель последовательно учитывает испарение и конденсацию, агрегирование и распад взвешенных частиц, обводнение и сушку включений. Непрерывный характер распределения включений по объемам приводит к несколько иным значениям коэффициентов переноса по сравнению с приведенными в работах В.А. Цибарова. Попарное подключение взаимно обратных процессов влечет наличие в каждой из этих пар состояний динамического равновесия. В ходе анализа вклада в кинетические уравнения операторов, описывающих различные пары рассматриваемых процессов, получена диаграмма, определяющая вид первого приближения к решению задачи о течении газозвеси от объемной доли примеси и диаметра взвешенных частиц. Все

вычисления новых замыкающих соотношений в построенных моделях газозвеси проводились в рамках только самой системы кинетических уравнений и принятой обобщенной диффузной модели испарения — конденсации на включениях. Построенная в работе модель двухфазной четырехкомпонентной газозвеси с учетом выше упомянутых процессов после перехода к сокращенному гидродинамическому описанию применяется для исследования вращающихся течений газозвеси. В качестве основной задачи выступает построение математической модели атмосферного смерча. Получена форма границы течения и решение для скорости, плотности и давления среды внутри. Проанализирован ход процессов испарения и конденсации (при постоянной вероятности поглощения молекул), агрегирования и распада включений. Показано, что со временем происходит релаксация этих процессов, выход на равновесие, что соответствует известным положениям термодинамики и реально наблюдаемой картине явлений. Результаты соответствуют качественным наблюдениям, описанным в литературе. Решения, полученные в задаче о смерче, проиллюстрированы графиками (см. рис.1 — 3 на стр.12). Дополнительным примером применения модели среды выступает течение, задаваемое точным локально равновесным решением кинетических уравнений. Решение уравнений взвешенной фазы обобщает классические результаты на случай нестационарного течения с возможностью учета процессов испарения — конденсации и агрегирования — распада включений.

3. ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Лутов Н.Н., Петров Д.А., Цибаров В.А. Течение вращающихся газозвесей // *Аэродинамика* / Под ред. Р.Н. Мирошина. СПб.: НИИ Химии СПбГУ, 2002. С. 82–89.
2. Петров Д.А., Цибаров В.А. Математическая модель смерча (торнадо) // *Третьи Поляховские чтения: Тезисы докладов*. СПб.: НИИХ СПбГУ, 2003. С. 154.
3. Петров Д.А., Цибаров В.А. Течение газозвеси внутри торнадо // *Тезисы докладов XX*

Международного семинара по струйным, отрывным и нестационарным течениям. СПб.: ИПЦ СПбГУТД, 2004. С. 207.

4. Петров Д.А., Цибаров В.А. Стохастическая модель торнадо с учетом агрегирования и конденсации // *Аэродинамика* / Под ред. Р.Н. Мирошина. СПб.: «ВВМ», 2005. С. 48–56.
5. Петров Д.А., Цибаров В.А. Течение аэрозоля внутри торнадо // *Вестник СПбГУ. Сер. 1, Вып. 3 (№15)*, 2005. С. 95–101.
6. Петров Д.А., Цибаров В.А. Стохастическая модель трехфазной конденсирующей газозвеси // *Четвертые Поляховские чтения: Тезисы докладов Международной научной конференции по механике, Санкт-Петербург, 7 — 10 февраля 2006 г.* СПб.: Издательство «ВВМ», 2006. С. 163.
7. Петров Д.А., Цибаров В.А. Стохастическая модель трехфазной конденсирующей газозвеси // *Четвертые Поляховские чтения: Избранные труды.* СПб.: Издательство «ВВМ», 2006. С. 409–414.
8. Петров Д.А., Цибаров В.А. Модель трехкомпонентной агрегирующей газозвеси // *Материалы VI Международной конференции по неравновесным процессам в соплах и струях (NPNJ-2006), 26 июня — 1 июля 2006 г., Санкт-Петербург, М.: Вузовская книга, 2006. С. 268.*
9. Петров Д.А., Цибаров В.А. Стохастическая модель взвеси пыли и капель во влажном воздухе // *Вестник СПбГУ. Сер. 1. Вып. 4 (№ 22)*, 2007. С. 38–46.
10. Петров Д.А., Цибаров В.А. Описание испарения и конденсации в стохастическом моделировании газозвесей // *Всероссийский семинар по аэрогидродинамике: Тезисы докладов, Санкт-Петербург, 5 — 7 февраля 2008 г., СПб.: Санкт-Петербургский государственный университет, 2008. С. 48.*