

аттестационное дело № _____

дата защиты 15.04.2016 протокол № 106

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 501.001.89
ПО ДИССЕРТАЦИИ
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА ФИЗИКО-
МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК

Асмолов Евгений Савельевич, ФГУП «Центральный аэрогидродинамический
институт имени проф. Н.Е. Жуковского»,
ведущий научный сотрудник

Диссертация "Поперечная миграция малых сферических частиц в
сдвиговых и нестационарных потоках" в виде рукописи по специальности
01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы выполнена в ФГУП
«Центральный аэрогидродинамический институт имени проф. Н.Е.
Жуковского». Диссертация принята к защите 18.12.2015 года, протокол № 103-
П, диссертационным советом Д 501.001.89 на базе Федерального
государственного бюджетного образовательного учреждения высшего
профессионального образования «Московский государственный университет
имени М.В. Ломоносова», 119234, Российская Федерация, Москва, Ленинские
горы, д. 1, действующего на основании приказа № 105/нк Министерства
образования и науки Российской Федерации от 11 апреля 2012 года.

Соискатель Асмолов Евгений Савельевич 1958 года рождения, в 1981 году
окончил Московский физико-технический институт, в 1986г. защитил в
Московском физико-техническом институте диссертацию на соискание учёной
степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 –
«Механика жидкости, газа и плазмы». С 1999 и по настоящее время - ведущий
научный сотрудник Отделения 8 ФГУП «Центральный аэрогидродинамический
институт имени проф. Н.Е. Жуковского».

Официальные оппоненты:

доктор физ.-мат. наук, профессор, член-корр. АН республики Башкирия, директор Центра по проектированию, производственным технологиям и материалам Сколковского института науки и технологии, **Ахатов Искандер**

Шаукатович;

доктор физ.-мат. наук, профессор, ФГБУН Институт механики сплошных сред УрО РАН, зав. лабораторией вычислительной гидродинамики, **Любимова**

Татьяна Петровна;

доктор физ.-мат. наук, профессор, ФГБОУ ВПО Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ», профессор кафедры плазмогазодинамики и теплотехники, **Циркунов Юрий Михайлович;**

ведущая организация Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур Российской Академии Наук

(заключение составлено Соном Эдуардом Евгеньевичем, заместитель директора, доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, и утверждено заместителем директора Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук Гавриковым Андреем Владимировичем)

дали положительные отзывы о диссертации.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы официальных оппонентов и ведущей организации, на автореферат поступило 3 положительных отзыва.

В отзыве официального оппонента Ахатова И.Ш. отмечается, что диссертация Асмолова Е. С. посвящена теоретическому исследованию инерционных сил, действующих на сферические частицы при малых числах Рейнольдса в ламинарных сдвиговых потоках. Тема имеет существенное значение для гидродинамики дисперсных систем. Знание законов миграции частиц важно для адекватного моделирования течений дисперсных сред в многочисленных приложениях: помимо традиционных инженерных, в последнее время бурно развиваются такие направления, как биомедицина

(исследование движения крови в кровеносных сосудах, гидродинамическая сепарация биологических частиц), микроэлектроника (течение аэрозолей в микрокапиллярах для направленного нанесения микроскопических количеств вещества на подложку), нефтедобыча (течение дисперсных систем в трещинах и микропорах нефтяного пласта).

Обоснованность положений, выводов и рекомендаций в диссертационной работе обеспечена использованием фундаментальных положений механики сплошных сред и уравнений Навье-Стокса. Автор разбивает пространство вокруг частицы на внутреннюю и внешнюю области. Течение жидкости в этих областях описывается в рамках систематических гидродинамических приближений. Сращивание этих асимптотических решений позволяет вычислить поперечную силу и использовать ее для моделирования миграции частиц в сдвиговых потоках.

В диссертации получены следующие новые результаты:

1. Для частицы, движущейся в линейном сдвиговом потоке, ограниченном с одной стороны неподвижной стенкой, показано, что поперечная сила определяется двумя безразмерными параметрами – параметром скольжения, введенным автором, и расстоянием от стенки, отнесенном к масштабу Сэфмана. Если поток опережает частицы, поперечная сила всегда направлена от стенки, в противном случае сила является знакопеременной функцией расстояния до стенки с образованием устойчивого положения равновесия.
2. Для частицы, движущейся в плоском канале, показано, что вблизи стенки поперечная сила близка к значениям, полученным для линейного потока, ограниченного неподвижной стенкой. В основной части канала (вблизи центральной линии) сила зависит от двух безразмерных параметров - параметра скольжения и кривизны профиля невозмущенной скорости.
3. Решена задача о нестационарном движении частицы в неограниченном сдвиговом потоке. Выведена аналитическая формула для обобщенной

силы Бассэ, зависящей от движения частицы в предыдущие моменты времени.

4. Решена задача о течении газовой среды при обтекании тел различной формы в приближении пограничного слоя. Показано, что при обтекании клина действие поперечной силы приводит к образованию области чистого газа вблизи поверхности, где частицы отсутствуют.

Автореферат, составленный с соблюдением установленных требований, в достаточной степени отражает содержание диссертации.

По работе следует отметить следующие замечания:

1. Из Рис.1.3 и 2.2 не сразу видна устойчивость положений равновесия в точках, где сила равна нулю. Было бы нагляднее, если направление силы было включено в определение коэффициента поперечной силы.
2. В работе используется большое количество параметров и обозначений. В ряде случаев это затрудняет чтение и понимание результатов. Например, на стр. 53 без объяснения физического смысла вводятся параметры γ и σ .

В отзыве отмечено, что приведенные замечания носят редакторский характер и не умаляют достоинств диссертационной работы. На основании изложенного официальный оппонент считает, что диссертация Асмолова Е. С. является законченной научно-квалификационной работой, в которой решен ряд задач по теоретическому исследованию инерционных сил, действующих на сферические частицы при малых числах Рейнольдса в ламинарных сдвиговых потоках, имеющих существенное значение как для фундаментальной гидродинамики, так и для многочисленных приложений. Работа удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы. Её автор, Асмолов Евгений Савельевич заслуживает присуждения ему учёной степени доктора физико-математических наук.

В отзыве официального оппонента Любимовой Т.П. отмечено, что диссертация Асмолова Е. С. посвящена теоретическому исследованию

поперечной миграции малых сферических частиц в сдвиговых и нестационарных потоках. Актуальность изучения течений дисперсных сред связана с многочисленными техническими приложениями и природными явлениями с участием таких сред, таких как процессы химической технологии, использующие двухфазные рабочие среды, движение летательных аппаратов в запыленной атмосфере или облаках, исследование загрязнения атмосферы, диагностика потоков на основе метода визуализации поля скорости, движение крови в каналах, гидродинамическая сепарация и фильтрация клеток, бактерий и других биологических частиц.

В первой главе рассмотрена и аналитически решена задача о поперечной силе, действующей на частицу, движущуюся с постоянной скоростью скольжения в стационарном линейном сдвиговом потоке, ограниченном одной плоской стенкой. Известное выражение для силы Сэфмана обобщено на случай произвольного отношения чисел Рейнольдса скольжения и сдвига. Зависимости коэффициента поперечной силы для частицы в сдвиговом потоке вблизи стенки от параметра скольжения и масштаба Сэфмана были позднее подтверждены в работе МакЛофлина.

Вторая, самая большая глава диссертации посвящена исследованию поперечных сил при стационарных течениях в плоских каналах для различных направлений и величин скорости скольжения. Проанализировано влияние стенок и кривизны профиля основного течения. Рассмотрены силы, действующие на нейтрально плавучую частицу в неограниченном параболическом потоке и в линейном сдвиговом потоке, ограниченном одной стенкой. Определены устойчивые положения равновесия частиц; показано, что при больших числах Рейнольдса канала и конечных параметрах скольжения или для нейтрально плавучих частиц положения равновесия находятся на малых расстояниях от стенок, а при больших параметрах скольжения имеются дополнительные положения равновесия на конечных расстояниях от стенок. Проведено сопоставление результатов для поперечной силы для нейтрально плавучей частицы и положения равновесия с экспериментальными данными;

оказалось, что теоретические и экспериментальные кривые близки, за исключением положений частиц, близких к оси канала.

В третьей главе рассмотрено возмущенное поле скорости при обтекании частицы неограниченным сдвиговым потоком. Определены компоненты скорости в вязкой, озееновской и невязкой областях течения и в вязких следах. Результаты использованы для описания дальнего инерционного взаимодействия пары частиц в сдвиговом потоке.

Четвертая глава посвящена исследованию инерционных сил в нестационарном потоке. Вначале рассмотрена упрощенная постановка задачи, когда лишь скорость скольжения меняется со временем, а градиент скорости стационарен, затем исследована сила сопротивления в нестационарном однородном потоке, получены выражения для нестационарного поля скорости и нестационарной силы Озеена (обобщенной силы Бассе). Показано, что память об изменении скорости затухает быстрее, чем в классической силе Бассе.

В пятой главе исследованы течения газозвеси в ламинарных пограничных слоях при обтекании тел различной формы. Найден продольный масштаб течения, на котором влияние поперечной силы конечно. Показано, что в случае плоской пластины частицы дисперсной фазы движутся в пограничном слое к поверхности, а в случае клина и затупленного тела поперечная сила направлена от поверхности и наблюдается отрыв дисперсной фазы.

По работе имеются следующие замечания:

1. В первой главе диссертации после формулы (1.30) рассматривается условие сшивания внешнего и внутреннего решений. При этом в левую часть входит только слагаемое с w , в то время, как в предыдущем пункте говорится о том, что часть решения неоднородной системы уравнений, также дает вклад во внешний предел внутреннего разложения. Даже, если это слагаемое не дает вклада в поперечную силу, его все равно следовало бы написать.

Аналогичное замечание справедливо и для соответствующего места во второй главе.

2. В первой главе на стр. 28 дается выражение поперечной силы через часть скорости $\mathbf{w}$. Оно имеет такой же вид, как силы Стокса без поправок. Это справедливо только в том случае, когда эта часть скорости не зависит от угла ни по величине, ни по направлению (однородна). В общем случае это не обязательно так. Следовало бы это пояснить. Предполагается, что вся неоднородность входит в часть решения для неоднородной системы $\mathbf{u}^{\text{PP}}$ (при этом также следовало бы обосновать, что другие части не дают вклада в поперечную силу). Аналогичное замечание можно сделать и по второй главе.
3. Для нахождения внутреннего решения в первом порядке малости решение представляется в виде суммы трех слагаемых. Следовало бы отметить, что первые два слагаемые это частные решения, а третье — общее. Причем, первое слагаемое предполагается убывающим до нуля на бесконечности (как видно из Главы 2.4, на которую имеется ссылка). Это также следовало бы отметить в тексте.
4. Не совсем понятно, как автор производит сшивание внутреннего и внешнего решения в Фурье-пространстве. Этот вопрос возникает также в связи с тем, что Фурье-разложение делается по плоским, а не по сферическим функциям, а граничные условия в физическом пространстве рассматриваются на сферической поверхности. В связи с этим возникает также вопрос об эквивалентности используемых автором граничных условий для бесконечного Z для внешнего решения в Фурье-пространстве граничным условиям для бесконечного R в физическом пространстве.
5. В разделе 3.4 утверждается, что взаимодействие пары одинаковых частиц в приближении Стокса не приводит к их относительному перемещению. В сдвиговых течениях скорости частиц, не расположенных на прямой вдоль движения жидкости, скорее всего, будут разными. Существует ли доказательство указанного утверждения для сдвиговых течений? Если существует, то при каких допущениях?

6. Чем объясняется большое различие расчетных и экспериментальных значений для частиц нейтральное плавучести при положениях частиц, близких к оси канала?
7. Для динамической вязкости в работе используется символ μ , но это обозначение нигде не поясняется, в то время, как для кинематической вязкости пояснение есть. В названии 1-ой главы, по-видимому, пропущено слово "потока". В списке литературы в ссылке №15 указан неверный номер тома. В тексте диссертации встречаются и другие опечатки.

В отзыве отмечено, что сделанные замечания не влияют на общую положительную оценку работы. Диссертация Е.С.Асмолова представляет собой цельное и полное исследование рассматриваемой проблемы. Полученные результаты являются существенным развитием теории инерционных сил, действующих на частицы в сдвиговых потоках. Достоверность полученных результатов хорошо обоснована и подтверждена сравнением с результатами других авторов и с экспериментом. Результаты опубликованы в ведущих российских и зарубежных научных журналах.

Автореферат соответствует содержанию диссертации, а сама диссертационная работа соответствует требованиям п. 9 «Положения ВАК о присуждении ученых степеней». Е.С. Асмолов заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы.

В отзыве официального оппонента Циркунова Ю.М. отмечено, что диссертация Асмолова Е. С. посвящена развитию важного направления в теории двухфазных течений – определению поперечных сил, возникающих при обтекании частиц локально неоднородными и нестационарными потоками, вследствие присутствия стенок. Проблема адекватного моделирования взаимодействия несущей фазы с дисперсными включениями является одной из ключевых в гидромеханике двухфазных течений, поэтому тема диссертации, бесспорно, актуальна. Результаты решения рассмотренных в диссертации задач

являлись на момент опубликования совершенно новыми, в настоящее время они признаны мировым научным сообществом. Новизна состоит, во-первых, в развитии метода сращиваемых асимптотических разложений применительно к проблеме обтекания сферических частиц в сдвиговых потоках, во-вторых, в решении этим методом конкретных задач в широких диапазонах определяющих параметров, в-третьих, в применении полученных решений для поперечных сил для анализа свойств двухфазных течений в каналах и в пограничных слоях.

Интересной особенностью при определении поперечной силы на одиночную частицу в сдвиговом потоке является тот результат, что при этом не требуется специально сращивать решения в областях Стокса и Сэфмана для продольной и трансверсальной компонент скорости. При исследовании гидродинамического взаимодействия, например, двух частиц сращивание для указанных компонент уже требуется.

Несомненное практическое значение имеет предложенная классификация режимов миграции частиц в каналах. Другое возможное применение результатов диссертации – более корректный анализ достоверности определения поля течения газа с использованием широко распространенного PIV-метода. Как следует из полученных в диссертации результатов, даже очень мелкие частицы вследствие действия поперечной силы не следуют за газовой фазой, и при некоторых условиях появляются области, свободные от частиц. Автором предложены простые аппроксимационные соотношения для коэффициента поперечной силы, которые удобно использовать в практических расчетах двухфазных течений.

Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

По работе имеются следующие замечания:

1. В диссертации фактически не затронут вопрос о выборе асимптотических последовательностей при построении асимптотических разложений в различных областях течения. Понятно, что автор опирается на работы предшественников, в частности Сэфмана, однако следовало бы все же

пояснить, из каких соображений выбираются степени малого параметра в различных асимптотических рядах.

2. Число Рейнольдса во всех главах, кроме пятой, обозначается одной буквой R с тем или иным индексом, хотя общепринятое обозначение - Re . При этом той же буквой R в ряде случаев обозначается полярный радиус сферической системы координат (см., например стр. 144).
3. Литература насчитывает 184 наименования и при этом приведена в порядке цитирования, что заметно затрудняет поиск ссылок по авторам при чтении.
4. Следовало бы привести список основных обозначений в начале работы.

Диссертация Е.С. Асмолова удовлетворяет всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы.

Выбор Ахатова И.Ш., Любимовой Т.П. и Циркунова Ю.М. в качестве официальных оппонентов обосновывается тем, что они являются известными специалистами в России и за рубежом в области течений многофазных сред и имеют ряд работ, близких к теме диссертации.

Ведущая организация в своем отзыве отмечает, что диссертация Асмолова Е. С. посвящена теоретическому исследованию инерционных сил, действующих на сферические частицы при малых числах Рейнольдса в ламинарных сдвиговых и нестационарных течениях, а также движения частиц под действием этих сил. Тема диссертации актуальна для исследований поперечной миграции сферических частиц, важных в технологических приложениях. Полученные результаты для инерционных сил и расчеты положений равновесия частиц могут найти применение при расчете обтекания летательных аппаратов запыленным газом, течений суспензий в трещинах гидроразрыва нефтеносных пластов, при создании устройств для гидродинамической сепарации клеток и бактерий в биологии и медицине. Результаты работы могут быть использованы в фундаментальных и

прикладных исследованиях, проводимых в МГУ им. Ломоносова, ОИВТ РАН, ИПМ им. Келдыша РАН и других институтах, занимающихся данной и смежными тематиками.

Новизна диссертационной работы состоит в развитии и обобщении асимптотических методов определения инерционных сил. В ней определены поперечные силы и возмущенное поле течения для практически значимых сдвиговых течений – течения в канале и в пограничном слое, для различных значений плавучести частиц и направлений обтекания. Достоверность результатов обеспечена тем, что в качестве методов решения рассмотренных задач использованы хорошо зарекомендовавшие себя теоретические методы - методы возмущений и сращиваемых асимптотических разложений и теория интегрального преобразования Фурье. Для численного решения обыкновенных дифференциальных уравнений в Фурье-пространстве использован известный метод ортонормализации Годунова. Достоверность расчетов поперечных сил подтверждается сравнением с результатами экспериментов, компьютерного моделирования, других теоретических работ. Результаты диссертации опубликованы в 26 научных публикациях, из которых 17 - статьи из журналов перечня ВАК. Основные результаты работы были доложены на различных конференциях и научных семинарах.

Отзыв ведущей организации содержит следующие замечания:

1. В работе не уделено достаточно внимания современным методам численного моделирования, позволяющим определить более детальную картину движения как жидкости, так и находящихся в ней частиц.
2. Из работы не ясно, можно ли использовать подходы, развитые автором, для анализа других силовых факторов и явлений (сила Магнуса, турбофорез и др.).
3. В исследованиях не нашел отражение вопрос, при каких концентрациях частиц в потоке (низких, умеренных, высоких) можно использовать выводы диссертации.

Отмечается, что данные замечания не снижают общей положительной оценки работы.

Диссертация Е.С. Асмолова представляет собой законченную актуальную, достоверную и обоснованную научно-исследовательскую работу, с возможностью практического применения и потенциалом дальнейшего исследования. Работа выполнена на высоком научном уровне. Диссертационная работа содержит достаточное количество исходных данных, имеет пояснения, рисунки, графики, подробные расчёты. Написана квалифицированно и последовательно. Автореферат полностью и точно отражает содержание диссертации.

Ведущая организация в своем отзыве указывает, что диссертационная работа Асмолова Евгения Савельевича соответствует всем критериям, установленным п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013г., а её автор заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Диссертационная работа Е.С. Асмолова и отзыв на нее обсуждены на научном семинаре Научно-исследовательского центра электрофизики и тепловых процессов (НИЦ-4 ЭФТП) Объединенного института высоких температур РАН (ОИВТ РАН) под руководством чл.-корр. РАН Э.Е. Сона, протокол № 24 от 25 февраля 2016 года.

Выбор ведущей организации обусловлен тем, что сотрудники ОИВТ РАН являются признанными специалистами в области механики жидкости, газа и плазмы, механики многофазных систем и имеют широко известные достижения в областях науки, смежных с тематикой диссертации, и способны объективно оценить научную и практическую ценность диссертационного исследования.

Получен положительный отзыв на автореферат без замечаний от Кабова Олега Александровича, профессора, доктора физ.-мат. наук, зав. лабораторией интенсификации процессов теплообмена ФГБУН Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН.

В отзыве отмечено, что рассмотренные в диссертации задачи являются чрезвычайно актуальными в связи с быстрым развитием микро- и нанофлюидики, с

созданием приборов для управления движением частиц на микро- и нано-масштабах. К наиболее важным результатам относятся определение поперечных инерционных силы для различных направлений и величин скорости скольжения и для режима без скольжения (нейтрально-плавучая частица), расчет устойчивых положений равновесия.

Как следует из автореферата, диссертация представляет собой законченную научную работу, соответствует всем требованиям ВАК, а ее автор, Е.С. Асмолов, заслуживает присуждения ему степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 – механики жидкости, газа и плазмы.

Получен положительный отзыв на автореферат без замечаний от Демехина Евгения Афанасьевича, доктора физ.-мат. наук, профессора кафедры математики и информатики Краснодарского филиала Финансового университета при правительстве РФ.

В отзыве отмечено, что диссертация посвящена теоретическому исследованию динамики сферических частиц в сдвиговых потоках при малых числах Рейнольдса. Результаты, полученные в проведенном исследовании, обладают актуальностью, значительной научной новизной и практической значимостью. Автор эффективно использует асимптотические и численные методы для решения линеаризованных уравнений Навье-Стокса (уравнений Озеена). Достоверность полученных результатов подтверждается сравнением с другими теоретическими и экспериментальными работами.

В отзыве указано, что диссертационная работа соответствует всем требованиям ВАК, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор, Е.С. Асмолов, заслуживает присуждения ему степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 – механики жидкости, газа и плазмы.

Получен положительный отзыв на автореферат без замечаний от Патлажана Станислава Абрамовича, доктора физ.-мат. наук, главного научного сотрудника ФГБУН Институт химической физики им. Н.Н. Семенова РАН.

В отзыве отмечено, что рассмотренная в диссертации проблема поперечной миграции твердых частиц в сдвиговых потоках является принципиально важной для описания отклонения траекторий их движения от линий тока базовых течений. Актуальность результатов работы обусловлена возможностью их применения в многочисленных прикладных задачах, связанных с течением дисперсий в микрожидкостных устройствах, сепарацией частиц, распределением твердых взвесей при гидроразрыве пластов и в микросоплах. Последовательное развитие математических методов на базе срачиваемых асимптотических разложений позволило автору получить ряд важных результатов, в частности, получено обобщение классической задачи Сэфмана о поперечной силе, действующей на частицу в линейном поле скорости.

На основании автореферата можно заключить, что диссертационная работа Е.С. Асмолова выполнена на высоком научном уровне, удовлетворяет всем требованиям ВАК, а ее автор, Е.С. Асмолов, заслуживает присуждения ему степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 – механики жидкости, газа и плазмы.

Основные результаты диссертации опубликованы в 26 работах в научных журналах и изданиях, из которых 17 – статьи, опубликованные в журналах, которые входят в перечень рецензируемых научных журналов и изданий, рекомендованных ВАК. Всего соискатель имеет 56 опубликованных работ. Основные работы по теме диссертации:

1. Е.С. Асмолов. О поперечной силе, действующей на сферическую частицу в ламинарном пограничном слое. *Изв. АН СССР. МЖГ*, (5):66–71, 1989.
2. Е.С. Асмолов. О динамике сферической частицы в ламинарном пограничном слое. *Изв. АН СССР. МЖГ*, (6):91–96, 1990.
3. Е. С. Асмолов. О движении дисперсной примеси в ламинарном пограничном слое на плоской пластине. *Изв. РАН. МЖГ*, (1):66–73, 1992.
4. Е.С. Асмолов. Движение частиц в ламинарном пограничном слое на масштабе релаксации поперечной скорости. *Изв. РАН. МЖГ*, (1):86–93, 1993.

5. Е.С. Асмолов. О движении дисперсной примеси в ламинарном пограничном слое при обтекании клина. *Изв. РАН. МЖГ*, (1):34–42, 1993.
6. E. S. Asmolov. Dusty-gas flow in a laminar boundary layer over a blunt body. *J. Fluid Mech.*, 305:29–46, 1995.
7. Е.С. Асмолов. Движение дисперсной примеси в ламинарном пограничном слое на клине при неоднозначном распределении скорости частиц. *Ученые записки ЦАГИ*, 27(1):91–99, 1996.
8. E.S. Asmolov, S.V. Manuilovich. Stability of a dusty-gas laminar boundary layer on a flat plate. *J. Fluid Mech.*, 365:137–170, 1998.
9. E.S. Asmolov. The inertial lift on a spherical particle in a plane Poiseuille flow at large channel Reynolds number. *J. Fluid Mech.*, 381:63–87, 1999.
10. E.S. Asmolov, J. B. McLaughlin. The inertial lift on an oscillating sphere in a linear shear flow. *Int. J. Multiphase Flow*, 25:739–751, 1999.
11. E.S. Asmolov. Flow past a sphere undergoing unsteady rectilinear motion and unsteady drag at small Reynolds number. *J. Fluid Mech.*, 446:95–120, 2001.
12. E.S. Asmolov. The inertial lift on a small particle in a weak-shear parabolic flow. *Phys. Fluids*, 14:15, 2002.
13. A.A. Osipov, E.S. Asmolov. Asymptotic model of the inertial migration of particles in a dilute suspension flow through the entry region of a channel. *Phys. Fluids*, 20(12):123301–15, 2008.
14. E.S. Asmolov, A.A. Osipov. The inertial lift on a spherical particle settling in a horizontal viscous flow through a vertical slot. *Phys. Fluids*, 21(6), 2009.
15. Е.С. Асмолов, Н.А. Лебедева, А.А. Осипов. Инерционная миграция осаждающихся частиц при течении суспензии в ячейке Хеле-Шоу. *Изв. РАН. МЖГ*, (3):85–101, 2009.
16. E.S. Asmolov, F. Feuillebois. Far-field disturbance flow induced by a small non-neutrally buoyant sphere in a linear shear flow. *J. Fluid Mech.*, 643:449–470, 2010.
17. N.A. Lebedeva, E.S. Asmolov. Migration of settling particles in a horizontal viscous flow through a vertical slot with porous walls. *Int. J. Multiphase Flow*, 27:453–461, 2011.

Результаты диссертационного исследования прошли апробацию на международных конференциях: на 2-й, 4-й и 8-й Европейских конференциях по механике жидкостей, проведенных под эгидой EUROMECH (EFMC'94, Варшава, Польша, 1994; EFMC'00, Эйндховен, Голландия, 2000; EFMC'10, Бад Райхенхаль, Германия, 2010), на XIX и XX международных конгрессах по

теоретической и прикладной механике (XIX ИСТАМ, Киото, Япония, 1996; XX ИСТАМ, Чикаго, США, 2000); международной конференции "Асимптотика в механике" (Санкт-Петербург, 1996).

Постановки задач и полученные результаты обсуждались и получили одобрение на специализированных научно-исследовательских семинарах: семинары в Ecole superieure de physique et de chimie industrielles (ESPCI), Париж, Франция (2004, 2008); объединенные семинары по аэромеханике ЦАГИ — ИТПМ СО РАН — СПбГПУ — НИИ Механики МГУ (2011, 2014); семинары Московского исследовательского центра Шлюмберже (2007, 2008); семинары по механике многофазных сред под руководством проф. А.Н. Осипцова (НИИ Механики МГУ, Москва, 2004, 2010); семинар по механике сплошных сред НИИ механики МГУ под руководством акад. РАН А.Г. Куликовского, проф. В.П. Карликова и члена-корр. РАН О.Э. Мельника (2015).

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

- **описаны** течения при обтекании сферической частицы сдвиговыми и нестационарными потоками на масштабах радиуса частицы (внутренняя область) и длины Сэфмана (внешняя область), а также течения газозвеси в пограничных слоях под действием сил Стокса и Сэфмана;
- **исследована** роль малых, но конечных конвективных членов в уравнениях Навье-Стокса в возникновении поперечной миграции сферических частиц в сдвиговых потоках;
- **найжены** поперечные инерционные силы, действующие на частицы, для различных течений (линейный сдвиговый поток, течение в плоском канале), направлений и величин скорости скольжения и для режима без скольжения (нейтрально-плавучая частица), а также устойчивые положения равновесия частиц для различных режимов. Также найдены степенные законы зависимостей возмущений всех компонент возмущенной скорости от расстояния до частицы в дальней невязкой области и в вязких ламинарных следах;

- **установлена** структура течения в дальней области при обтекании частицы линейным сдвиговым потоком, область Сэфмана, невязкая область, ламинарные следы;
- **разработан** метод решения уравнений Озеена через 2-х и 3-х мерные преобразования Фурье полей скорости и давления, а также численный алгоритм решения получаемых обыкновенных дифференциальных уравнений, основанный на методе ортонормализации Годунова;
- **выполнено** параметрическое численное исследование зависимостей поперечных инерционных силы от основных безразмерных параметров (параметра скольжения, расстояния до стенки, кривизны профиля невозмущенной скорости);
- **показано**, что положения равновесия при больших числах Рейнольдса канала и конечных параметрах скольжения и для нейтрально плавучих частиц находятся на малых расстояниях от стенок. Также предсказано появление дополнительных положений равновесия при больших параметрах скольжения.

Теоретическая значимость исследования обусловлена тем, что:

- **изучена** поперечная миграция частиц для широкого класса практически значимых сдвиговых ламинарных течений (пограничные слои, течения в трубах), величин и направлений скорости скольжения;
- **разработана** математическая формулировка задачи о динамике сферических частиц на основе методов возмущений и сращиваемых асимптотических разложений с учетом малых конвективных и нестационарных членов в уравнениях Навье-Стокса;
- **найденны** аналитические выражения для поля возмущенной скорости и нестационарной силы Озеена (обобщенной силы Бассэ) для частицы, движущейся в покоящейся жидкости. Данная сила зависит от "истории" движения в предшествующие моменты времени;
- **впервые** проведена классификация режимов обтекания частицы при малых числах Рейнольдса - сильный, слабый, конечный сдвиг, введен безразмерный параметр, характеризующий соотношение сдвигового и однородного членов в

набегающем потоке - параметр скольжения. Впервые решена задача о силе Сэфмана для линейного сдвигового потока, ограниченного стенкой, и для нестационарной скорости обтекания частицы. Также впервые показано, что положения равновесия частиц в течении в канале приближаются к стенкам с ростом числа Рейнольдса канала.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

они могут быть использованы при расчете обтекания летательных аппаратов запыленным газом, для более достоверного определения поля течения газа с использованием широко распространенного PIV-метода, при проектировании устройств для быстрого разделения или фокусировки потоков частиц в малых объемах жидкости или газа, которые активно используются в микроэлектронике, различных био- и медицинских технологиях.

Достоверность полученных результатов обусловлена

- **использованием** классических моделей гидродинамики и самосогласованных постановок задач механики сплошной среды, хорошо зарекомендовавших себя асимптотических методов (методы возмущений и сращиваемых асимптотических разложений), теории интегрального преобразования Фурье;
- **сопоставлением** полученных результатов для поперечных сил и положений равновесия частиц в широком диапазоне значений определяющих параметров с известными в литературе результатами экспериментов, компьютерного моделирования, других теоретических работ;
- **применением** апробированных численных алгоритмов и методов численного решения сформулированных задач математической физики.

Все основные результаты, представленные в работе, получены лично автором. К ним относятся формулировка на основе методов возмущений и сращиваемых асимптотических разложений задачи о динамике сферических частиц в сдвиговых потоках при конечных значениях параметра скольжения, разработка методов аналитического и численного решений линеаризованных уравнений Навье-Стокса (уравнений Озеена) на основе преобразования Фурье,

численное определение инерционных сил и возмущенных полей скорости частиц, формулировка и решение задач о движении дисперсной примеси в пограничных слоях с учетом сил Стокса и Сэфмана. Результаты других авторов, использованные в диссертации, во всех случаях содержат ссылки на источники. Диссертация охватывает основные вопросы поставленных в пяти главах научных задач и соответствует критериям внутреннего единства, что подтверждается наличием последовательного плана исследований, обоснованных подходов к решению рассмотренных задач и взаимосвязи полученных выводов.

Диссертационным советом сделан вывод о том, что диссертация представляет собой научно-квалификационную работу, соответствует критериям, установленным Положением о порядке присуждения учёных степеней, и принято решение присудить Асмолову Евгению Савельевичу учёную степень доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве **23** человек, из них **16** докторов наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы и **7** докторов наук по специальности 01.02.08 - биомеханика, участвовавших в заседании, из **25** человек, входящих в состав совета, проголосовали: за **23**, против **0**, недействительных бюллетеней **0**.

Председатель

диссертационного совета Д 501.001.89,
доктор физико-математических наук,
профессор

В.П. Карликов

Учёный секретарь

диссертационного совета Д 501.001.89,
доктор физико-математических наук

В.В. Измоленов

Подписи удостоверяю:

И.о. декана механико-математического
факультета МГУ имени М.В. Ломоносова,
доктор физико-математических наук,
профессор



В.Н. Чубариков