

УТВЕРЖДАЮ
Заместитель директора
Федерального государственного
бюджетного учреждения науки
Объединенного института высоких
температур Российской академии наук,
Гавриков А.В.



марта 2016 года

ОТЗЫВ

ведущей организации

на диссертационную работу Асмолова Евгения Савельевича
«Поперечная миграция малых сферических частиц
в сдвиговых и нестационарных потоках»,
представленную на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук по специальности
01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Диссертационная работа Е.С. Асмолова 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. Эффекты, связанные с влиянием малых конвективных членов в уравнениях Навье-Стокса, описываются на основе метода сращиваемых асимптотических разложений: выведены уравнения для различных областей течения и получены их решения на основе преобразований Фурье.

Тема диссертации актуальна для исследований поперечной миграции сферических частиц, важных в технологических приложениях. Полученные результаты для инерционных сил, действующих на частицы, и расчеты положений их равновесия могут быть использованы 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.

Диссертационная работа имеет следующую структуру: введение, пять глав, заключение, список литературы. Объем диссертации составляет 206 страниц, в том числе 51 рисунок и 4 таблицы. Список литературы состоит из 184 наименований.

Во **введении** описаны предметная область исследований, актуальность темы диссертационной работы, степень проработанности, формулируются цели и задачи исследования и приводятся положения, выносимые на защиту. В этом разделе также содержатся сведения о практической значимости работы, научной новизне, апробации, обозначается личный вклад автора в совместных работах.

В **первой главе** диссертации приведен обзор работ, посвященных исследованиям инерционных сил и поперечной миграции частиц. Далее в ней рассмотрена задача о поперечной силе (силе Сэфмана), действующей на частицу в стационарном линейном сдвиговом потоке. Построено асимптотическое решение уравнений Навье-Стокса при малых числах Рейнольдса с учетом малых конвективных членов. Поперечная сила выражается через интегралы от Фурье-образа поперечной скорости. Определены зависимости силы, действующей на частицу, которая движется в ограниченном стенкой потоке, от двух безразмерных параметров: параметра скольжения и расстояния до стенки, отнесенного к масштабу Сэфмана. Частицы, опережающие несущий поток, имеют устойчивое положение равновесия, т.к. сила является знакопеременной функцией расстояния до стенки.

Во **второй главе** асимптотический метод решения задачи о динамике частицы распространен на практически более важное течение в плоском канале. При этом найдены поперечные инерционные силы для различных направлений (параллельная и перпендикулярная основному потоку) и величин скорости скольжения и для режима без скольжения (нейтрально-плавучая частица). При больших числах Рейнольдса канала влияние стенок существенно в тонких пристеночных слоях, где поперечная сила и положение равновесия близки к значениям, полученным для линейного потока с одной стенкой. В основной части канала коэффициент силы соответствует неограниченному параболическому потоку и зависит от двух безразмерных параметров: параметра скольжения и кривизны профиля. Определены устойчивые положения равновесия для режима слабого сдвига и нейтрально-плавучих частиц.

В **третьей главе** асимптотическое решение для возмущений скорости, индуцированных нейтрально плавучей частицей в сдвиговом потоке, построено не только для поперечной скорости в начале координат (что необходимо для вычисления поперечной силы), но и для всех трех компонент скорости и всех значений координат. Выведены степенные законы зависимостей возмущений скорости от расстояния до

частицы в дальней невязкой области и в вязких следах. Результаты использованы для описания парного взаимодействия частиц в дальней области и определения взаимных расположений, при которых частицы притягиваются.

В четвертой главе рассмотрены задачи определения инерционных сил для случаев, когда скорость скольжения частицы нестационарна. Найдена поперечная сила в неограниченном сдвиговом потоке в пределе сильного сдвига. Для частицы, движущейся прямолинейно с произвольной скоростью в покоящейся жидкости, получено аналитическое выражение для обобщенной силы Бассэ, которая зависит от "истории" движения в предшествующие моменты времени.

В пятой главе рассмотрено движение частиц газозвеси в ламинарных пограничных слоях на различных телах (плоская пластина, клин, окрестность критической точки на затупленном теле) под действием сил Стокса и Сэфмана. При этом для силы Сэфмана учтена зависимость от параметра скольжения, полученная в первой главе. Для течения на плоской пластине сила Сэфмана направлена к поверхности. В результате частицы скапливаются в тонком пристеночном слое. В пограничных слоях на клине и затупленном теле поперечная сила имеет обратный знак, и вблизи поверхности возникает область чистого газа, где частицы отсутствуют.

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, 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. Также положения и выводы, сформулированные в диссертации, получили квалифицированную апробацию на международных и российских конференциях и семинарах, а также опубликованы в рецензируемых научных изданиях.

Обоснованность выводов подтверждается корректностью применения апробированного в научной практике исследовательского и аналитического аппарата, а

также сопоставлением результатов исследования с данными зарубежного и отечественного опыта.

Результаты расчетов сил активно используются в последнее время для описания инерционной миграции частиц в течениях запыленных газов и пограничных слоях, при расчете течений суспензий в каналах и трещинах гидроразрыва при нефтедобыче. Они находят применение в био- и медицинских технологиях при проектировании устройств для гидродинамического разделения, фокусировки и фильтрации частиц разных размеров и/или плотности.

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.

По диссертационной работе Е.С. Асмолова можно сделать 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.

Отметим, 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.

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.

Диссертационная работа Асмолова Евгения Савельевича «Поперечная миграция малых сферических частиц в сдвиговых и нестационарных потоках» соответствует всем критериям, установленным п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013г., 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.

Отзыв составлен руководителем НИЦ-4, чл.-корр. РАН, доктором физико-математических наук Соном Эдуардом Евгеньевичем.

руководитель НИЦ-4,
чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н.



Э.Е. Сон

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук.

Почтовый адрес: Россия, 125412, г. Москва, ул. Ижорская, д.13, стр.2.

Телефон: 8 (495) 484-16-55

Адрес электронной почты: son.eduard@gmail.com

Подпись Сона Э.Е. и сведения удостоверяю.

Учёный секретарь ОИВТ РАН,
д.ф.-м.н.



Р.Х. Амиров

Почтовый адрес: Россия, 125412, г. Москва, ул. Ижорская, д.13, стр.2.

Телефон: (495) 485-90-09, (495) 484-17-33

Адрес электронной почты: amirovravil@yandex.ru