

ОТЗЫВ

официального оппонента д.ф.-м.н., профессора Т.П.Любимовой
о диссертационной работе **Евгения Савельевича Асмолова «Поперечная
миграция малых сферических частиц в сдвиговых и нестационарных
потоках»**, представляемой на соискание ученой степени доктора физико-
математических наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и
плазмы

Диссертационная работа Е.С. Асмолова посвящена исследованию поперечной миграции малых сферических частиц в сдвиговых и нестационарных потоках. Изучение сил, действующих на частицы при их обтекании жидкостью при малых числах Рейнольдса, является классической задачей гидродинамики. В большинстве случаев при движении сферических частиц учитывают лишь силу сопротивления, совпадающую по направлению со скоростью обтекания. Однако, во многих приложениях основной поток является сдвиговым и ограничен стенками. В этом случае на частицу, кроме продольной силы сопротивления, действует поперечная сила, проявление которой впервые наблюдалось Пуазейлем для течений крови в каналах. Теоретическому исследованию поперечного движения сферических частиц в сдвиговых потоках и посвящена диссертационная работа.

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.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Она содержит 51 рисунок и 4 таблицы, список литературы

включает 184 источника. Полный объем работы 206 страниц.

Во введении обсуждаются цели и задачи работы, актуальность, новизна и практическая значимость, основные положения, выносимые на защиту, приводятся данные об апробации работы и личном вкладе автора.

В первой главе приведен обзор работ, посвященных исследованию инерционных сил и поперечной миграции частиц в сдвиговых потоках, 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, глава диссертации посвящена исследованию поперечных сил при стационарных течениях в плоских каналах для различных направлений и величин скорости скольжения. Рассмотрены случаи параллельного и перпендикулярного основному потоку направлений 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.

Таким образом, в диссертационной работе получены новые важные результаты, вносящие существенный вклад в теорию инерционных сил, действующих на частицы в сдвиговых потоках. В качестве наиболее важных результатов можно отметить обобщение выражения для силы Сэфмана на случай произвольного отношения чисел Рейнольдса скольжения и сдвига и определение положений равновесия частиц для линейного потока и течения в канале.

По работе следует отметить следующие замечания:

1. В первой главе диссертации после формулы (1.30) рассматривается условие сшивания внешнего и внутреннего решений. При этом левую часть входит только слагаемое с \mathbf{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 лишь 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}^{PP} (при этом также следовало бы обосновать, что другие части не дают вклада в поперечную силу). Если нет, то нужно вычислять силу через тензор напряжений на поверхности тела. 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. Однако, 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 нейтральной 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.

Сделанные замечания не влияют на общую очень 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. Они используются для описания миграции частиц при течениях суспензий и запыленных газов, а также при разработке устройств для разделения и фильтрации частиц и расчете течений при гидроразрыве. Автореферат соответствует содержанию диссертации, а сама диссертационная работа соответствует требованиям п. 9 «Положения ВАК о присуждении ученых степеней». Считаю, что Е.С. Асмолов безусловно заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-

математических наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы.

Официальный оппонент, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией вычислительной гидродинамики Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт механики сплошных сред» Уральского отделения Российской академии наук



Татьяна Петровна Любимова

Рабочий адрес: 614013, Россия, г. Пермь, ул. Академика Королёва, 1.

Телефон: +7 (342) 237 83 31

Электронная почта: lubimova@icmm.ru

Я, Татьяна Петровна Любимова, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.



Подпись Любимовой Т.П. заверяю

Татьяна Петровна Любимова

