

Отзыв

Официального оппонента о диссертации Белана Сергея Александровича «Статистические модели динамики инерционных частиц в неоднородных турбулентных течениях», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 — Теоретическая физика.

Диссертационная работа относится к области статистической гидродинамики. Автором рассматриваются, безусловно, актуальные, важные и технически сложные задачи, связанные с движением инерционных частиц в пространственно неоднородных турбулентных течениях.

Глава 1 посвящена выводу уравнений для концентрации инерционных частиц в пристенном вязком подслое турбулентного течения в различных пределах по числу Стокса частицы, St . При малых St автор воспроизводит уравнение турбулентной диффузии пассивного скаляра в предположении о том, что время релаксации частицы много меньше времени корреляции случайной составляющей скорости. Далее, при $St \sim 1$ автор вводит в модель время корреляции поля скоростей, предположив экспоненциальный характер затухания корреляционной функции. Такой вид корреляционной функции позволяет представить поле скоростей жидкости как решение уравнения Орштейна-Уленбека и записать систему уравнений для положения и скорости частицы, а также скорости жидкости в месте нахождения частицы. Далее автор записывает уравнение Фоккера-Планка для совместного распределения этих величин и, интегрируя по всем возможным скоростям, получает уравнение на пространственную функцию распределения частицы (или, что эквивалентно, концентрацию частиц). К сожалению, полностью исключить скорости из этого уравнения удастся, лишь перейдя к пределу больших времен. В этом пределе квадратичный момент скорости частицы, входящий в уравнение для концентрации, может быть вычислен аналитически, а уравнение на концентрацию частиц принимает замкнутый вид. В рамках этой модели решена задача о распределении частиц вблизи стенки в случае, когда тензор турбулентной диффузии зависит от расстояния до стенки как z^4 . Получено условие существования равновесного профиля концентраций (условие локализации): $St < 1/3$. Наконец, при больших числах Стокса (сильно неинерционные частицы) автор выводит уравнение Фоккера-Планка для совместного распределения положения и скорости частицы в предположении дельта-коррелированных флуктуаций скоростей жидкости. В граничных условиях на функцию распределения учитываются

неупругие столкновения частицы со стенкой. При этом предполагается, что гидродинамическое взаимодействие частицы со стенкой может быть полностью учтено коэффициентом восстановления β . В рамках этой модели также решена задача о распределении частиц вблизи стенки в случае, когда тензор турбулентной диффузии зависит от расстояния до стенки как z^4 , а также получено условие локализации в зависимости от параметра β .

Глава 2 представляет собой обобщение раздела 1.5.3 на случай произвольной степенной зависимости тензора диффузии от расстояния до стенки $D \sim z^m$. Получена диаграмма режимов локализации в зависимости от степени m и коэффициента восстановления β . Показано, что при $m < 1$ частицы всегда уходят на бесконечность, при $1 < m < 2$ всегда локализованы, а при $m > 2$ их поведение зависит от β .

В **Главе 3** рассмотрен частный случай задачи из Главы 2, соответствующий $m=2$. Для анализа локализации распределения частиц автор использует оригинальную замену переменной, с помощью которой удается записать явное уравнение для функции плотности вероятности. Этот элегантный прием позволяет вычислить ляпуновскую экспоненту стохастической траектории частицы, не решая непосредственно уравнения Фоккера-Планка. В результате получена фазовая диаграмма локализации в зависимости от β и параметра инерции (связанного со временем релаксации и коэффициентом турбулентной диффузии при $z=1$). Частный случай этой задачи (абсолютно упругие столкновения со стенкой) можно трактовать как распределение частиц в окрестности глубокого минимума турбулентности. В этом случае существует критическое значение параметра инерции, при превышении которого частицы стремятся уйти из зоны низкой турбулентности. Это новый физический эффект (обратный турбофорез), который ранее не был описан в литературе.

Глава 4 посвящена анализу движения частиц в приземном атмосферном слое. Автор использует статистическую модель, которая учитывает турбулентную диффузию в вертикальном направлении, горизонтальный перенос ветром и седиментацию. Получено точное решение уравнения для распределения концентрации частиц в вертикальном направлении.

Диссертация является завершенной научной работой, её актуальность и новизна ряда технических приемов, а главное, физических результатов не вызывает сомнения. Особенно хочется отметить блестящее владение автором математической техникой, а также высочайший уровень его публикаций по теме диссертации, которые включают

статью в ведущем российском журнале Письма в ЖЭТФ и 5 статей в высокоимпактных международных журналах, в том числе, в престижнейшем Phys. Rev. Lett.

Однако, текст и оформление диссертации не лишены недостатков и вызывают много вопросов и замечаний.

Общие замечания:

- 1) Огромным недостатком диссертации является отсутствие в ней Обзора литературы. Данное замечание особенно важно, поскольку для обоснования новизны полученных результатов должно быть четко сформулировано, что конкретно изучалось и сделано в предшествующих работах многочисленных научных групп, а что получено лично автором. Отчасти этот пробел диссертационной работы компенсирован во Введении, где очень кратко, с минимальным числом ссылок и без каких-либо формул, излагается точка зрения автора на текущее состояние исследований в области. Автор также упоминает о некоторых известных результатах в отдельных главах диссертации. Однако, делается это конспективно и часто лишь после того, как результаты самого автора уже изложены. Например, лишь из Заключения к Главе 2 можно узнать, что некоторые используемые модели давно известны в литературе и даже приводили к точным аналитическим результатам. Отсутствие Обзора литературы также привело к тому, что результаты работ многих ведущих групп, в том числе российских механиков (например, работы Л.И.Зайчика и соавторов), вообще в диссертации не процитированы.
- 2) В тексте диссертации часто используется жаргон, что неприемлемо. Так, обыкновенные дифференциальные уравнения называются автором «обычными», а численное моделирование «симуляцией». Автор пишет «скорость осаждения выпадает из ответа», имея в виду, что решение не зависит от скорости осаждения. Другой (и далеко не единичный) пример жаргона – это фраза «введем разрез на отрицательной части действительной оси и «посадим» контурный интеграл на берега этого разреза».
- 3) В диссертации отсутствует какая-либо информация о деталях и методах численного моделирования, что не позволяет читателю воспроизвести эти результаты, а также судить об их достоверности.

Вопросы и замечания по главам.

Глава 1:

- 1) При рассмотрении динамики частицы в вязком подслое (ур. (1.6)) учитывается только сила сопротивления Стокса. Автор упоминает, но не учитывает силы Бассе и присоединенной массы, связанные с нестационарностью течения. При этом не упоминается поперечная инерционная сила (сила Сафмана), учет которой важен для многих сдвиговых и пристенных течений. Следовало указать, при каких значениях основных параметров можно пренебречь данными силами, и оценить их возможный вклад в динамику частицы.
- 2) Является ли уравнение (1.35) новым результатом, или оно аналогично уже известным моделям?
- 3) Какие граничные (или иные) условия должны дополнять уравнение (1.36) для того, чтобы решение было физически корректным? По всей видимости, эти условия неявно учтены при получении решения (1.37), однако для читателя они не очевидны.
- 4) Каким образом учитывается взаимодействие частицы со стенкой при $St \sim 1$? Могут ли частицы иметь ненулевую скорость вблизи границы и отражаться от нее? Как это проявляется в граничных условиях?
- 5) Известно, что в результате гидродинамического взаимодействия со стенкой вблизи нее резко возрастает сила сопротивления, действующая на частицу ($F_d \sim a/z$, где a - радиус частицы). Как следствие, вблизи поверхности сильно уменьшается ее эффективное число Стокса. К каким эффектам это может привести? Не изменит ли это характер распределения (1.37) в нуле? Тот же вопрос относится и к разделу 1.5.2, где рассматривается поведение частиц в узкой пристенной области $z \ll L/St^{1/2}$.

Глава 2:

- 1) Показатель степени $m=1$ соответствует турбулентному пограничному слою, $m=4$ - вязкому пограничному слою. Имеют ли остальные показатели степеней явный физический смысл?

Глава 3:

- 1) Существует ли такое пристенное течение, в котором коэффициент турбулентной диффузии меняется по квадратичному закону?

Замечания по оформлению:

- 1) Очень плохое качество рисунков. Например, на рисунках 1.3, 3.2-3.4 очень мелкие подписи по осям и символы, неотличимые друг от друга. Особенно это принципиально на рис. 3.2 (стр. 48), где разные символы обозначают различные коэффициенты восстановления скорости β , при этом их нельзя отличить друг от друга.
- 2) Разделы диссертации 2.2-2.4 имеют названия вида " $0 \leq m < 2$ ". В названии разделов стоило написать, какому режиму соответствует данный диапазон значений параметра m , тем более что m (показатель степени в ур. (2.1)) вводится только на стр. 38 текста, и его упоминание в оглавлении диссертации вызывает недоумение.
- 3) Ссылки на все работы российских авторов даются в переводах: известные монографии Ландау и Лифшица [4], Мони́на и Яглома [5], статьи в ЖЭТФ [20,34] и письма в ЖЭТФ [55]

Приведенные замечания не влияют на общую положительную оценку диссертации С.А.Белана, результаты которой опубликованы в ведущих физических журналах. Автореферат правильно и полно отражает её содержание. Представленная диссертационная работа полностью соответствует требованиям Положения ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а сам автор безусловно заслуживает присуждения ему степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 - Теоретическая физика.

14 декабря 2016

Доктор физико-математических наук,
Член Academia Europaea,
Заведующая лабораторией
физико-химии модифицированных поверхностей,
ФГБУН Институт физической химии и электрохимии им. А.Н.Фрумкина РАН,



Ольга Игоревна Виноградова

Адрес: Ленинский проспект, д.31, корп.4, 119071 Москва

Email: oivinograd@yahoo.com,

Тел.: 8 (495) 9554603

Я, О.И.Виноградова, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

О.И.Виноградова

Подпись О.И.Виноградовой заверяю,
Кандидат химических наук,
Ученый секретарь Ученого Совета
Института физической химии и электрохимии
им. А.Н.Фrumкина РАН



И.Г.Варшавская