ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Белана Сергея Александровича «Статистические модели динамики инерционных частиц в неоднородных турбулентных течениях», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 – «Теоретическая физика»

Взаимодействие инерционных частиц с турбулентностью привлекает в последнее время большое внимание исследователей во всём мире ввиду огромной практической важности этой задачи для ряда проблем космологии, метеорологии, энергетики, химической промышленности, медицины и т.д. Одними из наиболее интересных и сложных явлений, возникающих в турбулентных потоках со взвешенными инерционными частицами, является кластеризация частиц в однородной турбулентности и аккумуляция частиц в пристенной турбулентности, связанные с турбофорезом частиц в пространстве относительных скоростей и координат частиц для кластеризации в однородной турбулентности и неоднородностью пристенной турбулентности для аккумуляции. Ввиду трудоёмкости прямого численного моделирования турбулентности со взвешенными частицами, большую роль в решении этой задачи играют статистические модели движения частиц, позволяющие использовать мощный математический аппарат теории марковских случайных процессов и стохастических дифференциальных уравнений. Таким образом, тема диссертации С.А.Белана, посвящённая разработке статистических моделей динамики инерционных частиц в неоднородной турбулентности, является, безусловно, актуальной для современной науки и инженерной практики.

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения (основные результаты и выводы), списка публикаций автора по теме диссертации и списка литературы из 72 наименований. Объем работы составляет 82 страницы.

<u>Во введении</u> даётся обзор литературных источников, относящихся к теме диссертации. Обзор отражает современное состояние исследований динамики частиц в неоднородных турбулентных потоках. Кратко излагаются основные результаты диссертации.

<u>Первая глава</u> посвящена статистическим моделям инерционных частиц в вязком подслое турбулентного течения. Отметим в качестве **замечания №1**, что автор использует в некоторых местах термин «вязкий пограничный

слой», хотя более общепринятым и корректным названием является «вязкий подслой» (Л.Д.Ландау, Е.М.Лифшиц, Гидродинамика. М.: Наука, 1986), поскольку вязкий подслой может быть, например, частью пограничного слоя, если он турбулентный. В п.1.1 даются основные сведения о турбулентном течении в вязком подслое. В п.1.2 приводятся уравнения движения частицы в приближении точечных сил, приложенных к центру масс частиц и допущения, на которых эта модель основана. В п.1.3 кратко описана статистическая модель турбулентного переноса пассивного скаляра в вязком подслое, основанная на уравнении Фоккера-Планка для концентрации скаляра, подчёркивается, что стационарным решением для пассивного скаляра с адиабатическими граничными условиями является однородное распределение концентрации. С пункта 1.4 начинается изложение уже собственно полученных автором результатов с помощью развитых им статистических моделей динамики инерционных частиц в неоднородной турбулентности.

Первые статистические модели такого рода восходят ещё к известной модели Крайчнана переноса пассивного скаляра, в которой турбулентные флуктуации скорости несущей среды представлялись в виде гауссова белого шума. Однако, многочисленные численные эксперименты показали, что явления кластеризации и аккумуляции наиболее ярко выражены при временах релаксации частиц, сопоставимых с характерным масштабом времени флуктуаций скорости. В этом случае приближение коротко-коррелированного поля скорости неприменимо и требуется развитие новых статистических моделей, использующих в качестве движущей силы вместо белого шума цветной шум с конечным временем корреляции. Такие подходы применительно к динамике частиц в турбулентности были развиты в работах M.W.Reeks (1991), D.C.Swailes & K.Darbyshire (1997), Л.И.Зайчика и И.В.Деревича (1988,1990), J.Pozorski (1998) и др., в которых поле скорости среды моделировалось случайным гауссовым полем с конечным временем корреляции и было получено различными методами обобщённое уравнение Фоккера-Планка для функции плотности вероятности положения и скорости частицы, или кинетическое уравнение (по терминологии проф. Майкла Рикса). В другой группе работ O.Simonin et al. (1993), J.Pozorski & J.-P.Minier (1999), M.W.Reeks (2005) и др. скорость среды вдоль траектории частицы моделировалась с помощью стохастического дифференциального уравнения со случайной силой в виде белого шума. Такой подход, получивший название обобщённой Ланжевеновской модели, использует описание статистики частиц с помощью совместной функции плотности вероятности положения и скорости частицы и скорости среды вдоль траектории частицы.

В диссертационной работе автором предложен третий подход к статистическому описанию, в котором в функцию плотности вероятности фактически добавляются величины скорости среды сразу во всех точках области потока, а не только вдоль траектории частицы, как в обобщённой Ланжевеновской модели. Функция плотности вероятности при этом фактически является функционалом поля скорости среды, для которого автором предложено линейное стохастическое уравнение Ланжевена (1.14), записанное в эйлеровой системе координат, что существенно облегчает задачу идентификации его параметров из экспериментальных данных, как правило, добываемых с помощью стационарных датчиков. Данный подход и полученное с его помощью уравнение Фоккера-Планка (1.19) для совместной ФПВ координат, скорости частиц и поля скорости среды являются важным результатом работы. К его преимуществам перед упомянутыми выше подходами следует отнести гарантию отсутствия так называемого ложного сноса (spurious drift) частиц. Ложный снос, являющийся серьёзной проблемой для упомянутых выше обобщённых Ланжевеновских моделей, нарушает условие хорошей перемешиваемости (well-mixed condition) в неоднородных турбулентных течениях, приводя к возникновению нефизичных неоднородностей концентрации пассивной примеси из первоначально полностью перемешанного состояния с однородной концентрацией. Хочется надеяться, что предложенное автором уравнение Фоккера-Планка (1.19) послужит отправной точкой для новых исследований динамики частиц в неоднородном случайном поле скорости среды с конечным временем корреляции.

Далее автор применяет полученное уравнение к решению задачи о распределении концентрации частиц в пристенной области турбулентного потока и получает решение полученного уравнения в локально-равновесном приближении, когда длина пробега частицы, т.е. её смещение за характерное время декорреляции, много меньше характерного масштаба длины неоднородности турбулентности. Получено уравнение диффузионного типа для концентрации частиц, имеющее стационарное решение со степенной сингулярностью на стенке. Автор приводит оценки области применимости полученного локально-равновесного решения, из которых следует удивительный факт: в определённом интервале расстояний от стенки условия локального равновесия справедливы для чисел Стокса, много больших единицы! На первый взгляд это противоречит распространённому мнению о применимости квазиравновесных моделей турбулентных двухфазных сред только для малых чисел Стокса, меньших, например, 0.2 (Balachandar, Eaton, 2010). Всё объясняется быстрым квадратичным убыванием скорости и длин пробега частицы с уменьшением расстояния до стенки. Нужно отметить, что эта ситуация является уникальной особенностью турбулентности в вязком подслое. Аналогичные результаты были получены нами независимо с помощью решения более общей задачи о динамике частиц в вязком подслое с негауссовой статистикой поля скорости (Sikovsky, 2014).

На основании полученного автомодельного решения для концентрации частиц автор делает важный вывод о наличии перехода локализация-делокализация по числу Стокса. Показано, что при числе Стокса, большем одной третьей, основная масса частиц потока скапливается вблизи стенки, в то время как при меньших числах Стокса концентрация частиц вдали от стенки сопоставима с их начальной концентрацией. Этот результат получен впервые и представляет большую важность для практических приложений, таких, как задачи очистки газов от аэрозолей в газоходах промышленных устройств и т.д.

Далее в п.1.5 рассматривается динамика сильно инерционных частиц с большими числами Стокса, длина пробега которых много больше, чем расстояние от стенки. В этом случае автор приводит аргументы, согласно которым в уравнении Фоккера-Планка (1.42) можно пренебречь диссипацией за счёт силы сопротивления частицы, в результате чего можно перейти к приближению стохастического ускорения. Рассматривая задачу с общим граничным условием неупругого отскока частиц, автор получает новое автомодельное решение уравнения Фоккера-Планка (1.42) с отброшенным диссипативным членом. Показано, что стационарное решение для функции плотности вероятности, соответствующее нулевому потоку частиц на стенку, имеет степенные хвосты и существует только при малых значениях коэффициента восстановления, меньших некоторого критического значения. Соответствующий решению профиль концентрации имеет степенную сингулярность на стенке и свидетельствует об аккумуляции частиц вблизи стенки. При значениях коэффициента восстановления, больших критического, стационарное решение не существует, и автор делает вывод, что в этом случае локализация отсутствует. Проведённое численное моделирование динамики частиц в искусственном поле скорости, моделирующем турбулентность вязкого подслоя, показало возрастание темпа выноса инерционных частиц с ростом коэффициента восстановления. По содержанию п.1.5 можно сделать **замечание № 2**: как должны выглядеть решение задачи и профиль концентрации при коэффициенте восстановления большем критического? Согласно автору, при критическом значении коэффициента восстановления профиль концентрации есть степенной закон с показателем -5/3, соответствующий аккумуляции частиц у стенки. Что произойдёт, когда коэффициент восстановления чуть больше критического? Автор утверждает, что локализация частиц исчезнет. Если предположить, что профиль скорости имеет степенной вид, то это значит, что показатель степени должен соответствовать неинтегрируемому профилю, т.е. равняться -1 или больше. Значит, при небольшом увеличении коэффициента восстановления показатель степени меняется скачкообразно? Что это, бифуркация решения? Проведя численное моделирование, автор мог бы предъявить соответствующие профили концентраций, подтверждающие наличие столь резкого изменения структуры потока частиц в окрестности критического значения коэффициента восстановления. однако, единственный приводимый в диссертации результат численного моделирования – темп выноса частиц на рис. 1.3 – свидетельствует о плавном изменении этого параметра в окрестности критического значения коэффициента восстановления. Глядя на этот рисунок, можно предположить отсутствие бифуркаций решения и плавное изменение профиля концентрации в зависимости от коэффициента восстановления. Но в этом случае локализация должна иметь место и при значениях коэффициента восстановления, превышающих критическое значение, что противоречит утверждению автора.

Возможно, проведённый автором анализ не является законченным, и ответ на поставленные выше вопросы может дать рассмотрение **Замечания № 3**, которое состоит в следующем**.** Критическое значение коэффициента восстановления определяется автором на стр.33 из условия сходимости интеграла для потока частиц, который берётся по бесконечным пределам. Но это не является физически обоснованным. В самом деле, вероятности больших отклонений скоростей частиц вблизи стенки не могут существенно превышать соответствующие вероятности больших отклонений скоростей частиц в расположенном над вязким подслоем ядре потока. В ядре потока ФПВ скорости частиц близка к гауссовой с дисперсией порядка обратного корня из числа Стокса (для рассматриваемого случая частиц с большими числами Стокса). Поэтому степенные хвосты функции плотности вероятности (1.59),(1.60) имеют место только до скоростей порядка обратного числа Стокса, выше которых ФПВ должна затухать экспоненциально. Другими словами, вблизи стенки максимальные скорости частиц определяется залетающими из ядра потока баллистическими частицами, о которых будет более подробно сказано ниже. Вследствие этого интеграл потока сходится всегда, и решение задачи и локализация частиц существуют при всех значениях коэффициента восстановления. Вывод автора об отсутствии решения при $\beta > \beta_c$ был бы справедлив только для совершенно фантастического случая вязкого подслоя бесконечной толщины, когда степенной профиль интенсивности флуктуаций скорости среды простирался бы неограниченно вдоль нормали к стенке.

Ещё одно, **замечание №4** касается полученного в 1.5.3 решения для функции плотности вероятности в виде комбинаций функций Куммера и Трикоми: удовлетворяет ли оно граничным условиям (1.43)? В тексте граничные условия применяются только для асимптотик решения при больших значениях аргумента, но ничего не сказано об остальных значениях аргумента.

Приведённые выше соображения указывают на важную роль ядра потока на динамику инерционных частиц в пристенной турбулентости. Ещё в 1957 году Фридлендер и Джонстон показали, что основным механизмом осаждения инерционных частиц является их свободный полёт (free-flight) из ядра потока. При числах Стокса порядка единицы доля таких свободнолетящих, или баллистических частиц, может достигать примерно половины общей популяции частиц вблизи стенки (Narayanan et al., 2003), увеличиваясь с ростом числа Стокса. В работе (Sikovsky, 2014) было показано, что баллистические частицы создают длинные степенные хвосты функции плотности вероятности скорости частиц вблизи стенки. **Замечание №5** к главе 1 состоит в том, что в построенной автором теории вклад этих частиц не учитывается. Пренебрежение ими вполне допустимо для расчёта концентрации частиц, поскольку быстрые баллистические частицы не накапливаются у стенки (Sikovsky, 2014). Однако, для вычисления моментов скорости частиц более высокого порядка, вклад баллистических частиц будет существенным, особенно для высших моментов скорости. Так, эксцесс скорости частиц вблизи стенки имеет на стенке степенную сингулярность, с таким же показателем степени, как и концентрация (Sikovsky, 2014), а в диссертации, где учитываются только диффузионные частицы с гауссовой ФПВ скорости, он получится равным 3. Поэтому теорию автора нельзя использовать для расчёта статистики скорости частиц, поскольку она применима не ко всей популяции частиц вблизи стенки, а только к диффузионным частицам.

Причиной такого сложного поведения решений уравнений Фоккера-Планка является то, что диффузионный коэффициент при старшей производной является степенной функцией расстояния и обращается в нуль на стенке. Такие задачи являются сингулярно возмущенными и их решения имеют многомасштабный характер. Как показано в (Sikovsky, 2014), квазиравновесное решение, полученное автором в п.1.4, соответствует так называемому внутреннему слою в пространстве скоростей, в то время как баллистические частицы заполняют внешний слой.

В главе 2 особенности локализации инерционных частиц в пристенной турбулентности рассмотрены для модели дельта-коррелированного поля скорости среды и степенного профиля коэффициента турбулентной диффузии с произвольным показателем степени. В этой главе показано, что результат, полученный в п.1.5, для критического значения коэффициента восстановления, для которого происходит переход локализация-делокализация, обобщается на случай всех моделей, в которых коэффициент диффузии растёт быстрее, чем квадрат расстояния до стенки.

Глава 3 посвящена рассмотрению случая движения частицы в дельта-коррелированом поле скорости с квадратичным профилем коэффициента диффузии. В этой модели параметр неравновесности, или степень инерционности, I не зависит от расстояния, и характеристики локализации частиц могут быть определены путем вычисления ляпуновской экспоненты. Ценность анализа данной модели по сравнению с результатами предыдущих глав в том, что его можно провести при любом значении параметра неравновесности. Необходимо отметить, что помимо указанных автором несколько умозрительных применений данной модели таких, как динамика инерционных частиц в окрестности минимума интенсивности турбулентности и относительного движения частиц в однородном одномерном поле скорости, есть и более конкретная важная практическая область применения: динамика частиц в турбулентном течении вблизи свободной поверхности жидкость-газ, где нормальная к поверхности компонента флуктуационной скорости жидкости затухает линейно в зависимости от расстояния и вблизи свободной поверхности наблюдается аккумуляция инерционных частиц (см. B. van Haarlem, B. J. Boersma, and F. T. M. Niewstadt, Direct numerical simulation of particle deposition onto a free-slip and no-slip surface, Phys. Fluids, 1998, V.10, P.2608). **Замечание №6** связано с различием определений локализации-делокализации, используемых автором в разных местах диссертации. Если в главе 1 критерием локализации служит интегрируемость профиля концентрации частиц на больших расстояниях от стенки, то в главе 3 используется критерий отрицательности ляпуновской экспоненты. Являются ли эти критерии эквивалентными и, если да, то можно ли это доказать?

Глава 4 посвящена практически важной для метеорологии, экологии и других областей применений задаче рассеяния примеси в приземном атмосферном пограничном слое. Рассмотрены двумерные нестационарные решения уравнения турбулентной диффузии примеси с учётом средним переноса горизонтальным ветром. Впервые получено точное нестационарное решение уравнения для распределения концентрации в вертикальном направлении для однородного в продольном направлении случая. Установлены закономерности убывания количества частиц в атмосфере за счёт их осаждения и распределение плотности осажденных частиц в продольном направлении. Полученные в этой главе результаты важны для разработки и тестирования современных моделей турбулентной дисперсии примесей в атмосфере.

Переходя к оценке всей работы, необходимо отметить, что высказанные замечания не снижают общей высокой оценки диссертационной работы, которая по объему, степени обоснованности научных положений, значимости выводов для науки и практики соответствует требованиям ВАК РФ, предъявляемым к диссертациям на соискание степени кандидата физико-математических наук.

Научная ценность работы заключается в том, что автор внес значительный вклад в развитие статистических моделей динамики инерционных частиц в неоднородных турбулентных течениях и на их основе объяснил известные и предсказал новые явления в динамике инерционных частиц в пристенных и неоднородных турбулентных потоках. В совокупности, полученные результаты можно квалифицировать как заметное достижение в области исследований статистических характеристик и структуры неоднородных турбулентных течений с взвешенными инерционными частицами.

Практическая значимость работы С.А.Белана определяется как разработанными новыми статистическими моделями турбулентных газодисперсных течений, которые могут лечь в основу новых инженерных методов расчёта двухфазных потоков более сложной геометрии для широкого спектра практических приложений, так и важными для проектирования различных устройств с двухфазными турбулентными течениями выводами о механизмах турбофореза, кластеризации и аккумуляции дисперсной фазы.

Работа выполнена на высоком научном уровне и представляет собой законченное исследование. Все основные результаты работы опубликованы (шесть статей в изданиях, соответствующих требованиям ВАК) и апробированы на авторитетных международных конференциях и семинарах. Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Диссертация **Белана Сергея Александровича** «Статистические модели динамики инерционных частиц в неоднородных турбулентных течениях» является законченной научной квалификационной работой, полностью соответствующей требованиям «Положения о присуждении учёных степеней», утверждённого постановлентем Правительства РФ №842 от 24.09.2013г., и критериям, установленным в разделе II этого Положения, а её автор заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 – «Теоретическая физика».

28 ноября 2016г.

Официальный оппонент,
кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе
Сибирского отделения Российской академии наук

Сиковский Дмитрий Филиппович

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Новосибирск, пр.ак.Лаврентьева, 1,
тел. (383) 3308128, e-mail: dphs@itp.nsc.ru

ЗАВЕРЯЮ
Зав. канцелярией ИТ СО РАН
Лисунова С.В.
28 ноября 2016 г.