

ОТЗЫВ

**официального оппонента доктора физико-математических наук, профессора
Павловского Валерия Алексеевича на диссертационную работу
Хатунцевой Ольги Николаевны
«Развитие методов расширения фазового пространства для описания нелинейных
процессов и систем в задачах механики сплошных сред и аэродинамики»,
представленную на соискание учёной степени доктора физико-математических наук
по специальности 01.02.05 - «Механика жидкости, газа и плазмы»**

В настоящее время внимание исследователей и инженеров привлекают нелинейные процессы и системы, которым присуща как неединственность, так и неопределенность их состояний. В частности, это относится к переходу от ламинарного режима течения к турбулентному, когда при течении жидкости возникает большое число дополнительных стохастических степеней свободы. Здесь так же уместно отметить, что во многих аэродинамических процессах наблюдаются гистерезисные явления, анализ которых в настоящее время затруднен. Кроме того, во многих задачах механики сплошных сред и теплофизики наблюдается скачкообразное изменение функций или их производных. Перечень процессов и систем такого рода можно продолжить, отметив, что проблема их описания пока является недостаточно разработанной. На решение этих проблем и направлена диссертационная работа О.Н. Хатунцевой, что свидетельствует об актуальности данной диссертации.

Для описания нелинейных процессов и систем Хатунцевой О.Н. развиты методы, основанные на расширении фазового пространства, которые можно эффективно применять при решении разнообразных задач науки и техники.

В частности, можно отметить, что разработанный в диссертационной работе метод описания процессов со скачкообразным изменением функций и их производных может быть применен для описания ламинарно-турбулентного перехода в гидро- и газодинамических процессах. А метод описания стохастических процессов с помощью дифференциальных уравнений в расширенном фазовом пространстве может быть использован, в том числе, для развития подходов к описанию турбулентного течения.

Отдел документационного
обеспечения МАИ

Вх. № _____
« 03 » _____ 02 2020.

В настоящее время в теории турбулентности развиваются несколько существенно различающихся направлений:

– Статистическая теория турбулентности (Монин А.С., Яглом А.М.) с естественным для нее математическим аппаратом – теорией случайных полей. Однако, несмотря на почти столетнюю историю этого пути теории турбулентности, его успехи ограничиваются в основном только однородной и изотропной турбулентностью. Попытки развития статистической теории турбулентности, в сторону представляющих наибольший интерес неоднородных сдвиговых течений пока успехом не увенчались.

– Феноменологические теории турбулентности, которые основываются на анализе опытных данных и изменении масштаба осреднения в уравнениях Навье-Стокса, в результате чего, они превращаются в уравнения течения особой сплошной среды – «жидкости Рейнольдса». Определяющими соотношениями для такой среды являются гипотезы турбулентной вязкости (Буссинеск), пути смешения (Прандтль) и самоподобия стационарных турбулентных течений (Карман). Исходя из них был получен универсальный логарифмический профиль скорости, являющийся ближней асимптотикой течений. На основе теории, пути перемешивания Прандтля, опирающейся на опыты Никурадзе, был решен ряд важных для практических приложений задач (течения в трубах, пограничных слоях и другие). При этом для решения более сложных задач возникали более сложные и более специализированные варианты теории Прандтля-Кармана.

Слабым местом такого феноменологического описания турбулентности, основывающейся только на уравнениях Рейнольдса, является отсутствие в нем учета пульсационных характеристик турбулентных течений. Для устранения этого недостатка А.Н. Колмогоров дополнил уравнение Рейнольдса уравнением переноса кинетической энергии пульсации, что стало в дальнейшем основным направлением феноменологической теории турбулентности.

В настоящее время предложено большое число вариантов дифференциальных моделей турбулентности, являющимися различными вариациями уравнений переноса характеристик турбулентных течений, отличающимися количеством уравнений, выбором «независимых» параметров и способами замыкания (модели « $k - \varepsilon$ », « $k - \omega$ » и другие, используемые ныне в пакетах прикладных программ ANSYS, NUMECA и других). Стремясь к охвату наибольшего количества экспериментальных фактов для различных типов течений, авторы таких моделей турбулентности идут по пути увеличения числа вспомогательных эмпирических функций и входящих в них констант, придавая методам расчета интерполяционный характер. Как заметил Г. Моффат: «В результате тщательного рассмотрения обычно выясняется, что точные предсказания экспериментальных

результатов связаны не столько с физическим содержанием схемы, сколько с количеством свободных параметров, которые она содержит и которые могут быть выбраны для оптимальной подгонки к результатам наблюдений». Тем не менее, этот подход является в настоящее время доминирующим в феноменологической теории турбулентности.

В связи с бурным развитием вычислительной техники и совершенствования алгоритмов возник метод расчета турбулентных течений непосредственно из уравнений Навье-Стокса. Используются различные варианты счета: метод крупных частиц (О.М. Белоцерковский), метод Бубнова-Галеркина (Б.Л. Рождественский) и другие. Этот метод расчета непосредственно из уравнений Навье-Стокса реализован в современных пакетах прикладных программ в виде модели DNS.

Недостатком этого пути являются большие затраты машинного времени и необходимость в каждом конкретном случае тщательной проверки адекватности используемых приближений и методов счета моделируемым задачам.

Идея использования «странных аттракторов» для описания турбулентности возникла из результатов изучения поведения систем, описываемыми нелинейными неконсервативными дифференциальными уравнениями с детерминированными параметрами. Оказалось, что такие системы могут приводить в некотором интервале этих параметров к столь неупорядоченным решениям задач, что описываемые ими поля величин можно рассматривать как случайные. Такие решения весьма неустойчивы, сильно реагируют на изменение начальных и граничных условий. Но это не касается их осредненных значений, которые, как правило, весьма устойчивы. Все это настолько похоже на картину изменения характеристик турбулентных течений, что возникает мысль: не обусловлено ли возникновение и развитие турбулентности «странными аттракторами» в решениях уравнений Навье-Стокса при закритических значениях числа Рейнольдса? Не подлежит сомнению, что эта точка зрения правильная, но оснований ожидать, что это может быть использовано для практических расчетов турбулентных течений, нет. Трудность состоит не только в выявлении странных аттракторов в решениях уравнений Навье-Стокса, но и в детерминированном описании результатов расчетов – определении осредненных характеристик рассматриваемого течения. А это более сложно реализовать, нежели в задачах теории случайных процессов и полей, где при этом возникают чрезвычайные трудности.

Уместно отметить интересные попытки трактовки турбулентности через призму уравнений больцмановского типа (В.В. Струминский). В этом случае кинетические уравнения понимаются, разумеется, не буквально, а как дальнейшее развитие представлений Рейнольдса и Прандтля о том, что турбулентные течения могут

рассматриваться как квазимолекулярные движения элементарных объемов жидкостей, молей, турбонов.

Диссертационная работа Хатунцевой О.Н. напрямую не затрагивает проблему описания турбулентности, хотя в публикациях автора приводятся подходы к описанию турбулентных течений (течения Хагена-Пуазейля, течения Куэтта, плоского течения Пуазейля), а также подходы к определению критических чисел Рейнольдса в этих течениях, основанные на методах, предложенных в диссертации. В этих работах Хатунцевой О.Н. аналитически получены одновременно профили течения, соответствующие, как ламинарному, так и осредненному турбулентному течению.

В русле новых подходов работа Хатунцевой О. Н. позволяет дать еще одно, новое направление теории турбулентности, что также характеризует несомненную актуальность рассматриваемой работы. Работа Хатунцевой О.Н. дает новое направление попыткам решения проблемы турбулентности за счет расширения фазового пространства переменных, что является крупным научным достижением.

Разработанные новые методы исследования нелинейных процессов и систем в задачах гидро-аэродинамики позволяют эффективно их применять при решении практических проблем совершенствования аэродинамических характеристик современных летательных аппаратов.

В тексте диссертации четко просматривается логика изложения материала.

Во введении дано обоснование актуальности темы диссертационной работы, выполнен обзор и анализ существующих исследований нелинейных процессов и систем, обладающих неединственностью и неопределенностью решения. Отмечено, что если в рассматриваемом процессе или системе существуют скрытые параметры для описания поведения, удобно переходить к расширению фазового пространства. Приводятся примеры использования этого расширения при решении некоторых задач гидро-аэродинамики, теории управления и термодинамики.

В первой главе разработаны теоретические основы метода расширения фазового пространства для описания процессов со скачкообразным изменением функций и их производных. Показано, что процессы в природе и технике, совершающие скачкообразные переходы между различными состояниями, можно вне области перехода описать с помощью непрерывных функций, а в области перехода функциями, имеющими стохастическую природу. Для функций с разрывом 1-го рода дается метод определения размера и положения этой области.

В главе 2 на основе разработанного в главе 1 метода расширения фазового пространства дается решение задач определения размерности односвязных фрактальных

структур. В ней также разработаны методы описания физических процессов в односвязных фрактальных структурах. Здесь представляет интерес теоретические приведенные находения размерностей «вязких» пальцев, дендритов, которые хорошо согласуются с экспериментальными данными. Не менее интересен способ замены дифференцирования с дробными производными, применяемого при описании поведения процессов в односвязных фрактальных структурах, в частности для процесса теплопроводности и диффузии, на описание этого поведения с помощью обычных дифференциальных уравнений с расширением фазового пространства. Приведенное описание процесса теплопроводности во фрактальных структурах с помощью метода расширенного пространства показывает эффективность этого метода.

В главе 3 дан метод описания стохастических процессов с помощью дифференциальных уравнений в расширенном фазовом пространстве. Построена математическая модель для описания стохастических процессов, не имеющих выделенных состояний равновесия: дан метод описания мартигалов, представлен метод описания статистических процессов, в которых небольшое измерение реализованного значения приводит к значительным изменениям плотности вероятности его окрестности. В качестве приложения метода рассмотрена задача распространения акустических возмущений малых амплитуд, где в качестве дополнительной стохастической переменной использована энтропия.

Интересна трактовка и исследованного автором поведения в фазовом пространстве странного аттрактора, возникающего, например, при численном интегрировании системе управлений Лоренца. Показано, что при определенных условиях стохастичность возникает при численном интегрировании уравнения Навье-Стокса.

В главе 4 подробно рассмотрены аэродинамические гистерезисные явления. Прежде всего, в ней выполнена классификация этих явлений. Далее дается описание разных типов явлений аэродинамического гистерезиса на основе метода расширения фазового пространства. Показано сравнение полученных гистерезисных кривых с экспериментальными данными для гистерезисных функций первого типа, когда процессы зависят от модуля скорости изменения аргумента. Для гистерезисных явлений 2-го тип, зависящих от направления изменения аргумента, но независящего от скорости, теоретическая модель проиллюстрирована в приложении к задаче о пересечении косых скачков уплотнения.

В главе 5 разработан метод определения колебательного движения летательного аппарата на основе анализа коэффициентов аэродинамических производных демпфирования. Этот метод основан на использовании модели гистерезисных явлений,

развитого в главе 4. Метод имеет перспективы своего использования для предсказания поведения летательного аппарата в режиме колебания.

В целом работа Хатунцевой О.Н. носит характер законченного исследования, вводящего в научный оборот, в качестве эффективного инструмента исследований нелинейных процессов и систем метод расширения фазового пространства. Этот метод является альтернативой многим современным подходам, таким как связанных с использованием дробных размерностей и дробных дифференциалов при описании поведения фрактальных объектов, таким как современным способом описания турбулентных течений и многим другим. В диссертационной работе разработан единый подход для решения нелинейных задач с помощью метода расширения фазового пространства, увеличения его размерности. Зачатки этого метода наблюдаются в работах, связанных с получением уравнения Лиувилля, кинетического уравнения Больцмана, цепочки уравнений Боголюбова, в уравнениях теории управления, а также при описании Ландау фазовых переходов 2-го рода в термодинамике. В них замечено, что во многих процессах, описываемых нелинейными уравнениями в обычном пространственно-временном измерении, существуют некоторые скрытые параметры, которые необходимо учитывать и переходить к расширенному фазовому пространству. Однако цельная, полная формулировка метода расширения фазового пространства дана именно в рассматриваемой диссертационной работе. В ней разработан математический аппарат перехода к расширенному фазовому пространству, даны подходы для решения разнообразных нелинейных задач, возникающих в науке и технике, опираясь на этот метод расширенного фазового пространства.

Работа прошла серьезную апробацию, она докладывалась и обсуждалась на разного рода семинарах и конференциях, в том числе и международных. Список публикаций весьма внушителен, он содержит более 70 работ, в том числе 15 публикаций в журналах, рекомендованных ВАК.

В целом работа О.Н. Хатунцевой представляет собой крупное продвижение в области механики сплошных сред.

Однако, несмотря на общую положительную оценку работы, по ней следует сделать следующие замечания:

- 1) Подходы к решению уравнений Навье-Стокса, записанных в расширенном фазовом пространстве, в работах автора представлены применительно к несжимаемой жидкости. Однако для задач аэродинамики важен учет сжимаемости, что оказалось вне поля интересов диссертанта.

- 2) Для уравнения Навье-Стокса выполнено расширение фазового пространства за счет введения в рассмотрение энтропии. Это привело в выражении для полной производной по времени дополнительного слагаемого. Однако изменения вязкостного слагаемого не произошло, связь между тензорами напряжений и скоростей деформации, присущая линейно-вязкой ньютоновской жидкости, не изменилась. Но затраты энергии потока на производство энтропии может привести к изменению кинетической энергии потока и изменению реологического соотношения вязкой жидкости.
- 3) На некоторых графиках нет разметки шкал физических величин по осям, в частности это касается рисунков 3,4 стр. 67,68, что затрудняет восприятие соответствующего фрагмента текста работы.
- 4) По всему тексту работы не даются размерности фигурирующих в ней физических величин и появляющихся в ходе исследования коэффициентов при них.

Отмеченные недостатки не снижают общей положительной оценки работы, их можно, скорее всего, рассматривать как пожелания для дальнейшей работы.

Практическая значимость полученных в диссертации результатов не вызывает сомнений. Они могут использоваться в таких областях хозяйства как энергетика и транспорт, а также при решении ряда экологических проблем. В учебном процессе эти результаты полезны при изучении дисциплин, связанных с проектированием и эксплуатацией летательных аппаратов, энергетических установок и аппаратов химической технологии. Их целесообразно использовать в ведущих вузах страны – МГУ, МФТИ, МЭИ, СПбГУ, НГУ и других.

Автореферат полностью отражает содержание диссертационной работы.

Считаю, что диссертационная работа Хатунцевой Ольги Николаевны соответствует всем критериям, установленным Правительством РФ от 24.09.2013г. №842 «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемых ВАК РФ к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, а ее автор Хатунцева Ольга Николаевна заслуживает присуждение ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа, плазмы».

Официальный оппонент

Доктор физико-математических
наук, профессор, профессор
кафедры «Теплофизические

основы судовой энергетики»
Санкт-Петербургского
государственного морского
технического университета


24.01.20

Павловский Валерий Алексеевич

Адрес: 190121, г. Санкт-Петербург, улица Лоцманская, д.3

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет» (СПбГМТУ)

e-mail: office@mail.ru, тел.: 8(812)714-07-61, факс: 8(812)713-81-09

Павловский Валерий Алексеевич

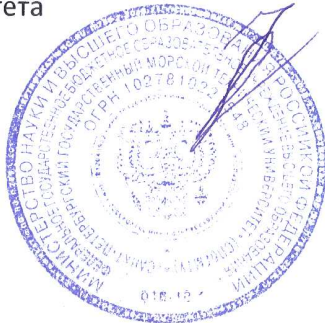
Домашний адрес: 198330, г. Санкт-Петербург, ул. Маршала Захарова, д.27 корп.1 , кв.366

e-mail: v.a.pavlovsky@gmail.com , моб.тел. 8-921-973-82-54

Шифр научной специальности 01.02.05

Подпись Павловского В.А. и личные данные заверяю :

Ученый секретарь Учёного совета Санкт-Петербургского государственного морского технического университета



А.И.Фрумен