

Отзыв официального оппонента о диссертации Мулляджанова
Рустама Илхамовича «Устойчивость и когерентные структуры
в струйных и отравных течениях жидкости» на соискание
ученой степени доктора физико-математических наук по
специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы

Диссертация Р.И. Мулляджанова посвящена решению ряда актуальных задач гидродинамики и теплообмена. Объектом численного и аналитического исследования являются затопленные струи, отрывные течения за цилиндром и движения в узких щелях. Каждое из этих движений допускает реализацию в экспериментах, что повышает интерес к изучаемым задачам. Важно также, что понимание закономерностей таких движений позволяет разобраться в работе многих технических устройств. Помимо этого, крупномасштабные вихревые и когерентные структуры наблюдаются в атмосфере и океане, что расширяет круг приложений получаемых результатов. Однако актуальность тематики диссертации определяется не только возможными приложениями, но и внутренними потребностями развития теории. Изучаемые в диссертации задачи относятся к тесно связанным между собой направлениям современной гидродинамики – это гидродинамическая устойчивость и турбулентность. Оба направления сейчас активно развиваются, чему способствует прогресс вычислительной техники и прикладной математики. Однако целый ряд задач оставался неисследованным, в том числе задача устойчивости знаменитого решения Ландау, объяснение механизма турбулизации закрученной струи, явления гистерезиса при истечении реагирующих газов из кольцевого сопла.

Сказанное выше свидетельствует об актуальности тематики работы. Новизна полученных результатов в значительной мере обусловлена новизной постановок задач. Так, впервые решена задача об устойчивости струи Ландау по отношению к неосесимметричным возмущениям с учетом расширения потока вниз по течению. Это позволяет учесть влияние неосесимметричности сопла, из которого вытекает струя. В отличие от работы В. Штерна и Ф. Хуссейна (2003), где рассматривались только нейтральные возмущения, диссертант нашел растущие возмущения, соответствующие азимутальным волновым числам $m = 0$ и $m = 1$. Принципиальным является вывод о том, что дальнейшее поле затопленной струи «помнит» о характеристиках ближней области течения. Чтобы прийти к этому заключению, диссертанту пришлось продвинуться в асимптотике дальнего следа до выражений второго порядка малости по параметру R^{-1} , попутно уточнив результаты Ю.Б. Румера, М.С. Цуккера, М.А. Гольдштика и Н.И. Яворского. С прикладной точки зрения, основным результатом главы 2 является получение критерия расстояния от

кромки сопла, на котором происходит ламинарно-турбулентный переход в затопленной струе. Хорошее согласование предсказаний линейной теории с экспериментальными данными в этой задаче достигнуто впервые.

Самой большой по объему является глава 3 «Когерентные структуры в турбулентной струе». Обширные экспериментальные данные демонстрируют сложную картину формирующихся когерентных структур, которая во многом определяется предысторией течения в подводящей трубке. Для минимизации влияния этого фактора автор предлагает исследовать каноническую круглую струю, формируемую целиком развитым турбулентным потоком из длинной трубы. Сам по себе расчет такого потока, который определяет ближнее поле в струе, представляет сложную вычислительную задачу. Далее использованы три современных метода моделирования турбулентных течений. Ближняя область рассчитывается методом крупных вихрей (LES), который не требует таких затрат машинного времени и памяти, как метод прямого численного моделирования (DNS), но является менее информативным. Для определения пространственных форм наиболее энергонесущих вихревых структур выбран метод собственного ортогонального разложения (POD). Автор виртуозно владеет этими методами и их численной реализацией. Выяснилось, что доля турбулентной кинетической энергии для базисных функций с азимутальными волновыми числами $m = 0, 1, 2, 3$ сопоставима и составляет приблизительно половину общей энергии, а наибольший вклад дает мода с $m = 1$.

При увеличении продольной координаты выше значения 20 диаметров трубы струя приобретает автомодельные свойства, характерные для течения в дальней области. Далее расчет проводится методом DNS с последующей статистической обработкой результатов. Эти результаты не имеют аналогов в мировой литературе. Впервые выявлено, что основным типом когерентных структур в турбулентной струе являются бегущие спиральные волны. В главе 3 также рассмотрены задачи о слабо закрученной турбулентной струе и об импульсной струе в смеси реагирующих газов, которые вытекают из соосных кольцевых сопел. Для решения последней задачи автору пришлось освоить программу HIPSTAR, предназначенную для расчета турбулентных течений газов. По этой задаче имеется набор экспериментальных данных (Хюбнер и др., 2003; Туммерс и др., 2009). Диссертанту удалось смоделировать сложные переходные режимы турбулентного горения, характеризующиеся гистерезисом. Результаты расчетов хорошо совпали с экспериментальными данными. Это позволяет надеяться на возможность замены физического эксперимента в подобных задачах численным экспериментом.

Глава 4 посвящена расчету отрывного течения за круглым цилиндром при обтекании его равномерным потоком. Эта задача является классической

задачей гидродинамики и имеет богатую историю. Ее специфика состоит в том, что осредненное поле скоростей является двумерным, но пульсации скорости в направлении x_3 могут внести существенный вклад в напряжения Рейнольдса. Поэтому адекватное моделирование течения в турбулентном следе за цилиндром должно производиться на базе трехмерных уравнений. Автор использует тройную декомпозицию поля скоростей, предложенную Хуссейном и Рейнольдсом (1970). По координате x_3 ставятся периодические граничные условия, что является вынужденным компромиссом. Исследованы характеристики течения при $Re = 3900$ и $Re = 1.4 \times 10^5$. Получена богатая информация о когерентных, смешанных и стохастических корреляциях. Эта информация позволяет сделать вывод, что смешанные корреляции заметно ниже напряжений Рейнольдса, однако при $Re = 3900$ могут достигать 30% от стохастических пульсаций. Рассчитанные автором поля пульсаций хорошо согласуются с данными экспериментов Кантвелла и Коулза (1983).

Как уже отмечалось, в главе 4 решались трехмерные уравнения. Было бы интересно оценить вклад напряжений Рейнольдса, вызванных пульсацией компоненты скорости u_3 , в общее поле напряжений. Здесь также возникает вопрос о законности гипотезы Буссинеска относительно сонаправленности тензоров $\tilde{S}_{ij}$ и $\tilde{R}_{ij}^{tr}$, поскольку эти тензоры имеют разные размерности.

Завершает диссертацию глава 5 «Вторичные течения в квазидвумерных струйных и отрывных течениях». Здесь имеется в виду, что масштаб области течения по одной из координат много меньше, чем по двум другим. Интерес к таким течениям в контексте турбулентности обусловлен тем, что подобные ситуации наблюдаются в атмосфере и океане. Двумерная турбулентность может быть реализована в опытах с жидкими металлами, где приложение магнитного поля подавляет третью компоненту скорости. Кроме того, в ней возможен «обратный каскад» – передача энергии от мелких вихрей к более крупным.

Основным результатом главы 5 является обнаружение продольных вихрей при истечении струи из узкого отверстия в щелевую область. Их появление вызвано взаимодействием меандрирующего течения с твердыми стенками. Таким образом, этот эффект является существенно трехмерным. Данный результат подтвержден экспериментально: M.V. Shestakov, R.I. Mullyadzhanov, M.P. Tokarev, D.M. Markovich. Modulation of large-scale meandering and three-dimensional flow in turbulent slot jet // Journal of Engineering Thermophysics. 2016. Vol. 25. No. 2. P. 159-165.

Достоверность результатов диссертации обусловлена тем, что в ней используются надежно апробированные методы вычислительной математики

и теории дифференциальных уравнений. В ряде случаев удается достичь согласия с экспериментальными данными, а также с результатами других авторов, полученными в предельных ситуациях.

Результаты диссертации существенно расширяют наши представления о механизме ламинарно-турбулентного перехода и о когерентных вихревых структурах в струях и следах. Поскольку такие процессы и формы движения характерны для многих технологических процессов, то эти результаты могут найти применение при проектировании энергетического оборудования и аппаратов химической технологии. Теоретическая значимость результатов состоит в обогащении подходов к численному интегрированию уравнений Рейнольдса при различных способах их замыкания. Можно также полагать, что приближенно решенная во второй главе задача об устойчивости струи Ландау заинтересует математиков, занимающихся спектральной теорией. В точной постановке эта задача сводится к уравнениям, которые не допускают полного разделения переменных, но после применения преобразования Меллина получается система уравнений, разностных по одной переменной и дифференциальных по другой. Насколько мне известно, такие уравнения до сих пор не исследовались.

Диссертация хорошо оформлена, и у меня практически нет замечаний по этому поводу. Замечу все же, что слова «выделено синим» (стр. 51), «светло-голубые линии» (стр. 93) или «красный и синий цвет» (стр. 101) выглядят странно в тексте, отпечатанном на обычном принтере.

Важным элементом диссертации является список литературы из 422 наименований, в котором присутствует лишь 26 публикаций в отечественных изданиях. Это не соответствует вкладу российских ученых в развитие данной области науки. Я имею в виду работы О.Ф. Воропаевой, О.В. Капцова, Г.Г. Черных и А.В. Шмидта по моделированию турбулентного следа, статьи В.А. Гущина и П.В. Матюшина по расчету отрывного течения за цилиндром в однородной и стратифицированной жидкости. В списке отсутствует ссылка на публикацию В. Шверака «О решениях Ландау уравнений Навье-Стокса» (Проблемы математического анализа, выпуск 61, октябрь 2011, с. 175-191). В ней доказано, что решение Ландау является единственным стационарным автомодельным решением уравнений Навье-Стокса, определенном во всем пространстве и имеющим особенность лишь в начале координат.

По теме диссертации автором опубликовано 16 статей в журналах из списка, рекомендованного ВАК. Пятнадцать из них написаны в соавторстве. Автореферат диссертации правильно отражает ее содержание.

В диссертации Р.И. Мулляджанова решена крупная научная проблема формирования, динамики и устойчивости когерентных структур в условиях

развитой турбулентности. Считаю, что ее автор вполне достоин присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы.

Главный научный сотрудник Института
гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН
доктор физико-математических наук,
профессор, член-корреспондент РАН

В.В. Пухначев

26 сентября 2018 г.

Подпись В.В. Пухначева заверяю:
Ученый секретарь ИГиЛ СО РАН
кандидат физико-математических наук

И.В. Любашевская

