

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Мулляджанова Рустама Илхамовича
«Устойчивость и когерентные структуры в струйных и отрывных течениях
жидкости», представленную на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук по специальности
01.02.05 — Механика жидкости, газа и плазмы

Диссертация Р.И. Мулляджанова в основном посвящена изучению структурных особенностей представительного класса струйных и отрывных турбулентных течений несжимаемой жидкости, с определением характеристик и роли наиболее энергосодержащих когерентных структур и в сочетании с анализом ряда важных вопросов гидродинамической устойчивости струйных течений. В ней также исследуются процессы формирования и роль вторичных трехмерных вихревых структур, развивающихся около ограничивающих стенок в квазидвумерных струйных и отрывных течениях.

Основной объем исследований по теме диссертации выполнен автором с применением современных методов вихреразрешающего численного моделирования турбулентных течений и, частично, посредством численного решения нестационарных, осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса в сочетании с той или иной полуэмпирической моделью турбулентности. Представленные в работе задачи устойчивости струйных течений решались в линеаризованной постановке с применением полуаналитических методов.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка цитируемой литературы, дополненного списком публикаций автора по теме диссертации. Материал диссертации изложен на 253 страницах, включающих 111 рисунков и 15 таблиц. Список цитируемой литературы включает 422 наименования.

Несомненная актуальность выполненного Р.И.Мулляджановым исследования обусловлена фундаментальным значением углубленного понимания сложной, существенно нестационарной вихревой структуры струйных и отрывных течений, что, в свою очередь, формирует основы для создания методов пассивного и активного управления такого рода течениями с целью интенсификации процессов турбулентного перемешивания, снижения аэро- и гидродинамического шума, оптимизации разнообразных технологических процессов и т.д. Ставшие сегодня широко доступными суперкомпьютерные вычислительные технологии, в сочетании с развитыми программными средствами вычислительной гидродинамики и компьютерными методами обработки больших объемов данных, только усиливают интерес исследователей к проведению вихреразрешающего численного моделирования турбулентных течений, результаты которого, при соответствующем детальном и всестороннем анализе, выводят понимание глубинной сути турбулентных течений на новый уровень, включая и «канонические» конфигурации

струйных и отрывных течений, ранее изучавшихся на основе статистических моделей.

Основные результаты, полученные соискателем по теме диссертации, заключаются в следующем.

1. Автором найдено аналитическое решение для дальнего поля ламинарной струи, которое описывает отклонение от точного осесимметричного решения Ландау, вызванное ненулевыми поперечными компонентами вектора момента импульса на выходе из создающего струю источника. В совокупности с ранее представленными в литературе осесимметричными решениями, описывающими влияние начального расхода струи и закрутки, полученное автором решение завершает анализ возмущающих эффектов первого порядка методом асимптотического разложения по обратным степеням расстояния от источника. Особая ценность этого, неосесимметричного решения заключается в том, что оно наглядно отражает эффект долгой “памяти” струйного потока в отношении поля скорости источника.

2. Изящным методом решена линейная задача устойчивости затопленной ламинарной круглой струи, описываемой точным решением Ландау. Примененный автором «автомодельный» подход позволил отказаться от «параллельного» приближения, обычно используемого при анализе устойчивости сдвиговых течений. Убедительно показано, что возмущения растут степенным образом с увеличением расстояния от источника, а показателем степени является величина, зависящая от постоянного вдоль струи числа Рейнольдса. Найдены критические значения числа Рейнольдса для осесимметричных и спиральных возмущений.

3. На достаточно подробных сетках методом моделирования крупных вихрей (Large Eddy Simulation, LES) получены численные решения задачи о турбулентной затопленной струе несжимаемой жидкости, истекающей из вращающейся или неподвижной круглой трубки с полностью развитым вверх по потоку внутренним турбулентным течением при значениях числа Рейнольдса в интервале от 5000 до 6000. В результате сформирована новая база данных, позволяющая провести детальный анализ спектрального и модального состава нестационарных вихревых образований, формирующих турбулентные струйные течения в указанных, в известной мере, «канонических» конфигурациях.

4. С использованием метода POD (собственного ортогонального разложения), приложенного для обработки и анализа полученных по методу LES данных, впервые и обстоятельно показано, что спиральные бегущие волны являются собственными функциями задачи, описывающей круглую затопленную незакрученную струю. Эти волны составляют совокупность наиболее энергонесущих вихревых структур в дальнем поле струи, где, как показано автором, доля турбулентной кинетической энергии для первых четырех (по азимутальному волновому числу) мод составляет в сумме около 50%. Важным новым результатом является и установленная в диссертации согласованность характеристик выделенных по методу POD вихревых структур, отвечающих единичному азимутальному волновому числу, с результатами

линейного анализа устойчивости осредненного турбулентного струйного течения, проведенного с учетом эффектов фоновой мелкомасштабной турбулентности. Справедливость полученных заключений о «тонкой» структуре турбулентного поля круглой незакрученной струи, выведенных из анализа LES данных, подтверждена автором посредством аналогичного анализа данных, полученных по методу DNS для слабосжимаемой струи.

5. Проведен обстоятельный анализ влияния исходной закрутки, создаваемой вращением стенки подающей трубки, на формирование вихревых структур в ближнем поле турбулентной струи и интенсивность вовлечения окружающей жидкости в ядро потока. Методом LES получен обширный объем новых данных о влиянии режимных параметров и, в особенности, резкого изменения расхода на вихревую структуру течения, формирующегося при истечении несжимаемой среды из двух соосных кольцевых каналов, при том, что внешняя стенка такого комбинированного сопла, как и в экспериментальном прототипе, может вращаться. Детально проанализированы переходные процессы, вызванные резким изменением расхода и сопровождающиеся формированием крупномасштабных когерентных структур. Дано достаточно убедительное объяснение причин гистерезиса, наблюдавшегося в экспериментах в случае реагирующего потока, развивающегося в аналогичных по геометрии и режимным параметрам условиях.

6. Методом LES получены численные решения задачи о статистически двумерном докритическом обтекании кругового цилиндра при двух существенно различных значениях числа Рейнольдса (3900 и $1,4 \times 10^5$); показано, что эти данные находятся в хорошем согласии с имеющимися литературными данными. Полученные данные использованы для обстоятельного анализа значимости смешанных корреляций когерентных и стохастических флуктуаций, которые, в дополнение к напряжениям Рейнольдса, возникают в нестационарных уравнениях движения при использовании процедуры условного осреднения (URANS). Впервые показано, в частности, что роль смешанных корреляций становится пренебрежимо малой только при относительно высоких числах Рейнольдса.

7. На основе данных вихреразрешающего численного моделирования существенно углублены знания о свойствах «квазидвумерных» струйных и отрывных турбулентных течениях, развивающихся в щелевых конфигурациях. В частности, впервые обнаружены и охарактеризованы интенсивные продольные вихревые структуры, возникновение которых обязано взаимодействию меандрирующего (основного) потока с вязкими слоями у твердых ограничивающих стенок.

Степень достоверности полученных в диссертации результатов представляется высокой по следующим обстоятельствам. В работе использованы вычислительные методики, которые достаточно апробированы и обоснованы. Применимость этих методов в условиях, при которых развиваются изучаемые процессы, детально проанализирована в диссертации, а правильность выбора схемных факторов специально обоснована. При обработке результатов вычислений в

диссертации использованы известные, хорошо апробированные методики. Полученные в диссертации результаты физически непротиворечивы. Дополнительным свидетельством достоверности полученных в диссертации результатов является их многолетняя апробация на многочисленных национальных и международных семинарах и конференциях.

Полученные соискателем научные результаты являются полезными для оптимизации применяемых на практике методов интенсификации процессов смешения посредством закрутки струйного течения, а также для совершенствования тех элементов энергетических и технологических установок, в которых тепломассобменные процессы связаны с организацией струйного или отрывного турбулентного течения в щелевой конфигурации. Представленные в работе расчетно-теоретические данные могут быть непосредственно использованы при подготовке и интерпретации исследовательских экспериментов по устойчивости струйных течений в контролируемых условиях, а также экспериментов на установках с квазидвумерными струйными и отрывными течениями. Полученные знания о наиболее энергосодержащих когерентных структурах могут быть полезны для построения экономичных малоразмерных моделей турбулентного струйного течения. Данные по значимости взаимодействия когерентной и стохастической компоненты пульсаций скорости, полезны для выработки углубленного взгляда на предсказательные возможности подхода, основанного на решении осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье – Стокса и по сие время являющимся основным при проведении расчетов инженерной направленности.

Диссертация хорошо структурирована. Содержание работы отражает не только весьма значительный объем, но и осязательную глубину проведенного исследования. Все разделы диссертации логически связаны между собой и в совокупности представляют цельное завершённое научное исследование.

При прочтении диссертационной работы возник ряд вопросов и замечаний:

1. Не раскрывается, каким образом автор получил «теоретическую» кривую, приведенную на рис. 2.15 в целях сопоставления с литературными данными по турбулизации струи, истекающей из сопла в виде длинной круглой трубки. В подписи к данному рисунку сказано лишь, что эта кривая получена в соответствии со степенной зависимостью амплитуды возмущения от расстояния до сопла, где показателем степени служит инкремент нарастания, зависящий от числа Рейнольдса Re (определенного выражением (2.80)). Пояснения необходимы, так как рассчитанные значения инкремента нарастания представлены в диссертации только для значений Re , не превышающих 400, в то время как для сопоставления с приведенными на рис.2.15 опытными данными должны были привлекаться данные по инкременту для существенно больших (на несколько порядков !) значений числа Re , при том, что оно связано с традиционным, используемым на практике числом Рейнольдса (Re_D), соотношением $Re = (Re_D)^2 / 8$.

2. Линейная система уравнений (1.113)-(1.116) для поиска амплитудных функций возмущений, накладываемых на исходное ламинарное течение (по методу нормальных мод), выведена в предположении постоянства коэффициента вязкости (числа Рейнольдса). Её же автор использует и для анализа устойчивости осредненного турбулентного течения в виде незакрученной затопленной струи (стр. 103-105), вводя эффективное число Рейнольдса. Последнее, очевидно, меняется поперек струи, если, как это принято автором (см. рис. 3.14), турбулентная вязкость зависит от радиальной координаты. Тем самым возникает некоторое рассогласование в принятой методике учета фоновой турбулентности.

3. Неясно, зачем при постановке своего рода «канонической» задачи о турбулентной струе, истекающей из круглой трубки с полностью развитым вверх по потоку внутренним турбулентным течением (раздел 3.2), вводится существенная по величине толщина трубки (12% от радиуса). Что мешало использовать модель с бесконечно тонкой стенкой, чтобы в задаче действительно оставался один определяющий параметр – число Рейнольдса (полагая, что влияние накладываемого слабого спутного потока пренебрежимо мало)? Насколько динамические процессы, возникающие при обтекании острого внешнего угла эжектируемым струей потоком, могут повлиять на развитие ближнего поля струи, и достаточно ли аккуратно разрешались эти процессы?

4. Поскольку входные условия для указанной «канонической» задачи (определявшиеся в ходе параллельного LES расчета) являются ключевыми для проводимого «тонкого» анализа структуры струи, то весьма желательно было бы видеть в диссертации прямые свидетельства высокого качества определения этих условий. Однако автор ограничивается лишь фразой о том, что использованная расчетная сетка позволила «... получить хорошее согласие для радиального осредненного по времени профиля скорости и пульсаций с данными прямого численного моделирования из литературы» (стр. 95).

5. В диссертации не указано, из каких источников автор получил базу данных прямого численного моделирования турбулентной сжимаемой струи, анализ которых проводится в п.3.2.2. Является ли эта база данных открытой, или она была передана автору в «приватном порядке»?

6. При описании постановки задачи о струе, формирующейся при истечении среды из двух соосных кольцевых каналов (стр. 139), указано, что входные условия определялись, как и в случае круглой струи, посредством отдельного LES расчета. Вместе с тем, для течения во внутреннем, относительно узком канале число Рейнольдса составляет всего от 1300 до 2250 при его определении по гидравлическому диаметру и, следовательно, оно примерно в два раза меньше, если его вычислять по ширине канала. В этих условиях вряд ли можно применять метод LES для определения входных условий при истечении из внутреннего канала. Или данное указание относится только к внешнему, широкому каналу, с существенно большими значениями числа Рейнольдса, а для внутреннего канала использовался другая методика?

7. На рис. 5.11, 5.12 проводится сопоставление результатов LES расчетов поперечного обтекания цилиндра, находящегося в щелевом канале, с данными PIV измерений. При этом не освещается степень согласованности вычислительной и экспериментальных моделей по граничным условиям. Вопрос немаловажный, поскольку число Рейнольдса набегающего потока (полагаемого ламинарным) составляет около полутора тысяч. В вычислительной модели на входной границе исходно задается профиль развитого течения (профиль Пуазейля), а в экспериментальной модели для обеспечения развитости ламинарного течения при таком числе Рейнольдса требуется порядка сотни высот щелевого канала (если не применять специальных вставок, формирующих профиль), что существенно превышает размеры, указанные для установки в ИТФ СО РАН. Возможно, именно неполная согласованность вычислительной и экспериментальной моделей по граничным условиям приводит к заметному (около 20%) расхождению расчетных и опытных данных по длине зоны рециркуляции за цилиндром.

8. Название раздела 3.4 «Импульсная слабозакрученная турбулентная струя» неудачно, поскольку фактически в этом разделе анализируется влияние скачкообразного изменения расхода на смену режима истечения соосных кольцевых струй при вращении одной из стенок внешнего кольцевого сопла.

9. Встречаются неясные комментарии и неточные термины. Например, при анализе влияния параметра вращения N на характеристики закрученной струи, истекающей из вращающейся трубы, говорится следующее (стр.125): «Помимо роста скорости расширения струи с N , стоит отметить, что пограничный слой в трубе становится толще (см. рис. 3.27), что также приводит к более быстрой диффузии импульса вниз по течению». Что в данном случае, а именно для развитого (!) по длине трубного течения, понимается под пограничным слоем? И как определяется «толщина» этого слоя? Далее, турбулентное (стохастическое) течение в трубе, рассчитываемое методом LES при наложении условий периодичности, не следует именовать периодическим, как это сделано в конце стр. 103. Термин «плоскопараллельное приближение», широко используемый при анализе устойчивости двумерных (плоских) течений, вряд ли уместен при рассмотрении устойчивости осесимметричных течений со строго или приблизительно цилиндрическими (!) поверхностями тока.

10. Встречаются и жаргонные выражения, например: «DNS разрешает весь спектр турбулентных пульсаций», «LES находится посередине», «незакрученный случай», и т.п. Вместо принятого в русскоязычной литературе термина «динамическая скорость» соискатель повсеместно использует термин «скорость трения», являющийся «прямым» и неудачным переводом англоязычного термина «friction velocity».

11. Имеется ряд недостатков в оформлении рисунков. Например, на осях графиков рисунка 3.16 не указаны значения нормированного времени. Не определено, в каких единицах (или как нормирован) тепловой поток, данные для которого приводятся на рис. 5.13.

12. В тексте имеется немалое количество опечаток, нередки и синтаксические погрешности (в основном, это относится к пропуску запятых).

Высказанные замечания относятся в основном к представлению материала на страницах диссертации и не снижают общую высокую оценку диссертационной работы соискателя. Представленная Р.И.Мулляджановым диссертация является цельной научно-исследовательской работой, вносящий крупный вклад в понимание сложной, существенно нестационарной вихревой структуры струйных и отрывных турбулентных течений несжимаемой жидкости, спектрального и модального состава когерентных структур, а также особенностей и роли вторичных продольных вихревых структур в квазидвумерных течениях данного класса.

Тема диссертации и характер выполненных исследований соответствует специальности 01.02.05 — механика жидкости, газа и плазмы.

Все основные результаты диссертации опубликованы, преимущественно в журналах из перечня ВАК, а также в трудах профильных отечественных и международных конференций. Содержание автореферата соответствует основным положениям и выводам из представленной диссертационной работы.

Считаю, что диссертация Мулляджанова Рустама Илхамовича является завершенной научно-квалификационной работой, полностью соответствующей требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ №842 от 24.09.2013, и другим критериям, установленным в разделе II этого Положения. Автор диссертации Мулляджанов Рустам Илхамович 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 кафедрой «Гидроаэродинамика, горение и теплообмен»
СПб Политехнического Университета Петра Великого


Смирнов Евгений Михайлович

Смирнов Е. М.
Достоверяю
Специалист
Васильева А. А.
«26» 09 2018 г.

Санкт-Петербургский Политехнический Университет Петра Великого,
192251, С.-Петербург, Политехническая улица, д.29,
тел./факс (812) 552-66-21, email: aero@phmf.spbstu.ru