

## О Т З Ы В

**официального оппонента на диссертацию на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук Гареева Линара Рафаилович на тему: «Исследование механизмов нарастания возмущений в струйном течении» по специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы**

Кандидатская диссертация Л.Р. Гареева посвящена детальному экспериментальному исследованию закономерностей формирования и развития возмущений затопленной струи и их влияния на структуру ламинарного течения и на особенности его перехода в турбулентное состояние. Ряд важных количественных результатов получен автором благодаря использованию разработанного им метода возбуждения контролируемых осесимметричных и трёхмерных возмущений

*Актуальность избранной темы исследования обусловлена как большим фундаментальным значением задач формирования и развития трёхмерных волновых возмущений затопленной струи и их важной роли в процессе возникновения турбулентности, так и большим распространением исследуемых ламинарных, переходных и турбулентных струйных течений в широком классе технических и технологических устройств. В частности это относится к ламинарным струйным установкам, предназначенным для создания чистых зон в производственных и лабораторных помещениях и к форсункам камер сгорания газотурбинных двигателей. Характеристики и свойства создаваемых струйных течений важно учитывать при разработке и проектировании этих и многих других технических устройств. Хорошо известно, что дальнобойность струй и характеристики их тепломассопереноса существенно зависят от свойств их восприимчивости к внешним возмущениям и скорости развития, взаимодействия и разрушения развивающихся в них волновых и вихревых возмущений. Исследование, представленное в диссертации Л.Р. Гареева, без сомнения способствует углублению понимания основополагающих физических характеристик и механизмов формирования, развития и взаимодействия сложных трёхмерных возмущений в струях ламинарного и переходного типа.*

Основные *результаты моего краткого анализа достижений соискателя*, изложенных им в тексте диссертации, сводятся к следующему.

*Во введении* (объёмом 9 страниц) автором даётся краткое описание исследуемой проблемы и обосновывается актуальность темы диссертации. В частности, справедливо отмечается, что механизмы появления и усиления немодовых (транзиторных) возмущений в струйных течениях и ассоциируемые с ними режимы байпасного перехода изучены очень слабо. Достаточно ясно сформулированы основные цели и задачи работы, представлен авторский взгляд на новизну, практическую ценность и достоверность полученных результатов и перечислены основные результаты работы, выносимые на защиту. В целом, введение производит хорошее впечатление и выполняет задачу информирования читателя о круге рассматриваемых в работе проблем, и их актуальности, а также об основных целях диссертации, её структуре и степени апробации.

*В главе 1* (объёмом 15 страниц) дан очень хороший, квалифицированный обзор результатов предыдущих экспериментальных, теоретических и численных исследований по теме диссертации. Обзор хорошо структурирован. Первая его часть, относится к исследованиям модовой неустойчивости струйных (а также пристенных сдвиговых) течений. А во второй части обсуждаются исследования механизмов немодовой неустойчивости сдвиговых течений, в том числе – струйных. В обзоре показана недостаточная изученность ряда важных аспектов проблемы. В частности справедливо отмечено сильный недостаток экспериментальных исследований, посвященных трехмерной вихревой структуре струйных течений. Сделан вывод о том, что предыдущие исследования обсуждаемых аспектов проблемы носят в основном качественный характер и не дают однозначного ответа на вопрос о правомерности использования линейных теорий модовой и немодовой неустойчивости для расчёта начальных стадий процесса перехода в ламинарных затопленных струях. На основе проведённого обзора работ соискатель приходит к обоснованному выводу об актуальности темы его диссертации.

*Глава 2* (объёмом 11 страниц) является методической. Она посвящена описанию ряда использованных в работе методов измерений, в том числе разработанных автором. Хотя эта глава имеет относительно небольшой размер, она отражает

важный вклад соискателя в развитие методических приёмов исследования трёхмерной структуры струи в условиях возбуждения в ней контролируемых модовых и транзиторных возмущений. Эта глава также характеризует довольно высокую квалификацию автора диссертации в вопросах владения современными методами измерений (визуализация, термоанемометрия, PIV), обработки и представления больших массивов экспериментальных данных и идентификации, на этой основе, сложных трёхмерных структур в ламинарных и переходных режимах струйного течения. Важно также отметить, что исследования опираются на использование очень хорошей экспериментальной установки, созданной в НИИ Механики МГУ, которая генерирует струю большого диаметра с необычно длинным для таких струй ламинарным участком. Последнее обстоятельство и позволило автору выполнить детальные исследования линейного развития возмущений.

В главе 3 (объёмом 22 страницы) представлены результаты количественных исследований характеристик и законов развития модовых возмущений струи. Наиболее важным выводом этой части работы является заключение о получении количественного обоснования применимости классической (модовой) теории линейной неустойчивости в струйных течениях.

В главе 4 (объёмом 38 страниц) автором представлены наиболее интересные, на мой взгляд, результаты. С помощью разработанного автором метода возбуждения контролируемых трёхмерных возмущений впервые подробно экспериментально изучено развитие в затопленной струе немодовых (транзиторных) возмущений. Обнаружено, что переход может происходить по необычному (байпасному) сценарию, не связанному с усилением неустойчивости Кельвина-Гельмгольца.

Приведённый выше анализ основных достижений диссертации показывает, что её автором получено большое количество важных результатов, обладающих несомненной *научной новизной*. Ряд из них не имеет аналогов в предыдущих экспериментальных исследованиях.

*Степень достоверности полученных результатов* представляется достаточно высокой ввиду следующих обстоятельств. Методы измерений, использованные в рамках данной диссертации, хорошо освоены в научном коллективе, где соискатель работает. Измерения, выполненные разными методами, дополняют друг друга и, как

правило, хорошо коррелируют. В ряде случаев приведена тщательная оценка погрешности используемых методов и степени воспроизводимости результатов измерений. Во многих принципиально важных случаях проведено количественное сопоставление экспериментальных данных с расчётными результатами, которое показало их хорошее согласование в целом поле параметров задачи. Наконец, важным свидетельством достоверности полученных в диссертации результатов является их очень серьёзная апробация на большом количестве (34-х) национальных и международных семинаров, симпозиумов и конференций.

*Степени обоснованности положений, выносимых на защиту, научных выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, представляются мне весьма высокими ввиду следующих обстоятельств. Прежде всего, необходимо отметить «комфортный» для читателя объём текста диссертации (115 страниц), который обусловлен чётким, сжатым языком изложения, при большом количестве рисунков (150, в общей сложности, включая в счёт рисунки «а, б, в, и т.д.»). Такой стиль хорошо иллюстрирует большую глубину проведённого исследования, выполненного в рамках единого подхода на базе широкого применения современных, углублённых методов измерений. Глубокий, количественный анализ экспериментальных данных с применением различных, дополняющих друг друга, подходов, сочетается с детальным сопоставлением полученных результатов с результатами расчётов в рамках двух теорий устойчивости. Хотя работа является в основном экспериментальной, очень важную роль в ней играют результаты выполненных автором расчётов нарастания модовых и транзиторных возмущений, используемых для сопоставления с экспериментальными данными. Помимо важных результатов такого сопоставления автор также демонстрирует свою осведомлённость в теоретических вопросах и соответствующую, довольно высокую, квалификацию в области линейной теории устойчивости. Использование автором в указанных расчётах локально-параллельных невязких теорий представляется вполне обоснованным ввиду очень медленного изменения свойств изучаемой ламинарной струи вниз по потоку, довольно большого значения числа Рейнольдса и наличия в профилях скорости точек перегиба. Диссертация в целом представляется достаточно цельной, логически завершённой, а её выводы хорошо обоснованными.*

### *Наиболее существенные замечания*

1. Экспериментальные точки, приведённые на Рис. 2.4*в*, довольно сильно отклоняются от расчётных линий на большом расстоянии от среза сопла (при  $x/D = 3$ ). Автор справедливо объясняет это расхождение нелинейностью развития возмущений, но отмечает, что это «не нарушают ламинарность течения» и «поэтому рассчитанные профили считаются приемлемыми». Следует, однако, отметить, что указанное отклонение достигает 10% от максимальной скорости потока и его вряд ли можно называть небольшим. Кривые нарастания возмущений, как первой, так и второй моды, полученные в результате анализа устойчивости течения вблизи сечения  $x/D = 3$ , выполненного на основе профилей скорости без обнаруженных в измерениях искажений, ожидаемо отклоняются от экспериментальных, что подтверждает существенность указанных расхождений.

2. Стр. 47-48. Процедура определения длины волны возмущения из кадров визуализации нуждается в уточнении. Здесь всё очень непросто! Дело в том, что эти кадры показывают нам яркость частиц среды, которая связана с концентрацией визуализирующего вещества (частиц глицерина, в данном случае). Концентрация же частиц определяется пространственно-временным интегралом по предшествующей эволюции потока и его возмущений. Она не является локальной характеристикой течения и зависит от многих факторов. Например, частицы среды, сместившиеся в сторону края струи, начинают двигаться медленнее и, соответственно «горб» волнообразной линии края высокой яркости начинает отставать от впадины этой линии, находящейся ближе к оси струи. В результате, видимое расстояние между горбом и впадиной будет меняться вниз по потоку и не будет точно соответствовать половине локальной длины волны исследуемых возмущений. Иначе говоря, точность данного метода определения длины волны по картинам визуализации нуждается в более подробном анализе.

3. Стр. 60 последний абзац выводов по Главе 3. Написано: «...Ожидается, что рост возмущений согласно теории линейной невязкой устойчивости, как показано в этой главе диссертации для ламинарной струи, также может происходить в других неограниченных потоках, таких как след за телом и неограниченные стенками сдвиговые слои...». Гипотеза, высказанная автором в этом абзаце раздела выводов

имеет право на существование. Однако это всего лишь гипотеза, а не вывод по результатам исследований Главы 3. Кроме того, она должна быть подкреплена ссылками на соответствующие предыдущие исследования следов и слоёв смешения. В отсутствии оных эта гипотеза «повисает в воздухе» не давая ответ на вопрос: «А проводились ли ранее подобные исследования для следов и слоёв смешения и были ли ранее получены для этих течений результаты аналогичные тем, что получены в данной работе для затопленной струи?»

### *Второстепенные замечания*

1. Непонятно почему в формулировке целей и задач диссертации (Введение, стр. 5 и 6) автор не упоминает исследование немодовых возмущений, хотя этой проблеме уделено большое внимание в диссертации?

2. Список литературы приведён в диссертации в алфавитном порядке, что существенно затрудняет чтение, особенно Обзора. Кроме того такой порядок может приводить к огрехам в списке литературы. Например, работы [17] и [43], приведённые в списке, в тексте диссертации не цитируются.

3. На стр. 13 в начале 2-го абзаца написано: «Рост собственных мод течения, то есть волн Толмина-Шлихтинга в пристенных течениях...» Это утверждение не точно. Кроме волн ТШ в пристенных течениях (например в погранслоях) могут существовать и другие типы неустойчивости, такие, например, как неустойчивость поперечного течения.

4. Неточность цитирования на стр. 26, строки  $-10 \div -6$ , цитата работы [107]. Впервые возможность подавления нарастания двумерных волн ТШ полосчатыми структурами была показана в экспериментах Качанова Ю.С., Тарарыкина О.И. (Экспериментальное исследование устойчивости релаксирующего пограничного слоя // Изв. СО АН СССР, Серия техн. наук. 1987. – вып. 5) за 27 лет до публикации работы [107] (см. <https://www.researchgate.net/publication/370779887> ).

5. Неточность в первом предложении раздела «Постановка задачи устойчивости». Написано: «Благодаря достаточно большим числам Рейнольдса, анализ устойчивости проводился в невязком приближении». Однако большое число Рейнольдса ещё не является само по себе достаточным условием преобладания

невязкой неустойчивости. Например, это не так в пограничных слоях. Важнейшим фактором здесь является наличие точек перегиба в профилях скорости, которые играют определяющую роль в доминировании невязкой неустойчивости.

6. Рис 2.9а. Измерения с помощью PIV отчётливо показывают некоторую, довольно заметную степень нарушения осевой симметрии течения для поля модуля поперечной скорости. Это отклонение может приводить к несимметрии возмущений струи. Однако автор, почему-то, не обсуждает этот вопрос при описании рис. 2.9а.

7. В диссертации не указана важная характеристика течения – величина степени турбулентности основного потока, а также не сказано о её изменении (или нет) под воздействием используемых источников контролируемых возмущений.

8. Непонятно почему в разделе «Инкременты нарастания возмущений» для первой моды приведены кривые нарастания только для частоты 5 Гц, в то время, как для второй моды приведены кривые нарастания для шести частот?

9. Стр. 80, строки –3 ÷ –1. Написано: «...при  $\epsilon = 0.1$  количество зон завихренности увеличивается...» Вопрос: «Почему?» Тут, вероятно, какая-то нелинейность, которая может мешать сравнению с линейной теорией.

10. Автор использует понятие средней скорости потока  $U_{ev} = 0.66$  м/с, определение которого в тексте диссертации мне найти не удалось.

Говоря об оформлении диссертации в целом, необходимо отметить, что в ней содержится необычно мало орфографических ошибок и описок. Текст написан, в основном, ясным, чётким языком. Поэтому представляется нецелесообразным перечислять здесь некоторое небольшое число опечаток и стилистически неудачных выражений, имеющих в диссертации.

### *Заключение*

Сделанные выше замечания не снижают, однако, общую весьма высокую оценку диссертации Л.Р. Гареева, представляющей собой законченную научно-квалификационную работу, в которой содержится решение важной научной задачи изучения закономерностей формирования и развития трёхмерных возмущений затопленной струи и их влияния на структуру ламинарного течения и на особенности его перехода к турбулентности. Результаты данного исследования

могут быть весьма полезны при разработке различных инновационных устройств, на стадиях расчёта и управления механизмами ламинарно-турбулентного перехода в струях в целях либо его затягивания, либо ускорения.

Все основные результаты диссертации хорошо опубликованы в отечественных и международных научных изданиях, в том числе 5 статей – в очень солидных журналах (Доклады РАН, ПМТФ, Journal of Fluid Mechanics), индексируемых в базах данных РИНЦ, Web of Science и Scopus. Автореферат составлен в соответствии с установленными требованиями и отражает содержание диссертации.

Суммируя вышесказанное, можно заключить, что по своей актуальности, объёму выполненной автором работы, новизне полученных им результатов, их достоверности, научной и практической ценности, диссертация Л.Р. Гареева «Исследование механизмов нарастания возмущений в струйном течении» отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы (по физико-математическим наукам), а именно следующим ее направлениям: Ламинарные и турбулентные течения, Струйные течения и кавитация, Гидродинамическая устойчивость, Линейные и нелинейные волны в жидкостях и газах, Экспериментальные методы исследования динамических процессов в жидкостях и газах. Содержание диссертации также соответствует критериям, определенным пп. 2.1-2.5 «Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова», а также оформлена согласно требованиям «Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова».

Таким образом, соискатель Гареев Линар Рафаилович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы.

Официальный оппонент:

Доктор физико-математических наук,

профессор по специальности «Механика жидкости, газа и плазмы»,



главный научный сотрудник лаборатории № 8 «Аэрофизических исследований дозвуковых течений»

Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
«Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича»  
Сибирского отделения Российской академии наук (ИТПМ СО РАН)

Качанов Юрий Семенович

26.11.2024

Контактные данные:

тел.: [REDACTED], e-mail: [REDACTED]

Диссертация Ю.С. Качанова защищена по специальности:

01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы»

Адрес места работы:

630090, г. Новосибирск, ул. Институтская, д. 4/1, ФГБУН Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,  
лаборатория № 8.

Тел.: [REDACTED]; e-mail: [REDACTED]

Адрес официальной почты: 630090, Новосибирск,  
ул. Институтская, 4/1, ИТПМ СО РАН

Подпись сотрудника ИТПМ СО РАН

Ю.С. Качанова удостоверяю:

Учёный секретарь ИТПМ СО РАН, к.ф.-м.н.

Ю.В. Кратова

26.11.2024

