



УТВЕРЖДАЮ

Директор ИТ СО РАН

член-корр. РАН Д.М. Маркович

2018 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

**Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе
Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН)**

Диссертация на соискание степени доктора физико-математических наук «Устойчивость и когерентные структуры в струйных и отрывных течениях жидкости» выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН).

В период подготовки диссертации с 2012 по 2018 гг. соискатель Мулляджанов Рустам Илхамович работал в Лаборатории физических основ энергетических технологий в должности старшего научного сотрудника. В 2010 году соискатель окончила магистратуру Новосибирского государственного университета Физического факультета по направлению «физика». В период с 2010 по 2012 год проходил обучение в очной аспирантуре ИТ СО РАН, где на втором курсе защитил диссертацию на соискание степени кандидата физико-математических наук.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

Актуальность работы

При увеличении скорости потока жидкости или газа ламинарный режим течения рано или поздно сменяется турбулентным. В этом случае вихревые образования различных масштабов оказывают влияние практически на все свойства среды. Известно, что способность турбулентности к передаче импульса, переносу пассивных примесей и частиц, взвешенных в потоке, к катализации химических реакций, а также рассеиванию звуковых и электромагнитных волн оказывается выше, чем у ламинарных. Эти свойства играют ключевую роль в понимании механизмов многих физических явлений, которое необходимо для успешного развития технологий и многих отраслей промышленности.

Теория гидродинамической устойчивости исследует условия, при которых один режим течения сменяется другим. Первые теоретические результаты были получены Гельмгольцем, Кельвином и Рэлеем. Зачастую турбулизация происходит посредством потери устойчивости крупномасштабных пока еще ламинарных образований, как в случае течения Тейлора–Куэтта или Рэлея–Бенара. Аналогичные структуры остаются легко различимыми и в случае полностью развитых турбулентных потоков. Эти крупномасштабные вихри могут содержать в себе существенную долю турбулентной кинетической энергии в диапазоне от 10 до 50% для типичных конфигураций течения и рассматриваются как некоторый “скелет” динамики потока, демонстрируя высокий уровень организации.

Механизм каскадного переноса энергии при достаточно больших скоростях потока и соответствующие автомодельные соотношения, описанные Колмогоровым, дают возможность количественно вычислять характеристики мелкомасштабной турбулентности. В свою очередь, характеристики основных крупномасштабных вихрей (когерентных структур), определяющих общие свойства потока, сильно зависят от конкретной геометрии течения и граничных условий в целом. С одной стороны, это дает возможность управлять свойствами потока и протекающими процессами переноса, варьируя входные условия и внося подходящие низкоамплитудные возмущения. С другой стороны, едва ли будет возможным разработать некоторую единую теорию, содержащую основные количественные параметры этих объектов. Полезен был бы общий принцип для расчета или определения тех или иных параметров крупномасштабных вихрей.

Цель работы

Теоретическое и численное исследование структуры струйных и отрывных течений жидкости и газа, изучение гидродинамической устойчивости и определение характеристик основных наиболее энергонесущих когерентных структур, а также выявление важнейших факторов, влияющих на характеристики течения и процессы тепломассопереноса. В соответствии с описанной целью, были поставлены следующие **задачи**:

- развитие теории затопленных ламинарных неосесимметричных закрученных струйных течений, вызванных точечным источником массы, импульса и момента импульса;
- теоретическое исследование устойчивости классической затопленной струи Ландау к бесконечно малым возмущениям;
- численное исследование динамики и свойств когерентных структур в турбулентном струйном течении, а также анализ влияния граничных условий, включая закрутку потока и резкое изменение расхода жидкости или газа, на характеристики ближнего поля струи;
- численное исследование взаимодействия когерентных и стохастических пульсаций в отрывном потоке за круглым цилиндром;
- численный анализ роли вторичных течений и когерентных структур в струйных и отрывных потоках в целевой геометрии.

Научная новизна данной работы подтверждается следующими результатами:

- представлено аналитическое решение линеаризованных уравнений для дальнего поля струи, соответствующее возмущению точного решения Ландау, которое определяется поперечными компонентами вектора момента импульса и соответствует неосесимметричной струе;
- решена линейная задача устойчивости для затопленной ламинарной струи, соответствующей точному решению Ландау, которая позволила предложить критерий оценки местоположения ламинарно-турбулентного перехода и впервые получить хорошее количественное соответствие между линейной теорией и экспериментальными данными;
- на основе собственного ортогонального разложения и численного моделирования систематически показано, что спиральные бегущие волны являются наиболее энергонесущими вихревыми структурами в дальнем поле затопленной

турбулентной струи, характеристики которых могут быть предсказаны в рамках задачи линейной теории устойчивости, сформулированной для турбулентного течения;

- посредством численного моделирования исследованы механизмы интенсификации процессов перемешивания, вовлечения сторонней жидкости в ядро потока слабозакрученной струи, которое совершает небольшие колебания относительно оси симметрии, что приводит к наблюдаемому явлению противовращающегося вихревого ядра;
- на основе численного моделирования в соосной кольцевой закрученной струе исследованы переходные процессы при резком изменении расхода жидкости, что позволило выявить, что наблюдаемый гистерезис режимов в случае реагирующего потока может быть связан с формированием вторичной зоны рециркуляции около кромки сопла;
- при помощи численного моделирования рассчитаны смешанные корреляции когерентных и стохастических компонент поля скорости в отрывном течении при наличии крупномасштабных пульсаций в зоне рециркуляции, при этом впервые показано, что их значение не растет с увеличением числа Рейнольдса;
- на основе численного моделирования обнаружено, что в щелевых струйных и отрывных течениях помимо крупномасштабного квазидвумерного течения присутствуют продольные вихри и впервые показано, что эти структуры ответственны за интенсивный тепломассоперенос поперек узкой щели.

Теоретическая и практическая значимость данной работы заключаются в том, что полученные результаты способствуют более глубокому пониманию вопросов, связанных с гидродинамической устойчивостью струйных течений, а также с влиянием когерентных вихревых структур в струях и следах на нестационарную динамику и интенсивность турбулентного тепломассопереноса. Опираясь на полученное количественное согласие положения ламинарно-турбулентного перехода в затопленной струе, можно оптимизировать процессы смешения в ряде практических приложений. Выявленные наиболее энергонесущие когерентные структуры могут быть использованы для построения низкоразмерных моделей струйного течения. Новые результаты о взаимодействии когерентной и стохастической компоненты пульсаций скорости разрешают некоторые вопросы, связанные с подходом осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса, которые являются основным инструментом для расчетов турбулентных течений в практических приложениях. Полученные данные об интенсивности процессов смешения и вовлечения сторонней жидкости в ядро потока в зависимости от параметра закрутки, а также о влиянии обнаруженных продольных вихревых структур на тепломассоперенос поперек канала в струйных и отрывных щелевых течениях могут быть полезными при проектировании соответствующего энергетического оборудования.

Достоверность полученных результатов обусловлена использованием проверенных методик численного и аналитического решения, совпадением полученных решений как качественно, так и во многих случаях количественно с достоверными экспериментальными или расчетными данными, согласием полученных результатов в предельных случаях с известными и апробированными результатами других авторов.

Положения, выносимые на защиту:

- результаты теоретического анализа течения в дальнем поле затопленной ламинарной струи, вызванной локализованным источником массы, импульса и момента импульса;
- результаты теоретического анализа устойчивости течения в дальнем поле затопленной ламинарной струи, соответствующего точному решению уравнений Навье–Стокса;
- результаты численного исследования структуры и динамики течения незакрученных и слабозакрученных турбулентных струй, влияния степени закрутки потока на процессы перемешивания, а также резкого изменения входных условий на формирование когерентных структур;
- результаты численного исследования динамики течения при обтекании круглого цилиндра однородным потоком в докритическом режиме и взаимодействия когерентных флуктуаций со стохастическими;
- результаты численного исследования щелевых струйных и отрывных потоков, формирования обнаруженных продольных вихревых структур в ограниченной геометрии течения и их связи с интенсивностью тепломассопереноса поперек щели.

Личный вклад автора

Научные результаты и выводы, послужившие основой диссертации и выносимые на защиту, получены соискателем самостоятельно. Постановка решаемых задач проводилась диссертантом как лично, так и совместно с проф. Н.И. Яворским и проф. К. Ханъяlichem. Автор проводил лично или непосредственно участвовал в теоретическом анализе, отладке вычислительных кодов, проведении численных расчетов, обработке и анализе полученных данных, а также подготовке результатов исследований к публикации.

Публикации по материалам диссертации

1. Mulliyadzhanov R.I., Sandberg R.D., Abdurakipov S.S., George W.K., Hanjalic K. Propagating helical waves as a building block of round turbulent jets // *Physical Review Fluids*. – 2018. – Vol. 3. – P. 062601(R). (из перечня ВАК)
2. Мулладжанов Р.И. Уравнения для описания семейства автомодельных решений дальнего поля круглой затопленной турбулентной струи // *Теплофизика и Аэромеханика*. – 2018. – Т. 25, No 4. – С. 647–650. (из перечня ВАК)
3. Мулладжанов Р.И., Яворский Н.И. Линейная гидродинамическая устойчивость дальнего поля затопленной ламинарной струи // *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки*. – 2018. – Т. 11, No 3. – С. 32–40. (из перечня ВАК)
4. Иващенко В.А., Мулладжанов Р.И. Численное моделирование затопленной струи переменной плотности // *Сибирский физический журнал*. – 2018. – Т. 13, No 1. – С. 45–53. (из перечня ВАК)
5. Mulliyadzhanov R., Abdurakipov S., Hanjalic K. Helical structures in the near field of a turbulent pipe jet // *Flow, Turbulence and Combustion*. – 2017. – Vol. 98, No. 2. – P. 367–388. (из перечня ВАК)

6. Mullyadzhanov R., Abdurakipov S., Hanjalic K. On coherent structures and mixing characteristics in the near field of a rotating-pipe jet // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. – 2017. – Vol. 63. – P. 139–148. (из перечня ВАК)
7. Палкин Е.В., Мулладжанов Р.И. Низкочастотные пульсации в задаче обтекания цилиндра потоком жидкости в узком зазоре при $Re = 3750$ // *Сибирский физический журнал*. – 2017. – Т. 12, No. 1. – С. 43–49. (из перечня ВАК)
8. Мулладжанов Р.И., Сандберг Р.Д., Абдуракипов С.С., Джордж В.К., Ханьялич К. О спиральных структурах в круглой турбулентной струе // *Сибирский физический журнал*. – 2017. – Т. 12, No 4. – С. 40–51. (из перечня ВАК)
9. Palkin E., Mullyadzhanov R., Hadziabdic M., Hanjalic K. Scrutinizing URANS in shedding flows: The case of cylinder in cross-flow in the subcritical regime // *Flow, Turbulence and Combustion*. – 2016. – Vol. 97, No. 4. – P. 1017–1046. (из перечня ВАК)
10. Shestakov M.V., Mullyadzhanov R.I., Tokarev M.P., Markovich D.M. Modulation of large-scale meandering and three-dimensional flows in turbulent slot jets // *Journal of Engineering Thermophysics*. – 2016. – Vol. 25, No. 2. – P. 159–165. (из перечня ВАК)
11. Mullyadzhanov R., Palkin E., Niceno B., Vervisch L., Hanjalic K. Verification of a low Mach variable-density Navier–Stokes solver for turbulent combustion // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2016. – Vol. 754, No 6. – P. 062005. (из перечня ВАК)
12. Mullyadzhanov R., Hadziabdic M., Hanjalic K. LES investigation of the hysteresis regime in the cold model of a rotating-pipe swirl burner // *Flow, Turbulence and Combustion*. – 2015. – Vol. 94, No. 1. – P. 175–198. (из перечня ВАК)
13. Hanjalic K., Mullyadzhanov R. On spatial segregation of vortices and pressure eddies in a confined slot jet // *Physics of Fluids*. – 2015. – Vol. 27, No. 3. – P. 031703. (из перечня ВАК)
14. Mullyadzhanov R., Ilyushin B., Hanjalic K. On dynamics and secondary currents in meandering confined turbulent shallow jet // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. – 2015. – Vol. 56. – P. 284–289. (из перечня ВАК)
15. Мулладжанов Р.И., Яворский Н.И. Решение задачи об истечении неосесимметричной закрученной затопленной струи // *Прикладная механика и техническая физика*. – 2013. – Т. 54, No 2. – С. 46–51. (из перечня ВАК)
16. Hadziabdic M., Hanjalic K., Mullyadzhanov R. LES of turbulent flow in a concentric annulus with rotating outer wall // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. – 2013. – Vol. 43. – P. 74–84. (из перечня ВАК)
17. Современные проблемы моделирования энергетических процессов. Под ред. проф. Ханьялича К., чл.-корр. РАН Марковича Д. М., к.ф.-м.н. Сиковского Д.Ф. Новосибирск, Изд-во НГУ, 2016. 452 с.
Мулладжанов Р.И., Абдуракипов С.С., Ханьялич К. Когерентные структуры в круглой турбулентной струе, С. 263–296.
18. Mullyadzhanov R., Abdurakipov S., Hanjalic K. Turbulent kinetic energy evolution in the near-field of a rotating pipe round jet // In *Direct and Large-Eddy Simulation X*, Springer. ERCOFTAC Series. – 2018. – Vol. 24. – P. 553–558. (Scopus)
19. Mullyadzhanov R., Ilyushin B., Hadziabdic M., Hanjalic K. Large-eddy simulation of a shallow turbulent jet // In *Direct and Large-Eddy Simulation IX*, Springer. ERCOFTAC Series. – 2015. – Vol. 20. – P. 233–239. (Scopus)
20. Palkin E., Shestakov M., Mullyadzhanov R., Markovich D., Hanjalic K. Flow around a confined cylinder: LES and PIV study // *MATEC Web of Conferences*. – 2017. – Vol. 115. – P. 02010. (Scopus)

21. Мулладжанов Р.И., Сандберг Р.Д., Абдуракипов С.С., Джордж В.К., Ханъялич К. Бегущие спиральные волны в турбулентной струе // Сб. трудов XVIII научной школы “Нелинейные волны - 2018”, Нижний Новгород, Россия, 26 февраля-4 марта, 2018, С. 217–218.
22. Mullyadzhanov R., Sandberg R., Abdurakipov S., George W., Hanjalic K. Identification of coherent wavy motion in round turbulent jets // Proc. of 70th Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics, Denver, USA, November 19-21, 2017, 1 p.
23. Палкин Е.В., Шестаков М.В., Мулладжанов Р.И., Маркович Д.М., Ханъялич К. Обтекание цилиндра в узком зазоре: LES и PIV // Сб. трудов Всероссийской конференции “XXXIII Сибирский теплофизический семинар”, Новосибирск, Россия, 6-8 июня, 2017, С. 75.
24. Mullyadzhanov R., Sandberg R., Abdurakipov S., Hanjalic K. Helical wave as a building block of a round turbulent jet // Book of Abstracts of 11th European Fluid Mechanics Conference, Sevilla, Spain, September 12-16, 2016, 1 p.
25. Палкин Е.В., Мулладжанов Р.И. Вихревые структуры при обтекании цилиндра в неглубоком канале при $Re = 3750$ // Сб. трудов XIV Всероссийской школы-конференции “Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики”, Новосибирск, Россия, 22-25 ноября, 2016, С. 40.
26. Mullyadzhanov R., Sandberg R., Abdurakipov S., Hanjalic K. Helical wave as a building block of a round turbulent jet // Proc. of 581 EUROMECH Colloquium “Dynamics of concentrated vortices”, Novosibirsk, Russia, May 30-June 1, 2016, 1 p.
27. Палкин Е.В., Мулладжанов Р.И., Ничено Б., Вервиш Л., Ханъялич К. Численное решение уравнений Навье – Стокса с переменной плотностью в приближении малых чисел Маха // Сб. трудов Всероссийской конференции “Теплофизика и физическая гидродинамика”, Ялта, Крым, 19-25 сентября, 2016, 1 с.
28. Мулладжанов Р.И., Абдуракипов С.С., Ханъялич К. Когерентные структуры в ближней области круглой канонической струи // Сб. трудов XI Всероссийского съезда по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики, Казань, Россия, 20-24 августа, 2015, С. 2661–2664.
29. Palkin E, Mullyadzhanov R, Hadziabdic M, Hanjalic K. Scrutinizing URANS models in shedding flows: The case of the cylinder in cross flow // Proc. of 8th International Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer, Sarajevo, Bosnia & Herzegovina, September 15-18, 2015, 14 p.
30. Mullyadzhanov R., Abdurakipov S., Hanjalic K. On coherent structures in the near field of a pipe jet // Proc. of 8th International Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer, Sarajevo, Bosnia & Herzegovina, September 15-18, 2015, 10 p.
31. Mullyadzhanov R., Abdurakipov S., Hanjalic K. Large-eddy simulations of the round jet with a fully developed inflow conditions at $Re=5300$: Coherent structures evolution // Proc. of 13th Asian Symposium on Visualization, Novosibirsk, Russia, June 22-26, 2015, 6 p.
32. Мулладжанов Р.И., Сандберг Р.Д., Абдуракипов С.С., Ханъялич К. Турбулентные затопленные осесимметричные струи: новые результаты // Сб. трудов Всероссийской конференции “XXXII Сибирский теплофизический семинар”, Новосибирск, Россия, 19-20 ноября, 2015, 1 с.
33. Mullyadzhanov R., Abdurakipov S., Hanjalic K. Turbulent kinetic energy evolution in the near field of a rotating-pipe round jet // Proc. of X Direct and Large-Eddy Simulation ERCOFTAC Workshop, Limassol, Cyprus, May 27-29, 2015, 2 p.

34. Palkin E., Mullyadzhhanov R., Hanjalic K. URANS and LES of a flow over a cylinder at $Re = 3900$ // Proc. of 17th International Conference on the Methods of Aerophysical Research, Novosibirsk, Russia, June 30-July 6, 2014, 9 p.
35. Мулладжанов Р.И. Динамика и трехмерные вторичные течения в турбулентной щелевой струе // Сб. трудов XIII Всероссийской школы-конференции “Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики”, Новосибирск, Россия, 20-23 ноября, 2014, С. 123–124.
36. Mullyadzhhanov R, Ilyushin B, Hadziabdic M, Hanjalic K. Numerical study of a quasi-two-dimensional confined turbulent jet // Book of Abstracts of 14th European Turbulence Conference, Lyon, France, September 1-4, 2013, 2 p.
37. Hadziabdic M., Mullyadzhhanov R., Hanjalic K. LES investigation of the hysteresis regime in the cold model of a swirl burner // Proc. of 8th International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena, Poitiers, France, August 28-30, 2013, 4 p.
38. Mullyadzhhanov R., Ilyushin B., Hadziabdic M., Hanjalic K. Numerical simulation of a quasi-two-dimensional jet // Proc. of IX Direct and Large Eddy Simulation ERCOFTAC Workshop, Dresden, Germany, April 3-5, 2013, 2 p.
39. Мулладжанов Р.И., Яворский Н.И. О задаче устойчивости для затопленной струи // Сб. трудов 4-ой Всероссийской конференции “Задачи со свободными границами: теория, эксперимент и приложения”, Бийск, Россия, 5-10 июля, 2011, С. 69–70.

Апробация работы

Результаты диссертационной работы обсуждались на международных симпозиумах: на ежегодном съезде Американского физического сообщества APS Division of Fluid Dynamics (Денвер, США, 2017), “Turbulence and Shear Flow Phenomena” (Пуатье, Франция, 2013), “Direct and Large-Eddy Simulation” (Дрезден, Германия, 2013; Кипр, Греция, 2015), “Turbulence, Heat and Mass Transfer” (Сараево, Босния и Герцеговина, 2015), “European Fluid Mechanics Conference” (Севилья, Испания, 2016); на Международной конференции по методам аэрофизических исследований (Новосибирск, 2014; Пермь, 2016); на международном коллоквиуме сообщества EUROMECH “Dynamics of Concentrated Vortices” (Новосибирск, 2016); научной школе “Нелинейные волны - 2018” (Нижний Новгород, 2018); всероссийской конференции “Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики” (Новосибирск, 2014; 2016); Сибирском теплофизическом семинаре (Новосибирск, 2015; 2017); Азиатском симпозиуме по визуализации (Новосибирск, 2015). Результаты диссертации обсуждались на семинарах Института теплофизики СО РАН (рук. акад. Алексеенко С.В., чл.-корр. Маркович Д.М.), Института гидродинамики СО РАН (рук. чл.-корр. Пухначев В.В.), Вычислительного центра СО РАН (рук. проф. Глинский Б.М.), Института теоретической и прикладной механики СО РАН (рук. проф. Козлов В.В.), Центрального аэрогидродинамического института (рук. проф. Копьев В.Ф.), Института Пола Шеррера в г. Виллиген, Швейцария (рук. проф. Ничено Б.), а также на видеосеминаре ЦАГИ–ИТПМ СО РАН–СПбПУ–НИИМ МГУ–ОИВТ РАН. Результаты, послужившие основой для данной диссертации, вошли в перечень важнейших результатов фундаментальных исследований Института теплофизики СО РАН в 2014–2016 годах.

Решение о рекомендации работы к защите

Диссертация «Устойчивость и когерентные структуры в струйных и отрывных течениях жидкости» Мулладжанова Рустама Илхамовича рекомендуется к защите на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы.

Заключение принято на заседании семинара Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук под руководством академика РАН С.В. Алексеенко.

Присутствовало на заседании 38 чел., в том числе 1 член-корреспондент, 10 докторов и 15 кандидатов наук. Результаты голосования: «за» – 38 чел., «против» – 0 чел., «воздержалось» – 0 чел., протокол №50/2-2018 от «6» февраля 2018 г.



Председатель семинара

Алексеенко С. В., д.ф.-м.н., акад. РАН



Секретарь семинара

Горелик Р. С., к.т.н., с.н.с.