

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 003.053.01, СОЗДАННОГО  
НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО  
УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ИНСТИТУТА ТЕПЛОФИЗИКИ ИМ. С.С. КУТАТЕЛАДЗЕ  
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК, ПО  
ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА НАУК**

аттестационное дело № \_\_\_\_\_  
решение диссертационного совета от 17.10.2018 г. № 7/2018

О присуждении Мулляджанову Рустаму Илхамовичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени доктора физико-математических наук.

Диссертация «Устойчивость и когерентные структуры в струйных и отрывных течениях жидкости» по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы принята к защите 27.06.2018 г. (протокол заседания №5/2018) диссертационным советом Д 003.053.01, созданным на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН), 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 1, приказ о создании диссертационного совета №105/НК от 11.04.2012 г.

Соискатель Мулляджанов Рустам Илхамович, 1987 года рождения, работает в должности старшего научного сотрудника в ИТ СО РАН.

Диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы «Затопленные струйные МГД течения» защитил в 2012 году в диссертационном совете Д 003.053.01, созданном на базе ИТ СО РАН.

Диссертация «Устойчивость и когерентные структуры в струйных и отрывных течениях жидкости» выполнена в Лаборатории физических основ энергетических технологий ИТ СО РАН.

Официальные оппоненты: Бойко Андрей Владиславович, д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН, профессор, ФГБУН Институт теоретической и прикладной механики СО РАН, главный научный сотрудник Лаборатории аэрофизических исследований дозвуковых течений; Пухначев Владислав Васильевич, д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН, профессор, ФГБУН Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, главный научный сотрудник Лаборатории прикладной и вычислительной гидродинамики; Смирнов Евгений Михайлович, д.ф.-м.н., профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, заведующий Кафедрой гидроаэродинамики, горения и теплообмена, дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Центральный аэрогидродинамический институт (ЦАГИ) имени профессора Н.Е. Жуковского, г. Жуковский, в своем положительном отзыве, подписанном д.ф.-м.н. Копьевым Виктором Феликсовичем, начальником НИО-9 ЦАГИ, профессором, указала, что: «Теоретическая и практическая значимость работы заключается 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. Полученные результаты можно использовать для



оптимизации процессов смешения в ряде практических приложений, построения низкоразмерных моделей струйного течения и могут быть полезными при проектировании соответствующего энергетического оборудования. Материалы диссертации рекомендуется использовать специалистам ЦИАМ, ЦАГИ и других организаций, занимающихся исследованием струйных и отрывных течений. Полученные результаты представляют интерес для теоретических и экспериментальных групп ИТПМ СО РАН, МФТИ, НИИ Механики МГУ и других исследовательских институтов и университетов».

Соискатель имеет 54 опубликованные работы, в том числе по теме диссертации опубликовано 39 работ, из них в рецензируемых научных изданиях опубликовано 16 работ (содержат в сумме 217 страниц). Недостоверные сведения об опубликованных работах отсутствуют. Вклад автора состоит в постановке задач, теоретическом анализе, отладке вычислительных кодов, проведении численных расчетов, обработке и анализе полученных данных, а также подготовке результатов исследований к публикации. Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. Mullyadzhhanov 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).
2. Mullyadzhhanov 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.
3. Palkin E., Mullyadzhhanov 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.
4. Mullyadzhhanov 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.
5. Mullyadzhhanov 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.
6. Мулладжанов Р.И., Яворский Н.И. Решение задачи об истечении неосесимметричной закрученной затопленной струи // *Прикладная механика и техническая физика*. – 2013. – Т. 54, № 2. – С. 46–51.

На автореферат диссертации поступило 6 отзывов. Все отзывы положительные и содержат замечания. В отзывах отмечено, что диссертация выполнена на высоком научном уровне, тема исследования является актуальной, результаты работы имеют теоретическую и практическую значимость и вносят вклад в развитие теории затопленных струй и следов.

В отзыве д.ф.-м.н. Ерманюка Евгения Валерьевича, заместителя директора ИГиЛ СО РАН, содержится два замечания: «1. Очевидно, что результат применения POD зависит от репрезентативности выборки данных по времени (и пространственного разрешения). В работе (п. 3.3) этот вопрос не освещен. 2. Не показан вклад подсеточного моделирования в корреляции, вычисленные в п. 4.2».

В отзыве д.ф.-м.н. Качанова Юрия Семеновича, профессора, главного научного сотрудника Лаб. 8 ИТПМ СО РАН, имеется два замечания: «1. Не вполне ясны преимущества, даваемые подходом, рассмотренным в пункте 2.2, по сравнению с



традиционным подходом в рамках плоскопараллельной теории устойчивости затопленной струи. 2. В пункте 3.4 не вполне ясно обоснование прямого переноса результатов численного моделирования, рассматривающего не реагирующие течения, на случай пламен, исследованных в эксперименте».

В отзыве д.ф.-м.н. Веденеева Василия Владимировича, доцента, заведующего Лабораторией экспериментальной гидродинамики НИИ Механики МГУ, содержится три замечания: «1. В выражении (8)  $u_L$  обозначает решение, «полученное Слезкиным, Ландау и Сквайром». Однако, это разные решения: решение Ландау – точное решение уравнений Навье-Стокса, решение Сквайра – точное решение уравнений Прандтля. Непонятно, какое именно решение здесь берется. 2. Из описания результатов главы 2, в части определения критических  $Re$  для разных мод, непонятно, в чем отличие постановки задачи от статьи Штерна и Хуссейна (2003), получивших приблизительно такие же критические числа Рейнольдса. 3. В диссертации анализируются результаты DNS и LES расчетов. Из автореферата не понятно, расчеты непосредственно проведены автором (в таком случае – с использованием вновь созданного, или уже имеющегося ПО), или используются базы данных результатов, полученные другими авторами».

В отзыве д.т.н. Емельянова Владислава Николаевича, профессора, заведующего кафедрой «Плазмогазодинамика и теплотехника» ФГБОУ ВО «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова», имеется четыре замечания: «1. В тексте автореферата имеются опiski. В тензоре полного потока импульса (соотношение (7), стр. 11) должна присутствовать молекулярная вязкость, а не кинематическая вязкость. В формуле (8) на мой взгляд символ малости в последнем члене должен быть  $O$ -большое, а не  $o$ -маленькое. Непонятно, почему в (12) и (13) используются десятичные логарифмы в степенях числа  $e$ . 2. Течение в струе (глава 3) и обтекание цилиндра (глава 4) рассматриваются при невысоких числах Рейнольдса ( $5 \times 10^3$  и до  $1.4 \times 10^5$ , соответственно). Известны многочисленные зарубежные и отечественные публикации, в которых охватывается более широкий диапазон чисел Рейнольдса, а расчет параметров потока производится при помощи различных подходов (стоит отметить, что отечественные работы нашли слабое освещение в диссертации). В этой связи хотелось бы услышать мнение автора по поводу того, как он видит место своей работы в кругу других многочисленных публикаций на данную тему. 3. Немаловажным представляется также вопрос о практических приложениях, в которых наблюдаются существенно более высокие числа Рейнольдса, чем рассмотренные в данной работе. 4. В обширном списке литературы, состоящем из 422 наименований, нашлось место всего 3-5 статьям, опубликованным в отечественной литературе. Стоит отметить, что вопросы, рассмотрению которых посвящена настоящая работа, в частности, вопросы, связанные с моделированием струйных течений и обтекания цилиндра при помощи вихреразрезающих подходов, нашли широкое освещение в русскоязычной литературе, в том числе в тех организациях, с которыми сотрудничал автор. Список литературы содержит сравнительно небольшое (по сравнению с общим числом упомянутых наименований) число ссылок на статьи, опубликованные за последние 5 лет (исключая работы автора)».

В отзыве д.ф.-м.н. Просвирякова Евгения Юрьевича, заведующего сектором нелинейной вихревой динамики ФГБУН Института машиноведения УрО РАН,



имеется одно замечание: «Почему для несжимаемой жидкости используются методы расчета, характерные для сжимаемых сред?».

В отзыве д.ф.-м.н. Черных Геннадия Георгиевича, профессора, главного научного сотрудника Лаборатории математического моделирования ИВТ СО РАН, содержится три замечания: «1. В работе исследуется широкий класс свободных турбулентных течений. Турбулентные течения могут быть охарактеризованы значениями турбулентного числа Рейнольдса по тейлоровскому микромасштабу, отвечающего за свойство развитости (по Колмогорову) течения. К сожалению, в автореферате отсутствуют оценки этого важного параметра. Подобные оценки позволили бы более детально оттенить вопрос о классе изучаемых течений. Какие течения изучаются? Развитые, или течения в переходных режимах? 2. В автореферате серьезной критике подвергается полуэмпирические модели турбулентности, позволяющие рассчитывать не только осредненные гидродинамические поля, но и корреляционные функции второго и более высокого порядков. Безусловно, универсальных полуэмпирических моделей нет. Применяемые и развиваемые диссертантом математические модели турбулентности, основанные на прямом численном моделировании и моделировании крупных вихрей, являются более общими. Они позволяют получить более полную информацию о течениях. Автором, к сожалению, не приведены результаты подробного сопоставления с известными результатами лабораторных измерений, в частности, в задаче о динамике затопленной круглой струи по таким характеристикам, как компоненты тензора рейнольдсовых напряжений. Такие расчеты могли бы убедительно продемонстрировать универсальность применяемых и развиваемых диссертантом подходов. 3. На стр. 16 автореферата для изучения турбулентных круглых струй вводится новая адаптивная система координат, позволяющая рассматривать вопрос о численном моделировании течения не в конической, а в цилиндрической области. К сожалению, структура появившихся в уравнениях (23)-(26) источниковых слагаемых из автореферата не совсем ясна. Какого порядка производные по пространственной и временной переменных в ней присутствуют? Не слишком ли высокую цену придется заплатить из-за стремления к проведению вычислений в более простой области?».

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается тем, что официальные оппоненты являются признанными специалистами в областях, непосредственно связанных с темой диссертации: чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н. Бойко А.В. является специалистом в области механики жидкости и газа, гидродинамической неустойчивости сдвиговых течений и разработки методов управления обтеканием тел, чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н. Пухначев В.В. является специалистом в области механики сплошной среды, точных решениях и асимптотических методах, д.ф.-м.н. Смирнов Е.М. является специалистом в области численного моделирования турбулентных потоков. Ведущая организация является признанным лидером в области теоретических и экспериментальных исследований аэрогидродинамики, гидродинамической устойчивости. Ее сотрудник д.ф.-м.н. Копьев В.Ф. может дать полноценную экспертную оценку достоверности, научной и практической значимости результатов работы.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований разработана научная концепция теоретического и численного анализа струйных и отрывных течений, вопросов их гидродинамической



устойчивости, а также роли наиболее энергонесущих когерентных структур в потоке. Представлено аналитическое решение линеаризованных уравнений для дальнего поля неосесимметричной закрученной струи. Предложен новый подход для анализа линейной гидродинамической устойчивости затопленной ламинарной струи, который впервые позволил получить хорошее количественное соответствие между теорией и экспериментальными данными для положения ламинарно-турбулентного перехода. Предложена и доказана оригинальная научная гипотеза о том, что спиральные бегущие волны являются наиболее энергонесущими вихревыми структурами в дальнем поле затопленной турбулентной струи. Доказано, что смешанные корреляции когерентных и стохастических компонент поля скорости в отрывном течении не возрастают с увеличением числа Рейнольдса. Установлены неизвестные ранее закономерности, определяющие присутствие продольных вихревых структур и их связь с интенсивным тепломассопереносом поперек узкого канала в щелевых струях и следах.

Теоретическая значимость исследования заключается в том, что доказаны положения об определяющем влиянии когерентных вихревых структур на интенсивность процессов тепломассопереноса в струйных и отрывных течениях разной геометрии. Для решения задач, рассматриваемых в диссертации, эффективно использованы асимптотические методы, методы линейного анализа устойчивости, а также методы численного моделирования уравнений Навье-Стокса на базе различных современных вихреразрешающих подходов. Выведено новое аналитическое решение линеаризованных уравнений для дальнего поля неосесимметричной закрученной ламинарной струи. На основе численно обнаруженных закономерностей разработаны новые модели низкоразмерного представления динамики струйных течений, а также дано доказательство незначительности величины смешанных корреляций когерентных и стохастических компонент поля скорости в отрывных потоках при увеличении числа Рейнольдса.

Значение полученных соискателем результатов для практики подтверждается тем, что информация о ламинарно-турбулентном переходе и характеристиках наиболее энергонесущих вихревых структур в струйных и отрывных течениях, как и полученные низкоразмерные модели соответствующих течений, могут быть полезными при проектировании соответствующего энергетического оборудования. Новые результаты о взаимодействии когерентной и стохастической компоненты пульсаций скорости разрешают вопросы, связанные с подходом осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (URANS), которые являются основным инструментом для расчетов турбулентных течений в практических приложениях. Результаты диссертации могут быть использованы в ЦИАМ, ЦАГИ, ОИВТ РАН, ИТ СО РАН, ИТПМ СО РАН, ИГиЛ СО РАН, МФТИ, МГТУ им. Баумана, НИИ Механики МГУ.

Оценка достоверности результатов исследования выявила, что физический анализ проведен с использованием проверенных методов аналитического решения. Новые аналитические решения основываются на строгих математических выкладках. Для численного исследования использованы хорошо известные и апробированные методы, в том числе метод прямого численного моделирования уравнений Навье-Стокса и метод крупных вихрей. Установлено количественно совпадение полученных результатов с достоверными экспериментальными или расчетными данными.



Личный вклад автора состоит в самостоятельном получении основных научных результатов, послуживших основой диссертации и выносимых на защиту. 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.

Диссертационным советом сделан вывод о том, что диссертация Мулляджанова Рустама Илхамовича представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой на основании выполненных автором исследований струйных и отрывных потоков жидкости разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение в теории струй, следов и отрывных течений, и соответствует критериям п.9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ №842 от 29.04.2013 г.

На заседании 17.10.2018 г. диссертационный совет принял решение присудить Мулляджанову Р.И. ученую степень доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы. При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 19 человек, из них 9 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 26 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за 17 против 2 недействительных бюллетеней 0.

Заместитель председателя  
диссертационного совета  
д.ф.-м.н., академик РАН



Алексеев Сергей Владимирович

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
д.ф.-м.н., профессор



Кузнецов Владимир Васильевич

«19» октября 2018 г.

