

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 002.110.03,  
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ  
НАУК, ПО ДИССЕРТАЦИИ  
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от 15.05.2019 протокол № 9

О присуждении Куликову Юрию Матвеевичу, гражданину Российской Федерации ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Устойчивость и турбулентность течений термовязкой жидкости» в виде рукописи по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы, принята к защите 04.03.2019 г., протокол № 4, диссертационным советом Д 002.110.03 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук (ул. Ижорская, д. 13, стр. 2, г. Москва, 125412, <https://jiht.ru>, +7 (495) 485-8345), утвержденным Приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 11.04.2012 г. № 105/нк.

Соискатель Куликов Юрий Матвеевич, 1990 года рождения, в 2013 году окончил Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет).

В 2017 году окончил очную аспирантуру Московского физико-технического института (национального исследовательского университета).

Диссертация выполнена на кафедре физической механики Физтех-школы аэрокосмических технологий Федерального государственного

автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)».

Работает научным сотрудником Лаборатории № 18 – Плазменных технологий Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук.

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, профессор, академик Российской академии наук Сон Эдуард Евгеньевич, заведующий кафедрой физической механики Физтех-школы аэрокосмических технологий Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)».

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор, Головизнин Василий Михайлович, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», профессор кафедры вычислительных методов Факультета вычислительной математики и кибернетики, заведующий лабораторией индустриальной математики;

доктор физико-математических наук, профессор, Урманчеев Саид Федорович, Институт механики имени Р.Р. Мавлютова – обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук, главный научный сотрудник лаборатории «Механика многофазных систем» дали положительные отзывы на диссертацию.

**Ведущая организация:** Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (г. Санкт-Петербург) в своем

положительном заключении, составленном заведующим кафедрой «Гидроаэродинамика, горение и теплообмен» СПбПУ, доктором физико-математических наук, профессором Смирновым Евгением Михайловичем и доцентом кафедры «Гидроаэродинамика, горение и теплообмен» СПбПУ, кандидатом физико-математических наук Смирновским Александром Андреевичем (утвержденном проректором по научной работе, членом-корреспондентом РАН Сергеевым В.В.), указала на актуальность темы диссертации, связанную с необходимостью развития фундаментальных представлений о различных режимах движения термовязкой жидкости и множеством практических приложений (продукты переработки нефти, растворы полимеров, расплавы горных пород). Ведущей организацией отмечена значимость результатов работы:

1. Сформулировано дифференциальное уравнение типа уравнения Орра-Зоммерфельда; определены значения критического числа Рейнольдса потери устойчивости при изменении в широких пределах относительного перепада температур на противоположных стенках канала.
2. Осуществлена адаптация современной, обладающей многими достоинствами численной схемы КАБАРЕ к рассматриваемому классу течений, разработан и верифицирован собственный программный код для расчёта ламинарных, переходных и турбулентных режимов течения термовязкой жидкости.
3. Выполнен большой объем численных экспериментов, в целом направленных на идентификацию и количественную оценку двумерных и трехмерных нелинейных процессов, определяющих интенсивность перемешивания в течениях термовязкой жидкости.
4. Автором накоплен большой опыт проведения ресурсоемких численных экспериментов по оценке ключевых характеристик турбулентности в течениях термовязкой жидкости, который будет, несомненно, полезен для постановки последующих исследований в этой области.

**Соискатель имеет 9 статей в реферируемых журналах из списка ВАК, 16 тезисов в сборниках трудов конференций.**

**Основные работы:**

1. Kulikov Y.M., Son E.E. Fluid flow with abrupt viscosity-temperature dependence // High Temperature. – 2014. – Vol. 52, no 5. – P. 723–729.
2. Kulikov Y.M., Son E.E. The CABARET method for a weakly compressible fluid flows in one- and two-dimensional implementations // Journal of Physics: Conference Series. – 2016. – Vol. 774, no 1. – P. 012094.
3. Куликов Ю.М., Сон Э.Е. Об устойчивости течения термовязкой жидкости в канале // Теплофизика и аэромеханика. – 2017. – Т. 24, № 6. – С. 909–928.
4. Kulikov Y.M., Son E.E. Stability of thermoviscous fluid flow under high temperature gradients // High Temperature. – 2017. – Vol. 55, no 1. – P. 131–138.
5. Kulikov Y.M., Son E.E. CABARET scheme implementation for free shear layer modeling // Computer Research and Modeling. – 2017. – Vol. 9, no 6. – P. 881–903.
6. Kulikov Y.M., Son E.E. Kelvin–Helmholz instability in thermoviscous free shear flow // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 946. – P.012075.
7. Kulikov Y.M., Son E.E. Taylor–Green vortex simulation using CABARET scheme in a weakly compressible formulation // The European Physical Journal E. – 2018. – Vol. 41, no 3.
8. Kulikov Y.M., Son E.E. On the Construction of Turbulent Transfer Spectral Models Using 3D Numerical Simulation of Taylor– Green Vortex Decay // High Temperature. – 2018. – Vol. 56, no 6. – P. 921–926.
9. Куликов Ю.М., Сон Э.Е. Режимы течения термовязкой жидкости в плоском неизотермическом слое // Теплофизика и аэромеханика. – 2018. – Т. 25, № 6. – С. 877–897.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

**1. Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова** (д. ф.-м.н., профессор кафедры молекулярных процессов и экстремальных состояний вещества физического факультета МГУ **Знаменская Ирина Александровна**) — отзыв положительный, с замечаниями:

1. «На стр. 9 автореферата: «Уравнения Навье-Стокса для стационарного течения несжимаемой жидкости сводятся к параболизированному уравнению». По-видимому, имеется в виду — к параболическому уравнению.»

2. «На стр. 11 автореферата: «Сформулированы периодические граничные условия, сохраняющие перепад давления в расчётной области в направлении периодичности» следует ли это понимать как граничные условия для инвариантов, обеспечивающие перепад давления?»

3. «Из автореферата можно понять, что результаты исследования не сравнивались с экспериментальными данными, желательно было бы сравнить.»

**2. ФГУП ЦНИИмаш** (д.т.н., профессор, главный научный сотрудник Шманенков Валерий Николаевич) — отзыв положительный, без замечаний;

**3. ФГУП ГНЦ «Центр Келдыша»** (д.ф.-м.н., профессор, главный научный сотрудник отделения твердотопливных ракетных двигателей) — отзыв положительный, с замечаниями:

«В качестве замечания надо отметить, что для некоторых термовязких жидкостей характерна немонотонная зависимость коэффициента вязкости от температуры, однако этот случай, судя по автореферату, в диссертации не рассматривался.»

**4. МГТУ им. Н.Э. Баумана (НИУ)** (д.ф.-м.н., заведующий кафедрой «Теплофизика» **Чирков Алексей Юрьевич**) — отзыв положительный, с замечаниями:

«желательно было более подробно, чем это сделано на стр. 11, описать систему уравнений, решаемых численно по схеме Кабаре, включая подход к описанию турбулентности, а также уделить немного больше внимания

механизму численной диссипации в схеме Кабаре применительно к условиям решаемых задач.»

**5. ООО «ТЕСИС»** (к.ф.-м.н., технический директор **Аксенов Андрей Александрович**) — отзыв положительный, с замечаниями:

«автор не привел сравнения расчетов с экспериментальными данными и/или данными других авторов, хотя практически все расчеты выполнены с исследованием сходимости по расчетной сетке. Также необходимо было бы привести обычные тесты расчетной схемы на наличие свойства монотонности и транспортности, как выполнено во многих работах Леонардо или Гартена (одномерное движение с постоянной скорости уступа, полусинуса, полусферы и так далее).»

**6. Института теплофизики СО РАН** (к.ф.-м.н., с.н.с. **Мулляджанов Рустам Илхамович**) — отзыв положительный, с замечаниями:

1. «Кажется странным, что зависимость ошибки численного решения уравнения Орра-Зоммерфельда при увеличении числа полиномов Чебышева монотонно растет при  $N > 70$  (Рис. 2а). В автореферате это приводится без соответствующих пояснений.»

2. «На Рис. 2б показаны кривые нейтральной устойчивости для различных значений параметра  $\alpha$  в плоскости  $k - Re$ . Логично было бы привести сравнение, начиная с малых  $\alpha$ , со случаем классического плоского течения Пуазейля.»

3. «В последние двадцать лет существенно развита немодальная теория устойчивости, которая, в частности, дает объяснение почему ламинарно-турбулентный переход происходит раньше в плоском канале, чем предсказывает уравнение Орра-Зоммерфельда и анализ наиболее неустойчивой моды, а также ламинарно-турбулентный переход в круглой трубе. Этот вопрос в автореферате не отражен.»

4. «Является ли развитие численных методов предметом для отдельной содержательной главы (глава 4), по которой должны быть сделаны выводы о

физике рассматриваемых процессов? Кажется, что уместнее было бы включить это описание в первую главу, где описаны методы и подходы.»

5. «В главе 5 нет пояснения, что такое  $Z - t$  диаграммы.»

**7. Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН** (д.ф.-м.н, профессор, заведующий Лабораторией морских течений, **Жмур Владимир Владимирович**) — отзыв положительный, без замечаний.

**8. ИПМ им. М.В. Келдыша** (д.ф.-м.н., главный научный сотрудник ФИЦ ИПМ им. М.В. Келдыша, **Змитренко Николай Васильевич**) — отзыв положительный, без замечаний.

**9. КНИТУ–КАИ** (д.ф.-м.н., главный научный сотрудник НИЛ №16, профессор кафедры теплотехники и энергетического машиностроения Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева-КАИ, **Тукмаков Алексей Львович**) — отзыв положительный, без замечаний.

**10. ИПХФ РАН** (д.ф.-м.н., заведующий лабораторией «Вычислительной гидродинамики» ФГБУН ИПХФ РАН, **Султанов Валерий Гулямович**) — отзыв положительный, без замечаний.

**11. Казанский федеральный университет** (д.т.н., профессор, член-корреспондент АН Республики Татарстан, Проректор по инженерной деятельности КФУ, директор Инженерного института КФУ, заведующий кафедрой технической физики и энергетики КФУ, **Кашапов Наиль Фаикович**) — отзыв положительный, с замечаниями:

«При учете зависимости вязкости от температуры недостаточное внимание уделено пристеночным областям, так, например, в объемах жидкости, имеющих относительно протяженную свободную поверхность и малый вертикальный размер – таких, как тонкие горизонтальные слои и пленки жидкости, объемные силы оказываются малы по сравнению с поверхностными. В этих случаях конвективное течение Марангони, возникающее в жидких средах вблизи поверхности раздела фаз, может быть

обусловлено наличием вдоль поверхности градиента температуры и способно вносить существенный вклад в процессы тепло/массообмена, а также влиять на форму свободной поверхности, вызывая поверхностные деформации и даже перемещения всего объема жидкости в целом. Межфазная конвекция существенно влияет на интенсивность многих технологических процессов в пищевой, химической, нефтяной, металлургической и других отраслях промышленности.»

**12. АО ГРЦ им. академика В.П. Макеева** (д.ф.-м.н., доцент, главный научный сотрудник АО ГРЦ им. ак. В.П. Макеева **Мокин Юрий Александрович**) — отзыв положительный, с замечаниями:

В материалах автореферата указано, что при моделировании течения ТВЖ, в различных разделах работы использованы две модели возмущений: детерминированные слабые гармонические возмущения или случайные (хаотические), характеризуемыми «длиной корреляции». Поскольку не указан второй объект корреляционной связи, по-видимому, речь идет об автокорреляции. В материалах автореферата слабо отражены физические условия, факторы и предпосылки реализации того или иного вида возмущений. Кроме того, по нашему мнению, было бы интересно рассмотреть вопрос о характере влияния суперпозиции гармонических и хаотических возмущений. В частности – имеет ли место при этом, в каком-либо смысле, свойство линейности?

**13. ПАО РКК «Энергия» им. С.П. Королева** (к.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник ПАО РКК «Энергия» **Журин Сергей Викторович**) — отзыв положительный, с замечаниями:

1. В автореферате явно не отражено сопоставление результатов численных расчетов с экспериментальными данными.
2. Каким образом полученные результаты могут использоваться в практических задачах?

Выбор официальных оппонентов обосновывается тем, что:

- д.ф.-м.н., профессор Головизнин В.М. является ведущим ученым в области численных методов, крупным специалистом в области вычислительной гидродинамики, создателем численного метода КАБАРЕ:

1. Goloviznin V.M., Solovjov A.V., Zalesny V.B. A new algorithm for solving the shallow water equations on the sphere based on the CABARET scheme // Journal of Physics: Conference Series. — 2018. — P. 6-12;

2. Глотов В.Ю., Головизнин В.М., Сергеенко К.М. LES-моделирование турбулентного теплообмена при течении свинцового теплоносителя в круглой трубе при различных числах Рейнольдса // Математическое моделирование. — 2018. — Т. 30, № 7. — С. 46-53;

3. Goloviznin V.M., Chetverushkin B.N. New Generation Algorithms for Computational Fluid Dynamics // Computations Mathematics and Mathematical Physics. — 2018. — Т. 58, № 8. — P. 1217-1225;

- д.ф.-м.н., профессор Урманчеев С.Ф. является крупным специалистом в области исследования течений со сложными реологическими свойствами, многофазных сред, ведущим ученым в области изучения термовязких и аномально термовязких жидкостей:

1. Сапсай А.Н., Шарафутдинов З.З., Урманчеев С.Ф. Определение оптимального радиуса кривизны скважины для сооружения подводного перехода // Нефтяное хозяйство. — 2019. — № 2. — С. 90-93;

2. Низамова А.Д., Киреев В.Н., Урманчеев С.Ф. Определение критического числа Рейнольдса в задаче об устойчивости течения термовязкой жидкости // Вестник Башкирского университета. — 2018. — Т. 23, № 3. — С. 627-634;

3. Кулешов В.С., Моисеев К.В., Хизбуллина С.Ф., Михайленко К.И., Урманчеев С.Ф. Особенности конвективных течений аномально термовязкой жидкости // Математическое моделирование. — 2017. — Т. 29, № 5. — С. 16-26;

Выбор федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» в качестве **ведущей организации** обусловлен тем, что «СПбПУ» является многопрофильным учреждением, в состав которого в качестве структурного подразделения входит Институт прикладной математики и механики. В институте на кафедре «Гидроаэродинамика, горение и теплообмен» активно ведутся исследования в области моделирования турбулентных течений жидкости и газа, что близко к тематике диссертационного исследования соискателя.

1. Smirnov E.M., Smirnovsky A.A., Schur N.A., Zaitsev D.K., Smimov P.E. Comparison of RANS and IDDES solutions for turbulent flow and heat transfer past a backward-facing step // Heat and Mass Transfer. — 2018. — Vol. 54, Issue 8. — P. 2231-2241.
2. Shur M., Strelets M., Travin A., Spalart P. , Suzuki T. Unsteady simulations of a fan/outletguide-vane system: aerodynamics and turbulence // AIAA Journal. — 2018. — Vol. 56, № 6. — P. 2283-2297;
3. Zasimova M.A., Ivanov N.G. Numerical Simulation of Air Distribution in a Room with a Sidewall Jet under Benchmark Test Conditions // AIP Conference Proceedings. — 2018. — Vol. 1959, № 050033. — P. 1-6.

Диссертационный совет отмечает, что **на основании выполненных соискателем исследований:**

— установлено, что форма профиля скорости термовязкой жидкости с экспоненциальной температурной зависимостью динамической вязкости в установившемся течении в канале, стенки которого имеют различную температуру, является функцией безразмерного параметра  $\alpha$ . Значения последнего для некоторой термовязкой жидкости определяются только перепадом температур. Вариация  $\alpha$  в диапазоне  $\alpha < -1.5936 \cup \alpha > 1.5936$  приводит к изменению выпуклости формы профиля скорости (появлению точки перегиба);

— получено обобщение уравнения Орра–Зоммерфельда на класс термовязких жидкостей с экспоненциальной зависимостью вязкости от температуры, обладающее рядом дополнительных членов, отражающих вклад резкой температурной зависимости вязкости жидкости в характеристики устойчивости течения.

— показано, что кривая нейтральной устойчивости смещается в область малых чисел Рейнольдса и длинноволновых возмущений при больших значениях  $|\alpha|$  в диапазоне существования точки перегиба в основном профиле скорости.

— выполнена программная реализация численного метода КАБАРЕ на основе приближения слабой сжимаемости для расчёта течений в двумерной и трёхмерной постановках;

— предложено дополнительное ветвление алгоритма численного метода КАБАРЕ на этапе расчета третьего и последующих инвариантов Римана;

— показано, что процесс развития неустойчивости в канале, связанный с эволюцией гармонических возмущений в плоском течении, происходит наиболее интенсивно в окрестности точки перегиба;

— на основе метода Окубо–Вейса установлено существование четырёх областей течения, в которых возможна активная филаментация турбулентной пелены или длительное существование вихревых структур.

— показано, что длина установления профиля ТВЖ  $x$  есть резкая функция параметра  $\alpha$  —  $x = A(\alpha) (Re^*)^{-\alpha}$ .

— установлено существование сильной турбулентности в верхней половине течения в канале с интенсивностью в диапазоне  $\langle I \rangle \sim 0.184–0.236$  практически до конца расчёта.

**Теоретическая значимость исследования** обоснована тем, что:

— изучены характеристики устойчивости сдвиговых течений термовязкой жидкости как с непрерывным, так и разрывным распределением вязкости в сдвиговом слое;

- получены характеристики крупномасштабного смешения жидкости в термовязкой жидкости;
- расширены представления об очаговой турбулентности, возникающей в течениях со стратификацией материальных параметров, в частности, с вязкой стратификацией в неоднородном температурном поле.

Значение полученных соискателем результатов **исследования для практики подтверждается** тем, что:

- выявлено решающее влияние температурной зависимости вязкости жидкости не только на распределение скорости в некотором установившемся течении, но также и на его устойчивость, приводящее к смене режима течения и изменению характера теплообмена;
- результаты указывают на необходимость обязательного учёта температурной зависимости вязкости при проведении моделирования течений жидкости и газа;
- разработан и верифицирован собственный программный код для расчета ламинарных, турбулентных и переходных режимов течений термовязкой жидкости;
- расширен опыт применения схемы КАБАРЕ, реализованной в приближении слабой сжимаемости, в двумерной и трёхмерной постановках, что позволяет судить о результативности данного метода для расчёта сдвиговых неустойчивостей, вихревых течений, турбулентности и связанных с ними процессов теплообмена.

Результаты диссертационного исследования могут быть рекомендованы для использования в Институте гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Институте проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, РФЯЦ – Всероссийском научно-исследовательском институте экспериментальной физики, Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Институте автоматизации проектирования РАН, МГУ им. М.В. Ломоносова, Институте проблем

механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Центральном аэрогидродинамическом институте им. проф. Н.Е. Жуковского, ОАО «Холдинговая компания «ЭЛЕКТРОЗАВОД», АО «НТЦ ФСК ЕЭС», ПАО «НК «Роснефть»

**Оценка достоверности результатов** исследования выявила:

- результаты получены методами вычислительной гидродинамики; перед непосредственным решением задач диссертации осуществлялось проведение тестов на сходимость решения по расчетной сетке, а также определение оптимальных начальных данных;
- установлено качественное и количественное согласие авторских результатов с результатами, представленными в независимых источниках по данной тематике;
- основные результаты были представлены на 16 международных и всероссийских конференциях.

**Личный вклад соискателя** является основным и состоит в разработке программного кода, его верификация и валидации. Постановка задач, а также анализ результатов, представленных в диссертационном исследовании, проведены коллективом соавторов при определяющем участии автора. Апробация результатов исследования проводилась на 16 российских и международных конференциях, в которых соискатель принимал личное участие. Основные публикации по выполненной работе также подготовлены лично автором.

Диссертационным советом сделан вывод о том, что диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, соответствует критериям пункта 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней ВАК РФ, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842.

На заседании от 15.05.2019 г. диссертационный совет принял решение присудить Куликову Ю.М. ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 17 человек, из них 12 докторов наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы, и 5 докторов наук по специальности 05.14.01 – энергетические системы и комплексы, участвовавших в заседании, из 25 человека, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за 17, против 0, недействительных бюллетеней 0.

Председатель диссертационного совета Д 002.110.03

чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н., профессор

Вараксин А.Ю.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 002.110.03

д.ф.-м.н.

М.П.



Директор Л.Б.

15.05.2019 г.