

УТВЕРЖДАЮ

Директор ФИЦ КазНЦ РАН
профессор РАН Калачев А.А.



2021 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки
«Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр
Российской академии наук» (ФИЦ КазНЦ РАН)

Диссертационная работа на соискание ученой степени доктора физико-математических наук «Развитие высокопроизводительных панорамных методов диагностики и их приложение к исследованию интенсивных событий в турбулентном пограничном слое» выполнена Зариповым Динаром Ильясовичем в Институте энергетики и перспективных технологий Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук» (ФИЦ КазНЦ РАН).

В период с 2010 по 2016 гг. соискатель Зарипов Динар Ильясович работал в лаборатории гидродинамики и теплообмена Института энергетики и перспективных технологий ФИЦ КазНЦ РАН. В 2013 году он окончил очную аспирантуру ФИЦ КазНЦ РАН по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы. В 2014 году ему присуждена ученая степень кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы, диплом кандидата наук выдан Высшей аттестационной комиссией при Министерстве образования и науки Российской Федерации в 2015 году.

По итогам обсуждения принято следующее заключение.

Актуальность работы.

Структура потока жидкости или газа в пристеночной области турбулентного пограничного слоя (ТПС) оказывает большое влияние на многие интегральные величины, например, сопротивление трения, знание которых необходимо при разработке новых образцов техники, используемых в различных отраслях человеческой деятельности. Между тем, различные интегральные величины являются результатом осреднения соответствующих флуктуирующих сигналов, возникающих вследствие движения когерентных вихревых структур различной природы и интенсивности. Наиболее интенсивные из этих структур могут оказывать большое влияние на интересующие интегральные величины и являются причиной работы той или иной техники на нерасчетных режимах, часто приводя к их неисправности

или даже разрушению. В этом смысле их изучение представляет большой фундаментальный и практический интерес.

Примером такой величины является скорость диссипации кинетической энергии турбулентности (КЭТ) – центральная величина в теории однородной турбулентности. Роль событий, сопровождающихся всплеском интенсивности этой величины, является предметом давнего спора между А.Н. Колмогоровым и Л.Д. Ландау (Frisch 1996). К сожалению, теоретическое изучение этих событий и структуры турбулентных течений в целом ограничено вычислительными ресурсами и доступно лишь в исследованиях при относительно малых числах Рейнольдса. Недостающую информацию получают из эксперимента. На сегодняшний день наиболее перспективными и бурно развивающимися экспериментальными методами диагностики потока являются панорамные методы цифровой трассерной визуализации, такие как Particle Image/Tracking Velocimetry (PIV/PTV, Raffel *et al.* 2018), Smoke Image Velocimetry (SIV, Mikheev *et al.* 2017) и Speckle Photography (Fomin 1998), позволяющие получать мгновенные пространственно-временные векторные поля скорости и ее производных. Однако их использование для достоверного определения скорости диссипации КЭТ является известной и до конца все еще нерешенной проблемой, связанной с влиянием погрешности измерения и необходимостью обеспечения высокого пространственно-временного разрешения на уровне колмогоровского масштаба (Sheng *et al.* 2000, Piirto *et al.* 2003, Alekseenko *et al.* 2009, Tokgoz *et al.* 2012, Schneiders *et al.* 2017, Mikheev *et al.* 2017). Например, в работе (Fernholz and Finley 1996) вовсе постулируется, что скорость диссипации КЭТ в ТПС не может быть измерена экспериментально.

Другой показательный пример несовершенства экспериментальных методов диагностики связан с изучением явления обратного пристеночного течения (ОПТ), характеризующегося мгновенным отрицательным значением продольной компоненты вектора касательного напряжения на стенке. Долгое время существование этого явления в безградиентном ТПС считалось невозможным (Eckelmann 1974, Colella and Keith 2003). Впервые экспериментальное подтверждение его существования было получено лишь недавно (Brücker 2015). При этом механизм его формирования все еще остается неизвестным. Как и в случае интенсивных диссипативных событий, сложность экспериментального исследования явления ОПТ связана с очень высокими требованиями к точности измерения и пространственному разрешению используемого метода измерения. Это связано с тем, что в среднем высота области ОПТ примерно в 5 раз меньше толщины вязкого подслоя ТПС, а величина измеряемой скорости имеет тот же порядок, что и неопределенность измерения. Ситуация осложняется малой «вероятностью» ($\sim 0,1\%$) возникновения ОПТ, так что для их регистрации и статистической сходимости результатов измерения необходима обработка большого объема данных.

Таким образом, в настоящее время существует ряд нерешенных актуальных проблем механики жидкости и газа, связанных с исследованием интенсивных процессов, протекающих в ТПС на уровне колмогоровского масштаба. Их решение требует дальнейшего развития существующих экспериментальных методов диагностики, в частности, в сторону увеличения их точности, пространственно-временного разрешения и быстродействия.

Целью данной работы является исследование интенсивных событий, возникающих в турбулентном пограничном слое и приводящих, в частности, к возникновению явления обратного пристеночного течения и интенсификации скорости диссипации и генерации кинетической энергии турбулентности, а также развитие высокопроизводительных панорамных методов для их диагностики. Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

- разработка методов и алгоритмов, допускающих наличие широкого динамического диапазона измеряемых скоростей, с целью повышения точности измерения, пространственного разрешения и ускорения вычисления мгновенных векторных полей скорости применительно к высокоскоростным панорамным методам измерения;
- исследование механизма возникновения высоких значений локальной мгновенной скорости диссипации кинетической энергии турбулентности в турбулентном пограничном слое, а также их пространственно-временной корреляции с высокими значениями генерации кинетической энергии турбулентности;
- экспериментальное и численное (методом прямого численного моделирования) исследование явления обратного пристеночного течения в развитом турбулентном потоке несжимаемой сплошной среды в канале с квадратным поперечным сечением при различных числах Рейнольдса.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- разработан новый бессеточный многопроходный метод PIV, позволяющий в 2 раза расширить диапазон допустимых градиентов скоростей с одновременным повышением пространственного разрешения и снижением погрешности измерения скорости, а также ее первой и второй производных по пространству;
- разработана серия алгоритмов, значительно ускоряющих вычисление мгновенных векторных полей скорости потока без существенного снижения достоверности измеряемых величин в широком диапазоне управляющих параметров;
- разработан метод, частично устраняющий влияние случайной погрешности измерения на оценку скорости диссипации кинетической энергии турбулентности, а также показано, что достоверность оценки

скорости диссипации кинетической энергии турбулентности зависит от пространственного разрешения, метода измерения и его погрешности;

- предложен единый механизм формирования высоких значений локальной мгновенной скорости диссипации и генерации кинетической энергии турбулентности в пристеночной области турбулентного пограничного слоя;

- впервые экспериментально подтверждено существование явления обратного пристеночного течения в каналах при относительно малых числах Рейнольдса ($207 < Re_\tau < 672$), предложен и обоснован механизм его возникновения в широком диапазоне чисел Рейнольдса;

- впервые обнаружено явление обратного пристеночного течения в углах канала квадратного поперечного сечения и предложен механизм его возникновения; выявлено, что доля времени обратного течения в углах канала примерно на три порядка выше, чем в центральной области стенки канала.

Достоверность полученных результатов обусловлена использованием проверенных методик численного и экспериментального исследования, качественным и во многих случаях количественным совпадением полученных численных и экспериментальных результатов друг с другом и с известными и апробированными результатами других авторов, использованием верифицированных алгоритмов обработки данных и глубоким анализом влияния погрешности измерения на результаты исследований.

Научная и практическая значимость работы связана с более глубоким пониманием процессов, протекающих в турбулентном пограничном слое, а также обнаружением и объяснением новых явлений и закономерностей, наблюдаемых на уровне колмогоровского масштаба. Полученные численные и экспериментальные результаты, объясняющие механизмы возникновения обратных пристеночных течений, могут быть использованы при разработке пассивных и активных методов управления сопротивлением трения, а новые знания о событиях, сопровождающихся всплеском интенсивности скорости диссипации и генерации кинетической энергии турбулентности, вносят вклад в развитие общей теории турбулентности и могут быть использованы при разработке новых подходов к созданию моделей турбулентности. Выбор интенсивных событий в качестве **объекта исследования** способствовал дальнейшему развитию существующих панорамных методов диагностики потоков. Разработанные методы и алгоритмы значительно превосходят по производительности существующие мировые аналоги и открывают новые возможности в экспериментальной гидродинамике, особенно при изучении процессов, протекающих на уровне колмогоровского масштаба. Результаты работы могут быть в дальнейшем использованы при разработке следующих

поколений панорамных методов, позволяющих измерять мгновенные поля скорости вблизи подвижных границ в режиме реального времени.

На защиту выносятся:

- научные положения по созданию высокопроизводительных панорамных методов диагностики турбулентных течений, в том числе бессеточный многопроходный метод PIV и алгоритмы, ускоряющие вычисление мгновенных векторных полей скорости потока применительно к методам PIV и SIV, а также результаты оценки их точности;
- научные положения, направленные на решение проблемы измерения скорости диссипации кинетической энергии турбулентности панорамными методами диагностики, в том числе результаты исследования факторов, влияющих на достоверность оценки скорости диссипации кинетической энергии турбулентности, и метод, частично устраняющий влияние случайной погрешности измерения;
- результаты экспериментального исследования событий, сопровождающихся высокими значениями скорости диссипации и генерации кинетической энергии турбулентности, в турбулентном пограничном слое планарным методом PIV;
- результаты исследования явления обратного пристеночного течения в развитом турбулентном потоке сплошной среды в канале квадратного поперечного сечения.

Личный вклад автора. Результаты и выводы, послужившие основой диссертации и выносимые на защиту, получены соискателем самостоятельно. Постановка решаемых задач проводилась соискателем как самостоятельно, так и совместно с проф. Н.И. Михеевым и акад. РАН Д.М. Марковичем. Соискатель самостоятельно разработал, обосновал эффективность и реализовал методы и алгоритмы расчета полей скорости, оценил их производительность, разработал и реализовал метод снижения влияния погрешности измерения, спланировал и провел все эксперименты, провел обработку, анализ и интерпретировал полученные результаты экспериментов и прямого численного моделирования.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы обсуждались на международных и всероссийских симпозиумах, съездах и конференциях: 19th International Symposium on Application of Laser Techniques to Fluid Mechanics (Lisbon, Portugal – 2018), 12th, 13th and 14th International Symposia on Particle Image Velocimetry (Busan, Korea – 2017; Munich, Germany – 2019; Chicago, IL, USA – 2021), International Conference on the Methods of Aerophysical Research (Novosibirsk, Russia – 2020), Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (Уфа, Россия – 2019), V Всероссийская научная конференция «Теплофизика и

физическая гидродинамика» (Ялта, Россия – 2016, 2020, 2021), Всероссийская конференция «XXXVII Сибирский теплофизический семинар» (Новосибирск, Россия – 2021), X Школа-семинар молодых ученых и специалистов академика РАН В.Е. Алемасова «Проблемы тепломассообмена и гидродинамики в энергомашиностроении» (Казань, Россия – 2016). Результаты диссертационной работы обсуждались на семинарах ИТ СО РАН (2021), КазНЦ РАН (2021) и видео-семинаре ЦАГИ – ИТПМ СО РАН – СПбГПУ – НИИМ МГУ (2021).

Список публикаций по теме диссертации:

1. (БАК) Zaripov D.I., Ivashchenko V.A., Mullyadzhhanov R.I., Li R., Mikheev N.I., Kahler Ch.J. On a mechanism of near-wall reverse flow formation in a turbulent duct flow // *Journal of Fluid Mechanics*. – 2021. – Vol. 923, Art. A20. – 15 p.
2. (БАК) Zaripov D.I., Ivashchenko V.A., Mullyadzhhanov R.I., Li R., Markovich D.M., Kahler Ch.J. Reverse flow phenomenon in duct corners at a low Reynolds number // *Physics of Fluids*. – 2021. – Vol. 33, № 8, Art. 085130. – 11 p.
3. (БАК) Bobrov M.S., Hrebtov M.Y., Ivashchenko V.A., Mullyadzhhanov R.I., Seredkin A.V., Tokarev M.P., Zaripov D.I., Dulin V.M., Markovich D.M. Pressure evaluation from Lagrangian particle tracking data using a grid-free least-squares method // *Measurement Science and Technology*. – 2021. – Vol. 32, № 8, Art. 084014. – 14 p.
4. (БАК) Zaripov D.I. Problems of an experimental study of a reverse flow in the turbulent channel flow // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2021. – Vol. 2057, Art. 012097. – 5 p.
5. (БАК) Zaripov D.I., Li R., Saushin I.I. Extreme events of turbulent kinetic energy production and dissipation in turbulent channel flow: particle image velocimetry measurements // *Journal of Turbulence*. – 2020. – Vol. 21, № 1. – P. 39-51.
6. (БАК) Zaripov D.I., Li R., Dushin N.S. Dissipation rate estimation in the turbulent boundary layer using high-speed planar Particle Image Velocimetry // *Experiments in Fluids*. – 2019. – Vol. 60, № 1. – 16 p.
7. (БАК) Душин Н.С., Михеев Н.И., Душина О.А., Давлетшин И.А., Зарипов Д.И. Особенности тепломассообмена в пристеночной области за выступом в канале // *Известия высших учебных заведений. Авиационная техника*. – 2019. – № 3. – С. 122-126.
8. (БАК) Zaripov D.I., Li R. High-speed technique based on a parallel projection correlation procedure for digital image correlation // *Measurement Science and Technology*. – 2018. – Vol. 29, Art. 055405. – 11 p.
9. (БАК) Zaripov D.I., Li R., Mikheev N.I., Dushin N.S. Speed-up algorithm based on parallel projection correlation technique for planar PIV: Accuracy and

- limitation // Flow Measurement and Instrumentation. – 2018. – Vol. 60. – P. 88-94.
10. (BAK) Zaripov D. Numerical study of steady-state acoustic oscillations in semi-closed straight channel // Journal of Hydrodynamics. – 2018. – Vol. 30, № 6. – P. 1093-1104.
 11. (BAK) Зарипов Д.И., Михеев Н.И., Душин Н.С., Аслаев А.К., Шакиров Р.К. Применение метода проекций для ускорения нового алгоритма измерения мгновенных полей скорости потока // Вычислительные технологии. – 2018. – Т. 23, № 1. – С. 33-45.
 12. (BAK) Zhou L., Li R., Hao Z., Zaripov D.I. Chao Y. Improved $k-\omega-\gamma$ model for crossflow-induced transition prediction in hypersonic flow // International journal of Heat and Mass Transfer. – 2017. – Vol. 115. – P. 115-130.
 13. (BAK) Zaripov D.I., Li R. High-performance technique for initial velocity field calculation based on PIV images processing // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – Vol. 899, Art. 062007. – 7 p.
 14. (BAK) Dushin N.S., Mikheev N.I., Dushina O.A., Zaripov D.I., Aslaev A.K. Validation of SIV measurements of turbulent characteristics in the separation region // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – Vol. 891, Art. 012091. – 6 p.
 15. (BAK) Давлетшин И.А., Зарипов Д.И., Михеев Н.И., Паерелий А.А. Теплоотдача в конфузоре при пульсациях потока // Теплофизика высоких температур. – 2017. – Т. 55, № 4. – С. 642-645.
 16. (BAK) Зарипов Д.И., Аслаев А.К., Михеев Н.И., Душин Н.С. Оценка точности нового оптического метода измерения мгновенных полей скорости потока // Труды Академэнерго. – 2016. – № 1. – С. 42-52.
 17. (BAK) Душин Н.С., Михеев Н.И., Душина О.А., Зарипов Д.И., Паерелий А.А., Газизов И.М. Влияние ошибок квантования видеокамеры на измерение скорости потока методом Smoke Image Velocimetry // Труды Академэнерго. – 2016. – № 4. – С. 23-31.
 18. Зарипов Д.И. Проблемы экспериментального исследования обратного течения в безградиентном турбулентном пограничном слое // Материалы VI Всероссийской научной конференции с элементами школы молодых ученых «Теплофизика и физическая гидродинамика», Август 2021, г. Севастополь, Республика Крым, – С. 215.
 19. Иващенко В.А., Зарипов Д.И., Мулладжанов Р.И. Прямое численное моделирование явления обратного пристеночного течения в канале с квадратным поперечным сечением // Материалы Всероссийской конференции с элементами научной школы для молодых ученых «XXXVII Сибирский теплофизический семинар», Сентябрь 2021, г. Новосибирск, Россия, – С. 13.
 20. Bobrov M.S., Hrebtov M.Y., Ivashchenko V.A., Mullyadzhhanov R.I., Seredkin A.V., Tokarev M.P., Zaripov D.I., Dulin V.M., Markovich D.M. A grid-free least-squares method for pressure evaluation from LPT data // 14th

- International Symposium on Particle Image Velocimetry. – 2021. – Vol. 1, № 1. – 3 p.
21. Zaripov D.I., Ivashchenko V.A., Mullyadzhанov R.I. A possible mechanism of near-wall reverse flow formation in zero-pressure-gradient turbulent boundary layer // Proceedings of the 20th International Conference on the Methods of Aerophysical Research, November 2020, Novosibirsk, Russia, – P. 231-232.
 22. Зарипов Д.И. Механизм формирования обратных пристеночных течений в безградиентном пограничном слое // Материалы V Всероссийской научной конференции с элементами школы молодых ученых «Теплофизика и физическая гидродинамика», Сентябрь 2020, г. Ялта, Республика Крым, – С. 25.
 23. Зарипов Д.И., Михеев Н.И. Обратное пристеночное течение в безградиентном турбулентном пограничном слое // Материалы XII Всероссийского съезда по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики, 2019, г. Уфа, Россия, – С. 546-548.
 24. Zaripov D.I., Li R. High-speed Particle Image Velocimetry for efficient turbulent kinetic energy dissipation rate estimation // Proceedings of the 19th International Symposium on Application of Laser Techniques to Fluid Mechanics, July 2018, Lisbon, Portugal, – 14 p.
 25. Зарипов Д.И., Душин Н.С., Аслаев А.К. SIV-метод измерения полей скорости турбулентного потока и алгоритм его ускорения // Материалы X Школы-семинар молодых ученых и специалистов академика РАН В.Е. Алемасова «Проблемы тепломассообмена и гидродинамики в энергомашиностроении», Сентябрь 2016, г. Казань, Россия, – С. 273-276.
 26. Шакиров Р.Р., Душин Н.С., Зарипов Д.И. Алгоритм предварительного определения скорости по результатам дымовой визуализации // Материалы X Школы-семинар молодых ученых и специалистов академика РАН В.Е. Алемасова «Проблемы тепломассообмена и гидродинамики в энергомашиностроении», Сентябрь 2016, г. Казань, Россия, – С. 283-285.
 27. Михеев Н.И., Зарипов Д.И., Саушин И.И. Структура турбулентности и теплообмен в пульсирующем потоке // Тезисы докладов Всероссийской научной конференции с элементами школы молодых ученых «Теплофизика и физическая гидродинамика», Сентябрь 2016, г. Ялта, Россия, – С. 83.
 28. Зарипов Д.И., Душин Н.С., Михеев Н.И. Высокопроизводительный метод измерения полей скорости турбулентного потока // Материалы II Отраслевой конференции по измерительной технике и метрологии для исследований летательных аппаратов, Октябрь 2016, г. Жуковский, Россия, – С. 444-451.

Соответствие содержания диссертации паспорту специальности.

Диссертация Зарипова Д.И. посвящена исследованию интенсивных событий, возникающих в турбулентном пограничном слое, и развитию экспериментальных методов их диагностики и соответствует паспорту специальности «1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы» для физико-математических наук.

Решение о рекомендации работы к защите

Диссертация «Развитие высокопроизводительных панорамных методов диагностики и их приложение к исследованию интенсивных событий в турбулентном пограничном слое» Зарипова Динара Ильясовича рекомендуется к защите на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.9 – механика жидкости, газа и плазмы.

Заключение принято на заседании семинара Института энергетики и перспективных технологий Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук».

На заседании присутствовало 18 чел., в том числе 6 докторов и 10 кандидатов наук. Результаты голосования: «за» – 18 чел., «против» – 0 чел., «воздержалось» – 0 чел., протокол №1 от «27» октября 2021 г.

Председатель семинара

Руководитель Института энергетики и перспективных технологий Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук», профессор, д.т.н. Михеев Николай Иванович

Секретарь семинара

в.н.с. лаборатории Теплофизики и волновых технологий Института энергетики и перспективных технологий Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук», к.т.н. Кадыров Айдар Ильдусович

Подписи д.т.н. Михеева Н.И. и к.т.н. Кадырова А.И.
заведующий отделом протокола и делопроизводства
к.х.н. Зинаидина С.А.
Секретарь ФНИЦ КНЦ РАН
«28» 10 2021 г.