

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИТ СО РАН

Академик РАН Д.М. Маркович



Маркович
«22» октября 2021 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

Диссертация 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 Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН).

В период подготовки диссертации с 2019 по 2021 гг. соискатель Зарипов Динар Ильясович работал в лаборатории физических основ энергетических технологий ИТ СО РАН в должностях научного сотрудника (2019 – 2020 гг.) и старшего научного сотрудника (2021 г.). В 2014 году Зарипову Динару Ильясовичу 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.

Текст диссертации состоит из списка часто используемых условных обозначений и сокращений, введения, 4 глав, заключения, списка публикаций по теме диссертации и списка цитируемой литературы. Зарипов Д.И. сделал развернутый доклад с изложением содержания диссертации.

Актуальность работы связана с проблемой экспериментального исследования интенсивных и кратковременных процессов, протекающих в турбулентных пограничных слоях (ТПС) на уровне колмогоровского

масштаба. Эти процессы могут оказывать большое влияние на многие интегральные величины, знание которых необходимо при разработке новых образцов техники, используемых в различных отраслях человеческой деятельности. Примером такой величины является скорость диссипации кинетической энергии турбулентности (КЭТ), являющейся центральной величиной в теории однородной турбулентности. Роль событий, сопровождающихся локальным всплеском скорости диссипации КЭТ, является предметом давнего спора инициированного А.Н. Колмогоровым и Л.Д. Ландау. Другой показательной величиной является сопротивление трения, управление которой является чрезвычайно важной прикладной задачей, требующей фундаментальных знаний о процессах, протекающих в пристенной области ТПС. С этой точки зрения интересен так называемый феномен обратного пристенного течения (ОПТ). Существование этого феномена долгое время считалось невозможным (Eckelmann 1974, Colella and Keith 2003), а экспериментально он был обнаружен лишь недавно (Brücker 2015).

К сожалению, теоретическое исследование таких процессов ограничено вычислительными ресурсами и доступно лишь в исследованиях при относительно малых числах Рейнольдса. Поэтому недостающую информацию получают из эксперимента. Однако сложность экспериментального исследования феномена ОПТ и процессов диссипации КЭТ связана с очень высокими требованиями к точности измерения и пространственному разрешению используемого метода измерения. Ситуация осложняется малой вероятностью их возникновения, так что для их регистрации и статистического анализа необходима обработка большого объема данных.

На сегодняшний день наиболее перспективными и бурно развивающимися экспериментальными методами диагностики турбулентных течений являются панорамные методы, такие как PIV и PTV, позволяющие получать мгновенные пространственно-временные векторные поля скорости и ее производных. Однако их использование, например, при измерении скорости диссипации КЭТ, является 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, Mikhееv *et al.* 2017).

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 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 результатами других авторов, использованием верифицированных алгоритмов обработки данных и глубоким анализом влияния погрешности и неопределенности измерения на результаты исследований.

Научная и практическая значимость работы связана с более глубоким пониманием процессов, протекающих в турбулентном пограничном слое на уровне колмогоровского масштаба, а также обнаружением и объяснением новых явлений и закономерностей. Полученные результаты могут быть использованы при разработке методов управления потоками, 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.

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. Марковым. 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, и опубликованы в 28 трудах, 17 из которых входят в перечень журналов, рекомендованных ВАК, и 14 – в международные реферативные базы данных и системы цитирования.

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. (БАК) 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. (БАК) 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., Mullyadzhhanov 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 теплообмена 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 теплообмена 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 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук под руководством академика РАН С.В. Алексеенко.

На заседании присутствовало 54 чел., в том числе 2 академика РАН, 1 член-корреспондент РАН, 11 докторов и 14 кандидатов наук. Результаты голосования: «за» – 54 чел., «против» – 0 чел., «воздержалось» – 0 чел., протокол № 78/5-2021 от «22» октября 2021 г.

Председатель семинара

С.В. Алексеенко, академик РАН, д.ф.-м.н.,
научный руководитель ИТ СО РАН



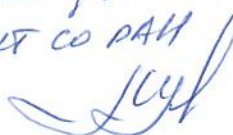
Секретарь семинара

Р.И. Мулладжанов, д.ф.-м.н.

с.н.с. лаборатории моделирования ИТ СО РАН



*Подписи академика РАН, д.ф.-м.н. С.В. Алексеенко
и д.ф.-м.н. Р.И. Мулладжанова заверены
Генеральным секретарем ИТ СО РАН
к.ф.м.н.*



М.С. Мамаров.