

На правах рукописи

Саушин Илья Ирекович

**ТУРБУЛЕНТНОСТЬ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ
ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ПОТОКА**

Специальность: 01.02.05. – Механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Казань 2015

Работа выполнена в Исследовательском центре проблем энергетики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Казанского научного центра РАН и Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н.Туполева-КАИ»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Михеев Николай Иванович.

Официальные оппоненты: **Егоров Андрей Геннадьевич**
доктор физико-математических наук, профессор,
Федеральное государственное автономное учреждение высшего профессионального образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет»,
институт математики и механики им.
Н.И.Лобачевского, кафедра «Аэрогидромеханика»,
заведующий кафедрой

Лаптев Анатолий Григорьевич
доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Казанский государственный энергетический университет», кафедра «Технология воды и топлива»,
заведующий кафедрой

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова»

Защита состоится 30.09.2015 г. в 12⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.079.02 при ФГБОУ ВПО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н.Туполева-КАИ» по адресу: 420111, г.Казань, ул. К.Маркса, д.10.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н.Туполева-КАИ» и на сайте <http://www.kai.ru/science/disser/index.phtml>.

Автореферат разослан " ____ " июня 2015 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук



А.Г. Каримова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Хорошо известно, что отрицательный градиент давления или ускорение дозвукового потока способствует снижению интенсивности турбулентных пульсаций, а торможение потока приводит к повышению степени турбулентности. Если же происходит чередование фаз ускорения и торможения потока по гармоническому закону, имеющее место в так называемых пульсирующих потоках, процессы генерации и диссипации кинетической энергии турбулентности в пограничном слое начинают существенным образом зависеть от частоты и амплитуды колебаний. Пульсирующие потоки весьма многообразны, поскольку для их описания в дополнение к числам Маха и Рейнольдса осредненного по времени течения добавляется еще два числа динамического подобия – относительная частота (число Струхала) и относительная амплитуда вынужденных колебаний потока.

С развитием новых оптических методов измерений существенно расширились возможности измерения динамики векторных полей скорости потока. На основе результатов таких измерений появилась возможность экспериментальной оценки эволюции параметров турбулентности в течение периода вынужденных колебаний одновременно по всей толщине пограничного слоя.

Не смотря на то, что современные подходы численного моделирования задач гидродинамики характеризуется широким спектром коммерческих многофункциональных систем программирования, по причине крайней вычислительной трудоемкости подходов LES и DNS, при расчете нестационарных турбулентных течений пока приходится использовать ресурсоемкий подход URANS. В случае пульсирующих потоков при решении системы уравнений URANS возникает классическая проблема замыкания, связанная с выбором оператора связи (модели турбулентности) тензоров напряжений Рейнольдса и скоростей деформации. Отсутствие систематизации экспериментальных данных и теории не позволяют сформулировать универсальную и корректную модель турбулентности для широкого диапазона чисел динамического подобия пульсирующего потока.

Целью работы является получение экспериментальных данных об эволюции по фазе колебаний профилей осредненной скорости, кинетической энергии турбулентности и скорости её диссипации в пограничном слое на пластине по фазе вынужденных колебаний внешнего потока. Оценка значений параметров модели турбулентности на основе полученных экспериментальных данных о динамике векторного поля скорости потока.

В соответствии с целью работы были поставлены следующие **основные задачи**:

- измерение динамического векторного поля скоростей в пограничном слое пульсирующего потока с помощью оптического метода;
- определение на основе полученных экспериментальных данных эволюции по фазе колебаний профилей осредненной скорости, кинетической энергии турбулентности и скорости её диссипации в пограничном слое;
- разработка математического метода оценки параметров моделей турбулентности на основе экспериментальных данных о динамике векторного поля скорости потока.

Научная новизна:

1. Впервые получены экспериментальные данные об эволюции профилей осредненной скорости, кинетической энергии турбулентности и скорости её

диссипации в пограничном слое на пластине по фазе вынужденных колебаний внешнего потока.

2. Впервые предложен математический метод определения параметров моделей турбулентности на основе решения обратной задачи для системы уравнений URANS с использованием данных о динамике векторного поля скорости потока.

Теоретическая значимость. Полученные в работе результаты вносят вклад в развитие теории пульсирующих течений, также представляют интерес для общей теории газовой динамики, турбулентности и теплообмена. Результаты изучения динамики турбулентных характеристик имеют фундаментальное значение для теории турбулентных потоков. Кроме того, решение поставленных в диссертационной работе задач имеет важное значение для развития методов моделирования течения сплошной среды.

Практическая значимость. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании теплообменных аппаратов и энергоустановок, работающих на нестационарных режимах.

Обоснованность и достоверность результатов основываются на качественном и количественном соответствии полученных результатов с результатами теоретических и экспериментальных исследований других авторов, обеспечиваются корректностью и полнотой используемых моделей, соответствием области применимости моделей, проверкой точности вычислений, использованием сертифицированной измерительной аппаратуры.

Положения и результаты, выносимые на защиту:

1. Экспериментальные данные об эволюции профилей осредненной скорости, кинетической энергии турбулентности и скорости её диссипации в пограничном слое на пластине по фазе вынужденных колебаний внешнего потока.

2. Метод определения параметров моделей турбулентности на основе решения обратной задачи для системы уравнений URANS с использованием экспериментальных данных о динамике векторного поля скорости потока.

Апробация работы, публикации и внедрения. Результаты работы докладывались на:

1. XIX Школе-семинаре молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И.Леонтьева (Орехово-Зуево, 20-24 мая 2013).
2. IX Школе-семинаре молодых ученых и специалистов академика РАН В.Е.Алемасова (Казань, 10-12 сентября 2014).
3. VIII Школе-семинаре молодых ученых и специалистов академика РАН В.Е.Алемасова (Казань, 16-18 октября 2012).
4. Итоговых конференциях Казанского научного центра РАН (Казань, 2011, 2012, 2013, 2014).
5. XXI Туполевских чтениях (школа молодых ученых) (Казань, 19-21 ноября 2013).
6. IX Международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения» (Казань, 23-25 апреля, 2014).
7. XII Международной школы-семинара. «Модели и методы аэродинамики» (Евпатория, 3-12 июня 2012).
8. Второй Всероссийской конференции "Метрология и стандартизация нефтегазовой отрасли" (Санкт Петербург, 3-5 октября 2012).
9. Вторая всероссийская научно-практическая конференция "Актуальные вопросы метрологического обеспечения учета жидкостей и газов" (Казань, 22-23 ноября 2012).

10. IX Международной конференции пользователей ANSYS/CADFEM (Москва, 24-28 апреля 2011).

Список публикаций по теме диссертации содержит 8 наименований, из которых 2 статьи опубликовано в журналах, рекомендованных ВАК, 7 тезисов докладов.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и списка использованной литературы. В ней содержится 101 стр. основного текста и список литературы из 111 наименований на 11 стр. Общий объём работы 112 стр.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** к диссертации дана общая характеристика работы, обоснованы актуальность исследований, научная новизна и практическая значимость.

В **главе 1** диссертации выполнен краткий обзор результатов экспериментальных и численных исследований пульсирующих течений.

Наиболее полный обзор исследований, посвященных пульсирующим потокам, дан в обзорных статьях Gündoğdu и Carpinlioğlu. По степени влияния вынужденных колебаний потока на турбулентность предложено несколько классификаций пульсирующих течений. В частности, Карром предложена классификация по характеру и степени проявления динамических эффектов, в качестве параметров, характеризующих степень проявления эффекта, выбраны относительная амплитуда пульсаций скорости β и отношение частоты наложенных пульсаций к характерной «частоте взрывов». М.М.Григорьевым, В.В.Кузьминым и А.В.Фафуриным предложена классификация по параметрам Sh и β , позволяющая установить четкие границы между классами пульсирующих течений. На основе данной классификации выделено 5 режимов течений – от квазистационарных до быстро-осциллирующих. В большинстве экспериментальных работ, посвященных исследованию турбулентности в пульсирующем потоке, оцениваются средние по времени профили скорости и характеристик турбулентности. В работе Худевилля, Ж. Кусто и А. Депозера с использованием термоанемометрических измерений и техники фазового усреднения были получены экспериментальные данные об изменении характеристик турбулентности по фазе наложенных пульсаций, но только для низкочастотных режимов по классификации А.В.Фафурина и др. Между двумя группами авторов до сих пор существует спорный вопрос по степени влияния нестационарности на осредненные по времени профиль скорости и турбулентные характеристики течения. Первая группа авторов (Iowa, Менендес, Mizushina, Ramaprian, Tu, Shemer, Mao, Hanratty и др.) выявила небольшие изменения в осредненных по времени характеристиках (скорость, касательное напряжение, напряжение Рейнольдса, и т.д.), тогда как вторая группа (Ohmi, Kita, Iguchi, Mao, Hanratty, Tardu, Finnicum) не наблюдала такого эффекта. Некоторые общие выводы и закономерности сформулированы в работах Беретона и др. (эффект запаздывания гармоник характеристик по толщине пограничного слоя и эффект снижения амплитуды гармоник с ростом частоты пульсации).

В целом имеющаяся информация основана на осредненных по фазе характеристиках. Для более полного исследования механизмов генерации и диссипации турбулентности в пульсирующем потоке требуется информация об эволюции профилей характеристик по фазе вынужденных колебаний.

Выполнен обзор современных оптических методов измерения векторных полей скорости потока, позволяющих получить информацию о турбулентном потоке в нестационарных условиях. На сегодняшний день широкое распространение получили методы лазерной доплеровской анемометрии LDV и цифровой трассерной визуализации PIV. Однако оба метода имеют существенные недостатки при измерении скорости потока и турбулентных характеристик в нестационарных условиях. С помощью метода LDV можно измерить скорость потока лишь в одной единственной точке. Метод PIV позволяет измерять векторное поле скоростей потока, однако по причине большого времени накачки импульсных лазеров высокой мощности, используемых для подсветки трассеров, метод не позволяет полноценно отслеживать динамику нестационарного векторного поля.

Выполнен обзор численных методов расчета турбулентных течений, наиболее распространенных моделей турбулентности и их модификаций. На сегодняшний день предложено несколько математических подходов для численного моделирования пульсирующих течений (Цебек, Lam, Квон, Орланд, На Min, Shim, Ohmi, Kita, Streeter, Wylie), но проблема создания универсальной модели остается открытой. Это, главным образом, связано с широким спектром режимов пульсирующих течений, которые имеют существенные различия по пространственно-временной эволюции профилей характеристик.

В работах Б.Г.Вагера, Rodi, П.Брэдшоу, В.А.Фафурина, Thangam, Х.Гротьянса, Ф.Ментера, Р.Бура, М.Глака, А.А.Халатова, Fujiwara, Matsou, Arakawa, Чинг-Джена, Chien, Шенг-Юха, Джоу и др. показано, что корректировка значений отдельных параметров модели турбулентности, выполненная даже методом их простого варьирования, может значительно повысить точность решения численного моделирования. Однако в данных работах не предложено универсальных методик или алгоритмов определения значений всего набора параметров, используемых в модели, и рассмотрены лишь стационарные течения.

Здесь же сформулированы цели и задачи диссертационной работы, представлены новые результаты, описаны основные положения, выносимые на защиту.

Глава 2 посвящена описанию экспериментального оборудования и объектов исследований, методик проведения экспериментов и обработки опытных данных. Сделана оценка относительных погрешностей получаемых опытных данных. Приведена математическая постановка задачи вычислительного эксперимента.

Пограничный слой формировался на стенке квадратного канала 2 (рисунок 1) сечением 50x50 мм и длиной 1200 мм. Расход воздуха и его пульсации задавались установленным на выходе из канала пульсатором 4, периодически перекрывающим часть площади проходного сечения по гармоническому закону. Управление частотой оборотов двигателя пульсатора, вал которого соединен с вращающейся заслонкой, позволило проводить эксперименты в широком диапазоне частот вынужденных пульсаций потока. При помощи пульсатора устанавливались значения средней скорости потока, частоты и амплитуды пульсационной составляющей. Ресивер 5 сглаживал пульсации потока перед ультразвуковым расходомером ИРВИС-РС4-Ультра, при помощи которого измерялся с относительной погрешностью не более 1% средний расход воздуха. Векторные поля скорости потока измерялись методом цифровой обработки данных видеосъемки дымовой визуализации SIV. Для этого на входе в канал

осуществлялся равномерный по сечению подвод аэрозоля из полости 1, а в плоскости симметрии канала в измерительной области выполнялась подсветка потока световым ножом толщиной не более 1 мм, создаваемым лазером непрерывного действия 6. Съемка выполнялась высокоскоростной монохромной видеокамерой Fastec HiSpec с разрешением кадра до 1280×1024 пикселя.

Средняя по времени и сечению канала скорость пульсирующего потока U в экспериментах изменялась от 4,7 до 7,2 м/с, частота пульсаций f от 6 до 130 Гц, относительная амплитуда пульсаций β (отношение сглаженного и статистически осредненного полуразмаха нестационарной составляющей скорости к ее средней величине) варьировалась от 0,13 до 0,89. Измерительная область располагалась на расстоянии 1 м от входного сечения. Число Рейнольдса по длине пластины до измерительного сечения $3 \cdot 10^5 < Re < 4,6 \cdot 10^5$. В области измерительного сечения течение при стационарном потоке в канале было близким к развитому трубному, поэтому число Струхали $Sh = fD/U_*$ оценивалось по гидравлическому диаметру D и средней за период колебаний динамической скорости $U_* = \sqrt{\tau_w/\rho}$. Напряжения поверхностного трения оценивались на основе градиента скорости $\tau_w \cong \mu \Delta U / \Delta y$ при расположении Δy в пределах вязкого подслоя пограничного слоя. Для исследованных режимов число Струхали изменялось в диапазоне от 0,83 до 18, а сами эти режимы по классификации А.В.Фафурина и др. относились к среднечастотным, высокочастотным и быстроосциллирующим. Границы классов определены в координатах $Sh-\beta$. Закон изменения скорости потока по времени был близким к гармоническому.

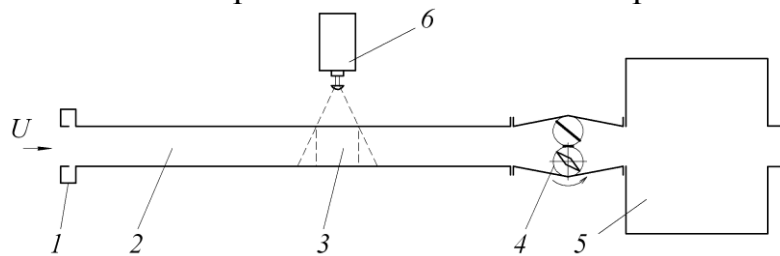


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки

Точки измерения скорости потока по толщине пограничного слоя и по продольной координате задавались с шагом от 0,1 до 0,5 мм (с округлением до цены пикселя). В каждой точке осциллограммы двух компонент вектора скорости разделялись на нестационарную и турбулентную составляющие. Нестационарная составляющая компонент U_x и U_y (далее индексы компонент опущены) определялась путем сглаживания методом наименьших квадратов фрагмента осциллограммы длительностью 2–3 периода вынужденных пульсаций функцией

$$\tilde{U}(t) = \sum_{i=0}^n c_i t^i + c_{n+1} \sin(2\pi ft) + c_{n+2} \cos(2\pi ft), \quad (1)$$

где последние два слагаемых описывают колебания на основной гармонике, а полином степени n не более 8 исключал низкочастотные отклонения скорости потока в эксперименте от гармонического закона. Последовательно такими интервалами с частичным перекрытием (порядка 20%) охватывалась вся осциллограмма, а значения функции \tilde{U} вычислялись в центральной области интервала. Турбулентная составляющая (по компонентам) определялась как разность мгновенного и нестационарного значений скорости \tilde{U} (рисунок 2):

$$u' = U - \tilde{U}. \quad (2)$$

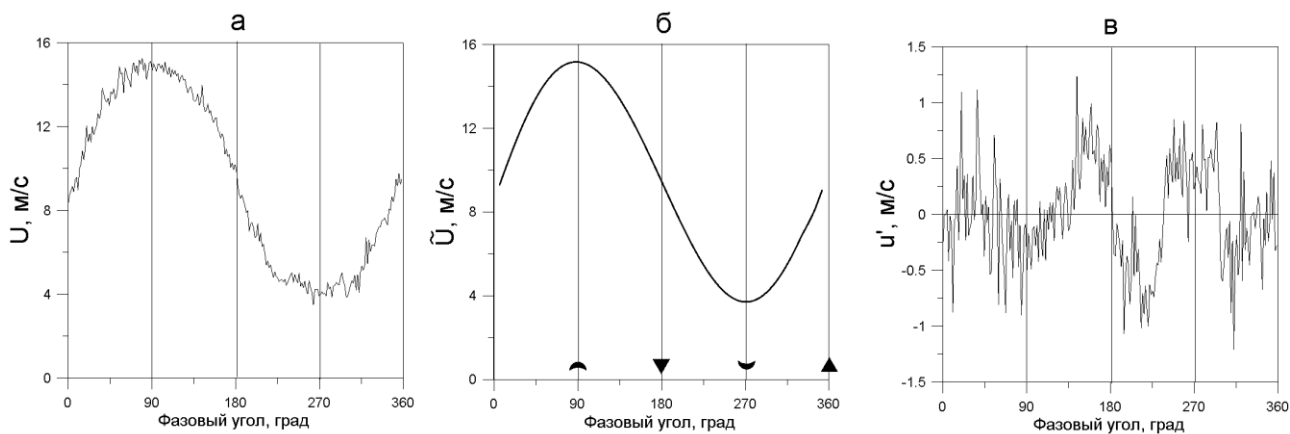


Рисунок 2 – Результат выделения турбулентной (в) и нестационарной (б) составляющих из мгновенной скорости (а); $Y=D/2$, $Sh=0,83$, $\beta=0,4$

Нестационарная и турбулентная составляющие скорости усреднялись по фазе пульсаций скорости потока на оси канала. Для определения фазового угла использовалась нестационарная составляющая продольной компоненты скорости. Момент времени, при котором значение нестационарной составляющей в фазе нарастания совпадало со средней за период скоростью, принимался за нулевой фазовый угол (рисунок 2,б). Период разбивался на 20 интервалов шириной 18 градусов при симметричном расположении относительно центра интервала, начиная с 0. В каждом интервале по фазовому углу оценивались средние значения компонент скорости, кинетической энергии турбулентности k и скорости её диссипации ϵ

$$k = \frac{\overline{u'_i u'_i}}{2}, \quad \epsilon = \nu \frac{\partial u'_y}{\partial x} \frac{\partial u'_x}{\partial y} \quad (3)$$

где ν – кинематическая вязкость. Производные по пространственным координатам оценивались на основе разностных аналогов по результатам одновременных измерений двух компонент вектора скорости на большом массиве точек пространства.

При численном моделировании расчетная геометрическая модель соответствовала экспериментальной установке. В качестве граничного условия на входе в канал использовалось условие постоянства величины полного давления и полученная экспериментально величина средней интенсивности турбулентности $T_u = \sqrt{u'^2} / \tilde{U}$. Решение задачи проведено на структурированной гексаэдральной расчетной сетке. Тип сопряжения узлов – интегральный, в области пульсатора – блочная сетка с несопрягающимися поверхностями. Размер ячеек в области пограничного слоя корректировался в процессе расчета с помощью адаптации по величине Y^+ . Каждый режим течения рассчитывался на индивидуальной сетке. Решение было проверено на устойчивость к измельчению расчетной сетки.

В расчетах использовался решатель ANSYS Fluent pressure-based с пространственной дискретизацией третьего порядка. Для проведения численного моделирования пульсирующего потока к квадратному каналу был добавлен участок с пульсатором. Область вокруг заслонки рассматривалась как отдельное тело с заданной угловой скоростью вращения.

Для проведения расчетов использовалась модель турбулентности k- ϵ Standard со стандартными значениями параметров (SKE) и со значениями

(SKE*), полученными на основе экспериментальных данных с использованием предложенного в главе 3 диссертационной работы метода.

В главе 3 приведен математический метод определения параметров моделей турбулентности на основе решения обратной задачи для системы уравнений URANS с использованием данных о динамике векторного поля скорости потока.

После проведения эксперимента и цифровой обработки данных становятся известными нестационарные и турбулентные составляющие векторов скорости, полученные с использованием (1, 2). По этим значениям можно определить компоненты тензоров скоростей деформаций и напряжений Рейнольдса. Согласно определению, под моделью турбулентности понимается оператор, связывающий эти два тензора, поэтому появляется возможность оценки и корректировки используемых в операторе параметров.

В качестве исследуемой модели турбулентности в диссертационной работе выбрана изотропная модель k-ε Standard, состоящая из уравнений сохранения кинетической энергии турбулентности (4) и скорости её диссипации (5)

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial k}{\partial t} + u_i \frac{\partial k}{\partial x_i} + k \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left(\mu + \frac{\rho C_\mu k^2}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right\} - \overline{u_i u_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \varepsilon - 2\varepsilon \frac{k}{\gamma RT}, \end{array} \right. \quad (4)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\varepsilon u_i) = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left(\mu + \frac{\rho C_\mu k^2}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right\} - C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} \overline{u_i u_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k}. \end{array} \right. \quad (5)$$

Следует отметить, что с теоретической и практической точек зрения в предлагаемом методе в качестве рабочей модели можно рассматривать большинство из предложенных в литературе моделей турбулентности.

Следующим этапом была подстановка экспериментально определенных значений (параметров потока u , u' , k , ε и их частных производных по времени и пространству) в системы уравнений (4, 5), записанных для каждой точки пространства и интервала фазового угла. В результате подстановки и преобразований системы нелинейных дифференциальных уравнений (4, 5) свелись к системам нелинейных алгебраических уравнений (6) относительно пяти параметров модели турбулентности

$$\left\{ \begin{array}{l} A_1 \frac{C_\mu}{\sigma_k} + A_2 = \Delta_k \\ A_3 C_{1\varepsilon} + A_4 \frac{C_\mu}{\sigma_\varepsilon} + A_5 C_{2\varepsilon} + A_6 = \Delta_\varepsilon, \end{array} \right. \quad (6)$$

где $A_j \in \mathbb{R}$ – комплексы, возникающие после преобразований уравнений (4, 5) и подстановки измеренных в эксперименте величин, Δ_k и Δ_ε – невязки, возникающие при подстановке измеренных в эксперименте величин в (4, 5).

Задача определения значений C_μ , $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, σ_k и σ_ε , обеспечивающих минимальное значение среднеквадратических невязок Δ_k и Δ_ε , решалась методом наименьших квадратов. При решении системы URANS использовались единые значения параметров модели турбулентности для всей области течения, поэтому сформулированная целевая функция Φ (7) с весовыми коэффициентами a_k и

a_ε , отображала сумму квадратических отклонений величин Δ_k и Δ_ε по всем точкам области и фазам течения

$$\Phi(C_\mu, C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, \sigma_k, \sigma_\varepsilon) = a_k \left(\sum_{x,y,t} \Delta_k \right)^2 + a_\varepsilon \left(\sum_{x,y,t} \Delta_\varepsilon \right)^2. \quad (7)$$

Для разделения переменных C_μ , σ_k и σ_ε необходимо использовать еще одно уравнение. В литературе встречаются полученные лишь для частных случаев эмпирические соотношения, связывающие эти три параметра. Поэтому значение параметра C_μ было принято равным стандартному значению 0,09.

В **главе 4** представлены экспериментальные и численные результаты для стационарного и пульсирующего потока в канале квадратного сечения. Проведено сравнение измеренных величин с измерениями других авторов.

Полученные экспериментально профили характеристик стационарного течения при различных числах Re , рассчитанные в координатах закона стенки

$$Y^+ = \frac{yU_*}{\nu}, \quad U^+ = \frac{U}{U_*}, \quad k^+ = \frac{k}{U_*^2}, \quad e^+ = \frac{e\nu}{U_*^4}, \quad (8)$$

представлены на рисунке 3. По аналогии с U^+ и k^+ в диссертационной работе предложено соотношение для выражения безразмерной величины скорости диссипации кинетической энергии турбулентности e^+ (8).

Как видно из рисунка 3, экспериментальные данные хорошо согласуются с универсальным логарифмическим профилем скорости и данными Хьюзера и Биринджена, полученными в результате решения задачи о стационарном турбулентном течении в канале квадратного поперечного сечения методом прямого численного моделирования.

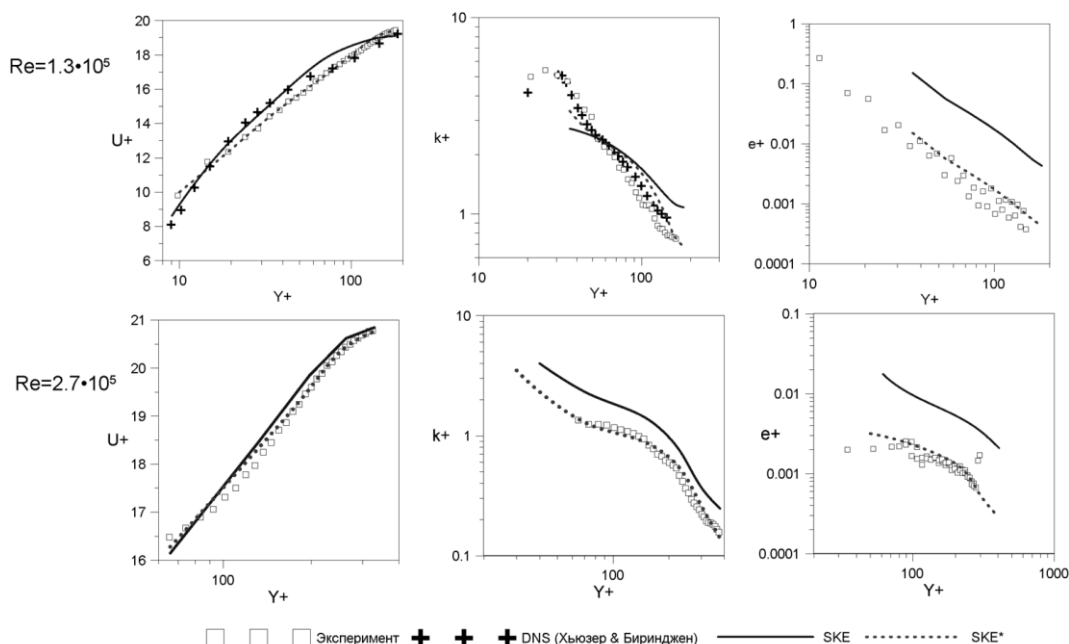


Рисунок 3 – Профили скорости и турбулентных характеристик полученные экспериментально, по результатам DNS и решения RANS с использованием моделей SKE и SKE*

С помощью предложенного в главе 3 метода для различных режимов стационарного течения были получены следующие уточненные значения параметров модели турбулентности (SKE*) (таблица 1):

Таблица 1 – Значения параметров модели турбулентности для стационарного течения в канале квадратного сечения

Параметр Модель	Re	C_μ	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	σ_k	σ_ε
SKE*	$1,3 \cdot 10^5$	0,09	1,40	2,09	1,05	1,38
	$2,7 \cdot 10^5$	0,09	1,46	2,18	1,08	1,36
SKE	-	0,09	1,44	1,92	1,00	1,30

Расчетные значения переменных U^+ , k^+ и ε^+ , представленные на рисунке 3, получены решением системы RANS. В качестве замыкающих уравнений использована модель турбулентности k-ε Standard со стандартными параметрами (сплошная линия) и с параметрами, определенными с использованием полученных экспериментальных данных по предложенному в главе 3 методу (пунктирная линия). Для оценки погрешности CFD решения в работе использовано среднеквадратическое отклонение расчетных значений характеристик (8) от экспериментальных в точках пограничного слоя.

Для режима, со значением числа $Re=1.3 \cdot 10^5$ (более близкому к $Re_{кр}$), использование уточненных значений параметров в модели k-ε снижает погрешность CFD расчета U^+ на 6%. Для режима $Re=2.7 \cdot 10^5$ погрешности расчета U^+ с использованием моделей SKE и SKE* сравнимы и составляют менее 1%. Более существенное влияние корректировки параметров модели турбулентности наблюдается по турбулентным характеристикам k и ε.

На рисунке 4 представлена карта исследованных пульсирующих режимов течения, совмещенная с классификацией М.М.Григорьева, В.В. Кузьмина и А.В. Фафурина. Экспериментально исследованные режимы нестационарного течения в канале квадратного сечения лежат в трех областях карты пульсирующих потоков: 3-среднечастотной («■»), 4-высокочастотной («▲», «●», «▣», ▽) и 5-быстро-осциллирующей («○», «□», «△»).

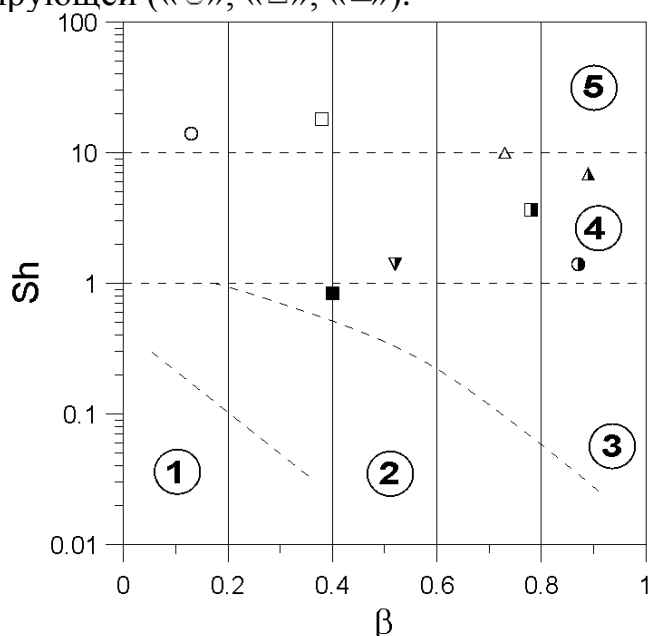


Рисунок 4 – Карта исследованных режимов пульсирующих режимов

Характеристики исследованных режимов представлены в таблице 2. Представленные в таблице 2 условные обозначения режимов сохраняются на всех рисунках данной работы.

Таблица 2 – Характеристики исследованных режимов пульсирующих течений

Режим	\bar{u} , м/с	f, Гц	Sh	β
■	8,85	6	0,83	0,40
▼	6,53	10	1,39	0,52
▣	8,85	25	3,47	0,78
●	8,85	10	1,39	0,87
▲	5,17	50	6,94	0,89
○	6,53	100	13,9	0,13
□	6,53	130	18,0	0,38
△	5,17	72	10,0	0,73

Для четырех характерных фаз периода вынужденных колебаний профили скорости и характеристик турбулентности представлены на рисунке 5 (▲ – фаза максимального ускорения потока, ◐ – фаза максимальной скорости, ▼ – фаза торможения потока, ◑ – фаза минимальной скорости (рисунок 2,б). Для сравнения на рисунке линиями представлены усредненные данные измерений профилей скорости и характеристик турбулентности на стационарном режиме $Re=1,3 \cdot 10^5$.

Как видно из рисунка 4, нестационарные профили продольной компоненты скорости, кинетической энергии турбулентности и скорости её диссипации существенно отличаются в различных фазах вынужденных колебаний потока. Для обоих режимов профили U^+ деформируются главным образом вблизи обтекаемой поверхности. Для среднечастотного режима воздействие колебаний потока на профиль средней скорости еще сохраняет подобие квазистационарного влияния – наиболее наполненным оказывается профиль в фазе ускорения потока, менее наполненный – в фазе торможения. При высокочастотных колебаниях наибольшая и наименьшая наполненность профиля соответствует фазам максимальной и минимальной скорости внешнего потока. В профилях U^+ в области координаты $Y^+ \approx 100-200$ появляются точки перегиба. Если же профили скорости усреднить по времени, отклонение от профиля в стационарном потоке окажется не таким большим.

Профили $k^+(Y^+)$ и $\epsilon^+(Y^+)$ при среднечастотных пульсациях группируются вблизи соответствующих профилей для стационарного потока, а на высокочастотных режимах расслаиваются по фазам колебаний внешнего потока. Значительное отклонение от стационарного уровня характерно для турбулентных характеристик k^+ и ϵ^+ в фазе, соответствующей минимальной скорости внешнего потока. Следует отметить, однако, что на высокочастотных режимах, представленных на рисунке 5, поток в пристеночной области в фазе торможения и минимальной скорости был предотрывным.

Из-за ограничений, связанных с характеристиками видеокамеры, количество кадров на период колебаний при быстро-осцилирующем режиме оказалось недостаточным для выделения турбулентной составляющей скорости. Поэтому анализ эволюции профилей $k^+(Y^+)$ и $\epsilon^+(Y^+)$ для этого режима в работе не представлен.

Анализ изменения средней скорости и характеристик турбулентности по фазовому углу вынужденных колебаний показал наличие заметных фазовых сдвигов относительно фазы колебаний потока на оси канала, к тому же этот сдвиг на 10° и более изменяется по толщине пограничного слоя (рисунок 6).

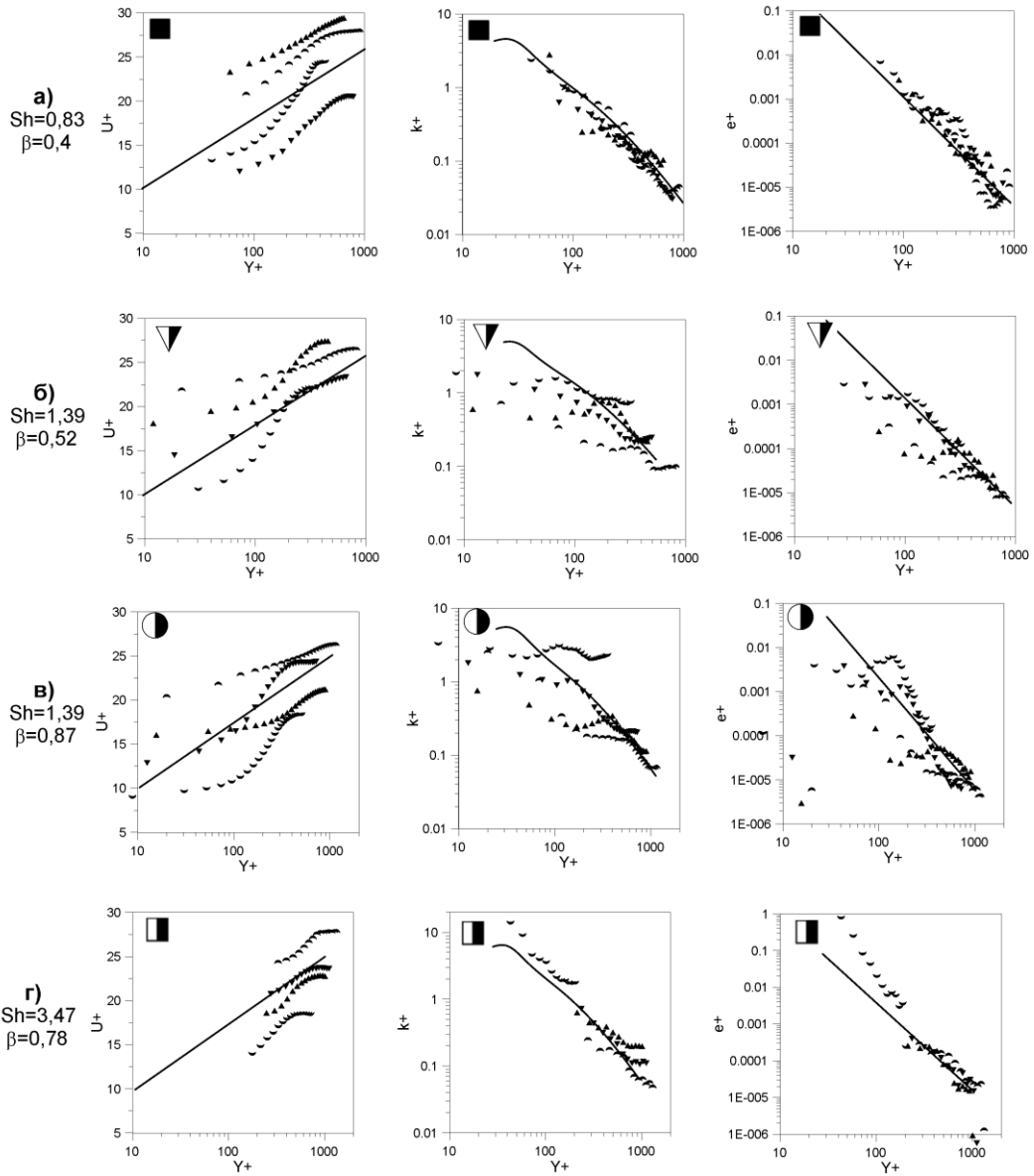


Рисунок 5 – Профили скорости и характеристик турбулентности; $\square, \blacktriangle, \triangle, \circ, \ominus$ - экспериментальные данные в различных фазах периода пульсации, --- - экспериментальные данные, стационарное течение, $Re=1.34 \cdot 10^5$

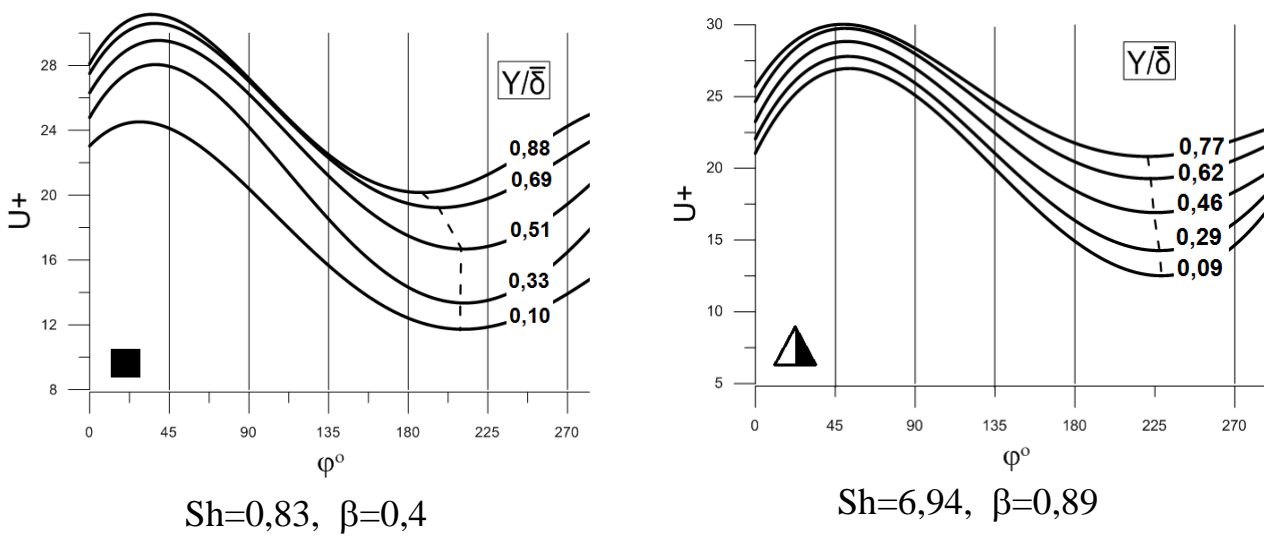


Рисунок 6 – Изменение U^+ по фазовому углу и толщине пограничного слоя

Анализ результатов выполненного экспериментального исследования и результатов других авторов указывает на существенное влияние нестационарности на профили скорости и турбулентные характеристики среднечастотных и высокочастотных режимов пульсирующего течения. Данные режимы достаточно плохо описываются базовыми постановками изотропных квазистационарных моделей турбулентности, в частности моделью турбулентности k-ε со стандартными значениями параметров (SKE).

Применение представленного в главе 3 диссертационной работы метода позволило уточнить стандартные значения параметров, входящих в уравнения модели k-ε Standard. В данном разделе работы рассмотрены среднечастотный режим «☒» и высокочастотный режим «■». Расчетные значения переменных (8) получены решением системы URANS, в качестве замыкающих уравнений использована модель турбулентности k-ε Standard со стандартными параметрами (SKE) и с параметрами, определенными с использованием полученных экспериментальных данных по предложенному в главе 3 методу (SKE*) (таблица 3).

Таблица 3 – Стандартные (SKE) и уточненные (SKE*) параметры модели турбулентности k-ε Standard

Параметр Модель	Режим	C_μ	$C_{\epsilon 1}$	$C_{\epsilon 2}$	σ_k	σ_ϵ
SKE	-	0,09	1,44	1,92	1,03	1,30
SKE*	☒	0,09	1,44	1,25	0,96	1,25
SKE*	■	0,09	1,43	0,89	0,92	1,05

Анализ представленных в таблице 3 параметров модели k-ε показывает влияние нестационарности на значения параметров $C_{2\epsilon}$ и σ_ϵ .

Параметр $C_{2\epsilon}$ входит в источниковый член уравнения переноса скорости диссипации турбулентной кинетической энергии и, следовательно, определяет скорость затухания турбулентности. Стандартное значение получено на основе экспериментальных данных по затуханию турбулентности в однородном потоке за решеткой. Влияние типа индуцирования турбулентности на данный параметр также выявлено другими авторами в работах, посвященных неустойчивости Рихтмайера-Мешкова, течениям в рециркуляционных зонах и закрученным потокам. Развитие турбулентности Рихтмайера-Мешкова, а именно асимптотическое поведение ширины турбулентной зоны при больших временах определяется ее начальными условиями, другими словами, развитие турбулентности помнит свою предисторию. При этом ширина этой зоны явно зависит лишь от одного параметра $C_{2\epsilon}$. На основании этого вывода можно сделать предположение, что в рассмотренных пульсирующих течениях на текущие значения k и ε оказывают влияние их значения на предыдущем итерационном шаге по времени и именно с этим связано изменение $C_{2\epsilon}$.

Турбулентное число Прандтля σ_ϵ регулирует величину турбулентной вязкости в уравнении переноса скорости диссипации турбулентной кинетической энергии. Стандартное значение $\sigma_\epsilon=1,3$ получено по условию описания логарифмического профиля скорости в турбулентном пограничном слое, а при выводе использованы фиксированные значения параметров $C_{\epsilon 1}=1.44$ и $C_{\epsilon 2}=1.92$.

Уравнения модели турбулентности, содержащие рассмотренные параметры, являются нелинейными дифференциальными уравнениями эволюционного типа генерации и диссипации кинетической энергии турбулентности, причем параметры модели влияют на решение совместно. По этой причине выводы о влиянии параметров на решение задачи в целом можно сделать только после сравнения расчетных значений и динамики профилей основных характеристик течения с аналогичными значениями, полученными экспериментально.

На рисунке 7 представлено изменение динамической скорости по фазе пульсации, полученное экспериментально и по результатам численного моделирования с различными наборами параметров. Результаты CFD в фазах торможения и ускорения хорошо согласуются с экспериментальными данными. В фазах смены знака продольного градиента давления, в особенности для рассмотренного на рисунке высокочастотного режима, поток в пристеночной области в фазе торможения и минимальной скорости был предотрывным, наблюдается более существенное расхождение экспериментальных данных и результатов CFD.

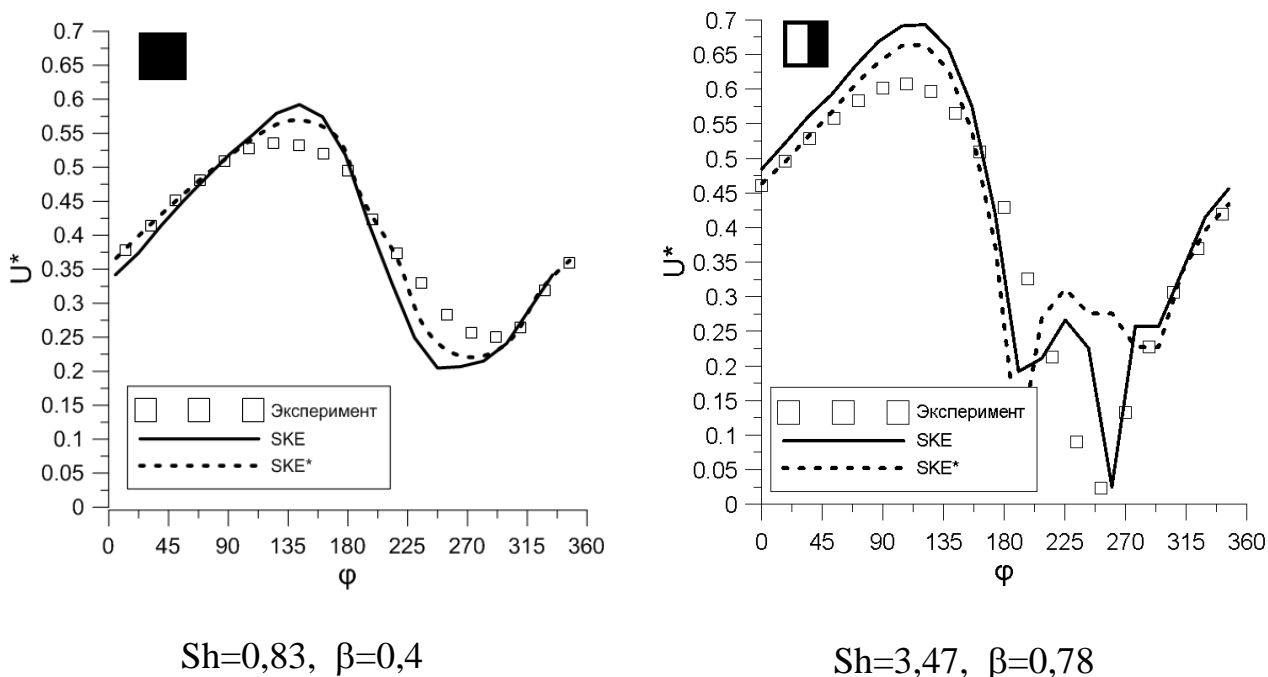


Рисунок 7 - Изменение U_* по фазе пульсации внешней скорости

Представленные в главе 4 результаты численного расчета среднечастотного (рисунок 8) и высокочастотного режимов и величины оцененных погрешностей, показывают, что использование уточненных значений параметров модели турбулентности k-е Standard позволяет снизить погрешность расчета U^+ в зависимости от фазы и режима течения на 2-50%. Несмотря на то, что модель k-е Standard приводит к сильно завышенным значениям k^+ и e^+ , использование уточненных значений параметров позволяет значительно понизить погрешность расчета турбулентных характеристик.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы.

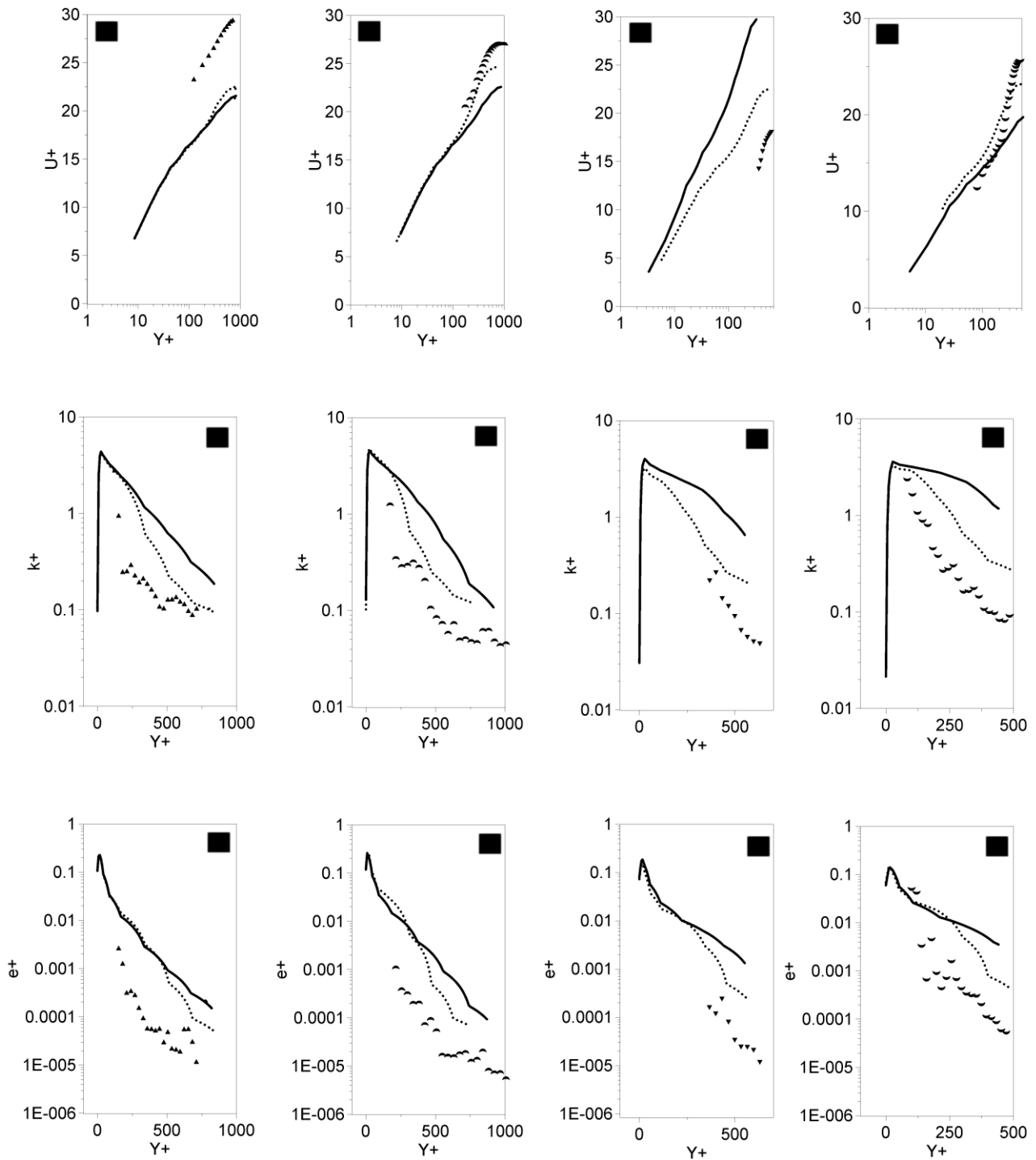


Рисунок 8 – Профили скорости и турбулентных характеристик.

Среднечастотный режим, $Sh=0.83$, $\beta=0.4$;

□, △, ○, ● - экспериментальные данные в различных фазах периода пульсации, — - модель SKE, ····· - модель SKE*

Основные результаты и выводы

1. Получены экспериментальные данные об эволюции профилей осредненной скорости, кинетической энергии турбулентности и скорости её диссипации в пограничном слое на пластине по фазе вынужденных колебаний внешнего потока для среднечастотных и высокочастотных режимов течения пульсирующего потока.
2. Для высокочастотных режимов в пристеночной области выявлено расслоение представленных в координатах закона стенки Y^+ профилей U^+ , k^+ и e^+ по фазе вынужденных колебаний потока. Для профилей U^+ выявлено наличие точки перегиба в районе координаты $100 < Y^+ < 200$.
3. Для высокочастотных режимов выявлено влияние нестационарности на турбулентные характеристики, в частности, выявлено значительное увеличение значений k^+ и e^+ в фазе, соответствующей минимальной скорости на оси канала. Для среднечастотного режима существенного влияния нестационарности на профили турбулентных характеристик не выявлено.
4. Для среднечастотного и высокочастотного режимов выявлены фазовые сдвиги средней скорости, кинетической энергии турбулентности и скорости её диссипации в пограничном слое пульсирующего относительно фазы колебаний скорости на оси канала. Изменение U^+ происходит по близкому к гармоническому закону, однако в области, близкой к стенке наблюдается запаздывание по фазе, где фазовый угол имеет отрицательное значение, для больших расстояний по нормали к стенке фазовый угол положителен.
5. Предложен математический метод определения параметров моделей турбулентности на основе решения обратной нестационарной задачи для системы уравнений URANS на основе экспериментальных данных о динамике векторного поля скорости потока. Метод апробирован для модели k-e Standard.
6. Для исследованных режимов течения получены значения параметров модели турбулентности k-e Standard для пограничного слоя на плоской стенке канала в условиях гармонических пульсаций скорости потока. Выявлено влияние безразмерной частоты Sh и относительной амплитуды β пульсации скорости потока на параметры уравнения сохранения скорости диссипации кинетической энергии. По сравнению со стационарным потоком наиболее существенные изменения получены для параметра σ_e при турбулентной вязкости и параметра C_{2e} при источниковом члене.
7. Показано, что изменением параметров модели турбулентности можно уменьшить расхождение результатов численного моделирования с опытными данными на 2-50% для профилей продольной скорости и многократно для профилей кинетической энергии турбулентности и скорости её диссипации по фазе пульсаций потока.

Основные обозначения

D – гидравл. диаметр; e – скорость дисс. кинет. энергии турбулентн.; f – частота пульсаций средней скорости потока; k – кинет. энергия турбулентн.; t – время; U – скорость потока; U_* – дин. скорость потока; u' – пульсация компоненты вектора скорости; Y – расстояние до твердой стенки канала; μ , ν – дин. и кин. вязкость; ρ – плотность; β – относительная амплитуда пульсации скорости; Sh , Re – числа Струхала, Рейнольдса; DNS – прямое численное моделирование; LES – метод крупных вихрей; URANS – система нестационарного осреднения по Рейнольдсу уравнений Навь-Стокса.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Саушин, И. И. Метод и результаты оценки параметров модели турбулентности $k-\epsilon$ на основе экспериментальных полей скоростей / Н. И. Михеев, И. И. Саушин // Труды Академэнерго. – 2013. – №3. – С. 17–25.

2. Саушин, И. И. Численное моделирование градуировки ультразвукового расходомера природного газа / Н. И. Михеев, И. И. Саушин, Д. В. Кратиров, В. А. Фафурин // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – Т.16. – С. 225–228.

Публикации в других изданиях, сборниках и материалах конференций

1. Саушин, И. И. Метод и результаты оценки параметров модели турбулентности $k-\epsilon$ на основе экспериментальных полей скоростей / И.И.Саушин, Н.И.Михеев, О.А.Душина // Труды XIX школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И.Леонтьева. Проблемы газовой динамики и тепломассообмена в энергетических установках – Орехово-Зуево, 20-24 мая 2013. – М.: ПЦ МЭИ, 2013. – С. 68–69.

2. Саушин, И. И. Расчет эмпирических констант $k-\epsilon$ модели турбулентности на основе экспериментальных данных по полям скорости потока / И.И.Саушин, Н.И.Михеев // Труды VIII школы-семинара молодых ученых и специалистов академика РАН В.Е. Алемасова – Казань, 16-18 октября 2012. – Казань: Академэнерго, 2012. – С. 19-20.

3. Саушин, И.И. Метод и результаты оценки параметров модели турбулентности $k-\epsilon$ на основе экспериментальных полей потока / И.И.Саушин, Н.И.Михеев // Труды IX Школы-семинара молодых ученых и специалистов академика РАН В.Е.Алемасова. Проблемы тепломассообмена и гидродинамики в энергомашиностроении – Казань, 10-12 сентября 2014. – Казань: Академэнерго, 2014. – С. 154–156.

4. Саушин, И.И. Метод и результаты оценки параметров модели турбулентности $k-\epsilon$ на основе экспериментальных полей скоростей / И.И.Саушин, Н.И.Михеев // Материалы XXI Международной молодежной научной конференции "Туполевские чтения" – Казань, 19-21 ноября 2014. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун., 2013. –Т.2. – С. 285–286.

5. Саушин, И.И. Использование весовых коэффициентов в методе оценки параметров моделей турбулентности на основе экспериментальных полей скоростей / И.И.Саушин, Н.И.Михеев // Труды IX Международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения» установках – Казань, 23-25 апреля 2014. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2014. –Т.2. – С. 121–123.

6. Саушин, И.И. Экспериментальная оценка и численное моделирование характеристик ультразвукового расходомера с конфузорной некруглой проточной частью / И.И.Саушин, Н.И.Михеев // Модели и методы аэродинамики: материалы XII Международной школы-семинара. Евпатория, 3-12 июня 2012. – М.: МЦНМО, 2012. – С. 147–147.

7. Саушин, И. И. Турбулентность в пограничном слое пульсирующего потока / И.И.Саушин, Н.И.Михеев // Труды XX школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И.Леонтьева. Проблемы газовой динамики и тепломассообмена в энергетических установках – Звенигород, 25-29 мая 2015. – М.: ПЦ МЭИ, 2015. – С. 75–76.

Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 0,93. Тираж 120. Заказ Д38.

Полиграфический участок Издательства КНИТУ-КАИ.
420111, г.Казань, ул. К. Маркса, 10