

УДК 532.526 + 536.244

О ФИЗИЧЕСКИХ ПРИНЦИПАХ ВЛИЯНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ НЕСТАЦИОНАРНОСТИ НА ТУРБУЛЕНТНОЕ ТЕЧЕНИЕ

© 2009 В. М. Краев, А. И. Тихонов

Московский авиационный институт (государственный технический университет)

Приводится анализ влияния неизотермичности и гидродинамической нестационарности на порождение и развитие турбулентности. Предложена физическая модель гидродинамически нестационарного турбулентного течения, созданная на основе проведенных ранее экспериментальных исследований по изучению структуры нестационарного турбулентного потока при течении газа в канале.

Турбулентность, пульсации, гидродинамическая нестационарность, структура течения, теплообмен и гидравлическое сопротивление.

Расчеты нестационарных тепловых и гидродинамических процессов ставятся в ряд определяющих при разработке новых образцов техники в различных областях - в авиации и космонавтике, энергетике, судостроении, криогенной технике, химической технологии и т.д. Это вызвано возрастанием энергонапряженности устройств, повышением требований к возможным режимам регулирования работы этих систем. Особое место занимают вопросы безопасности и надежности, а это означает необходимость расчета аварийных режимов, которые являются существенно нестационарными. Поэтому исследование нестационарных процессов теплообмена и гидродинамики и разработка методики их расчета представляют чрезвычайно актуальную для инженерной практики задачу.

Очевидно, что инженерные расчеты по теплообмену и гидродинамике могут быть выполнены при условии фундаментального изучения нестационарных процессов. Лишь органичное сочетание фундаментальных и прикладных исследований является наиболее эффективным путем получения практических результатов.

Проведенные в МАИ исследования турбулентной структуры потоков показали существенное влияние нестационарности расхода на структуру потока. Настоящая работа посвящена анализу физических процессов, связанных с влиянием неизотермичности и

нестационарности расхода на механизмы порождения и развития турбулентности.

Методика исследований и экспериментальная установка. Методика экспериментальных исследований была разработана для изучения структуры турбулентных газовых потоков в стационарных и нестационарных, изотермических и неизотермических условиях. Результаты измерений получены с помощью термоанемометрической системы.

Исследования проводились в условиях гидродинамической нестационарности, т.е. при изменении во времени расхода газа в канале $d = 42$ мм ($\delta G/\delta \tau \neq 0$) - ускорении и замедлении. Неизотермичность течения достигалась нагревом стенки канала и соответствовала температурному фактору $T_w/T_f = 1.1, 1.8$. Экспериментальная установка позволяла реализовать гидродинамическую нестационарность в широком диапазоне изменения расхода газа - до $|\delta G/\delta \tau| = 0,02$ кг/с². Время нестационарного процесса варьировалось в диапазоне от 2 до 5 с для различных режимов. Нестационарный режим течения характеризовался коэффициентом гидродинамической нестационарности, который изменялся в диапазоне $-0,111 \dots 0,111$:

$$Kg^* = \frac{\delta G}{\delta \tau} \frac{1}{G} \sqrt{\frac{d}{g}},$$

где G - расход газа, кг/с; τ - время, с; d - диаметр канала, м; g - ускорение свободного падения, м/с².

Более подробно методика экспериментальных исследований и описание экспериментальной установки изложены в работе [1].

Структура турбулентного потока в случае гидродинамической нестационарности при изотермических условиях. При ускорении течения профиль скорости становится более заполненным, что вполне согласуется с известными данными, в частности, с данными С. Б.Маркова [2], а также результатами предыдущих исследований в МАИ [3-10]. Полученное отличие от квазистационарных значений достигает 10 % в ядре и 15 % в пристеночной зоне. При замедлении наблюдается обратная картина: в пристеночной зоне осевая скорость снижается по отношению к квазистационарным значениям, а в ядре становится выше. При этом сама протяженность зоны существенных изменений скорости около стенки меньше, чем при ускорении, и составляет $y/R=0,05...0,2$ (y/R – безразмерное расстояние от стенки канала), абсолютная величина отличий от квазистационарных значений достигает 25 % около стенки и 10 % в ядре.

Рассмотрим влияние нестационарности на пульсации осевого компонента скорости. Вблизи стенки (зона $y/R < 0,2$) ускорение потока даёт увеличение пульсаций на 20-40%, а замедление - уменьшение на 10-25% по сравнению с квазистационарными значениями. В центральной зоне потока ($y/R > 0,6$) влияние нестационарности на пульсации несущественно (в пределах 5-8%). Величина отличий определяется степенью нестационарности и максимальна при максимуме критерия гидродинамической нестационарности $|K_g^*|$.

При ускорении потока поперечные пульсации вблизи стенки достигают 1,3 от стационарных значений, в ядре потока их значения несколько ниже: 1,0. При замедлении потока пульсации радиальной скорости меньше квазистационарных: в зоне $y/R=0,2...0,6$ различие достигает 30 %, в ядре потока оно не превышает двух-четырех процентов. Это вполне согласуется с результатами С.Б.Маркова [2], которые показывают также снижение интенсивности турбулентности в ядре потока при ускорении по срав-

нению со стационарным течением. Также видно, что как при замедлении, так и при ускорении потока зона повышенной интенсивности турбулентного движения смещается к оси канала.

Данные по корреляциям пульсаций скорости показывают особую роль зоны $y/R=0,1...0,3$ в формировании турбулентного движения. При ускорении потока корреляции в ней возрастают до 2,5...2,7 раз, а при замедлении - составляют 0,4...0,5 от квазистационарных значений. Видно, что с течением нестационарного процесса зона максимума корреляций постепенно смещается к оси канала.

Возникает закономерный вопрос: почему корреляции пульсаций скорости изменяются в несколько раз, а сами пульсации составляющих скорости не более, чем в 1,3...1,4 раза? Дело заключается в том, что приведённые данные по пульсационным составляющим являются осреднёнными, а при вычислении корреляций вначале проводилось перемножение пульсаций и лишь затем осреднение корреляций. Это свидетельствует о наличии упорядоченного механизма изменения структуры потока при нестационарных воздействиях.

Структура турбулентного потока в случае гидродинамической нестационарности в неизотермических условиях. При ускорении газового потока профиль осевой скорости, как и в изотермическом случае, становится более заполненным, однако влияние нестационарности выражено ярче: максимальное отличие осевой скорости от стационарных условий при $K_g^*=0,111$ достигает 40...43 %, тогда как в изотермическом случае - 30 %.

При замедлении потока профиль осевой скорости становится менее заполненным, и сравнительный анализ в изотермических и неизотермических условиях показывает изменение осевой скорости при нагреве стенки канала и $K_g^*=-0,111$ на 20 % и 35% соответственно. Также следует отметить сужение пристеночной зоны в неизотермических условиях ($y/R=0,01...0,15$), в то время как в изотермическом случае $y/R=0,05...0,4$.

Максимальное увеличение уровня пульсаций осевой скорости наблюдалось при максимальном ускорении потока, которому соответствует время середины процесса, и наименьшем значении числа Рейнольдса (режим $Re=3100...9300$). Максимальное значение критерия гидродинамической нестационарности - $|K_g^*|=0,111$. Наиболее заметные изменения происходят в зоне $y/R=0,0...0,2$: при ускорении потока осевые пульсации выше стационарных значений на 30...40 %, а при замедлении - ниже на 30...35 %. Влияние нестационарности на осевые пульсации усиливается с ростом $|K_g^*|$ ($Re=const$) и уменьшением числа Рейнольдса ($|K_g^*|=const$).

Если сравнить эти профили с аналогичными в изотермических условиях, то видно, что возврат характеристик потока к первоначальному стационарному уровню в неизотермических условиях происходит медленнее. Также существует еще одно отличие: в неизотермических условиях практически не наблюдается перемещения максимума пульсаций осевой скорости к центру потока.

Радиальные пульсации скорости при ускорении газового потока в зоне $y/R=0,05...0,3$ увеличиваются до 25...27 %, а в ядре остаются примерно на уровне квазистационарных значений. При уменьшении расхода наблюдается снижение радиальных пульсаций на 5...8 % в зоне $y/R=0,1...0,4$, в ядре потока их значения находятся на уровне стационарных. Влияние нестационарности на радиальные пульсации усиливается с ростом $|K_g^*|$ ($Re=const$) и уменьшением числа Рейнольдса ($|K_g^*|=const$).

По сравнению с изотермическими условиями возврат профилей радиальных пульсаций к стационарным значениям с течением времени сильно замедлен. Также практически не отмечается перемещение максимума пульсаций по направлению к ядру потока.

При анализе профилей корреляции осевых и радиальных пульсаций скорости наблюдается та же качественная картина, что и на графиках радиальных пульсаций. Основное отличие заключается в существенном количественном несоответствии корреляций осевым и радиальным пульсациям скорости: при ускорении их значения возрастают на

200...250 % в зоне $y/R=0,05...0,25$, а при замедлении - уменьшаются на 30...50 % в области $y/R=0,1...0,4$. Такое отличие (до 250%) свидетельствует об упорядоченных процессах в турбулентной структуре потоков при нестационарных воздействиях: именно корреляции осевых и радиальных пульсаций скорости определяют турбулентную вязкость потока и гидравлическое сопротивление.

В ядре потока ($y/R=0,4...1$) заметных изменений не наблюдалось. По сравнению с изотермическими опытами сильно замедлен возврат профилей корреляции осевых и радиальных пульсаций к своим стационарным значениям и практически отсутствует перемещение области максимальных корреляций в ядро потока. Влияние нестационарности на уровень корреляции пульсаций: с ростом $|K_g^*|$ ($Re=const$) и уменьшением числа Рейнольдса ($|K_g^*|=const$) усиливается.

Влияние гидродинамической нестационарности на теплообмен и гидравлическое сопротивление. Как уже было отмечено в предыдущих работах [3-4], обнаружено увеличение теплоотдачи при ускорении потока и уменьшение - при замедлении.

С учетом расчётно-экспериментальных данных о профиле коэффициента турбулентной вязкости и осредненной осевой скорости потока был рассчитан коэффициент теплоотдачи по интегралу Лайона. На рис. 1 и 2 приведены графики изменения коэффициента теплоотдачи, рассчитанного по экспериментальным данным ($Re=3100 - 9300$, $|K_g^*| = 0...0,111$, $T_w/T_f = 1,18$, $d = 0,0428$ м), и экспериментальные данные по теплоотдаче, полученные Калининым Э.К. и Дрейцером Г.А. [3] по безразмерному времени нестационарного процесса \overline{No} . Следует отметить, что не найдено качественных различий между данными, полученными авторами, и экспериментальными данными по теплоотдаче [3].

Проведённые до настоящего времени экспериментальные исследования влияния ускорения и замедления течения на коэффициент гидравлического сопротивления не позволяют дать однозначный ответ о том, насколько велико это влияние, о его характере и о применимости квазистационарного подхода.

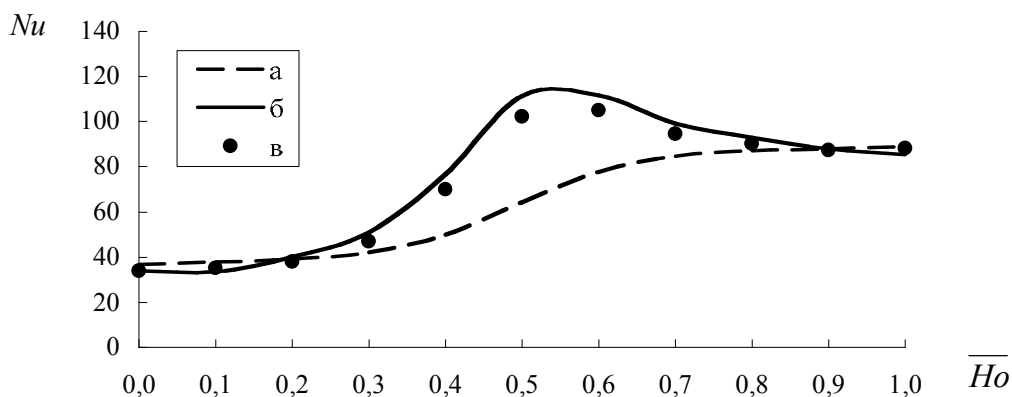


Рис. 1. Влияние ускорения потока на теплообмен при $Re = 3100 - 9300$, $T_w/T_f = 1,18$ (а – квазистационарный расчет, б - авторы, в – эксперимент [3])

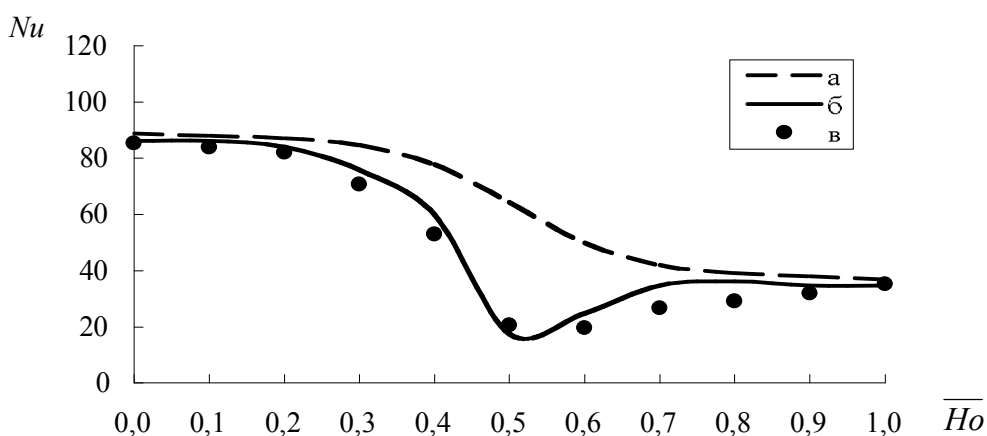


Рис. 2. Влияние замедления потока на теплообмен при $Re = 3100 - 9300$, $T_w/T_f = 1,18$ (а – квазистационарный расчет, б - авторы, в – эксперимент [3])

Полученные экспериментальные данные по структуре потока были использованы для расчета влияния гидродинамической нестационарности на коэффициент гидравлического сопротивления.

Обнаружено, что при ускорении потока коэффициент гидравлического сопротивления может более чем в 2 раза ($K_g^*=0,111$, $Re=3100...9300$) превышать соответствующее квазистационарное значение. При замедлении течения при $K_g^*=0,111$ и $Re=3100...9300$ коэффициент гидравлического сопротивления наблюдался ниже квазистационарного значения приблизительно на 35 %.

На рис. 3, 4 приведены зависимости для коэффициента гидравлического сопротивления при ускорении и замедлении потока соответственно. По горизонтальной оси отло-

жено безразмерное время нестационарного процесса \overline{Ho} . На графиках представлены квазистационарные расчеты, расчеты по зависимостям Маркова С. Б. [2] и Никифорова А. Н., Герасимова С. В. [11] и полученные авторами результаты. Можно отметить, что при качественном совпадении нестационарный эффект, полученный в расчетных зависимостях авторов, в несколько раз выше, чем у Маркова С.Б. и Никифорова А.Н., Герасимова С.В. Это можно объяснить тем, что Марков С.Б. и Никифоров А.Н., Герасимов С.В. проводили эксперименты при течении воды, а авторы - при течении воздуха.

Стоит отметить еще одно важное отличие. У Маркова С.Б. [2] и Никифорова А.Н., Герасимова С.В. [11] максимальный эффект влияния нестационарности наблю-

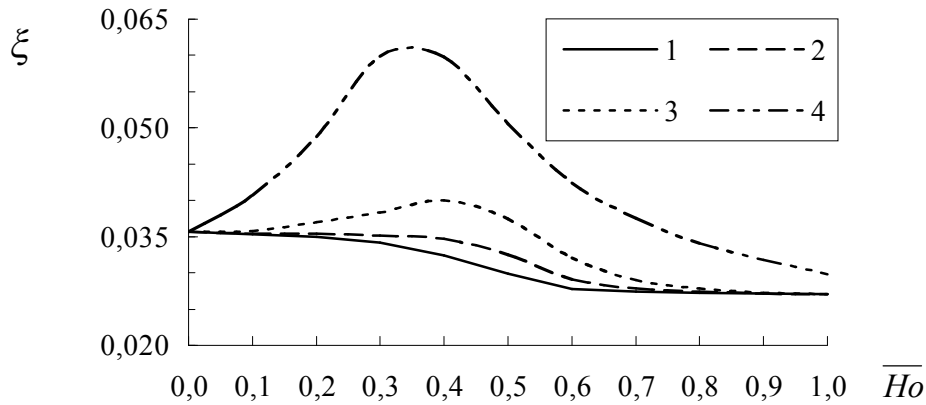


Рис. 3. Влияние ускорения потока на коэффициент гидравлического сопротивления ($Re = 6200 - 18700$, $T_w/T_f = 1$): 1 – квазистационарный расчет, 2 – эксперимент [2], 3 – эксперимент [11], 4 – авторы

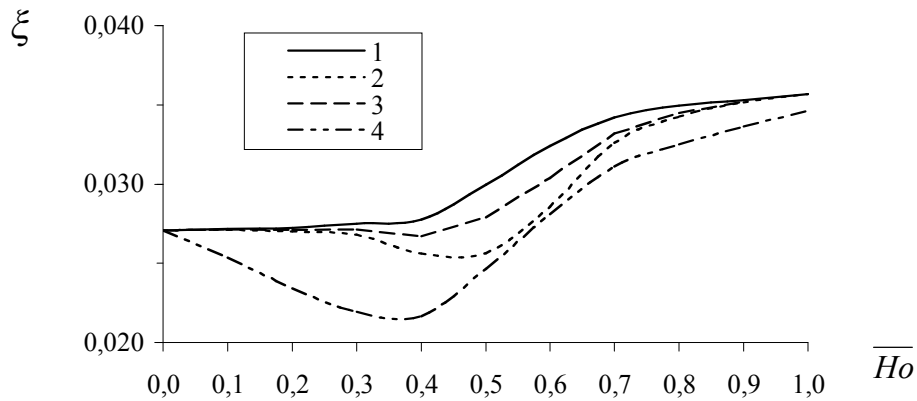


Рис. 4. Влияние замедления потока на коэффициент гидравлического сопротивления ($Re = 6200 - 18700$, $T_w/T_f = 1$): 1 – квазистационарный расчет, 2 – эксперимент [2], 3 – эксперимент [11], 4 – авторы

дался при максимальном ускорении/замедлении потока. В наших экспериментах и расчетах – немногим раньше, при $\overline{Ho} = 0,35$. Это легко объясняется тем, что коэффициент гидравлического сопротивления зависит от касательных напряжений на стенке, и именно при $\overline{Ho} = 0,35$ наблюдаются наибольшие изменения структуры течения у стенки канала. Данный эффект авторами [2] и [11], скорее всего, не был обнаружен из-за малой инерции турбулентной структуры потока при течении воды.

Результаты частотного анализа гидродинамически нестационарного течения. Проведенные исследования частотного спектра газовых течений в стационарных и нестационарных, изотермических и неизотер-

мических условиях [10] позволяют сделать выводы о физических процессах турбулентности.

При стационарном изотермическом течении на стенке канала происходит зарождение «крупных» (с частотой пульсаций 30...70 Гц) и «средних» (с частотой пульсаций 70...200 Гц) вихрей. Далее, по мере продвижения турбулентных структур от стенки канала к оси обнаруживается уменьшение амплитуды пульсаций «крупных» вихрей и одновременный рост амплитуды пульсаций «средних», что говорит о распаде больших вихрей на более мелкие. С ростом числа Рейнольдса этот процесс ускоряется, например, при $Re = 6200$ эта зона лежит в диапазоне $y/R = 0,05 \dots 0,7$, а при $Re = 18700$ - в области

$y/R=0,05...0,4$. Не отмечено какого-либо заметного изменения пульсаций с частотами 200...500 Гц, которые вообще по всему сечению канала на порядок слабее энергонесящих пульсаций с частотами 30...70 Гц. При сопоставлении графиков для осевых и радиальных пульсаций обнаруживается, что амплитуды осевых пульсаций в 1,5...2 раза выше радиальных, т.е. турбулентные вихри несимметричны.

При нагреве канала $T_w/T_f=1,18$ (в стационарных условиях) наблюдается значительный (до 3-х раз) рост амплитуд пульсаций «крупных» и «средних» вихрей, т.е. налицо более быстрый рост турбулентных вихрей на стенке. Зона преобразования, дробления «крупных» вихрей на «средние» заметно сужена ($y/R=0,05...0,35$) по сравнению с изотермическим случаем ($y/R=0,05...0,7$). То есть диссипация вихрей на более мелкие происходит значительно быстрее. При более сильном нагреве ($T_w/T_f=1,18$) рост радиальных пульсаций опережает рост осевых и различие их амплитуд незначительно, т.е. нагрев стенки делает вихри «симметричными».

Гидродинамическая нестационарность течения, как и неизотермичность, оказывает заметное влияние на структуру течения. Обнаружено, что при ускорении течения происходит очень быстрое преобразование (распад) «крупных» вихрей с частотой пульсаций 30...70 Гц в «среднечастотные» (70...200 Гц). В зоне $y/R=0,2...0,5$ амплитуда осевых пульсаций «среднечастотных» вихрей при $K_g^*=0,111$ даже превышает на 50 % амплитуду «низкочастотных». Для сравнения, в стационарном режиме амплитуда осевых пульсаций «среднечастотных» вихрей не превышает амплитуды «низкочастотных» пульсаций. При замедлении течения наблюдался обратный эффект - существенное замедление этого процесса. В зоне $y/R=0,2...0,5$ при $K_g^*=-0,111$ амплитуда осевых пульсаций «среднечастотных» вихрей ниже амплитуды «низкочастотных». Не отмечено заметного влияния гидродинамической нестационарности на «мелкие» (с частотой 200...500 Гц) вихри.

При совместном воздействии гидродинамической нестационарности и неизотер-

мичности на течение происходит наложение различных эффектов. Мы наблюдаем более интенсивное, чем при ускорении потока и $T_w/T_f=1$, порождение крупных вихрей (30...70 Гц) на стенке канала. Однако этот рост гораздо меньше, чем в стационарном неизотермическом случае, т.е. ускорение течения сильно ослабляет влияние неизотермичности на механизм порождения турбулентных вихрей. В дальнейшем, по мере продвижения к оси канала, крупные вихри распадаются на более мелкие, и частотные характеристики схожи тоже по мере продвижения к оси канала с рассмотренным выше изотермическим гидродинамически нестационарным случаем. При замедлении течения наблюдался противоположный эффект. Таким образом, можно предположить, что неизотермичность влияет на механизм порождения турбулентных вихрей, а гидродинамическая нестационарность - в основном на процесс дробления вихрей по мере их продвижения от стенки канала к оси.

Физическая модель нестационарной турбулентности. Анализируя результаты исследования структуры турбулентных течений и частотного анализа [10], можно сделать предположения о влиянии гидродинамической нестационарности и неизотермичности течения на физические процессы, происходящие вблизи стенки канала. Итак, в вязком подслое $0 \leq \eta \leq 5$ течение неламинарное. Сюда проникают пульсации скорости малой амплитуды и большие количества жидкости из соседних областей. В зоне $5 \leq \eta \leq 15$ периодически возникают вихревые структуры, которые выбрасываются в более удаленные слои. Взаимодействие этих выбросов с основным потоком, главным образом в зоне $7 \leq \eta \leq 30$, и ведет к порождению турбулентности, которое обычно сосредоточено лишь в слое, не выходящем за $\eta=70$. Наиболее важной чертой этой области являются возникновение и выброс вихревых структур. Эти процессы носят случайный характер и зависят от локальных условий, однако интенсивность и средняя частота возникновения этих структур есть функции различных параметров, в том числе скорости

течения (Re) и температуры стенки канала (T_w/T_f). После выброса и уноса вихревой структуры около стенки возникает локальная область замедленного течения толщиной порядка $\eta \geq 30$ с очень малым градиентом скорости, затем эта локально замедленная область взаимодействует с большой массой газа (жидкости), двигающейся со скоростью, близкой к средней для этого слоя. В результате этого взаимодействия происходит резкий выброс вихрей из замедленной области в верхние слои, который и является основным источником турбулентной энергии.

В условиях неизотермического течения ($T_w/T_f=1,18$) замедленная масса газа у стенки успевает существенно нагреться и расширяться. Это увеличивает поверхность ее взаимодействия с большими ускоренными массами относительно холодного газа и приводит к более интенсивному выбросу, поэтому происходит интенсификация порождения турбулентности.

При гидродинамической нестационарности в случае ускорения течения профиль скорости становится более заполненным, что приводит к некоторому «сжатию» пристеночной зоны, в которой и происходит зарождение турбулентных вихрей. Это, в свою очередь, ведет к более интенсивному взаимодействию замедленного течения с большой массой газа и резкому увеличению интенсивности турбулентных выбросов в поток. Далее турбулентная структура (вихрь), попадая в слои с более высокими касательными напряжениями, вызванными ускорением потока, распадается на более мелкие значительно быстрее, чем в стационарном случае. Описанные процессы ведут к существенному росту коэффициентов турбулентных вязкости и теплопроводности, что способствует росту теплообмена и сопротивления при ускорении потока.

Обратные явления происходят при замедлении течения. Профиль скорости становится менее заполненным; пристеночная зона, в которой и происходит зарождение турбулентных вихрей, расширяется относительно стационарного случая; интенсивность взаимодействия замедленного течения с большой массой газа падает, что приводит к

резкому уменьшению интенсивности турбулентных выбросов в поток. Попадая в слои с меньшими касательными напряжениями (по сравнению со стационарным случаем), турбулентные вихри распадаются на мелкие гораздо медленнее. Это приводит к уменьшению коэффициентов турбулентных вязкости и теплопроводности и, следовательно, к уменьшению теплообмена и сопротивления при замедлении потока.

Данная работа выполнена по грантам Президента РФ по поддержке молодых докторов наук (МД-2246) и Российского фонда фундаментальных исследований (08-08-00226-а).

Библиографический список

1. Дрейцер Г. А., Краев В. М. Турбулентные течения газа при гидродинамической нестационарности. - Красноярск. М.: Сибир. аэрокосм. акад., 2001. - 148 с.
2. Марков С. Б. Экспериментальное исследование скоростной структуры и гидравлических сопротивлений в неустановившихся напорных турбулентных потоках // Механика жидкости и газа. - 1973. - № 2. - С. 65–75.
3. В.К.Кошкин, Э.К.Калинин, Г.А.Дрейцер и др. Нестационарный теплообмен. - М.: Машиностроение, 1973. - 328 с.
4. Дрейцер Г. А. Нестационарный конвективный теплообмен при турбулентном течении газов и жидкостей в каналах // Теплоэнергетика. - 1998. - № 12. - С. 29.
5. Бухаркин В. Б., Краев В. М. Влияние гидродинамической нестационарности на теплообмен и гидравлическое сопротивление в трубе // Тр. 3-й Рос. нац. конф. по теплообмену. - М.: Изд-во МЭИ. - 2002. - Т. 2. - С. 71–74.
6. Краев В. М. Влияние гидродинамической нестационарности на коэффициенты теплоотдачи и гидравлического сопротивления при турбулентном течении теплоносителя в трубе // Вестник Московск. авиац. ин-та. - 2005. - Т. 12. - № 2. - С. 39–45.
7. Краев В. М. Теплообмен и гидродинамика турбулентных течений в условиях гидродинамической нестационарности // Изв. вузов. Авиационная техника. - 2005. - № 3. - С. 39–42.

8. Краев В. М. Модели расчета нестационарных процессов теплообмена и гидродинамики турбулентных течений в двигателях летательных аппаратов // Проблемы создания перспективных авиационных двигателей: Материалы Всерос. науч.-техн. конф. молодых ученых и специалистов. - М.: ЦИАМ. - 2005. - С. 162–163 .

9. Дрейцер Г. А., Краев В. М. Исследование структуры турбулентных течений, теплообмена и гидродинамики в условиях гидродинамической нестационарности // Изв. РАН. Энергетика. - 2006. - № 4. - С. 131–144.

10. Краев В. М. Турбулентная структура и теплогидравлические параметры нестационарных течений в каналах энергетических установок: Автореф. дис. докт.техн.наук / Московск. авиац. ин-т (гос. техн. ун-т). - М., 2006. - 40 с.

11. Никифоров А. Н., Герасимов С. В. Изменение параметров турбулентного течения при ускорении и замедлении потока // Инженерно-физический журнал. - 1985. - №49 (4). - С. 533-539.

References

1. Dreitser G.A., Kraev V.M. Turbulent gas flow at hydrodynamic unsteady conditions. Siberian Aerospace Academy, 2001. 148 p.

2. Markov S.B. Experimental research of flow structure and hydraulic resistance in unsteady turbulent flows // Mekhanika szidkosti I gasa. 1973. № 2. P. 65–75.

3. V.K.Koshkin, E.K.Kalinin, Dreitser G.A. etc. Unsteady heat transfer. M.: Mashinostroenie, 1973. 328 p.

4. Dreitser G.A. Unsteady convective heat transfer in turbulent gas and fluid flows in channels // Teploenergetika. 1998. № 12. P. 29.

5. Bukharkin V.B., Kraev V.M., Hydrodynamic unsteadiness unfluence on heat transfer and hydraulic resistance in a tube // Papers of 3-rd Russ. Nation. Heat Transfer Conf. M.: MEI Publ., 2002. T. 2. P. 71–74.

6. Kraev V.M., Hydrodynamic unsteadiness unfluence on heat transfer and hydraulic resistance at turbulent flow in a tube // Vestnik MAI. 2005. T. 12. № 2. P. 39–45.

7. Kraev V.M., Heat transfer and hydrodynamic of turbulent flows in hydrodynamic unsteadiness conditions // Izv. vuzov. Aviatsionnaya tekhnika. 2005. № 3. P. 39–42.

8. Kraev V.M., Modelig of heat transfer and hydrodynamic unsteady process in aerospace power plants // Problems of perspective aviation engines creation: Papers of Russ. Sc.-Res. Conference. M.: TsIAM. 2005. P. 162–163 .

9. Dreitser G.A., Kraev V.M. Turbulent flow structure, heat transfer and hydrodynamic at hydrodynamic unsteady conditions reserach // Izv. RAN. Energetika. 2006. № 4. P. 131–144.

10. Kraev V.M. Turbulent flow structure and heat-hydrodynamic parameters of unsteady flows in power plants channels. Annotation of Doctor Diss. dis. / MAI. M., 2006. 40 p.

11. Nikiforov A.N., Gerasimov S.V. Turbulent flow parameters changers at flow acceleration an deceleration // Inszenernofizichesky szurnal. - 1985. - №49(4). - P. 533-539.

PHYSICAL PRINCIPLES OF HYDRODYNAMIC NON-STATIONARITY EFFECT ON TURBULENT FLOW

© 2009 V. M. Krayev, A. I. Tikhonov

Moscow Aviation Institute (State Technical University)

The paper presents the analysis of the effect produced by non-isothermicity and hydrodynamic non-stationarity on the initiation and development of turbulence. A physical model of a hydrodynamically non-stationary turbulent flow is proposed, based on the previously conducted experimental investigations into the structure of non-stationary turbulent flow that takes place when gas is flowing in the duct.

Turbulence, pulsations, hydrodynamic non-stationarity, flow structure, heat exchange and pressure loss.

Информация об авторах

Краев Вячеслав Михайлович, доктор технических наук, доцент кафедры «Авиационная и ракетно-космическая теплотехника» Московского авиационного института (государственного технического университета). Область научных интересов: исследования в области нестационарных турбулентных течений. E-mail kraevvm@mail.ru.

Тихонов Алексей Иванович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Авиационная и ракетно-космическая теплотехника» Московского авиационного института (государственного технического университета). Область научных интересов: исследования в области интенсификации теплообмена в каналах энергоустановок. E-mail kraevvm@mail.ru.

Kraev, Vyacheslav Mikhailovitch, doctor of technical sciences, associate professor of the department “Aviation and space-rocket heat engineering”, Moscow Aviation Institute (State Technical University). Area of research: investigations in the area of non-stationary turbulent flows. E-mail: kraevvm@mail.ru.

Tikhonov, Alexey Ivanovitch, candidate of technical science, associate professor of the department “Aviation and space-rocket heat engineering”, Moscow Aviation Institute (State Technical University). Area of research: investigations in the area of intensifying heat exchange in the ducts of power plants. E-mail: kraevvm@mail.ru.