

УДК 532.526:536.24

ПРОБЛЕМЫ БАЙПАСНОГО ЛАМИНАРНО-ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕХОДА

Э. Я. ЭПИК

Национальный технический университет Украины “КПИ”

Получено 17.02.2005

Представлены результаты экспериментального исследования процессов переноса при возникновении на обтекаемой поверхности ламинарно-турбулентного перехода, инициированного внешними и внутренними возмущениями различной природы (повышенной турбулентностью, отрывом, их комбинацией и скоростной периодической нестационарностью). Особое внимание уделено проблемам прогнозирования верхнего термического перехода и методам расчета, основанным на учете суммарной возмущенности потока и эффективной вязкости на внешней границе динамического пограничного слоя.

Представлені результати експериментального дослідження процесів переносу в разі виникнення на обтічній поверхні ламинарно-турбулентного переходу, ініційованого зовнішніми та внутрішніми збуреннями різної природи (підвищеною турбулентністю, відривом, їх комбінацією та швидкісною періодичною нестационарністю). Особливу увагу приділено проблемам прогнозування верхнього термічного переходу та методам розрахунку, які базуються на сумарній енергії збурень потоку та ефективній в'язкості на зовнішній границі динамічного прилежового шару.

The results of experimental investigation of transport processes are presented for cases when laminar-turbulent transition initiated by external and internal disturbances of different nature (increased free stream turbulence, separation, their combination and periodic velocity nonstationarity) arises on streamlined surface. The special attention is paid to problems of upper thermal transition prediction and methods of calculation based on the total energy of flow disturbances and effective viscosity at an outer edge of a dynamic boundary layer are proposed.

ВВЕДЕНИЕ

При проектировании теплоэнергетического оборудования различного назначения необходимо располагать достоверными данными об изменениях коэффициентов переноса в характерных зонах рабочего пространства. Развитие пограничного слоя (ПС) в проточной части оборудования обычно происходит в сложных условиях нелинейного взаимодействия турбулизирующих эффектов различной природы. Термин “турбулизация” подразумевает учет многопараметричности возмущений (как минимум, их интенсивности и масштаба).

К внешним возмущениям можно отнести повышенную турбулентность среды ($Tu_e > 0$), градиенты давления, скоростную периодическую нестационарность и т. п. Основными причинами возникновения внешних возмущений можно считать конструктивное выполнение проточной части установки (сужения, расширения, наличие плохо обтекаемых элементов и т. п.) и принцип ее работы (перемещение рабочей среды в стационарных или нестационарных условиях).

Внутренние возмущения, возникающие на самой рабочей поверхности, можно разделить на два типа: естественные и искусственные. Первые из них обусловлены условиями на поверхности (например, шероховатость или отрыв). Вторые органи-

зованы с помощью специальных мероприятий, направленных на управление интенсивностью процессов переноса (например, вдув для охлаждения поверхности, лунки для увеличения теплосъема или риблеты для снижения гидравлического сопротивления).

В отличие от “классических” ламинарного или турбулентного ПС, развивающихся при отсутствии возмущений, в реальных турбулизованных потоках возникают так называемые (согласно введенной нами и широко используемой в настоящее время терминологии) **псевдоламинарные** и **квазитурбулентные** ПС [1]. В них, в зависимости от степени турбулентности и ее характерного масштаба, может наблюдаться интенсификация процессов переноса. Вполне очевидно, что в таких случаях ламинарно-турбулентный переход (ЛТП) имеет ряд специфических особенностей. Именно такой тип ЛТП широко распространен в различных технических приложениях, в первую очередь, в проточной части турбомашин, что объясняет возросший в последнее десятилетие повышенный интерес к его проблемам. Об этом свидетельствует создание в Европе в рамках крупных совместных проектов научно-исследовательских групп, деятельность которых направлена на создание уточненных методов прогнозирования и расчета этого нетрадиционного явления.

В стационарных условиях при $Tu_e > 0$ развивае-

тся **байпасный** ЛТП, который достаточно подробно описан в работах ИТТФ НАНУ (Институт технической теплофизики Национальной академии наук Украины) [2-5]. В этих работах впервые показано, что одним из характерных свойств байпасного ЛТП является сам механизм, отличающийся отсутствием волн Толлмина-Шлихтинга, т. е. “байпасированием” линейной стадии возникновения и развития начальных возмущений. Таким образом, в процессе байпасного ЛТП наблюдается только нелинейная стадия возникновения турбулентных пятен Эммонса, скорость движения и расширения которых вниз по потоку зависит от Tu_e . Другим характерным свойством байпасного ЛТП является в ряде случаев существенный (до 2 раз) рост теплообмена в псевдоламинарном ПС, который заметно опережает рост трения. В конечном итоге этот факт приводит к возникновению **верхнего** теплового байпасного ЛТП, характерного такими изменениями локальных коэффициентов теплоотдачи вдоль теплообменной поверхности, что приближение к турбулентному или квазитурбулентному ПС происходит “сверху”. В то же время, распределения коэффициентов трения могут оставаться немонотонными, хотя и характеризуются более сглаженной формой.

В этой связи особое практическое значение приобретает решение вопроса о том, возникает ли верхний тепловой ЛТП в **нестационарных** условиях. Это прежде всего относится к турбомашинам, в проточной части которых следы за вращающимися элементами генерируют периодическую скоростную нестационарность. Последняя инициирует особый вид ЛТП, названный **следовым**. Особенностью течения в следе следует считать высокие уровни Tu_e при наличии дефекта скорости. В [6, 7] показано, что именно высокие значения Tu_e (а не дефект скорости) несут основную ответственность за протекание следового ЛТП. Механизм следового ЛТП аналогичен байпасному, однако вместо турбулентных пятен ему свойственно образование турбулентных полос, расширяющихся и сливающихся вниз по потоку. Отсюда вытекает общность отдельных аспектов следового и байпасного ЛТП, отмеченная в [8], что позволяет рассматривать следовой ЛТП как некую модификацию байпасного и использовать опыт, накопленный в ИТТФ НАНУ в ходе исследований байпасного ЛТП [1-5], применительно к проблемам следового ЛТП.

Мощное развитие компьютерной техники открыло неограниченные возможности для разработки усовершенствованных методов расчета

сложных течений, что, однако, не избавило исследователей от трудностей, связанных с диагностикой байпасного или следового ЛТП, заданием координат области ЛТП и реальным описанием хода всего процесса, включая особенности развития псевдоламинарного ПС перед ЛТП и квазитурбулентного ПС за ним. Целиком неопределенными остаются играющие важную роль начальные условия, для описания которых не разработаны общие принципы. Таким образом, использование современных стандартных программ **не гарантирует** достоверность рассчитанных характеристик исследуемого нетрадиционного процесса переноса без подтверждения надежными экспериментальными данными. Отсюда вытекает актуальность физического моделирования сложных процессов в лабораторных условиях, максимально приближенных к натурным.

Настоящее экспериментальное исследование посвящено изучению механизма и закономерностей переходных процессов, протекающих при взаимодействии внутренних и внешних возмущений. Представленные ниже данные являются органическим продолжением указанных выше работ [2-5], но включают также случай следового ЛТП, возникающего при наличии нестационарности за вращающимся “беличьим” колесом, с помощью которого при физическом моделировании воспроизводятся условия роторно-статорного взаимодействия в турбомашинах.

1. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Эксперименты проводились в аэродинамической трубе Т-5 сечением 120×120 мм² по методике, общепринятой в ИТТФ НАНУ (сочетание термоанемометрии и электрокалориметрии) [1] (рис. 1). Плоская обогреваемая пластина с рабочей длиной 600 мм имела скругленную радиусом 1.5 мм входную кромку. Генерация турбулентности осуществлялась с помощью перфорированных шайб с числом отверстий 81 и 169 (ПШ81 и ПШ169), установленных на входе в конфузор, или вращающегося “беличьего” колеса (БК), установленного перед пластиной. Изменение длины интерцептора h в выходном сечении рабочего участка от 60 до 25 мм способствовало как безотрывному обтеканию носика пластины при $h = 60$ мм, так и образованию ламинарного отрыва при $h = 25 - 35$ мм. Для анализа особенностей верхнего теплового ЛТП, сле-

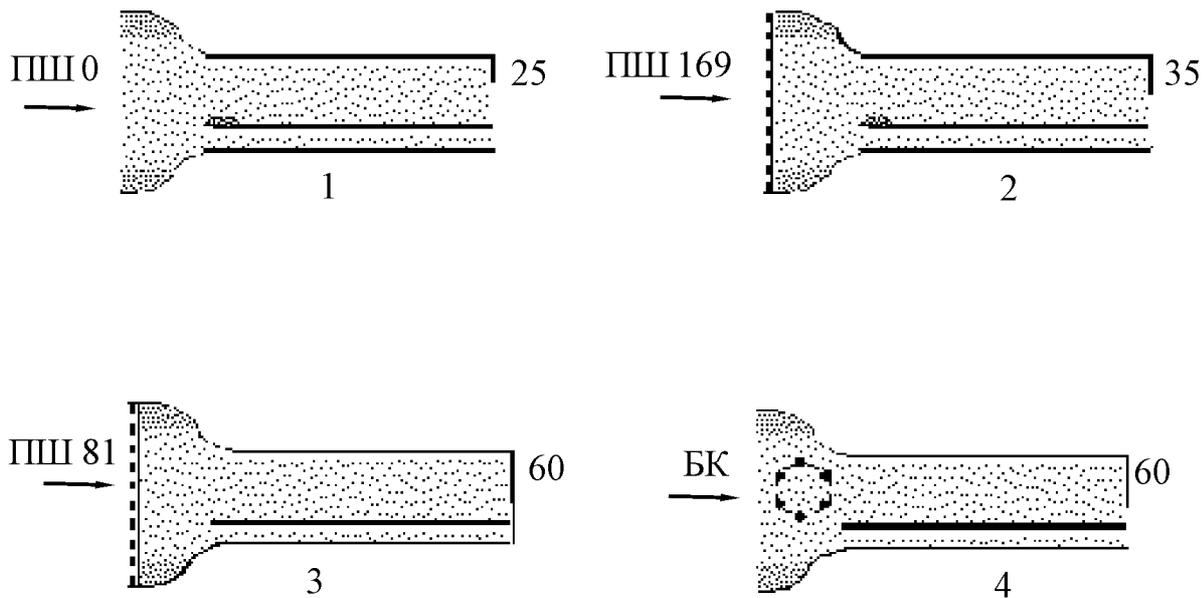


Рис. 1. Схемы генерации возмущений различной природы

дующего за псевдоламинарным ПС, были отображены важные для практики случаи генерации внешних и внутренних возмущений, а также их комбинации. Серии маркировались по типу генератора турбулентности и длине интерцептора.

В серии 1 без генератора турбулентности (ПШ0-25) близкий к верхнему байпасный ЛТП возникал в условиях стационарных внутренних возмущений (ламинарный отрыв при $Tu_e \sim 0.2\%$).

В серии 2 (ПШ169-35) верхний тепловой байпасный ЛТП был инициирован комбинацией стационарных внутренних (ламинарный отрыв на входной кромке пластины) и внешних ($Tu_e = 3.6 - 2.6\%$ при $x_{pl} = 50 - 600$ мм) возмущений.

В серии 3 (ПШ81-60) наблюдался верхний тепловой байпасный ЛТП при генерации стационарных внешних возмущений ($Tu_e = 7.9 - 4.5\%$ в сечениях $x_{pl} = 50 - 600$ мм).

Серии 1-3 были проведены при скорости внешнего потока $U_e \sim 5$ м/с.

В серии 4 (БК-60) верхний тепловой следовый ЛТП развивался за вращающимся “белчьем” колесом в нестационарных условиях, характерных наличием турбулентности, сдвига и скоростной периодической нестационарности с частотой 5 Гц. “Белчье” колесо диаметром 70 мм было изготовлено из 6 цилиндров диаметром 3 мм и длиной 118 мм. Суммарная возмущенность внешнего потока Tu , состоящая из турбулентной Tu_e и перио-

дической Tu_p мод, составляла 15–4% в различных сечениях по длине пластины ($x_{pl} = 50 - 600$ мм) при $U_e = 9$ м/с. Напомним, что в нестационарных потоках эти моды нескоррелированы друг с другом, так что $Tu^2 = Tu_e^2 + Tu_p^2$ (в сериях 2 и 3 $Tu = Tu_e$, поскольку $Tu_p = 0$).

2. НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ВЕРХНЕГО ПЕРЕХОДА

Как указывалось выше, основное внимание в настоящем исследовании было уделено случаям возникновения верхнего теплового ЛТП, инициированного достаточно мощными возмущениями различной природы. Распределения локальных коэффициентов теплоотдачи, представленные на рис. 2 и 3 в виде зависимостей $St = f(Re_x)$, явно иллюстрируют тенденцию к образованию верхнего теплового ЛТП в серии 1 непосредственно за отрывом на входной кромке пластины, а также его возникновению в сериях 2–4 (St – число Стантона, Re_x – число Рейнольдса по текущей длине пластины x_{pl}). Опытные точки в последних трех сериях располагаются выше зависимости

$$St_0 Pr^{0.4} = 0.03 Re_x^{-0.2}, \quad (1)$$

рекомендованной в [9] для расчетов теплообмена в безградиентном турбулентном ПС при $Tu_e = 0$ и

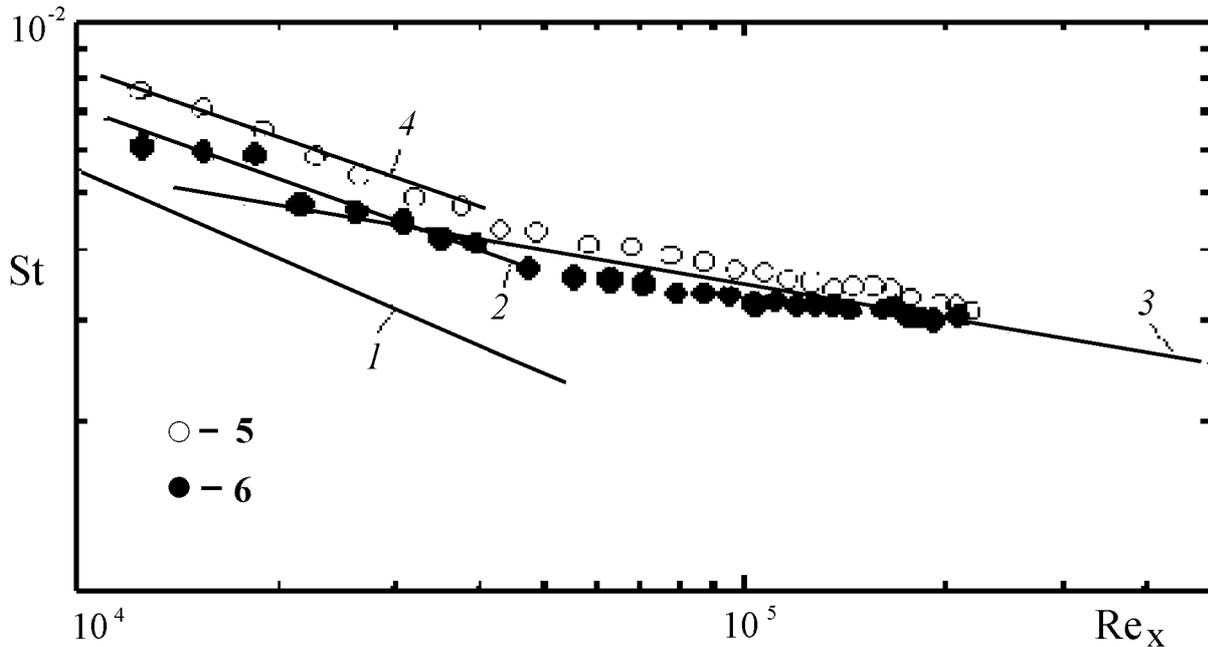


Рис. 2. Локальний теплообмін при наявності внутрішніх і зовнішніх возмущень:
1 і 2 – рівняння (3) і (2); 3 і 4 – розрахунок по рівнянню (11) при $C = 0.28$ і 0.33 для $n = 0.4$;
5 і 6 – опытні точки серії 2 (ПШ 169-35) і серії 1 (ПШ 0-25)

$q_w = \text{const}$. Для повітря залежність (1) приймає вигляд:

$$St_0 = 0.0344 Re_x^{-0.2}. \quad (2)$$

Во всіх серіях інтенсивність теплообміну в псевдоламинарному ПС, передшествуючому ЛТП, була суттєво вище, ніж в «класическому» ламинарному ПС, в якому для повітря при $q_w = \text{const}$ з урахуванням неізотермічності обтекаємої поверхності справедлива залежність (3):

$$St_0 = 0.55 Re_x^{-0.5}. \quad (3)$$

В той же час, в розподілах коефіцієнтів тертя $C_f = f(Re_x)$ зберігається немонотонність, свідетельствующая про наявність ЛТП (рис. 4). Перед ЛТП і за ним розвиваються псевдоламинарні і квазитурбулентні ПС, характерні зростом C_f по порівнянню з ламинарними і турбулентними ПС, для порівняння з якими використовувалися відомі залежності (4) і (5):

$$C_{f0} = 0.664 Re_x^{-0.5}, \quad (4)$$

$$C_{f0} = 0.0592 Re_x^{-0.2}. \quad (5)$$

Аналіз представлених експериментальних даних свідетельствует про більш суттєвний

росте теплообміну по порівнянню з тертям в псевдоламинарному ПС. Причини цього помітного явища до сих пор залишаються нез'ясненими. Однак в ряду наших робіт, наприклад в [9], механізм зросту теплообміну, опережающего тертя, зв'язан зокрема з особливостями формування поля пульсацій температури поблизу стінки (в частині, більш близьким розташуванням до стінки максимумів пульсацій температури по порівнянню з максимумами продольних пульсацій швидкості, більш високими значеннями поперечних градієнтів температурних пульсацій і т. п.).

3. ДІАГНОСТИКА ЛАМИНАРНО-ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕХОДА В СЛОЖНИХ УМОВАХ

Дані попереднього розділу наочно свідетельствуют про неможливість підтвердження існування ЛТП в турбулізованих потоках на основі розподілів $St = f(Re_x)$. Більш того, розташування на рис. 2 і 3 опытних точок вище залежності (2) може привести до помилковому висновку стосовно типу течії в ПС і

Табл 1. Местоположение и протяженность зоны ЛТП

Серия	1-ПШО-25	2-ПШ 169-35	3-ПШ 81-60	4-БК-60
Re_{st}^{**}	240	180	182	190
Re_{end}^{**}	628	488	482	500
$Re_{end}^{**}/Re_{st}^{**}$	2.63	2.71	2.67	2.63
x_{st} , мм	153	70	135	78
x_{end} , мм	655	305	453	268
$\Delta x/x_{st}$	3.281	3.357	2.356	2.435
$\Delta x/x_{end}$	0.77	0.77	0.70	0.71
Re_{xst}	46700	26500	43100	45320
Re_{xend}	209900	117300	144100	154700
Re_{xend}/Re_{xst}	4.495	4.4261	3.343	3.41

отождествлению последнего с турбулентным ПС. Распределения $C_f = f(Re_x)$ на рис. 4, хотя и свидетельствуют об образовании псевдоламинарного ПС, не могут служить основой для точного определения расположения ЛТП на обтекаемой поверхности. Поэтому необходим комплексный подход для доказательства образования именно псевдоламинарного ПС перед байпасным или следовым ЛТП, а также для нахождения координат (начала и конца) области ЛТП.

Диагностика ЛТП является достаточно сложной задачей, которая может быть решена на основе анализа интегральных и локальных характеристик как гидродинамического, так и теплового ПС. Хотя эта задача выходит за рамки настоящего исследования, полезно напомнить некоторые принципы диагностики, изложенные в ряде работ ИТТФ НАНУ (например, [5]).

Начало и конец ЛТП достаточно точно могут быть определены на основе трансформации по длине обтекаемой поверхности полей температуры и скорости. Последние представлены на рис. 5 для варианта 2 (ПШ169-35). Несмотря на наличие отрыва и Tu_e , профиль скорости перед ЛТП в координатах закона стенки характерен наличием только двух зон: вязкой и буферной. Дальнейшая деформация профиля скорости, свидетельствующая о начале формирования байпасного ЛТП, проявляется в появлении между буферной зоной и внешним течением уплощенного участка – аналога будущей области действия логарифмического закона. Последующее расширение этого участка заканчивается к концу ЛТП, когда профиль скорости становится типичным для квазитурбулентного ПС с отрицательными значениями параметра следа, что вызвано как наличием возмущений, так и низкими значениями Re^{**} (Re^{**} – число Рей-

нольдса по толщине потери импульса δ^{**}).

Одной из основных особенностей псевдоламинарного ПС является наличие мощных пульсаций скорости, максимум которых первоначально располагается при $y/\delta \sim 0.3$ и постепенно сдвигается к стенке в процессе ЛТП (y – расстояние от стенки, δ – толщина гидродинамического ПС). Как показывает анализ данных, представленных на рис. 6, профили продольных пульсаций скорости в псевдоламинарном ПС характеризуются скругленной формой. В процессе ЛТП эта форма трансформируется в остроугольную, типичную для турбулентного или квазитурбулентного ПС. Визуальный качественный анализ приводит к количественной оценке начала и конца ЛТП, однако использование этого метода требует проведения большого количества измерений профилей во многих близко расположенных сечениях по длине поверхности.

Среди других особенностей ЛТП можно отметить изменения в спектральных функциях, в частности, перераспределение энергии пульсаций между ПС и турбулизированным потоком, а также нескоррелированность пульсаций скорости и температуры по частотам. Интересно отметить, что в псевдоламинарном ПС генерация скоростной и температурной турбулентности происходит на низких частотах за счет поглощения энергии из внешнего потока на высоких частотах. Эти аспекты частично затронуты в [3, 5].

4. КООРДИНАТЫ ОБЛАСТИ ЛАМИНАРНО-ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕХОДА

Поскольку вплоть до настоящего времени универсальные методы для определения координат области ЛТП не разработаны, наиболее надежным

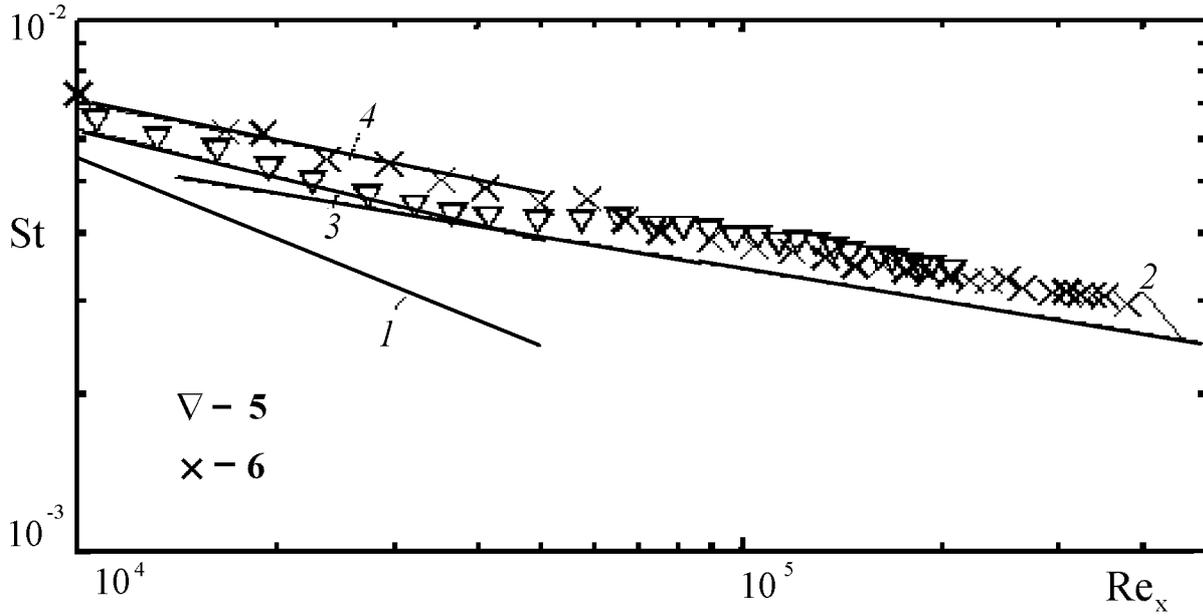


Рис. 3. Локальний теплообмін при генерації зовнішніх возмущень:
 1 и 2 – уравнения (3) и (2); 3 и 4 – расчет по уравнению (11) при $C = 0.0995$ и 0.33 $n = 0.3$; 5
 и $C = 0.064$, $n = 0.24$; 5 и 6 – опытные точки серии 3 (ПШ 81-60) и серии 4 (БК-60)

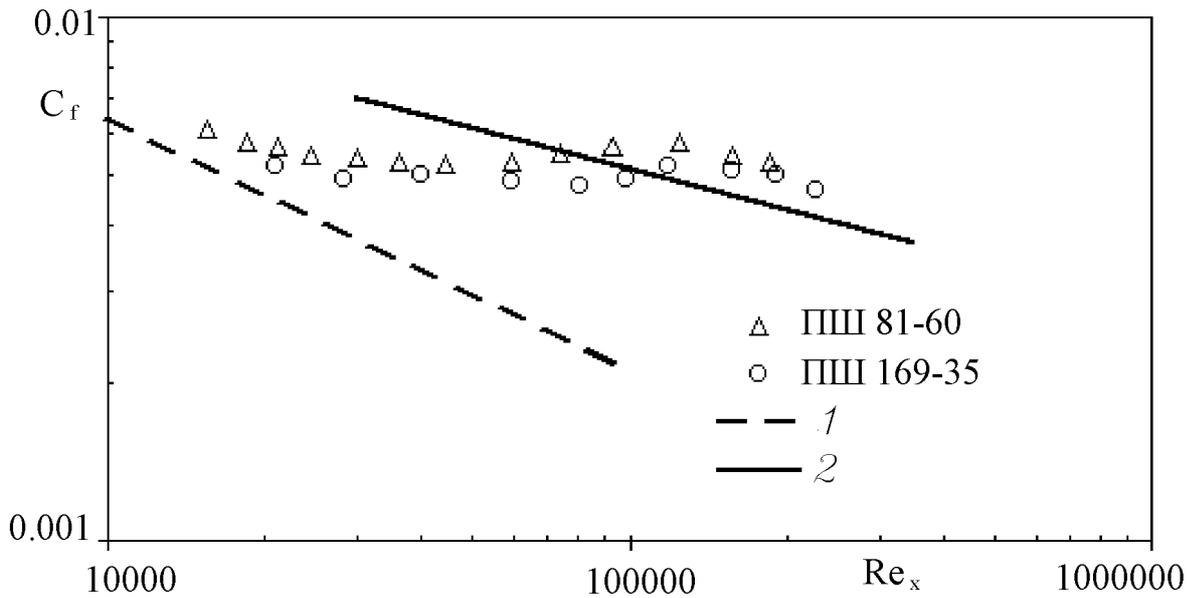


Рис. 4. Распределение коэффициентов трения:
 1 и 2 – расчет по уравнениям (4) и (5)

является феноменологический подход, основанный на экспериментальной информации. Такие подходы далеки от универсальных, поэтому в ка-

ждом конкретном случае выбор местоположения области ЛТП представляется самостоятельной и далеко нелегкой задачей.

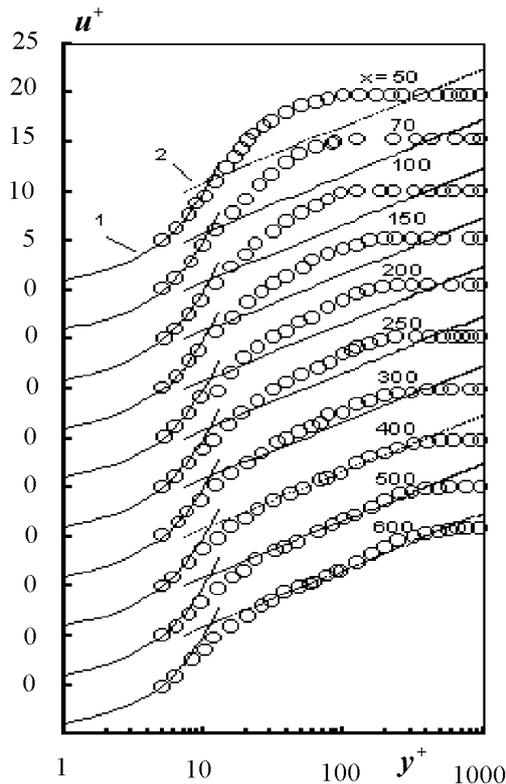


Рис. 5. Распределение скорости в серии 2:
 1 - $u^+ = y^+$; 2 - $u^+ = 2.51 \ln y^+ + 5.1$

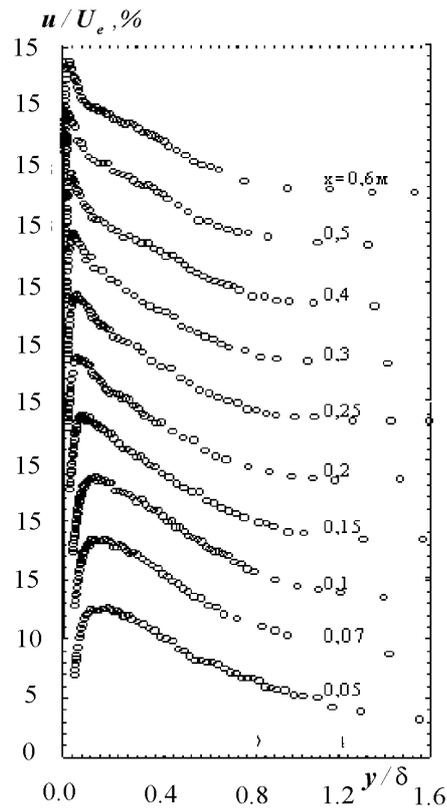


Рис. 6. Распределение продольных пульсаций скорости по длине пластины в серии 2

Для исследованных серий комбинация различных методов позволила определить начало и конец зоны ЛТП (x_{st} и x_{end} , Re_{xst} и Re_{xend} , Re_{st}^{**} и Re_{end}^{**}).

Анализ данных таблицы 1 позволяет сделать некоторые важные с практической точки зрения выводы относительно универсальных данных для определения местоположения и координат области байпасного и следового ЛТП. Значения ряда параметров, которые в первом приближении можно считать постоянными, выделены.

На основе данных табл. 1 можно отметить два обстоятельства, важных при разработке схемы определения области ЛТП:

1. В возмущенных потоках при $Tu_e > 0$ начало перехода может быть отождествлено с точкой потери устойчивости ($Re_{st}^{**} \sim 180 - 190$); использование указанного постоянного значения Re_{st}^{**} позволяет в определенной степени учесть как сами начальные условия, так и особенности развития начальных возмущений в псевдоламинарном ПС по мере приближения к области ЛТП;

2. Неоспоримым преимуществом использования

Re^{**} (а не Re_x) является постоянство отношения $Re_{end}^{**}/Re_{st}^{**} \sim 2.6 - 2.7$ независимо от уровня и типа возмущений.

К сожалению, описанная схема определения области ЛТП не является полностью универсальной в виду отсутствия однозначной связи $\delta^{**}/x = f(Re_x)$ при наличии внутренних и внешних возмущающих факторов. Это отчетливо видно из анализа табл. 1, где условию $Re_{st}^{**} \sim 180 - 190 \sim \text{const}$ соответствуют резко отличающиеся x_{st} , что свидетельствует о различиях как в абсолютных значениях δ^{**} , так и в темпе роста δ^{**} по длине обтекаемой поверхности.

Еще меньше определенности содержится в нахождении местоположения области ЛТП по x_{st} или Re_{xst} . Обнадешивающим является то обстоятельство, что в первом приближении (с точностью до 10%) можно принять постоянным отношение $\Delta x/x_{end} \sim \Delta Re_x/Re_{xend} \sim 0.70 - 0.77$. Однако при этом необходимо задать Re_{xst} или Re_{xend} , что является далеко не простой задачей в виду отсутствия универсальных эмпирических зависимостей, связывающих Re_{xst} с интенсивностью возмущений

различной природы.

Окончательный вывод, который может быть сделан, свидетельствует о том, что при выборе координат начала и конца ЛТП необходим **индивидуальный** подход в каждом конкретном случае возникновения байпасного или следового ЛТП.

5. ЭКСПРЕСС-МЕТОД РАСЧЕТА ВЕРХНЕГО ЛАМИНАРНО-ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕХОДА

В течение последнего десятилетия нетрадиционные типы ЛТП интенсивно исследуются с целью разработки улучшенных методов расчета сложных процессов переноса. Обычно результаты расчета сравниваются с экспериментальными данными, выбранными в качестве тестовых, по ряду параметров, включая распределение коэффициентов теплоотдачи. По нашему мнению, распространение численных методов не означает отказ от уравнений подобия, основанных на экспериментальных данных.

Известно, что вплоть до настоящего времени такие уравнения подобия широко используются в инженерных методах расчета. Поскольку их применение не требует таких больших затрат труда и времени, как численное моделирование, именно сегодня их роль становится более важной. Осуществленные на основе эмпирических корреляций расчеты можно рассматривать как экспресс-метод, предшествующий численному моделированию. Такой подход позволит избежать казусов, возникающих при численном моделировании, благодаря предварительной оценке реального поведения сложного процесса, а также при необходимости ввести дополнительные данные для улучшения использованной модели.

Разработанная в ИТТФ НАНУ схема расчета теплообмена при верхнем термическом ЛТП позволяет определить распределения локальных коэффициентов теплоотдачи на обтекаемой поверхности для исследованных четырех серий экспериментов. Она является дальнейшим развитием общих подходов ИТТФ НАНУ к расчету сложных течений. Схема предполагает раздельное определение локальных коэффициентов теплоотдачи на участках, занятых псевдоламинарным и турбулентным или квазитурбулентным ПС с последующей стыковкой в области байпасного или следового ЛТП. Координаты области верхнего теплового ЛТП задаются предварительно на основе физических представлений об особенностях данного

процесса, протекающего в условиях наложения достаточно мощных возмущений внутренней и внешней природы или их комбинации, как это сделано выше.

5.1. Характеристики внешнего потока.

Характеристики внешнего потока являются неотъемлемой частью расчетной схемы, поскольку координаты верхнего ЛТП и интенсивность теплообмена зависят от типа возмущений и закона их затухания $Tu = f(x)$.

Закон затухания для изотропной или близкой к ней турбулентности в общей форме может быть представлен, как [1]:

$$U_e^2 / \overline{u_e^2} = A(x + x_0)^m, \quad (6)$$

где u_e – продольная пульсация скорости внешнего возмущенного потока; x_0 – фиктивное предвключение (м).

Законы затухания для серий 2-4 представлены в табл. 2.

Табл. 2. Законы затухания возмущенных потоков

Серия	x_0 , мм	A	m
ПП 169-35	0.730	1022	1.22
ПП 81-60	0.406	537	1.25
БК-60	0.061	966	1.40

На основе законов затухания могут быть определены следующие гидродинамические характеристики внешнего потока, используемые в расчетах теплообмена:

– кинетическая энергия турбулентности

$$E_e = 1.5 \overline{u_e^2} = 1.5 U_e^2 / A (x + x_0)^m; \quad (7)$$

– диссипация кинетической энергии турбулентности

$$\varepsilon_e = U_e (dE_e/dx) = U_e^3 m / 2A (x + x_0)^{m+1}; \quad (8)$$

– диссипативный масштаб продольной компоненты пульсаций

$$L_e = (\overline{u_e^2})^{3/2} / U_e (d\overline{u_e^2}/dx) = (x + x_0)^{1-m/2} / m \sqrt{A}; \quad (9)$$

– безразмерная турбулентная вязкость возмущенного потока, ответственная за его переносные свойства, в рамках двухпараметрической модели турбулентности “энергия – диссипация”:

$$\nu_{te}/\nu = C_\nu E_e^2/\varepsilon_e \nu = 1.5C_\nu U_e A/m(x+x_0)^{m-1}\nu, \quad (10)$$

где в потоках без генерации турбулентности $C_\nu = 0.11$ [1], ν – молекулярная вязкость рабочей среды.

Типичные изменения характеристик внешнего потока (продольных пульсаций скорости, безразмерной турбулентной вязкости и диссипативного масштаба) для серии 3 (ПШ81-60) представлены на рис. 7, из которого видно убывание интенсивности пульсаций и турбулентной вязкости по длине обтекаемой поверхности пластины при одновременном росте характерного диссипативного масштаба.

5.2. Влияние турбулентности на теплообмен в псевдоламинарном ПС при наличии отрыва.

Для описания теплообмена в псевдоламинарном ПС можно использовать уравнения подобия общего вида:

$$St = C Re_x^{-n}, \quad (11)$$

в которых значения коэффициента C и показателя степени n зависят как от типа возмущений, так и от их уровня и масштаба.

Схемы расчета теплообмена в псевдоламинарном ПС при наличии внутренних и внешних возмущений отличаются друг от друга, хотя форма исходного уравнения подобия (11) сохраняется.

В случае отрыва на входной кромке в сериях 1 и 2 значения n в уравнении (11) могут быть приняты постоянными ($n = 0.4$), а определение C можно провести на основе распределения $Tu_e = f(x)$. В первом приближении зависимость $C = f(Tu_e)$ можно представить, как:

$$C = 0.28 + 0.014Tu_e\%. \quad (12)$$

Легко показать, что при $Tu_e = 0$ и возникновении одного отрыва $C = 0.28$, а при совместном влиянии $Tu_e > 0$ и отрыва $C = 0.33$. Соответствующие линии 3 и 4 на рис. 2 при $n = 0.4$ и указанных выше значениях C демонстрируют приемлемое согласование экспериментальных и расчетных данных при $Re_x < Re_{xst}$ в псевдоламинарном ПС в сериях 1 (ПШ0-25) и 2 (ПШ169-35).

5.3. Влияние эффективной вязкости на теплообмен в псевдоламинарном ПС при наличии внешних возмущений.

В случае наложения внешних стационарных или нестационарных возмущений, как это имело место

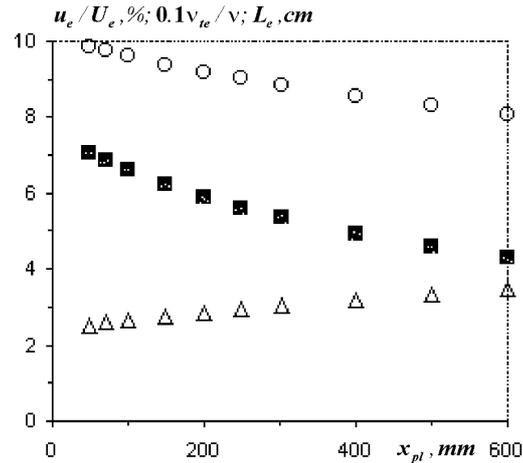


Рис. 7. Характеристики внешнего потока в серии 3: ○ – ν_{te}/ν ; ◻ – u_e/U_e ; △ – L_e

в сериях 3 и 4, схема расчета становится более сложной, но приближается к универсальной. В уравнении (11) для псевдоламинарного ПС появляется $\nu_{ef}\delta/\nu$ – безразмерная эффективная вязкость на внешней границе динамического ПС. Поскольку в разрабатываемом подходе именно $\nu_{ef}\delta/\nu$ используется в качестве основного критерия, ответственного за интенсификацию процессов переноса в ПС, $C = f(\nu_{ef}\delta/\nu)$ и $n = f(\nu_{ef}\delta/\nu)$.

Для расчета $\nu_{ef}\delta/\nu$ необходимо иметь в распоряжении следующие данные:

- закон затухания суммарных возмущений вдоль обтекаемой поверхности (уравнение (6));
- модель турбулентности для определения турбулентной вязкости возмущенного внешнего потока ν_{te} (уравнение (10) для двухпараметрической модели “энергия-диссипация”);
- зависимость для расчета толщины динамического ПС, выбор которой проблематичен и нуждается в экспериментальных данных;
- коэффициент ослабления турбулентной вязкости в надслое $k = \nu_{te}/\nu_{td}$ (ν_{td} – турбулентная вязкость на внешней границе динамического ПС) из-за влияния безразмерного диссипативного масштаба L_e/δ ; при $L_e/\delta < 1.25$ $k = 1$, при $L_e/\delta > 1.25$ k определяется по эмпирической зависимости [1]:

$$k = 1 + 10(\lg L_e/\delta - 0.1) + 10(\lg L_e/\delta - 0.1) + 1.5(\lg L_e/\delta - 0.1)^2 + 1.25(\lg L_e/\delta - 0.1)^3; \quad (13)$$

– поправка для учета взаимодействия молярной и молекулярной вязкостей $\nu_{ef} = f(\nu, \nu_t)$:

$$\nu_{ef} = \nu + \nu_t f(\nu, \nu_t), \quad (14)$$

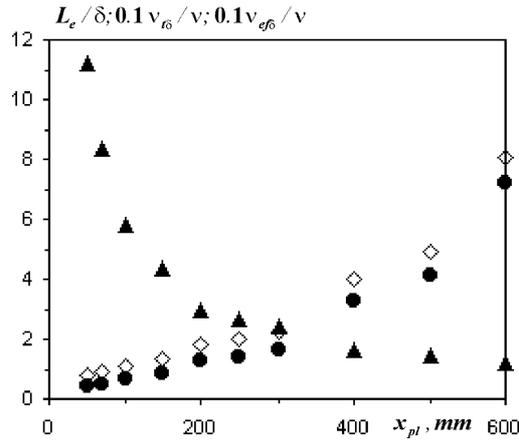


Рис. 8. Характеристики потока на внешней границе динамического ПС в серии 3:
 \triangle – L_e/δ ; \diamond – $\nu_{t\delta}/\nu$; \bullet – $\nu_{ef\delta}/\nu$

например, согласно модифицированной формуле Ротта [1]

$$f(\nu, \nu_t) = \left[1 + \frac{10.7}{\nu_t/\nu} \right]^{-1}. \quad (15)$$

Типичные изменения турбулентных характеристик на внешней границе динамического ПС, представленные на рис. 8, демонстрируют уменьшение безразмерного масштаба турбулентности по длине пластины и его влияние на изменение турбулентной вязкости.

Описанная выше схема определения гидродинамических параметров позволяет провести соответствующие расчеты теплообмена в псевдоламинарном ПС при $Re_x < Re_{xst}$. На основе рекомендаций [10] для серии 4 (БК-60) при $\nu_{ef\delta}/\nu > 15$ были выбраны значения $C = 0.064$ и $n = 0.2$, а для серии 3 (ПШ81-60) при $\nu_{ef\delta}/\nu = 4 \div 8 - C = 0.0995$ и $n = 0.3$ соответственно. Результаты расчетов при выбранных значениях $C = f(\nu_{ef\delta}/\nu)$ и $n = f(\nu_{ef\delta}/\nu)$ иллюстрируют совпадение с экспериментальными данными в псевдоламинарном ПС при $Re_x < Re_{xst}$ (линии 3 и 4 на рис. 3).

5.4. Теплообмен в квазитурбулентном ПС.

Расчеты теплообмена в квазитурбулентном ПС при $Re_x > Re_{xend}$ могут быть проведены двумя способами на основе $Tu = f(x)$ и $\nu_{et\delta}/\nu = f(x)$:

$$St/St_0 = 1 + 3Tu - 6Tu^2; \quad (16)$$

$$St/St_0 = 1 + 1.65(\nu_{ef\delta}/\nu)^{0.5} Re_x^{-0.4}, \quad (17)$$

где St_0 определяется по уравнению (2) для турбулентного ПС. Зависимости (16) и (17) примерно равнозначны и с приемлемой для практических расчетов точностью (до 3%) описывают теплообмен в квазитурбулентном ПС при $Re_x > Re_{xend}$. Это связано с тем, что развитие квазитурбулентного ПС за зоной ЛТП происходит при достаточно высоких значениях Re_x и толщина ПС δ становится соизмеримой с абсолютным значением масштаба турбулентности L_e . Хотя первый способ является более простым, он представляется менее универсальным в случае развития квазитурбулентного ПС непосредственно от входной кромки поверхности.

ВЫВОДЫ

В настоящем исследовании дан анализ особенностей верхнего теплового ЛТП, инициированного внешними и внутренними возмущениями различной природы: повышенной турбулентностью, отрывом на входной кромке, их комбинацией и скоростной периодической нестационарностью.

Основной причиной развития верхнего теплового байпасного и следового ЛТП является возникновение в сильно возмущенных потоках псевдоламинарного ПС, который характерен существенной интенсификацией теплообмена, прогрессирующей с ростом Re_x и опережающей рост трения.

Особое внимание уделено проблемам прогнозирования верхнего ЛТП и определению его местоположения на обтекаемой поверхности. В первом приближении обоснованы некоторые универсальные характеристики верхнего теплового ЛТП, в частности, соответствие начала ЛТП точке потери устойчивости ламинарного ПС ($Re_{st}^{**} \sim 180 - 190$), а также постоянство абсолютной ($\Delta Re_x/Re_{xend} \sim 0.70 - 0.77$) и относительной ($Re_{end}^{**}/Re_{st}^{**} \sim 2.6 - 2.7$) протяженностей области ЛТП. Показано, что при наложении внутренних и внешних возмущений одним из усложняющих проведение расчетов факторов является отсутствие универсальных корреляций $\delta/x = f(Re_x)$ и $\delta^{**}/x = f(Re_x)$.

Разработана схема расчета теплообмена при верхнем тепловом ЛТП, предполагающая отдельное определение локальных коэффициентов теплоотдачи на участках, занятых псевдоламинарным и турбулентным или квазитурбулентным ПС, с последующей стыковкой в области байпасного или следового ЛТП. Схема построена на основе учета суммарной возмущенности потока и эффективной вязкости на внешней границе динамиче-

ского пограничного слоя. Даны все необходимые данные для ее реализации в виде соответствующих уравнений подобия.

Подчеркнута необходимость предварительного осмысления физических особенностей любого сложного процесса, протекающего в условиях взаимодействия возмущений внутренней и внешней природы или их комбинаций. Кроме самостоятельного значения, рекомендованная для расчета теплообмена схема может быть использована как экспресс-метод для предварительной оценки реального хода сложного переходного процесса перед его численным моделированием.

1. Дыбан Е. П., Эпик Э. Я. Тепломассообмен и гидродинамика турбулизированных потоков // Киев.-Наук. думка, 1985.– С. 296.
2. Дыбан Е. П., Эпик Э. Я. Проблемы теплообмена байпасного ламинарно-турбулентного перехода // Промышленная теплотехника.– 1997.– Т.19, N 2-3.– С. 3–9.
3. Дыбан Е. П., Эпик Э. Я. Структура пристенных пограничных слоев при наличии байпасного ламинарно-турбулентного перехода // Промышленная теплотехника.– 1997.– Т.19 N 4-5.– С. 25–33.
4. Дыбан Е. П., Эпик Э. Я. Теплообмен при ламинарно-турбулентном переходе и повышенной турбулентности внешнего потока // ИФЖ.– 1996.– Т. 69, N 6.– С. 958–964.
5. Эпик Э. Я. Байпасный ламинарно-турбулентный переход в тепловом пограничном слое // ИФЖ.– 2001.– Т. 74, N 4.– С. 105–110.
6. Orth U. Unsteady boundary-layer transition in flow periodically disturbed by wakes // ASME J. of Turbomachinery.– 1993, Vol. 115.– P. 707–713.
7. Halstead D. E., Wisler D. C., Okishi T. H., Walker G. J., Hodson H. P., Shin H. W. Boundary layer development in axial compressors and turbines // ASME J. of Turbomachinery.– 1997, Vol. 119.– P. 114–127.
8. Верцинский З., Супрун Т., Эпик Э. Характеристики ламинарно-турбулентного перехода, индуцированного следом одиночного движущегося цилиндра // Промышленная теплотехника.– 2001.– Т. 23, N 3.– С. 22–30.
9. Себеси П., Брэдшоу П. Конвективный теплообмен.– М.: Мир, 1987.– 590 с.
10. Дыбан Е. П., Эпик Э. Я., Супрун Т. Т. Теплообмен в псевдоламинарном пограничном слое // Промышленная теплотехника.– 1988.– Т. 10, N 2.– С. 6–11.