

УДК 532.57 532.517 536.53 533.6

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ С ТРЕХМЕРНЫМИ ВОЗМУЩЕНИЯМИ

В. В. БАБЕНКО*, АББАС Ф. МАНМОД**, Н. А. ГНИТЕЦКИЙ*

* Институт гидромеханики НАН Украины, Киев

** Dijlah University College, Baghdad, Iraq

Получено 09.03.2011

Разработана методология взаимодействия в пограничном слое (ПС) когерентных вихревых структур (КВС), возникающих в процессе естественного перехода, с вносимыми малыми трехмерными возмущениями в виде продольных вихревых пар, подобных вихрям Гертлера. Эксперименты проведены на жесткой пластине в замкнутой гидродинамической трубе и в разомкнутой аэродинамической трубе при подобных условиях экспериментов. Разработаны макеты КВС переходного и турбулентного ПС. При обтекании водным потоком на различных этапах перехода получены визуализационные картины профилей скорости и линий тока с помощью теллур-метода Вортмана, а также профили скорости, измеренные с помощью лазерного анемометра. Подобные исследования выполнены в воздушном потоке. Обнаружен резонансный механизм взаимодействия возмущений в ПС. Получены безразмерные параметры, связывающие геометрическую структуру вносимых возмущений и кинематические характеристики ПС.

Розроблено методологію взаємодії в примежовому шарі (ПШ) когерентних вихрових структур (КВС), що виникають при незбуреному переході, з внесеними малими тримірними збуреннями у вигляді повздовжніх вихрових пар, подібних вихорам Гертлера. Досліди проведено на жорсткій пластинці в замкнутій гідродинамічній трубі та у відкритій аеродинамічній трубі при тотожних умовах експериментів. Розроблено макети КВС перехідного та турбулентного ПШ. При обтіканні водним потоком на різних стадіях переходу отримано візуалізаційні картини профілів швидкості та ліній току за допомогою телур-методу Вортмана, а також розподіл швидкості потоку по товщині ПШ, що здобуті за допомогою лазерного анемометру. Подібні вимірювання здобуто в аеродинамічній трубі. Виявлено резонансний механізм взаємодії збурень в ПШ. Знайдено безрозмірні параметри, що зв'язують геометричну структуру збурень, що вносяться в ПШ, та кінематичні характеристики ПШ.

The methodology of interaction in BL coherent vortex structures (CVS), arising during natural transition, with entering small three-dimensional disturbances in the form of the longitudinal vortex pairs, similar Gertler vortexes is developed. Experiments are lead on a rigid plate in the closed hydrodynamic tunnel and in the opened wind tunnel under similar conditions of experiments. Breadboard models CVS in transitive and turbulent BL are developed. At a flow by a water flow at various stages of transition of the BL are received pictures visualization of speed structures and flow lines by means of tellurium-method Wortmann F. X., and also the structures of speed measured by means of laser anemometer. Similar researches are executed in an air stream. The resonant mechanism of interaction of disturbances in BL is found out. The dimensionless parameters defining geometrical structure entering disturbances and kinematics characteristics BL are received.

ВВЕДЕНИЕ

В связи с проблемой энергосбережения все большее внимание уделяется различным методам снижения сопротивления. Первоначально исследовались методы снижения сопротивления с подводом энергии или при формировании вихревых структур в ПС за счет различных углублений или выступов, расположенных на обтекаемой поверхности. Примерами первого метода могут быть отсос и вдув жидкости в ПС. Ко второму методу относятся интерцепторы, расположенные на профиле крыла, двумерные или трехмерные углубления, выполненные на обтекаемой поверхности, и др. [1].

Обнаружено, что в ПС все энергетические обменны обусловлены особенностями отдельных характерных видов КВС и их взаимодействием. Упорядоченные КВС были обнаружены в переходном и турбулентном пограничных слоях (ТПС). Исследование законов их развития (формирования и чередования) позволили предложить гипотезу:

при соответствующем управлении этих когерентных структур можно влиять на кинематические параметры ПС. При этом необходимо обеспечить влияние не на весь ПС, а на его малую область, где сформировано ядро КВС, а также на область ПС, где происходит основной обмен компонентов энергии. Из этого следует, что необходимо влиять только на возмущающее движение. Уровень интенсивности возмущающего движения на порядок величины меньше по сравнению с характеристиками энергии всего ПС. Следовательно, расход энергии, необходимой для управления КВС, будет на порядок меньше по сравнению с энергией, требуемой для традиционных методов управления ПС.

В настоящее время основное внимание уделяется исследованию характерных особенностей различных видов КВС. В [2, 3] рассмотрены и систематизированы основные виды КВС. Нами систематизировано 12 основных видов КВС, возникающих при взаимодействии тел с потоком, и методы их управления. Перечислим основные виды КВС

при взаимодействии тел с потоком.

1.1. КВС ламинарного, переходного и турбулентного ПС.

1.2. КВС в потоке на криволинейных поверхностях.

1.3. КВС, формирующиеся при обтекании углублений на поверхности тел.

1.3.1. Поперечные (трансверсальные) КВС.

1.3.2. Продольные КВС.

1.3.3. Торнадо-подобные КВС.

1.4. КВС, формирующиеся при обтекании выступов.

1.4.1. Поперечные КВС.

1.4.2. Продольные КВС.

1.5. КВС, возникающие в угловых местах обтекаемых тел.

1.6. КВС, возникающие вдоль продольнообтекаемого тела.

1.7. КВС, возникающие при обтекании крыльев.

1.7.1. КВС, возникающие при обтекании профилей под углом атаки.

1.7.2. КВС, возникающие на концах выступов и крыльев.

1.7.3. КВС, возникающие на треугольном крыле.

1.7.4. КВС, формирующиеся за колеблющимся крылом.

1.8. КВС, возникающие на плохообтекаемых телах.

1.9. КВС, возникающие во внутренних течениях.

1.10. КВС, возникающие на границе затопленных и пристеночных струй.

1.11. КВС, возникающие при нестационарном (поступательном, вращательном) движении тел.

1.12 Геофизические КВС.

В настоящей работе будут рассмотрены КВС переходного ПС и ТПС, а также некоторые методы их управления для направленного влияния на характеристики ПС.

1. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ

Экспериментальные исследования проводились в гидродинамическом стенде малой турбулентности [4] и в аэродинамической трубе [5, 6]. Основные технические данные стенда следующие: длина стенда 7 м, длина рабочего участка 3 м, сечение рабочего участка $0,09 \times 0,25$ м, диапазон рабочих скоростей $0,05 \div 1,5$ м/с, сужение диффузора равно 10. Измерения физических особенностей КВС проводились с помощью теллур-метода Вортмана [4]. Вдоль рабочего участка на подвижной те-

лежке перемещались державки, на которых на различных расстояниях вдоль вертикальной (Y) и трансверсальной (Z) осей координат припаивались теллуровые проволочки. При пропускании тока с этих проволочек стекал коллоидный теллур, визуализирующий возмущающее движение ПС. Одновременно фотографировались мгновенные профили скорости и линий тока в объеме жидкости. Наряду с визуализацией течения теллур-метод дает возможность одновременно выполнить количественную обработку полученных результатов. Разработанная методика позволяет построить пространственно-временную картину возмущающего движения и поле скоростей на различных этапах перехода.

Кроме того, в характерных местах по осям Y и Z , определенных на основании полученных фотографий, были измерены кинематические характеристики ПС с помощью лазерного доплеровского измерителя скорости (ЛДИС) и термоанемометра DISA.

2. РАЗВИТИЕ ВОЗМУЩАЮЩЕГО ДВИЖЕНИЯ В ПЕРЕХОДНОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ

На основании экспериментальных исследований ПС [4], а также соответствующих визуализационных картин, приведенных в исследованиях других авторов, разработан и изготовлен макет КВС ПС (рис. 1), на котором изображена структура течения на отдельных этапах перехода при низкой степени турбулентности ($\varepsilon \leq 0,05\%$) [3, 7, 8]. Единый процесс перехода можно условно разделить на следующие этапы:

I. Ламинарное течение в ПС до области числа Рейнольдса потери устойчивости.

II. Усиление плоских волн Толлмина–Шлихтинга (Т – Ш).

III. Деформация этой волны в плоскости XOZ .

IV. Деформация волны в плоскости YOZ , амплитуда волны становится периодической функцией Z с пиками и впадинами в этом направлении.

V. Усиление деформированной волны, приводящее к вытягиванию пиков вперед и вверх и к образованию продольно ориентированных шпилькообразных (Λ – образных) вихрей.

VI. Отрыв или складывание головных участков этих вихрей и слияние следующих друг за другом их продольных боковых частей – образование вихревой системы с взаимно-противоположным вращением соседних продольных вихрей.

VII. Изменение формы и интенсивности вихрей.

Переход от прямолинейной к зигзагообразной траектории движения вихрей в плоскости XOZ (меандрирование).

VIII. Срыв периферических частей изгибающихся по Z вихрей и образование ТПС.

На рис. 1 черными линиями на макете показаны линии тока, а светлыми – линии равных скоростей. На каждом этапе перехода круговыми стрелками показано направление завихренности, а прямыми стрелками – направление оси вихря. На этапах IV – VII вертикальные стрелки показывают течение в пиках и впадинах. В зависимости от внешних условий чередование этих этапов может происходить с различной скоростью. При воздействии ухудшающих факторов возможно также слияние отдельных этапов или развитие ТПС сразу после срыва головок Λ -образных вихрей (после V этапа).

Кинематическая структура возмущающего движения на этапах перехода связана с пульсационным полем давления в ПС. Например, на I этапе при колебательном синусоидальном возмущающем движении в ПС возникает плоское синусоидальное пульсационное поле давления, которое обусловлено тем, что частички жидкости движутся периодически в слоях с различной скоростью. На последующих этапах перехода пульсационное поле давления изменяется в соответствии с формой кинематической структуры возмущающего движения. При этом плоскопараллельная форма поля давления преобразуется в пространственную форму. Косвенным подтверждением этому служат измерения (собственные [7] и других авторов) структуры осциллограмм пульсации продольной составляющей скорости, полученных с помощью термоанемометра и лазерного анемометра на различных этапах перехода [9].

3. КОГЕРЕНТНЫЕ ВИХРЕВЫЕ СТРУКТУРЫ В ТУРБУЛЕНТНОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ

Кляйн охарактеризовал восемь типов КВС, существующих в каноническом ТПС [10]:

1. Низкоскоростные полосы в области $0 < y^+ < 10$.
2. Выбросы низкоскоростной жидкости от стенки.
3. Движение высокоскоростной жидкости к стенке.
4. Вихревые структуры нескольких предполагаемых типов.
5. Сильные внутренние сдвиговые слои в пристеночной области $y^+ < 80$.
6. Пристеночные карманы, четко наблюдаемые

как области отмеченных частиц.

7. Большие (дельтаобразные) разрывы продольной скорости.

8. Крупномасштабные движения во внешних слоях.

Кляйн подробно проанализировал все эти типы КВС. Известно, что на плоской пластине основная часть турбулентности ($\sim 70\%$) во внутренних слоях генерируется за счет собственных механизмов, а меньшая часть ($\sim 30\%$) добавляется за счет действий пульсаций во внешней области. Кляйн утверждал, что в ТПС происходит взаимодействие как внутренних причин порождения турбулентности, так и внешних причин, вызванных пульсациями внешних слоев ПС. Однако до сих пор физический механизм взаимодействия КВС ТПС остается не ясным.

В 1980 г. нами была выдвинута гипотеза [11]: в вязком подслое ТПС развитие КВС происходит примерно так же, как и в переходном ПС, но при воздействии ухудшающих факторов. В 1983 г. Блэквэлдер опубликовал работу, в которой проводит аналогию между течениями в переходном ПС и ТПС [12].

В работах Мэнга [13, 14] выполнено обобщение результатов экспериментальных исследований других авторов и построена модель КВС в ТПС. В [13–16] выполнен подробный анализ современного состояния исследования КВС турбулентного и переходного ПС. Бандиападхая и Мохаммед Гад эль Хак [17] с помощью дымовой визуализации выполнили экспериментальные исследования крупных КВС во внешней области ПС.

На рис. 2 представлена схема развития КВС в ПС плоской жесткой пластины на всех этапах его развития [3]. Макет разработан нами на основе анализа работ Кляйна [10], Мэнга [13, 14] и других авторов, а также собственных экспериментальных исследований. При обтекании плоской пластины 1 в ламинарном ПС 2 возникают плоские волны Т–Ш 8, которые преобразуются в трехмерную волну 9 (см. также рис. 1). Эта волна имеет синусоидальную форму в плоскостях XOZ и YOZ . При дальнейшем ее развитии формируются шпилькообразные вихри 10 (V стадия перехода). Головная часть этих вихрей направлена к внешней границе ПС. Под влиянием неравномерности поля скоростей по толщине ПС в вихрях 10 формируются впадины в трансверсальном направлении. Под действием более скоростных слоев возрастает напряжение сдвига ПС, головная часть 14 вихря 11 отделяется, а боковые поверхности вихря 11 сгибаются в два продольных вихря 12 (VI стадия перехода). При меандрировании продольных

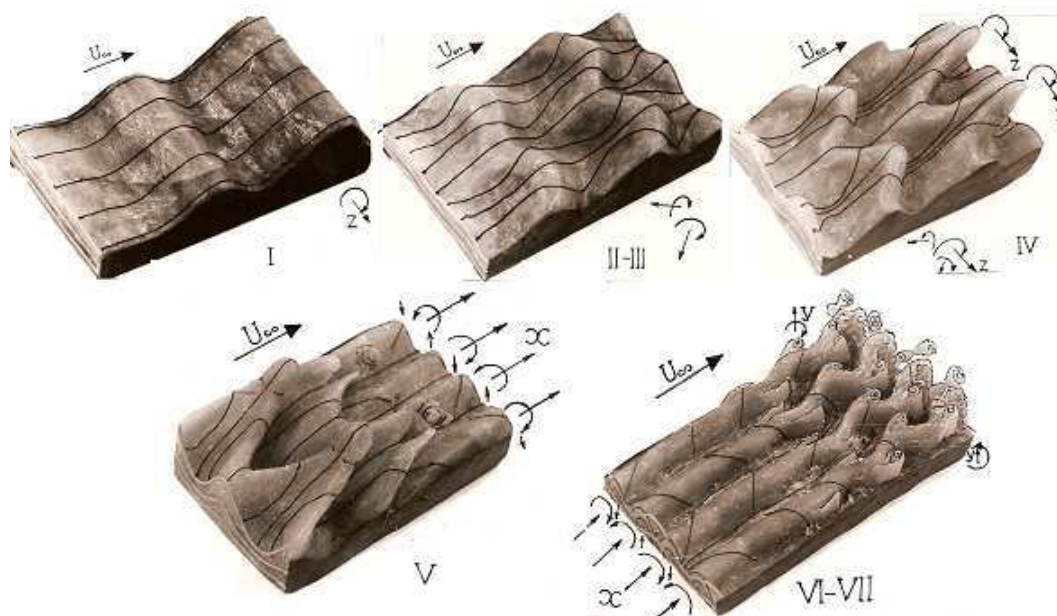


Рис. 1. Макет развития возмущающего движения на отдельных этапах перехода ламинарного ПС в ТПС

вихрей 12 на их боковых поверхностях возникают вертикальные вихри 13. Периодически вихри 13 отрываются (VII стадия перехода). Вследствие разрушения вихрей 13 возникает разрушение продольных вихрей и формируется ТПС (VIII стадия перехода).

Развитие возмущающего движения в переходном ПС происходит в узком конусном слое, расположенном симметрично относительно плоскости критического слоя (соответствует толщине вытеснения δ^*) и параллельно обтекаемой горизонтальной пластине. Измерение кинематических характеристик позволило обнаружить существование двух областей в переходном ПС, в которых наблюдается скачок энергии. Первый скачок энергии происходит после разрушения головных частей шпилькообразных вихрей (энергия ПС существенно уменьшается). Второй скачок энергии происходит после разрушения продольных вихрей перед формированием ТПС. Таким образом, энергия ПС также уменьшается и формируется вязкий подслой ТПС, в котором тоже наблюдаются скачки энергии после выбросов из вязкого подслоя. При этом частота такого рода скачков энергии существенно увеличивается (частота выбросов из вязкого подслоя). ТПС наступает после VII стадии перехода, если сохраняются идеальные условия обтекания. При различных ухудшающих факторах ТПС может наступить после V стадии перехода. В обоих случаях предыдущая история в ви-

де продольных вихревых систем переходного ПС продолжает развиваться при формировании ТПС. Таким образом, ТПС в пристеночной области содержит типичные особенности КВС переходного ПС. Происходит существенное утолщение ТПС. В начальной стадии формирования ТПС состоит из больших шпилькообразных структур 15, разделенных в продольном направлении карманами замедленной жидкости 17, и в трансверсальном направлении – карманами 16. Как и в переходном ПС, головные части этих шпилькообразных структур сдуваются, но уже невозмущенным потоком. Большие вихри 18 движутся вниз в менее скоростные области ПС. Достигая внешней границы вязкой области, эти вихри наносят удар (19) по внешней границе, вызывают колебание в этой границе и вносят возмущения в вязкую область. В буферной зоне с разрушением этих вихрей появляются КВС в форме продольных вихрей 20. Возникшие деформации на внешней границе вязкой области и возмущения, вызванные вихрями 18, в дальнейшем инициируют выбросы 23 из вязкого подслоя вследствие ускоренного развития КВС в вязком подслое.

Трехмерные волны 21 появляются в вязком подслое подобно волнам 9 в переходном ПС. Поскольку поток в вязком подслое подвергнут интенсивным возмущениям из внешней области и ядра ТПС, возмущающее движение в вязком подслое фактически сразу будет преобразовано от стадии

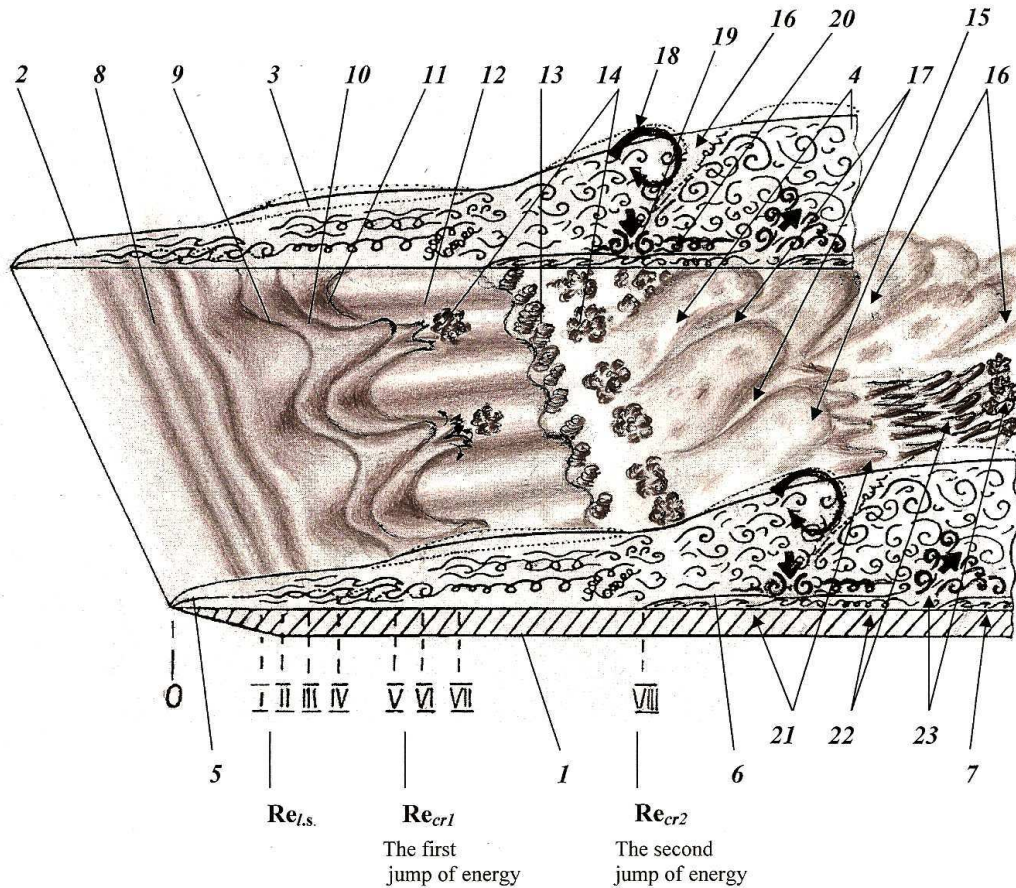


Рис. 2. Схема развития КВС в ПС:

1 – пластина, 2 – ламинарный ПС, 3 – переходный ПС, 4 – турбулентный ПС, 5 – критический слой ламинарного ПС, 6 – вязкий подслой ТПС, 7 – восстановленный вязкий подслой, 8 – плоские волны Т-Ш, 9 – трехмерные волны Т – Ш, 10 – шпилькообразные вихри, 11 – разрушенные шпилькообразные вихри, 12 – продольные вихри, 13 – вертикальные вихри, 14 – оторвавшиеся вихри, 15 – шпилькообразные вихри ТПС, 16 – поперечные карманы ТПС, 17 – продольные карманы ТПС, 18 – обрушившиеся крупные вихри, 19 – эти же сплюснутые вихри, 20 – продольные КВС в буферной области, 21 – трехмерные волны в вязком подслое, 22 – вихри Клейна, 23 – выбросы (взрывы) из вязкого подслоя

линейных волн к трехмерным волнам, которые далее развиваются в виде вихрей Клейна 22. Эти вихри Клейна развиваются двумя путями. В первом они увеличиваются в размере и, подобно шпилькообразным вихрям переходного ПС, разрушается их развивающаяся головная часть. Во втором этот процесс ускоряется из-за действия больших вихрей 18, поступающих в направлении обтекаемой границы. В обоих случаях разрушение Клейновских вихрей приводит к разрушению вязкого подслоя и выбросу замедленной жидкости из вязкого подслоя. В связи с этими двумя причинами, происходят постоянные статистически неопределенные в плоскости XOZ выбросы из вязкого подслоя в направлении его внешней границы. Посредством различных методов усреднения определены вероя-

тные характерные параметры таких выбросов и размеры КВС в вязком подслое (см. схему ТПС Мэнга [13, 14]).

Таким образом, есть три области поперек толщины ТПС, содержащие характерные КВС:

- область внешней границы ТПС, в которой формируются большие вихри с главной осью симметрии вдоль оси OZ ;

- область буферного слоя с периодическим возникновением вихрей с главной осью симметрии вдоль оси OX ;

- область вязкого подслоя с вихрями Клейна с главной осью симметрии вдоль оси OX и с периодическими их выбросами вверх под углом к оси OY .

Модель развития КВС в переходном ПС (см.

рис. 1) универсальна. Подобно этой модели происходит развитие КВС ТПС по толщине и в его вязком подслое. С ростом числа Рейнольдса размеры карманов 16, 17 уменьшаются.

На основании измерений, выполненных с помощью ЛДИС при $\varepsilon > 1\%$, стадии перехода, приведенные на рис. 1, 2, соответствуют следующим числам Рейнольдса [7]: этап I – $Re = 0.2 \cdot 10^5$; этап II – $0.3 \cdot 10^5$; этап III – $0.37 \cdot 10^5$; этап IV – $0.44 \cdot 10^5$; этап V – $0.5 \cdot 10^5$; этап VI – $0.8 \cdot 10^5$; этап VII – $0.98 \cdot 10^5$; этап VIII – $1.47 \cdot 10^5$.

Эксперименты показали [18–20], что коэффициент сопротивления трения пластины имеет минимальное значение, когда в ПС преобладают КВС с осью вихря в трансверсальном (вдоль оси OZ) или продольном (вдоль оси OX) направлениях. Таким образом, можно ожидать, что если поддерживать устойчивое существование этих двух форм возмущающего движения, то возможно уменьшить расход энергии на управление ПС. Это предположение стимулировало разработку нового направления – управление КВС ПС. В [3, 8, 21] приведена систематизация различных методов управления КВС. Ниже будет рассмотрен один из способов управления КВС из группы механических методов управления. С помощью этого способа в ПС, в частности, формируются продольные КВС. В основе подхода к проведению этих исследований положен разработанный нами метод восприимчивости ПС различных возмущений.

4. МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ВОСПРИИМЧИВОСТИ ПОГРАНИЧНЫМ СЛОЕМ РАЗЛИЧНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ

В реальных условиях обтекания тел в ПС всегда существуют различные возмущения. В соответствии с величинами этих возмущений их можно условно разделить на возмущения I и II групп. К I группе отнесем возмущения малой величины, действующие на возмущающее движение ПС. Например, к таким возмущениям относятся внешние, т.е. действующие с внешней границы ПС, – это турбулентность невозмущенного потока, его вихревые и термодинамические возмущения, акустические и электродинамические поля окружающей среды и др. Внутренние возмущения I группы действуют на ПС со стороны его внутренней границы, т.е. со стороны обтекаемой поверхности. К ним можно отнести неровность поверхности, шероховатость, различные выступы и выемки, вибрацию поверхности, ее термодинамические характеристики и др.

Важным этапом исследования является изуче-

ние характерного вида КВС, а также их особенностей развития при влиянии на ПС внешних и внутренних возмущений I группы. Предложена и развивается проблема восприимчивости пограничного слоя к различным возмущениям [7, 8, 18–22]. В этом случае рассматривается взаимодействие различных внешних возмущений I группы с характерными КВС ПС на каждом этапе перехода, возникающих при естественном развитии перехода (рис. 1, 2).

Вторая группа возмущений – это возмущения большой величины, действующие на весь ПС. Такие возмущения могут возникать при обтекании криволинейной поверхности, различного рода углублений и выступов на поверхности, угловых сочленений, крыльев под углом атаки или треугольных крыльев и в других случаях обтекания тел. При совершении маневра на выступающих частях тела и на боковых областях тела формируются крупные продольные вихри (КПВ), воздействующие как на ПС, расположенный в районе расположения КПВ, так и на ПС, расположенный ниже по потоку. Такие возмущения можно считать возмущениями III группы. В реальных условиях движения тело совершает различные по амплитуде и частоте колебания. В процессе таких колебаний на теле и элементах его конструкции образуются КПВ, которые вследствие колебательного движения тела являются нестационарными и мандрирующими. Причиной появления КПВ являются также режимы ускорения и торможения и, как следствие, появление дополнительной присоединенной массы и заторможенных отрывных пучков.

К настоящему времени выполнено недостаточное количество исследований влияния таких КПВ на характер обтекания тела. Практически не изучены задачи исследования особенностей взаимодействия указанных трех групп возмущений. Проблема восприимчивости пограничного слоя состоит из трех направлений:

- восприимчивость ПС возмущений I группы КВС;
- восприимчивость ПС возмущений I и II групп в различных сочетаниях;
- восприимчивость ПС возмущений II и III групп.

На рис. 3 приведена схема взаимодействия в ПС различных возмущений I группы КВС. Эту схему можно рассматривать в качестве примера взаимодействия возмущений ПС с возмущениями, генерируемыми со стороны обтекаемой поверхности. Кроме того, схема иллюстрирует также принципы управления КВС ПС.

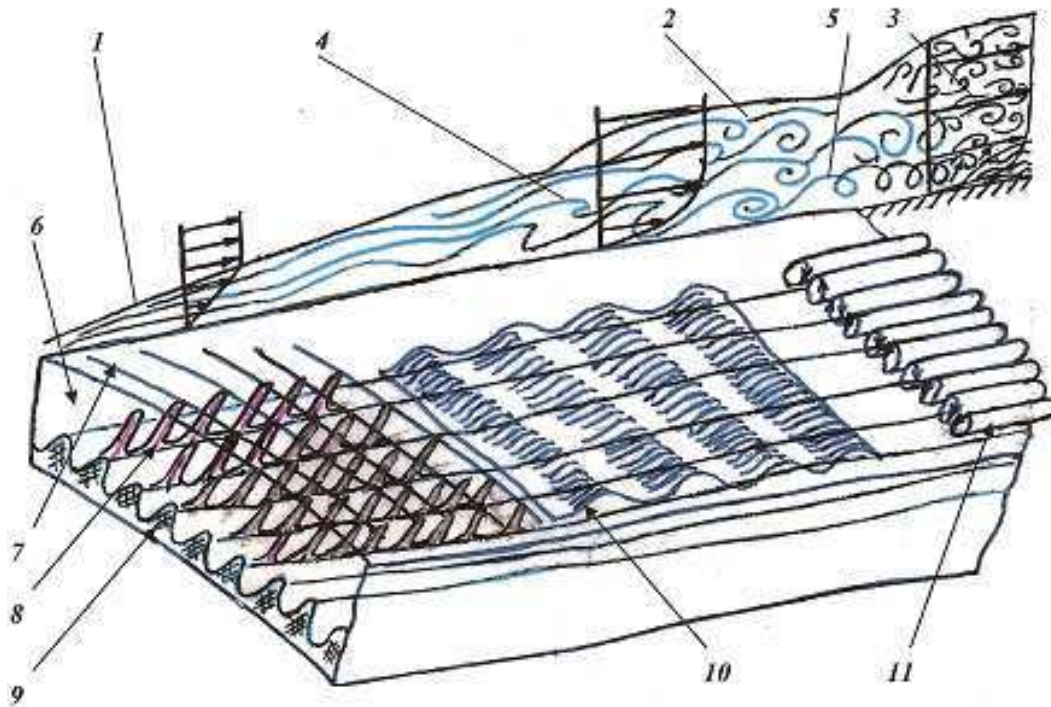


Рис. 3. Схема формирования в ПС различных видов КВС с помощью эластичной пластины: 1 – ламинарный ПС, 2 – переходный ПС, 3 – ТПС, 4 – двумерные возмущения, 5 – продольные вихри в ПС (трехмерные возмущения), 6 – наружный слой эластичной поверхности, 7 – трансверсальные микрообразования, 8 – вертикальные цилиндрические микрополости, 9 – продольные конструкции перевернутых риблетов, 10 – синусоидальные волны, генерируемые поперечными рядами микроцилиндров, 11 – продольные вихри в ПС, генерируемые продольными рядами микроцилиндров и перевернутыми риблетами

Обтекаемая поверхность выполнена из трех слоев эластичного материала [23]. Наружный слой выполнен в виде перевернутых риблетов – это риблеты, обтекаемая поверхность которых гладкая, а выступы направлены внутрь эластичной пластины (рис. 3, поз. 9). Во впадинах этих риблетов выполнены продольные ряды наклонных цилиндрических каналов 8, наполненных жидкостью. Упрощенная конструкция такой эластичной композитной пластины приведена в [22], а полное описание дано в [24]. Под действием возмущений, поступающих из ПС, наклонные ряды каналов 8 изгибаются и генерируют снизу в ПС плоскую синусоидальную волну 10 или трехмерную волну, подобную II–III этапам перехода (см. рис. 1). Конструкция позволяет генерировать также в ПС шпилькообразные вихри, подобные приведенным на IV этапе перехода (рис. 1). Указанная конструкция позволяет генерировать в ПС системы продольных вихрей 11. Внутри конструкции эластичной пластины имеются соответствующие полости, заполненные жидкостью и соединенные с источником давления. В зависимости от величин

этого давления упругость каналов 8 регулируется. Кроме того, можно задавать определенный закон пульсаций давления. Это дает возможность направленно генерировать в ПС указанные выше различные виды возмущений со стороны обтекаемой поверхности.

В случае существования в ПС, например, плоских волн Т–III в обтекаемую поверхность, приведенную на рис. 3, будет поступать пульсационное поле давления этих волн. При соответствующем давлении в полостях покрытия пульсационное поле давления ПС вызовет в покрытии плоские упругие колебания, которые будут генерироваться снизу в ПС. В результате пульсационное поле давления волн Т–III будет взаимодействовать с плоским полем давления, генерированным в ПС со стороны обтекаемой поверхности. Конструкция покрытия позволяет создавать в покрытии управляемое пульсационное поле давления с заданной частотой и амплитудой. В частности, покрытие может генерировать в ПС плоское поле давления с заданными характеристиками. В этом случае будет осуществляться регулируемое активное вза-

имодействие волн Т–Ш, существующих при естественном переходе, с плоским полем давления, генерируемым в ПС со стороны обтекаемой поверхности. Таким же образом каждый вид КВС ПС вызовет соответствующую реакцию в покрытии и будет взаимодействовать с генерируемым снизу соответствующим КВС. Конструкция позволяет направленно генерировать в ПС заданный вид КВС и направленно воздействовать на характер и степень развития возмущений в ПС.

Первоначально на различных этапах перехода при обтекании жесткой пластины были выполнены экспериментальные исследования восприимчивости ПС к плоским возмущениям [7, 20, 22, 24, 25]. Плоские колебания в ПС вносились так же, как и в [4], – с помощью колеблющейся ленточки. При этом была увеличена амплитуда колебания ленточки с $0.24 \div 0.32$ мм до $0.8 \div 0.9$ мм и степень турбулентности основного потока с $\varepsilon \leq 0.05\%$ до $\varepsilon \geq 1\%$. Ленточка размещалась по X на расстоянии 0.15 м перед местом измерения профилей скорости и по Y – в районе максимума профилей продольной пульсационной скорости на каждом этапе перехода ($y \approx \delta^*$). Измерения проводились в гидродинамическом стенде лазерным анемометром. Профили осредненной и пульсационной продольных скоростей на различных этапах перехода при естественном возникновении турбулентности являлись эталонными. На первых пяти этапах перехода КВС ПС взаимодействовали с вносимыми плоскими колебаниями, при этом сохранялись признаки плоской волны. На VI и VII этапах перехода КВС с продольной завихренностью не взаимодействовали с вносимыми плоскими возмущениями. В соответствии с пульсационными профилями продольных скоростей можно заключить, что процесс перехода при этом ускорялся. Механизм восприимчивости оказался избирательным: совпадение типов естественно существующих и вносимых КВС вызывает наиболее интенсивную реакцию ПС.

5. ВОСПРИИМЧИВОСТЬ ПОГРАНИЧНЫМ СЛОЕМ ТРЕХМЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ

Методика исследования восприимчивости ПС к трехмерным возмущениям заключалась в следующем. Устанавливался характер и структура КВС на каждом этапе при естественном развитии перехода с помощью визуализации теллур-методом Вортмана. В дальнейшем в характерных местах проводились соответствующие измерения с помощью ЛДИС и ДИЗА. Последовательно на каждом этапе перехода в ПС вносились трехмерные во-

змущения с помощью различных видов генераторов вихрей (ГВ). Теллуровая проволока размещалась на различных расстояниях по δ . Каждый тип ГВ устанавливался с различными расстояниями λ_z . Исследовались также полученные результаты в зависимости от расстояния между теллуровой проволокой и ГВ. Эксперименты на различных этапах перехода проводились двумя способами: ГВ устанавливались в фиксированном месте по x и изменялась скорость потока или при постоянной скорости потока ГВ последовательно устанавливались на различных расстояниях x от начала рабочего участка. Определялось взаимодействие вносимых систем продольных вихрей с естественными структурами возмущающего движения.

Были разработаны различные методы внесения трехмерных возмущений в ПС. Трехмерные возмущения вносились в ПС с помощью механических ГВ, размещенных как на обтекаемой пластине, так и по толщине ПС [7, 8, 20, 21, 24]. Трехмерные возмущения создавались также с помощью тонких проволок, приклеенных к обтекаемой пластине с определенным шагом в продольном направлении [21]. При этом для увеличения эффективности этого метода через проволоку пропускался электрический ток [9]. Трехмерные возмущения создавались также путем изготовления пластины из продольных склеенных эластичных полосок с заданным шагом в трансверсальном направлении [20–22, 24, 26] и путем изготовления эластичной пластины, наружный слой которой представлял собой перевернутые риблеты [23] (см. рис. 3).

Кроме того, исследовалась восприимчивость ПС к вносимому сложному возмущающему движению [18, 19, 20, 26, 27]:

- в пограничный слой сверху вносились плоские возмущения в области δ^* , а снизу со стороны обтекаемых эластичных пластин вносились трехмерные возмущения с шагом λ_z , равным $1.8 \cdot 10^{-3}$ или $5 \cdot 10^{-3}$ м;

- в пограничный слой сверху вносились трехмерные возмущения с помощью механических ГВ различных масштабов, а снизу со стороны обтекаемых эластичных пластин вносились трехмерные возмущения с указанным выше шагом.

Ниже представлены результаты взаимодействия ПС с трехмерными возмущениями, генерируемыми механическими ГВ, которые изготавливались из тонких металлических пластинок различных размеров (рис. 4). Каждая пластинка сгибалась пополам в продольном направлении. После этого полученные две пластинки разгибались с помощью специального приспособления таким обра-

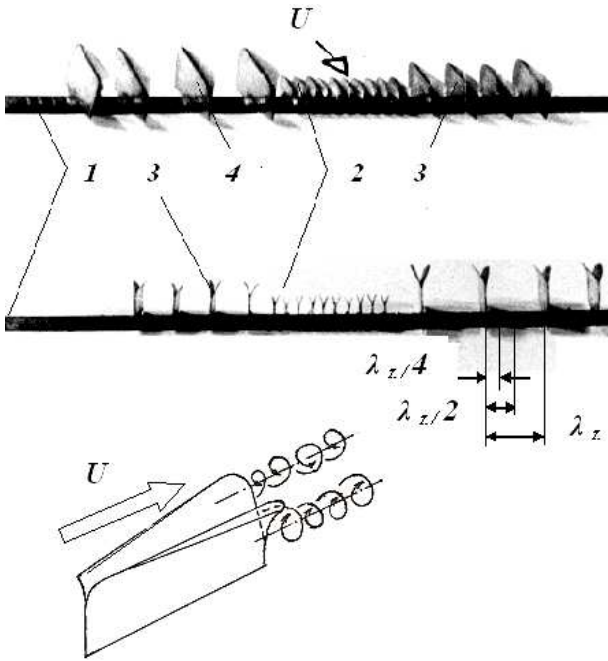


Рис. 4. Генераторы трехмерных возмущений:
1 – пластина для размещения ГВ,
2 – маленькие ГВ1, 3 – средние ГВ2,
4 – большие ГВ3.

зом, что вдоль длины пластинок увеличивалось расстояние между этими двумя плоскостями. Обе пластинки вдоль длины разворачивались по конусной поверхности приспособления так, что на каждой пластинке в верхней части вдоль ее длины формировался сектор конусной поверхности. Таким образом, формировались крылышки с парой развернутых вверх лепестков по одинаковой для всех крылышек конусной поверхности. Торцевые стороны крылышек сверху были скруглены.

При обтекании полученных крылышек сверху поток перемещался между лепестками крылышек по раскрывающемуся пространству и закручивался в две противоположные конусные поверхности. По нижней поверхности лепестков поток также отклонялся вниз и закручивался по тем же конусным поверхностям. Обтекаемая поверхность лепестков снизу была больше, чем сверху, так как снизу обтекалась вся боковая поверхность крылышек, а сверху – только часть боковой поверхности в виде сектора конусной поверхности. Кроме того, снизу площадь лепестков находилась в области толщины ПС от нуля до высоты соответствующего крылышка. А сверху площадь лепестков обтекалась только потоком более быстрого верхнего слоя ПС, расположенного на уровне высоты крылышек. Это обусловлено тем, что

в начале крылышек их плоскости были сжаты и далее вдоль потока постепенно раскрывались по конусной поверхности. В результате за задними кромками лепестков встречались два закрученных слоя жидкости – более скоростной закрученный верхний слой смыкался с менее скоростным слоем жидкости, закрученным по той же поверхности обтекаемой плоскости лепестка с нижней поверхности. Верхний слой жидкости накладывался на нижний слой и еще больше закручивал его. За каждым крылышком формировалась пара продольных вихрей. Размер и интенсивность этих вихрей определялась как размером крылышек, так и расстоянием между соседними крылышками λ_z .

Было изготовлено четыре вида ГВ размерами:

- маленькие крылышки высотой $h = 3 \cdot 10^{-3}$ м и длиной $b = 9 \cdot 10^{-3}$ м (ГВ1);
- средние крылышки $h = 5 \cdot 10^{-3}$ м и $b = 15 \cdot 10^{-3}$ м (ГВ2);
- большие крылышки $h = 7 \cdot 10^{-3}$ м и $b = 18 \cdot 10^{-3}$ м (ГВ3);
- крылышки для исследований на эластичных поверхностях $h = 15 \cdot 10^{-3}$ м и $b = 18 \cdot 10^{-3}$ м (ГВ4).

Угол раскрытия крылышек – переменный по высоте и в крайнем верхнем положении составлял $\beta = 10^\circ$. Безразмерный параметр b/h для первых двух ГВ составил 3.0, а для ГВ3 – 2.6. Каждое крылышко просверливалось в трех местах. В полученные отверстия протягивались тонкие проволочки, которые натягивались и закреплялись на державке, приведенной в [4, 7, 24]. С помощью микрометра имела возможность вносить в ПС системы продольных вихрей различного масштаба на различных расстояниях от обтекаемой поверхности. Была изготовлена также пластинка длиной 0.12 м, шириной $7 \cdot 10^{-3}$ м и толщиной $0.8 \cdot 10^{-3}$ м. В поперечном сечении пластинка снизу была плоской, а сверху выполнена в виде сегмента окружности диаметром 0.2 м. Пластинка устанавливалась на обтекаемую поверхность поперек потока. Вдоль потока на пластинке сделаны прорезы с шагом $2 \cdot 10^{-3}$ м. В прорезы поочередно устанавливались указанные три типа крылышек с различными расстояниями λ_z между собой.

Как и при исследовании восприимчивости ПС к плоским возмущениям, вначале были выполнены эталонные исследования структур течения в ПС при естественном развитии КВС при $\epsilon \leq 0.5\%$ и $\epsilon \geq 1\%$. Основное внимание уделялось измерениям развития профилей скорости $U(z)$. Визуализация показала, что такие профили скорости наиболее информативны при малых скоростях потока [4].

На рис. 5 приведены графические копии разви-

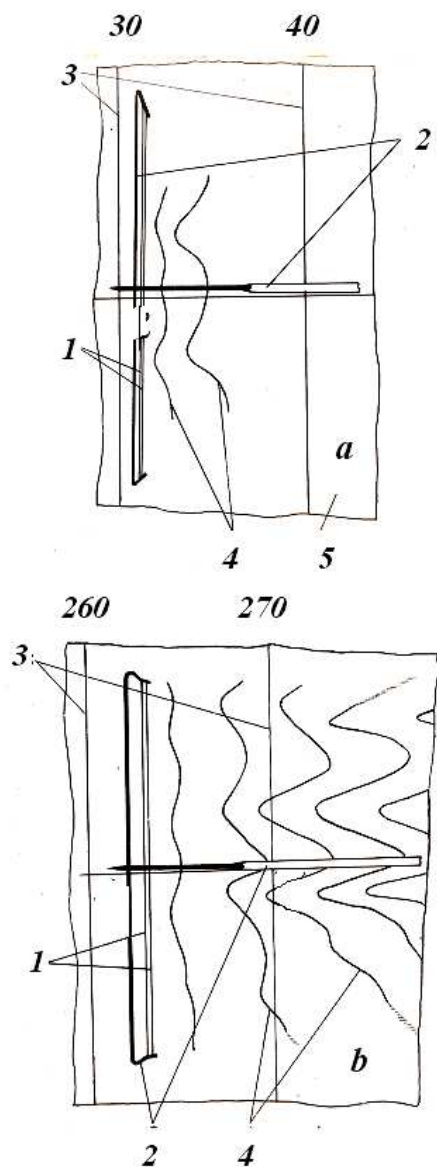


Рис. 5. Графические копии фотографий визуализации развития профилей скорости U_z в начале (а) и в конце (б) рабочего участка при $\epsilon = 0.5\%$, $U_\infty = 10.5 \cdot 10^{-2}$ м/с, $y/\delta = 0.2$:
1 – теллуриновые проволоки (tellurium wire);
2 – державки теллуриновых проволок;
3 – метки расстояний вдоль рабочего участка, см;
4 – профили скорости; 5 – нижняя стенка рабочего участка

тия профилей скорости $U(z)$ вдоль x при низкой степени турбулентности ($\epsilon \leq 0.5\%$).

Направление основного потока – слева направо. Устройство для генерирования теллурикового облака и фотографирования визуализированных профилей скорости с помощью этого облака через 0.5 с приведены в [4]. Таким образом, на рис. 5

приведено развитие мгновенных профилей скорости $U(z)$ через указанный интервал времени. При анализе изменения профиля скорости следует учитывать, что, начиная со второго профиля скорости, визуализированная картина отображает характер развития физических процессов формирования в ПС соответствующих структур (этапов перехода).

Зная скорость основного потока, параметры, приведенные в подписной подпункте, и расстояние между метками 3 на дне рабочего участка, можно определить кинематические параметры развития профилей скорости, приведенных на рис. 5. Видно, что в начале рабочего участка ($Re = 0.36 \cdot 10^5$) на I этапе перехода скорость деформации профиля скорости $U(z)$ небольшая, а в конце рабочего участка ($Re = 2.76 \cdot 10^5$) на VII этапе перехода – существенно больше. При этом форма деформации профиля скорости существенно изменилась: по ширине рабочего участка сформировались четыре волны трансверсальной деформации профиля скорости. Максимум одной из волн расположен вдоль продольной оси рабочего участка. Отметим, что с левой стороны по потоку формируется более четкая деформация профиля скорости. Это обусловлено, по-видимому, особенностями течения в гидродинамическом стенде. Следует учесть, что в разделе 3 указаны числа Рейнольдса, соответствующие различным этапам перехода при $\epsilon \geq 1\%$. На рис. 5 при $\epsilon \leq 0.5\%$ аналогичные этапы перехода наблюдались при больших числах Рейнольдса.

На рис. 6 приведена аналогичная картина развития профилей скорости $U(z)$ вдоль x при повышенной степени турбулентности основного потока ($\epsilon \geq 1\%$). Координата x теллуриновой проволоки вдоль рабочего участка соответствует координате первой левой вертикальной метке. Координата по y/δ теллуриновой проволоки выбиралась в районе местного расположения критического слоя в зависимости от x (δ – толщина пограничного слоя). Профили скорости отличаются от приведенных на рис. 5 нерегулярностью, большими амплитудами и максимумами волны профилей $U(z)$. Максимум одной из волн не расположен вдоль продольной оси рабочего участка, как на рис. 5, а меандрирует по отношению к продольной оси обтекаемой пластины. В начале рабочего участка на рис. 6, а ($Re \approx 0.2 \cdot 10^5$) так же, как и на рис. 5, первый профиль скорости равномерный, а затем быстро деформируется. Уже на рис. 6, б, в ($Re \approx 0.4 \cdot 10^5$ и $0.79 \cdot 10^5$) профиль скорости становится подобным приведенному на рис. 5, б ($Re = 2.76 \cdot 10^5$). Согласно макету этапов перехода (рис. 1) характер течения на рис. 6, б, в

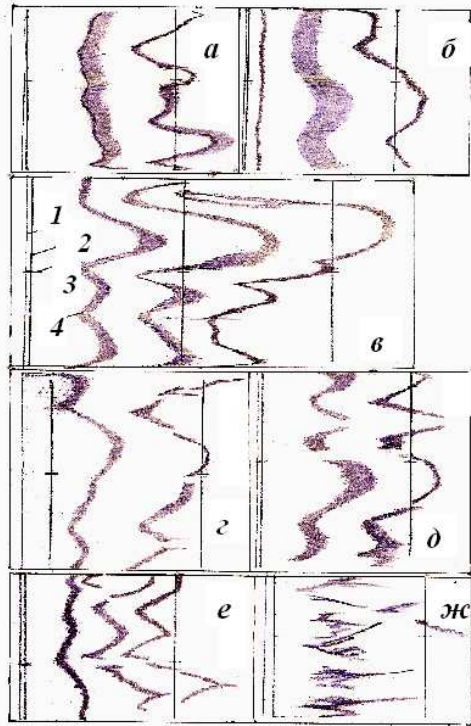


Рис. 6. Графические копии фотографий развития профилей скорости $U(z)$ при $\epsilon \geq 1\%$ и $U_\infty = 0.1$ м/с: 1 – теллуровые проволоки (t. w.), 2 – поперечные метки на пластине через 0.1 м, 3 – метки продольной оси пластины, 4 – профили скорости. Координата x теллуровой проволоки вдоль рабочего участка для: а – 0.2 м, б – 0.4 м, в – 0.8 м, г – 1.0 м, д – 1.2 м, е – 1.4 м, жс – 1.6 м

соответствует IV этапу перехода. На рис. 6, в, г, д ($Re = 0.79 \cdot 10^5$, $0.99 \cdot 10^5$ и $1.19 \cdot 10^5$) сформировались регулярные волны в трансверсальном направлении, при этом по мере их развития на отдельных пиках этих волн наблюдаются разрывы. Это соответствует отрыву вершин шпилькообразных вихрей (рис. 1, V этап перехода). На рис. 6, е ($Re = 1.39 \cdot 10^5$) появляются заостренные вершины волны с характером меандрирования (VII этап перехода). Структура потока на рис. 6, жс ($Re = 1.58 \cdot 10^5$) свидетельствует о формировании ТПС (VIII этап перехода). Этот характер течения сформировался уже при $x=1.6$ м, в то время как на рис. 5 – в конце рабочего участка (при $x=2.8$ м) при низкой степени турбулентности сформировался только IV этап перехода. При большей степени турбулентности или при наличии других ухудшающих факторах переход ускоряется.

На рис. 7 приведены профили скорости $U(z)$ на плоской пластине при естественном переходе в зависимости от координаты y . Первая вертикальная

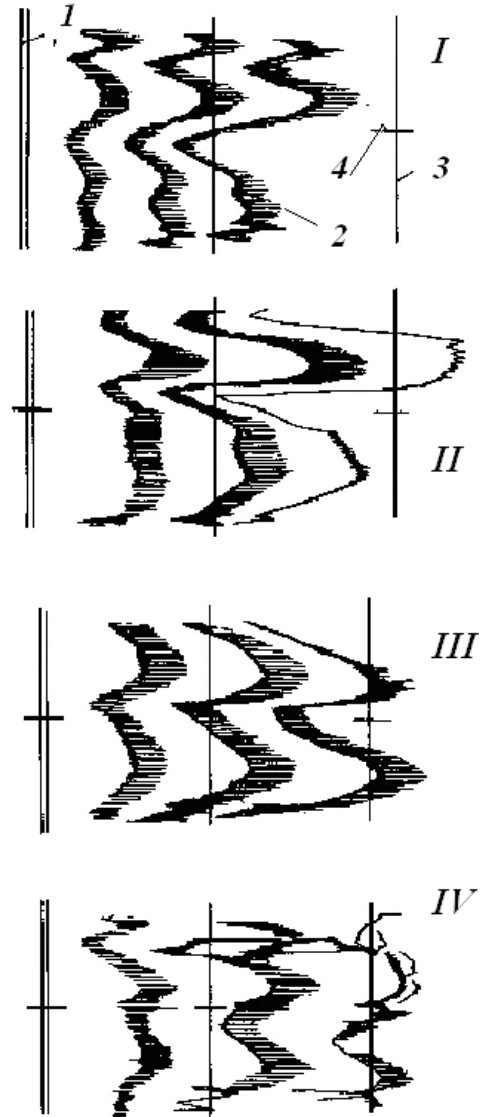


Рис. 7. Развитие возмущающего движения на жесткой пластине при естественном переходе: 1 – теллуровая проволока; 2 – профили скорости $U(z)$; 3 – поперечные метки на пластине через 0.1 м; 4 – метка вдоль продольной оси рабочего участка. $U_\infty = 7.9 \cdot 10^{-2}$ м/с; $x_{t. w.} = 1.0$ м; $y_{t. w.} = 2 \cdot 10^{-3}$ м (I); $3 \cdot 10^{-3}$ м (II); $4 \cdot 10^{-3}$ м (III); $5 \cdot 10^{-3}$ м (IV)

метка на фотографиях соответствует $x = 1.0$ м ($Re \approx 0.8 \cdot 10^5$). Направление основного потока – слева направо. Приведенные на рис. 7 результаты соответствуют типу течения на рис. 6, в. Были измерены профили скорости и при больших y (на рис. 7 не приведены). Визуализация показала, что продольные КВС расположены по всей толщине ПС. При $y < 5 \cdot 10^{-3}$ м (рис. 7) волна по z профилю скорости более мелкая, чем при $y > 5 \cdot 10^{-3}$ м

(на рис. 7 не показано). При $y > 5 \cdot 10^{-3}$ м форма волны по z укрупняется (удваивается) и вихри напоминают картину, приведенную на макете рис. 1 (VI–VII этапы перехода). Минимум волны в зависимости от y меандрирует по z . Максимум волны наблюдается при $y = 3 \cdot 10^{-3}$ м. При $y = 5 \cdot 10^{-3}$ м по краям волны зафиксированы следы высокоскоростных отрывов, напоминающих отрывы частей КВС на макете рис. 1. При $y = \delta$ ($y = 1 \cdot 10^{-2}$ м) профиль скорости $U(z)$ становится равномерным.

При повышенной степени турбулентности основного потока характер развития КВС на различных этапах перехода ПС становится нестационарным и чередование этапов перехода ускоряется. В соответствии с отмеченными выше закономерностями при исследовании восприимчивости ПС к трехмерным возмущениям необходимо учитывать особенности развития возмущений, приведенные на рис. 6, 7.

Исследование восприимчивости ПС к трехмерным возмущениям началось с изучения картины обтекания одиночных крылышек указанных масштабов и системы крылышек, установленных на различных расстояниях между собой. Визуализация выполнена с помощью одиночной теллуровой струйки. Изучалось направление закручивания одиночной струйки в зависимости от расстояния z от крылышек. При исследовании гидродинамической устойчивости [4] параметры возмущающего движения, формирующиеся с помощью колеблющейся ленточки, должны быть малыми и сопоставимыми с величиной естественных волн Т–Ш. Эксперименты показали, что конструкция приведенных на рис. 4 ГВ позволяет формировать системы продольных вихрей также малой интенсивности, сопоставимой с параметрами КВС при естественном переходе.

Известен радиус конусной поверхности, по которой формировались боковые лепестки крылышек ГВ. При виде с торца на ГВ (рис. 4) можно определить радиус генерированных продольных вихрей, соответствующих радиусу конусной поверхности приспособления. При продвижении вдоль x диаметр продольных вихрей будет возрастать. Таким образом, можно определить расстояние λ_z между ГВ, чтобы получить заданную форму и размер пары продольных вихрей, генерируемых за ГВ. Если λ_z было одинаковым для всех типов ГВ, то формировались одинаковые продольные вихревые системы, но расположенные на различных расстояниях от обтекаемой пластины (рис. 4). В соответствии с геометрическими размерами ГВ определялось расстояние λ_z , при котором поперечное сечение генерируемых продольных вихрей было симметри-

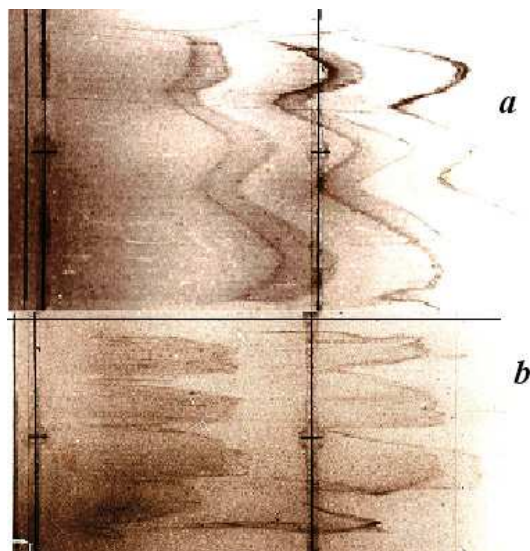


Рис. 8. Продольные КВС, вносимые в ПС различными ГВ:
а – поперечное сечение КВС круглой формы,
б – прямоугольной формы

чным. Тогда в ПС вносились различные по размеру симметричные круговые вихревые системы, продольная ось которых располагалась на различных расстояниях y . При увеличении расстояния λ_z между ГВ поперечное сечение вносимых в ПС продольных вихревых систем было не круглой, а прямоугольной формы.

На рис. 8 приведены профили скорости $U(z)$ при внесении в ПС трехмерных КВС. Направление основного потока – слева направо. Более толстые вертикальные линии – метки, а тонкие линии слева – теллуровые проволоки. Условия экспериментов – такие же, как и на рис. 6, а, б. Первая вертикальная метка слева соответствует $x=1.0$ м. Генераторы вихрей устанавливались на расстоянии $5 \cdot 10^{-2}$ м перед первой меткой. На рис. 8, а были установлены ГВ2 с шагом $\lambda_z = 1.8 \cdot 10^{-2}$ м ($b/\lambda_z=0.83$). Теллуровая проволока устанавливалась при $y_{t. в.} = 4 \cdot 10^{-3}$ м. Напротив крылышек располагались впадины, а между крылышками – максимумы трансверсальной волны профиля скорости. При развитии такого типа вихрей на расстоянии 0.1 м от ГВ и далее наблюдалось увеличение амплитуды волны.

Такую картину деформации естественного профиля скорости под действием ГВ можно объяснить двояким образом. За счет трения по боковым поверхностям ГВ и закручивания потока крылышками в районе расположения ГВ поток затормаживается вблизи крылышек, поэтому за крылышками образуются минимумы в фрон-

те профиля скорости $U(z)$. Между крылышками поток ускоряется вследствие формирования продольных вихрей. Одновременно это приводит к выравниванию естественного фронта волны $U(z)$, приведенного на рис. 6, *a, b* в процессе взаимодействия естественных и вносимых возмущений. В то же время, каждая пара соседних крылышек отклоняет и закручивает поток навстречу друг другу. Отклоненные крылышками потоки встречаются друг с другом и в зависимости от интенсивности этих потоков формируют пару продольных вихрей или посредине между крылышками увеличивают толщину δ и скорость суммарного потока. Приведенные на рис. 8, *a* профили скорости были устойчивыми и сохраняли свою форму без изменения на большом расстоянии.

На рис. 8, *b* приведен профиль скорости $U(z)$ при установке ГВЗ с шагом меньше, чем у ГВ2: $\lambda_z = 1.6 \cdot 10^{-2}$ м; $y_{t.w.} = 4 \cdot 10^{-3}$ м, ($b/\lambda_z = 1.125$). Профиль скорости при распространении вдоль потока на расстояние $x > 2 \cdot 10^{-2}$ м постепенно деформировался и приобретал форму профиля скорости, подобную приведенной на рис. 8, *a*. Хотя интенсивность вносимых КВС при этом была наибольшая, но устойчивость сформированных профилей скорости была меньше, чем при установке ГВ2 (рис. 8, *a*).

На рис. 9 приведен пример взаимодействия вносимых возмущений с естественными возмущениями ПС на I–III этапах перехода при $Re = 0.2 \cdot 10^5 \div 0.4 \cdot 10^5$. Направление скорости на рис. 9 – слева направо. Возмущения вносились с помощью ГВЗ. Первая слева вертикальная метка соответствует $x=0.2$ м. На рис. 9, *a* ГВЗ установлены за первой меткой (за теллуровой проволокой) на расстоянии $x = 5.7 \cdot 10^{-2}$ м, на рис. 9, *b* – $x = 10 \cdot 10^{-2}$ м. На рис. 9, *c* ГВЗ установлены перед теллуровой проволокой на расстоянии $5 \cdot 10^{-2}$ м, а на рис. 9, *d* – $10 \cdot 10^{-2}$ м. Для рис. 9, *a, b, d* соотношение $b/\lambda_z = 1.5$, а для рис. 9, *c* – $b/\lambda_z = 1.0$.

На рис. 9, *a* перед ГВ сформировался профиль скорости, соответствующий профилям скорости на рис. 6, *a, 7, a*. Взаимодействие естественных КВС с внесенными трехмерными возмущениями показали, что за ГВ происходит формирование трехмерных КВС с шагом, соответствующим λ_z вносимых возмущений. При $x=0.4$ м (III этап перехода) размер мелкомасштабных вихрей удваивается и разрушается. Более светлые области на профилях скорости указывают на большую диффузию вследствие возрастания местной скорости. Так, после $x=0.3$ м вследствие более интенсивной закрученности потока между соседними крылышками теллуровое облако диффундирует

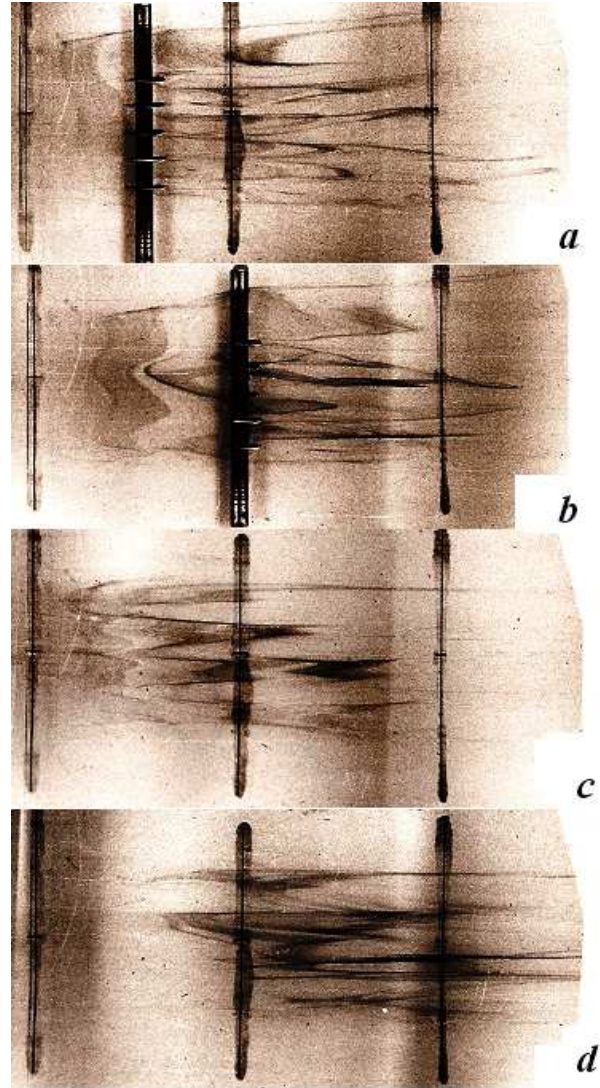


Рис. 9. Взаимодействие вносимых и естественных возмущений при $U_\infty = 0.1$ м/с; $\lambda_z = 1.2 \cdot 10^{-2}$ м (*a, b, d*) и $\lambda_z = 1.8 \cdot 10^{-2}$ м (*c*); $y_{t.w.} = 2 \cdot 10^{-3}$ м (*a, b*) и $y_{t.w.} = 3 \cdot 10^{-3}$ м (*c, d*)

и становится заметной только область по краям профиля $U(z)$. После $x=0.4$ м остаются только отдельные продольные теллуровые линии. Это свидетельствует о том, что в этом месте сформировались интенсивные продольные вихревые структуры с удвоенным шагом λ_z .

На рис. 9, *b* ГВ установлены за теллуровой проволокой на расстоянии 0.1 м. Слева от ГВ видна форма профиля $U(z)$, соответствующая профилю естественного возмущающего движения. Влияние ГВ при взаимодействии возмущений изменилось. Происходит более быстрое изменение формы суммарного профиля скорости. Однако, как и на

рис. 9, *a*, после $x=0.4$ м наблюдается похожая картина течения.

На рис. 9, *c* ГВ установлены перед теллуровой проволокой на расстоянии 0.05 м. Расстояние между крылышками увеличено до $\lambda_z = 1.8 \cdot 10^{-2}$ м. Взаимодействие вносимых и естественных возмущений начинается практически на первом этапе перехода, при этом профиль $U(z)$ естественных возмущений более равномерный, чем на рис. 9, *a*, *b*. Вследствие этого процесс взаимодействия на последующих этапах перехода замедленный. Форма профиля скорости при взаимодействии становится подобной приведенной на рис. 8, *b*, вероятно, из-за увеличения λ_z . На рис. 9, *c* после $x=0.4$ м зафиксированы прямые тонкие теллуровые линии из-за формирования интенсивных продольных вихревых структур, как на рис. 9, *a*, *b*.

На рис. 9, *d* ГВ установлены перед теллуровой проволокой на расстоянии 0.1 м. Расстояние между крылышками – такое же, как и на рис. 9, *a*, *b*: $\lambda_z = 1.2 \cdot 10^{-2}$ м. В этом случае очень хорошо видно, как уже при $x > 0.3$ м сформировались продольные вихревые структуры с $\lambda_z = 2.4 \cdot 10^{-2}$ м, равным удвоенному расстоянию между крылышками. Можно утверждать, что в этом случае на расстоянии $x=0.4$ м происходит наиболее устойчивое взаимодействие естественных возмущений и вносимых трехмерных возмущений, в результате сформировались стабильные трехмерные КВС ПС.

Таким образом, существует тонкий физический механизм взаимодействия естественных и вносимых возмущений. Для оптимизации такого взаимодействия необходимо учитывать, что наибольшее взаимодействие вносимых трехмерных возмущений будет на таком этапе перехода, на котором естественные возмущения будут иметь преимущественно такую же трехмерную структуру. Поэтому необходимо вносить определенный размер и форму трехмерных возмущений на предыдущих этапах перехода, как показано на рис. 9. Это приводит к ускорению формирования в ПС естественных трехмерных возмущений и к оптимальному взаимодействию вносимых и естественных трехмерных КВС ниже по потоку. Для влияния на КВС ТПС в начале его формирования (VIII этап перехода) необходимо вносить малые трехмерные возмущения с минимальным шагом λ_z на VI–VII этапах перехода. В рассмотренных случаях необходимо учитывать макет перехода, приведенный на рис. 1.

Для воздействия на КВС вязкого подслоя развитого ТПС размер вносимых трехмерных возмущений определяется в зависимости от скорости обте-

кания и размера естественных трехмерных КВС. Поэтому конструкция ГВ должна быть другой, например, такой, как в [20–24, 26]. В этом случае необходимо учитывать макеты КВС, приведенные на рис. 1, 2 и в работах Менга [13, 14].

Рассмотренный механизм восприимчивости ПС относится к переходному ПС, на котором вследствие малых скоростей имеется возможность выявить физические особенности структуры течения и взаимодействия КВС. Переходный ПС можно рассматривать как модель течения в вязком подслое ТПС [11, 12]. Как видно из рис. 2, в ТПС существуют и другие виды КВС, которые являются крупномасштабными. Для взаимодействия вносимых и естественных КВС в этом случае генераторы трехмерных возмущений (рис. 4) должны иметь соответствующие размеры. Известно, что для этого же применяются также статические [1, 28] или динамические разрушители вихрей [29] в виде LEBU. В [22, 24] предложен другой метод воздействия на КВС ТПС.

6. ИЗМЕРЕНИЕ С ПОМОЩЬЮ ЛДИС ВОСПРИИМЧИВОСТИ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ

Лазерный доплеровский измеритель скорости для исследования в гидродинамическом стенде малой турбулентности [4] был разработан В. П. Ивановым [30]. С помощью ЛДИС вдоль длины рабочего участка ($l = 3$ м) гидродинамического стенда было измерено поле скоростей вдоль продольной оси симметрии дна рабочего участка, а также в каждом месте измерения по x при значениях $z=0$; $2 \cdot 10^{-2}$ и $4.5 \cdot 10^{-2}$ м. Исследования были повторены при $x=2.48$ м при значениях скорости $U_\infty=0.09$; 0.12; 0.15; 0.18; 0.21; 0.27; 0.35; 0.4; 0.6 м/с. Полученные профили скорости были эталонными для результатов исследования восприимчивости ПС к плоским и трехмерным возмущениям [7, 25, 26, 30, 31].

Для исследования восприимчивости ПС к трехмерным возмущениям приведенные на рис. 4 ГВ устанавливались на расстоянии $x = 5 \cdot 10^{-2}$ м до места, в котором проводились измерения с помощью ЛДИС. Результаты измерений приведены в [7, 26, 31]. Анализ полученных результатов показал, что при проведении измерений необходимо выполнять условие $\lambda_z/h \approx 1.3 \div 2.0$.

На рис. 10 приведены результаты измерений продольной осредненной и пульсационной скорости при $x=2.48$ м и $U_\infty=0.1$; 0.2; 0.6 м/с. Эти скорости соответствуют I–II (нелинейные волны Т–III), IV–V (формирование продольных вихревых структур) и VIII (формирование ТПС) этапам пере-

Табл. 1. Характерные величины при измерении взаимодействия естественных и вносимых трехмерных возмущений

U_∞ , м/с	$\lambda_z \cdot 10^2$ м	$\delta^* \cdot 10^2$, м	$\delta \cdot 10^2$, м	δ^*/δ	z
0.1	1.2	3.6	14	0.26	0
0.1	1.2	3.6	14	0.26	z_1
0.1	1.2	3.6	12	0.3	z_2
0.2	1.2	4.3	20	0.22	0
0.2	1.2	3.2	20	0.16	z_1
0.2	1.2	3.6	20	0.18	z_2
0.6	1.2	—	—	—	0
0.6	1.2	6.5	44	0.15	z_1
0.6	1.2	—	—	—	z_2

хода. Трехмерные возмущения вносились с помощью ГВЗ, расстояние между крылышками составляло $\lambda_z = 1.2 \cdot 10^{-2}$ м ($b/\lambda_z = 1.5$). Каждая группа профилей измерялась для трех значений z , приведенных на рис. 4. Слева на рис. 10 вдоль вертикальной оси координат показана эффективная высота крылышек $h_o = h/\delta^*$, где δ^* – средняя по z толщина вытеснения. Для указанных скоростей основного потока $h_o = 2.25$; 2.0; 1.3 и $\lambda_z/h \approx 1.7$. В таблице 1 даны параметры выполненных измерений, приведенных на рис. 10.

Первая группа профилей характеризует взаимодействие возмущений при естественном переходе в виде трехмерной деформации волн Т–Ш (рис. 1, рис. 6, а, б) с вносимыми трехмерными возмущениями. На рис. 9, а приведена визуализация аналогичного взаимодействия возмущений при тех же безразмерных параметрах, но в начале рабочего участка. Качественно картина течения подобна для одного и того же этапа перехода, формирующегося при различных условиях, как в начале, так и в конце пластины. Поэтому можно проводить сравнение полученных результатов, приведенных на рис. 9, а и рис. 10.

Кривые 4 на рис. 10, а получены в следе за вихреобразователями вдоль продольной оси симметрии крылышек – в месте, где лепестки расходятся. Если кривую 4 сравнить с аналогичной эталонной кривой, то до $y = 0.8\delta^*$ суммарный профиль осредненной скорости будет более полный. Это означает, что конструкция крылышек действительно направляет ускоренный поток ниже, чем $y = 0.8\delta^*$. В целом профиль 4 соответствует эталонному профилю скорости. В районе $z_1 = \lambda_z/2$ (между крылышками) профиль скорости наиболее полный. Он соответствует существо-

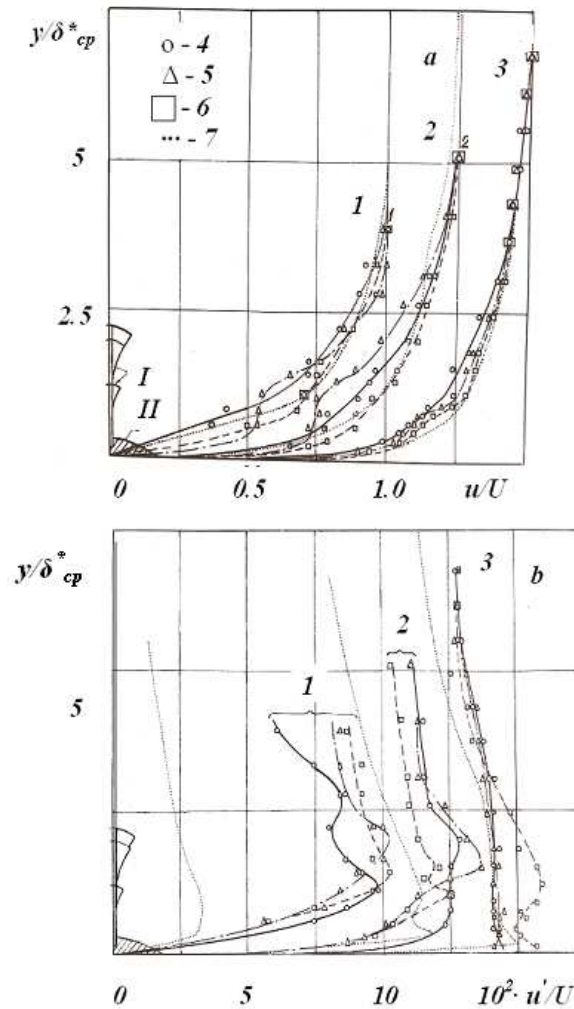


Рис. 10. Профили продольной осредненной (а) и пульсационной (б) скорости при взаимодействии естественных и вносимых возмущений на различных этапах перехода:

1 – $U_\infty = 0.1$ м/с; 2 – 0.2 м/с; 3 – 0.6 м/с; 4 – $z = 0$; 5 – $z_2 = \lambda_z/4$; 6 – $z_1 = \lambda_z/2$; 7 – профили скорости при естественном переходе; I – ГВ; II – державка для ГВ

ванию пары продольных вихрей, вращающихся к стенке. При $z_2 = \lambda_z/4$ (ближе к крылышкам) зафиксирован профиль скорости с большим перегибом. Такой профиль скорости соответствует измерениям в поперечном сечении продольного вихря посередине между осью вихря и его внешней границы.

Картина течения, приведенная на рис. 9, а, соответствует измерениям на рис. 10, а (кривые 4). Такое же совпадение наблюдается и с рис. 9, б, но при этом надо рассматривать область течения, расположенную после ГВ на расстоянии $x = 5 \cdot 10^{-2}$ м.

Анализ осредненных и пульсационных профилей скорости на рис. 10, *a* позволяет сделать вывод, что, как и при взаимодействии с плоскими возмущениями, результирующее поле скоростей свидетельствует об ускорении этапов перехода в большей степени, чем при взаимодействии с плоскими возмущениями.

Вторая группа профилей показывает, что происходит еще более интенсивное взаимодействие наложенных возмущений с естественными возмущениями ПС. Форма профилей при этом очень сильно зависит от координаты z и свидетельствует о полностью развитой системе продольных вихрей [32].

Пульсационные профили скорости у первой и второй группы профилей (рис. 10, *b*) существенно возросли по сравнению с эталонными профилями, что соответствует формированию в ПС продольных вихревых систем. Максимумы пульсационных суммарных профилей скорости расположены выше по сравнению с эталонным профилем. Это свидетельствует о возрастании размеров продольных вихрей результирующего возмущающего движения. На рис. 10 измеряется развитие взаимодействия вносимых и естественных трехмерных возмущений на расстоянии $x = 5 \cdot 10^{-2}$ м от ГВ, а на рис. 9, *d* показано развитие этого же типа взаимодействия на значительно большем расстоянии от ГВ. Видно, что такое взаимодействие способствует формированию устойчивых продольных вихревых систем.

Третья группа профилей на рис. 10 получена при взаимодействии вносимых трехмерных возмущений с характеристиками развивающегося естественного ТПС. В отличие от вносимых плоских возмущений, система продольных вихрей при взаимодействии с естественными возмущениями ТПС создает упорядоченные структуры, о чем свидетельствуют перегибы в профилях осредненной скорости. Форма результирующего профиля пульсационной скорости при $z = \lambda_z/2$ (между крылышками) была больше и подобна эталонному профилю (кривая 7). При остальных значениях z пульсационные значения по y_0 не имели максимумов и были меньше максимальных значений эталонного профиля. Это свидетельствует об уменьшении пульсационных скоростей и ламинаризации ТПС вплоть до $y_0=2.0$.

Во всех случаях вносимые трехмерные возмущения по высоте превышали значения $\bar{\delta}^*$, при которых пульсационные скорости имеют максимальные значения. Поэтому вносимые возмущения не располагались на той высоте, на которой они могли максимально эффективно взаимодействовать

с естественными возмущениями. Возможно, это свидетельствует о быстром развитии трехмерных возмущений и увеличении размеров продольных вихрей. При указанных значениях h_0 конструкция применяемых ГВ направляла более энергоемкие потоки жидкости ПС в расположенные ниже слои ПС, где наблюдаются энергетические обмены при естественном переходе (δ^*). Это позволяло доминировать вносимым трехмерным возмущениям по сравнению с естественными возмущениями ПС.

7. ИЗМЕРЕНИЕ ВОСПРИИМЧИВОСТИ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ ПРИ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЯХ

В авиации давно применяют ГВ для управления отрывом ПС на профилях крыльев при взлете и посадке. Конструкции различных видов генераторов вихрей приведены в [33]. В предыдущих разделах исследовалось влияние вносимых КВС, формирующихся с помощью разработанной конструкции ГВ. В этом случае для переходного ПС продольная ось вносимых трехмерных возмущений должна располагаться в районе δ^* . Механизм воздействия ГВ в авиации другой. Для эффективного влияния на отрывное течение ГВ должны направлять в ПС энергию основного потока или энергию потока с внешней границы ПС. Интенсивность таких ГВ будет существенно выше. Ниже приводятся результаты экспериментальных исследований влияния ГВ на характеристики ПС в том случае, когда высота ГВ была того же порядка, что и при исследовании в водном потоке.

Исследования восприимчивости ПС к трехмерным возмущениям проводились в аэродинамической трубе УТАД-2 Национального авиационного университета [6]. УТАД-2 – аэродинамическая труба замкнутого типа с открытой рабочей частью, поперечное сечение которой перед рабочим участком выполнено в виде эллипса с диагоналями $0.75\text{ м} \times 0.42\text{ м}$. В осевом сечении измерительного участка трубы монтировалась плоская прямоугольная пластина, выполненная из гетинакса толщиной $7 \cdot 10^{-3}$ м. Длина пластины – 0.4 м, а ширина – 0.27 м. Носовая и кормовая части пластины были заострены под клин (угол клина составил 9°). Степень турбулентности основного потока составляла $\varepsilon \approx 2\%$ при $U_\infty = 23 \div 24$ м/с. Числа Рейнольдса изменялись в пределах $Re = (1.5 \div 5.8) \cdot 10^5$ при $\bar{x} = 0.25 \div 0.9$ ($\bar{x} = x/L$, где L – длина пластины).

На рис. 11 приведен ГВ диффузорного типа. Анализ показал [34], что такой вид ГВ является достаточно эффективным. ГВ изготавливались из

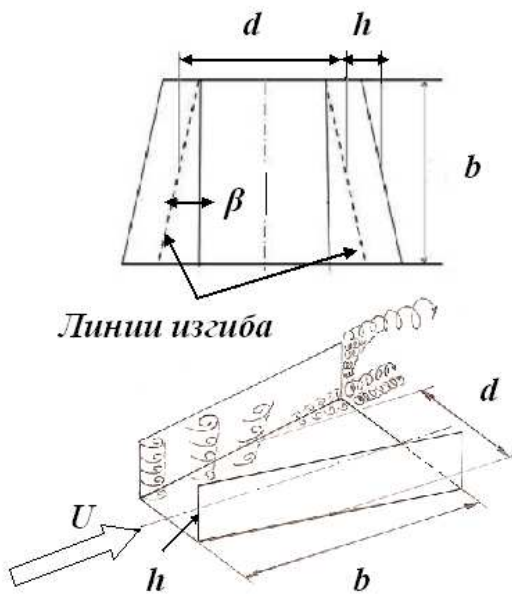


Рис. 11. Схема генератора вихрей диффузорного типа

трапецевидной тонкой металлической пластинки путем загибания боковых частей пластинки под углом 90° по линии, показанной на рис. 11 штриховой линией. Средняя часть ГВ прикрепляется к пластине вдоль потока с помощью скотча толщиной $5 \cdot 10^{-5}$ м. Генератор вихрей имеет следующие параметры: h – высота стенки; b – длина рабочей части ГВ; β – угол раскрытия стенки; d – расстояние между стенками в средней части. Анализ работ [35 и др.] показал, что значение этих параметров имеют определенные соотношения: $h/\delta = 0.3 \div 1.1$, где δ измерена в месте расположения генератора вихрей; $b/h = 2.5 \div 7.0$; $b/d = 0.5 \div 1.5$; $\beta = 10^\circ \div 25^\circ$.

При испытаниях ГВ располагались на расстоянии 40% от носика пластины. В этом месте толщина ПС составила $\delta = 5.42 \cdot 10^{-3}$ м. В данных экспериментах применялся ГВ, имеющий следующие параметры: $h = 3.0 \cdot 10^{-3}$ м, $b = 18.0 \cdot 10^{-3}$ м, $d = 16.3 \cdot 10^{-3}$ м, $\beta = 10^\circ$. В этом случае соотношения составили: $h/\delta = 0.55$, $b/h = 6.0$, $b/d = 1.1$. Измерение ПС выполнялось на пластине при $\bar{x} = 0.5; 0.7; 0.85$.

Влияние ГВ диффузорного типа на поток можно представить по аналогии с крылом малого удлинения (рис. 11). В районе стыковки вертикальных пластинок ГВ с обтекаемой пластиной формируется с каждой стороны вертикальной пластинки пара угловых вихрей. С задних кромок пластинок ГВ будут стекать вихревые пелены таким же образом, как и при обтекании крыла.

Эти вихревые пелены будут стягиваться к верхнему углу вертикальных задних кромок пластинок, с которых в поток будут сноситься продольные вихревые шнуры. Их интенсивность и форма будут зависеть от координаты x места установки ГВ на пластине, от числа Рейнольдса и δ . Таким образом, геометрические параметры продольного вихревого шнура будут составлять только часть высоты пластины h и зависеть также от величин β и b .

В зависимости от величины угла β с передних кромок вертикальных пластинок, с внутренней стороны ГВ будут происходить отрыв потока в виде вихревой пелены. Эти вихревые пелены будут смещаться к верхней продольной кромке ГВ и сворачиваться вблизи задней кромки ГВ в его верхней части в продольные вихри. Таким образом, внутри ГВ диффузорного типа при развитии вихревых пелен будет формироваться пара противоположно вращающихся продольных вихревых структур, которая будет взаимодействовать с парой продольных вихревых шнуров, сходящих с задних кромок вертикальных пластинок, и с двумя парами угловых вихрей. За задним срезом ГВ в его верхней части будут располагаться четыре продольных вихря: два крупных вихря, расположенных внутри ГВ, и два боковых вихря с продольными осями вдоль концевых кромок ГВ. В нижней части ГВ будут сформированы по краям ГВ четыре пары мелкомасштабных продольных вихрей. При продвижении вдоль пластины за ГВ крупномасштабные верхние вихри будут взаимодействовать с менее энергоемкими концевыми вихрями. По мере развития эти верхние пары вихрей могут объединяться в одну пару продольных вихрей. К сожалению, в настоящее время не исследован механизм формирования и развития указанной сложной структуры вихрей, формирующихся за ГВ диффузорного типа.

При установке системы ГВ диффузорного типа с небольшим шагом между ГВ эти сложные вихревые системы, в свою очередь, будут взаимодействовать с подобными КВС соседних ГВ. Такое сложное взаимодействие вихрей будет существенно зависеть от d и от расстояния между отдельными ГВ, установленными на пластине. Рассмотренный механизм формирования продольных вихрей существенно отличается от механизма формирования вихрей при обтекании пластины водным потоком (рис. 4).

На рис. 12 приведены экспериментальные точки профиля ПС при обтекании пластины без ГВ (кривая 3) при $x/L = 0.7$. В качестве датчика полного давления использовалась медицинская игла, име-

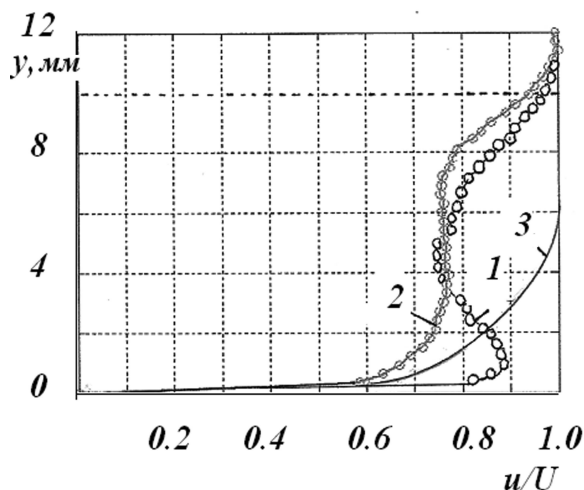


Рис. 12. Профили продольной осредненной скорости на пластине при $\bar{x}=0,7$ (за ГВ): кривая 1 – при z_1 , кривая 2 – при z_2 ; кривая 3 – без ГВ.

ющая внешний диаметр 0,5 мм, которая выполнена с плоским срезом, перпендикулярным продольной оси пластины. Через жесткую трассу значение скоростного напора подводилось к датчику MPXV5004DP фирмы Motorola(США). Длина трассы составила 420 мм. Датчики имели два входных штуцера для подвода полного и статического давлений. С помощью этих датчиков проводилось вычисление скоростного напора, и обработанная информация подавалась на информационно – измерительный комплекс. Перед началом экспериментов проводилась градуировка датчиков давления. В качестве эталонного измерителя давления использовался водяной образцовый манометр МКВ-250-002 с приведенной погрешностью 0,02%.

Измерения выполнены вдоль продольной оси симметрии пластины при $Re = 4.52 \cdot 10^5$. В этом случае толщина пограничного слоя и параметр H составили: $\delta = 7 \cdot 10^{-3}$ м и $H = \delta_1/\delta_2 = 1.298$. При указанном числе Рейнольдса ПС на пластине должен быть переходным. Полученная форма профиля скорости объясняется высокой степенью турбулентности основного потока.

ГВ диффузорного типа был установлен при $x/L = 0,4$. Измерения профиля ПС при установке ГВ проводились при следующих значениях координаты z в месте измерения: при координате z_1 (вдоль оси симметрии ГВ, вдоль продольной оси пластины) – кривая 1 на рис. 12, и при координате z_2 , соответствующей продольной линии, проходящей через заднюю кромку генератора, – кривая 2 на рис. 12. Влияние ГВ приводит к измене-

нию δ и формы профилей скорости. Толщина ПС при установке ГВ составила $\delta = 10.68 \cdot 10^{-3}$ м и $11.12 \cdot 10^{-3}$ м, а $H=1.234$ и 1.341 соответственно для кривых 1 и 2. Форма кривых показывает, что наличие в потоке ГВ приводит к изменению значения величины формпараметра H и изменению уровня запасенной энергии, необходимой для предотвращения отрыва ПС.

В районе установки ГВ существовали продольные вихревые КВС в переходном ПС, которые оптимально взаимодействовали с вносимыми трехмерными КВС. Результат такого взаимодействия приводил к тому, что в районе измерения профили скорости существенно видоизменились. Форма профилей скорости отражает приведенный выше механизм формирования вихревых структур за ГВ диффузорного типа. Так как в конце обтекаемой пластины сформировался предтурбулентный ПС, то полученные результаты удобно сравнить с рис. 6, е, 9, d и 10 (вторая и третья серии опытов). Профили скорости на рис. 12 свидетельствуют, что вихревые структуры, формирующиеся за ГВ диффузорного типа, более мощные по сравнению с вихревыми структурами, формируемыми за ГВ, приведенными на рис. 4.

ВЫВОДЫ

1. Разработаны макеты формирования и развития КВС на различных этапах переходного ПС и ТПС при низких значениях степени турбулентности основного потока. Модель развития КВС в переходном ПС универсальна. Подобно этой модели происходит развитие КВС ТПС по толщине и в его вязком подслое.

2. Приведены принципы и методология экспериментальных исследований восприимчивости ПС к различным типам КВС. Рассмотрены примеры взаимодействия ПС с плоскими и трехмерными возмущениями, вносимыми в ПС. Даны основные результаты таких взаимодействий. ПС можно представить как динамическую систему, обладающую спектром собственных частот, реагирующую на вносимые возмущения в зависимости от резонанса и структуры вносимых и собственных возмущений. Для управления КВС ПС необходимо выполнить согласование по трем основным параметрам: амплитудно-частотные, структурные и энергетические характеристики собственных возмущений ПС и вносимых возмущений должны быть приближенно одинаковыми.

3. Разработаны конструкции генераторов вихрей для формирования в ПС заданных пар продольных вихревых систем. Методика измерений

позволяет вносить такие пары КВС в любую область по толщине ПС, в частности, в ту область, где происходят основные энергетические процессы формирования КВС при естественном развитии ПС. Это позволяет получить адекватные результаты при различных числах Рейнольдса.

4. С помощью визуализации ПС теллур-методом Вортмана выполнены исследования процесса естественного развития возмущающего движения на различных этапах перехода ПС при обтекании пластины при малой ($\varepsilon \leq 0.05\%$) и при повышенной ($\varepsilon \geq 1\%$) степени турбулентности основного потока. Разработанная методика позволяет получить результаты измерений мгновенных кинематических характеристик ПС в объеме жидкости. Обнаружены существенные отличия распределения скорости в трансверсальном направлении при различных значениях ε .

С помощью разработанного ГВ в ПС вносились трехмерные возмущения при различных взаимных расположениях ГВ и теллуровой проволоки, визуализирующей развитие возмущающего движения, а также в зависимости от геометрических параметров ГВ и их взаимного расположения. Это позволяет определить место расположения разработанных ГВ по длине пластины для формирования заданных параметров системы продольных вихрей. Для получения оптимальных результатов восприимчивости трехмерных возмущений необходимо предварительно определить расположение КВС вдоль пластины на различных этапах перехода и учитывать необходимое место внесения и время развития вносимых КВС. Даны диапазоны чисел Рейнольдса для каждого типа КВС на различных этапах перехода при указанных значениях ε . Это позволяет определить расположение типов КВС вдоль пластины при экспериментальных исследованиях без дополнительных исследований.

5. По результатам визуализации ПС обнаружены характерные места в трансверсальном направлении относительно расположения ГВ, в которых с помощью лазерного анемометра измерены профили продольной осредненной и пульсационной скорости. Профили осредненной скорости по толщине ПС при различных z подтвердили формирование за разработанным ГВ продольных вихревых структур и были подобны классическим измерениям Вортмана для случая вихрей Гертлера.

Пульсационные профили скорости при воздействии на ПС трехмерных возмущений видоизменяются и имеют отличительные признаки:

- увеличиваются координаты по y/δ^* максимальных значений u' в соответствии с размерами ГВ (вносимых возмущений) и диапазон макси-

мальных значений u' ;

- пульсационные профили в зависимости от z различны, что связано с формированием продольных вихревых структур;

- при оптимальных взаимодействиях вносимых и естественных трехмерных возмущений на этапе развития ТПС распределение пульсационных профилей по y сглаживается.

6. В аэродинамической трубе исследован другой принцип введения трехмерных возмущений в ПС. Согласно первому принципу и проблеме восприимчивости, вносимые трехмерные возмущения имеют такой же порядок, как и естественные возмущения ПС, и должны вноситься в районе толщины δ^* . Другой подход заключается во внесении трехмерных возмущений с существенно большей энергией, соответствующей скорости основного потока или энергии скорости в районе верхней границы δ . Для формирования такого типа возмущающего движения использовался традиционный тип ГВ диффузорного типа. Получены формы профилей скорости, подобные при измерении лазерным анемометром. Рассмотрены различные виды продольных вихревых структур, формирующихся в ГВ диффузорного типа.

7. Необходимо в дальнейшем выполнить физические исследования характера формирования различных видов КВС и их развития за ГВ диффузорного типа. Необходимо исследовать также на основании результатов измерений восприимчивости ПС и обнаруженного резонансного характера взаимодействия естественных и вносимых возмущений новый порядок внесения возмущений в ПС: вначале, на первых этапах перехода, необходимо вносить плоские возмущения, которые должны приводить к ускорению формирования в ПС трехмерных возмущений. Затем ниже по потоку необходимо вносить в ПС трехмерные КВС, которые будут стабилизировать развитие в ПС продольных возмущений.

1. Корнилов В. И. Проблема снижения турбулентного трения активными и пассивными методами (обзор) // Теплофизика и аэромеханика. – 2005. – т.12, №2. – С. 183–208.
2. Бабенко В. В., Турик В. Н. Управление когерентных вихревых структур в плоских и криволинейных пристеночных течениях // Всемирный конгресс Авиация в XXI Столетию. – Киев, Украина, 2003. – С. 54–58.
3. Babenko V. V., Chun H. H. and Inwon Lee. Coherent vortical Structures and Methods of their Control for Drag Reduction of Bodies // Proc. of the 9th International Conference on Hydrodynamics (ICHD-2010). – Shanghai, China, 2010. – P. 45–50.

4. Козлов Л. Ф., Бабенко В. В. Экспериментальные исследования пограничного слоя. – Киев: Наукова думка, 1978. – 184 с.
5. Махмуд А. Ф. Вихреобразователи как средство улучшения аэродинамических характеристик самолета // Вестник НАУ. – 2007. – Вып. 1. – С. 126–129.
6. Іщенко С. А., Бондар О. В., Махмуд А. Ф. Експериментальні дослідження стану прилежового шару, збуреного генератором вихорів // Системи озброєння і військова техніка. – 2008. – №3(15). – С. 104–109.
7. Козлов Л. Ф., Цыганюк А. И., Бабенко В. В. и др. Формирование турбулентности в сдвиговых течениях. – Киев: Наукова думка, 1985. – 283 с.
8. Babenko V. V. Control of the coherent vortical structures of a boundary layer // Aerodynamic Drag Reduction Technologies, Proc. of the CEAS / DragNet European Drag Reduction Conf., Potsdam, Germany. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2001. – P. 341–350.
9. Schubauer G. B. and Skramstad H. K. Laminar boundary layer oscillation and stability of laminar flow // J. Aeronaut. Sci. – 1947. – N 14. – P. 69–81.
10. Kline S. J., Reynolds W. C., Schraub F. A. and Runstadler P. W. The structure of turbulent boundary layers // JFM. – 1967. – N30. – P. 741–752.
11. Бабенко В. В. К взаимодействию потока с эластичной поверхностью. – Механика турбулентных потоков: М.: Наука, 1980. – 292–301 с.
12. Blackwelder R. Analogies between transitional and turbulent boundary layers // Phys. Fluids. – 1983. – N 26. – P. 2807–2815.
13. Meng J. C. S. Engineering insight of near-wall micro turbulence for drag reduction and derivation of a design map for seawater electromagnetic turbulence control // Proc. of the Intern. Symp. on Seawater Drag Reduction. – Newport, Rhode Island, USA, 1998. – P. 359–367.
14. Meng J. C. S. Wall Layer Microturbulence Phenomenological Model and a Semi-Marcov Probability Predictive Model for Active Control of Turbulent Boundary layers. – Self-Sustaining Mechanism of Wall Turbulence: Editor: R. L. Panton. Computational Mechanics Publications, Southampton, UK and Boston, USA, 1997. – 201–252 p.
15. Seventh IUTAM Symposium on Laminar-Turbulent Transition Proc. of the Seventh IUTAM Symp. on Laminar-Turbulent Transition, Stockholm, Sweden, 2009. – Series: IUTAM Bookseries, Vol. 18: Schlatter, Philipp; Henningson, Dan S. (Eds.) 1st Edition, 2010. – 608 p.
16. Хлопков Ю. И., Жаров В. А., Горелов С. Л. Когерентные структуры в турбулентном пограничном слое. – М.: МФТИ, 2002. – 129 с.
17. Bandyopadhyay P. R., Gad-el-Hak M. Reynolds Number Effects in Wall-Bounded Turbulent Flows // Applied Mechanics Reviews. – 1994. – Vol. 47, N 28. – P. 139.
18. Бабенко В. В., Иванов В. П., Юрченко Н. Ф. Взаимодействие возмущений в пограничном слое на нелинейных этапах перехода // Гидромеханика. – 1986. – 54. – С. 42–47.
19. Babenko V. V., Ivanov V. P., Yurchenko N. F. Interaction between perturbations in the boundary layer in the nonlinear transition stages // Fluid Mechanics - Soviet Research. – 1988. – vol. 17, №3. – P. 80–88.
20. Бабенко В. В. Проблема восприимчивости пограничным слоем различных возмущений // Бионика. – 1988. – 22. – С. 15–23.
21. Babenko V. V. Method of influence on coherent vortices structures of a boundary layer // Proc. of the Intern. Symposium on Seawater Drag Reduction. – Newport, Rhode Island, USA, 1998. – P. 113–120.
22. Бабенко В. В. Канарский М. В., Коробов В. И. Пограничный слой на эластичных поверхностях. – Киев: Наукова думка, 1993. – 264 с.
23. Бабенко В. В., Козлов Л. Ф., Першин С. В. Демпфирующее покрытие // Авторское свидетельство Украины. – N413286. – Bull. N4, 30.1.1974. – С. 1–6.
24. Babenko V. V., Chun H. H., Inwon Lee. Boundary Layer Flow over Elastic Surfaces and Combined Methods of Drag Reduction. – Pusan National University. Advanced Ship Eng. Research Center. Korea.: (In press), 2011. – 861 p.
25. Бабенко В. В., Иванов В. П. Исследование структуры пограничного слоя при возникновении турбулентности // Бионика. – 1984. – 18. – С. 28–35.
26. Козлов Л. Ф., Бабенко В. В., Юрченко Н. Ф., Иванов В. П. Пограничный слой при воздействии плоских и трехмерных возмущений // Пристенные турбулентные течения. Сб. научн. трудов. – Новосибирск: Ин-т теплофизики. – 1984. – С. 95–105.
27. Yurchenko N. F., Babenko V. V., Kozlov L. F. Development of three-dimensional disturbances over compliant surface // Proc. of the Intern. Conf. EAHE (Engineering aero-hydroelasticity). – Prague, Czechoslovakia, 1989. – P. 63–69.
28. Мовчан В. Т., Шквар Є. О. Різномірні математичні моделі коефіцієнта турбулентної в'язкості // Прикладна гідромеханіка. – 2010. – 1. – С. 55–67.
29. Babenko V. V., Kozlov L. F., Dovgij S. A. and others The second IUTAM Symposium on laminar-turbulent Transition // Novosibirsk. – Berlin: Springer-Verlag, 1985. – P. 509–513.
30. Иванов В. П., Бабенко В. В., Блохин В. А., Козлов Л. Ф., Коробов В. И. Исследование поля скоростей в гидродинамическом стенде малой турбулентности с помощью лазерного доплеровского измерителя скорости // ИФЖ. – 1979. – т.37, 5. – С. 818–824.
31. Бабенко В. В., Иванов В. П., Юрченко Н. Ф. Измерение лазерным анемометром восприимчивости пограничного слоя к плоским и трехмерным возмущениям // Автометрия. Наука, СО, Новосибирск. – 1982. – 3. – С. 91–96.
32. Wortmann F. X. Visualisation of Transition // JFM. – 1969. – vol.38, pt.3. – P. 473–480.
33. Schubauer G. B., Spanglerberg W. G. Forced Mixing in Boundary Layers // JFM. – 1960. – 8, Part 1). – P. 10–32.
34. Махмуд А. Ф. Вихреобразователи. Оптимизация геометрических размеров // Сб. научных трудов Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского ХАИ. – 2007. – 36. – С. 139–145.
35. Lin J. C., Howard F. G., Selby G. V. Small Submerged Vortex Generators for Turbulent Flow Separation Control // Journal of Aircraft. – 1990. – Vol. 27. – P. 502–507.