

УДК 532.526 532.517 536.53 629.12.037.21

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФОРМЫ ТЕЛА НА ЕГО ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

В. В. БАБЕНКО, В. В. МОРОЗ

Институт гидромеханики НАН Украины, Киев
03680 Киев – 180, МСП, ул. Желябова, 8/4
vvb38@mail.ru

Получено 09.10.2012

На основании анализа формы тела скоростных гидробионтов и птиц предложено переднюю часть их тела аппроксимировать тремя сферами, сопрягающимися вогнутыми поверхностями, на которых формируются гертлеровские вихри (ГВ). Разработана экспериментальная методика исследования устойчивости ГВ на вогнутых пластинах. Исследована восприимчивость естественных ГВ к вносимым в пограничный слой продольным вихревым системам, формируемым с помощью разработанных генераторов продольных вихрей. Обнаружены условия формирования устойчивых ГВ, в том числе и за участком кривизны. Разработан новый бионический профиль, гидродинамические свойства которого были исследованы в модельном эксперименте. Выполнено сравнение с гидродинамическими характеристиками серийного руля судна. Коэффициент подъемной силы бионического руля превышал характеристики серийного профиля руля в широком диапазоне углов атаки. Даны рекомендации для увеличения эффективности бионического руля.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: гертлеровские вихри, пограничный слой, бионический руль

На основі аналізу форми тіла швидкісних гідробіонтів та птахів запропоновано передню частину їхнього тіла апроксимувати трьома сферами, з'єднаними увігнутими поверхнями, на яких формуються гьортлерівські вихорі (ГВ). Розроблена експериментальна методика дослідження стійкості ГВ на увігнутих пластинах. Досліджена сприятливість дійсних ГВ до внесених у примежовий шар повздовжніх вихрових систем, сформованих за допомогою розроблених генераторів повздовжніх вихорів. Знайдені умови формування стійких ГВ, в тому числі і після ділянки з кривизною. Розроблено новий біонічний профіль, гідродинамічні якості якого було досліджено за допомогою модельного експерименту. Виконано порівняння з гідродинамічними характеристиками серийного керма судна. Коефіцієнт підйомної сили біонічного керма був заввишки характеристик серийного профілю керма в широкому діапазоні кутів атаки. Наведено рекомендації для підвищення ефективності біонічного керма.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: гьортлерівські вихорі, примежовий шар, біонічне кермо

On the basis of the analysis of the form of a body high-speed hydrobionts and birds it is offered to approximate a forward part of their body three spheres, the interfaced concave surfaces on which are formed Goertlers vortices (GV). The experimental technique of research of stability GV on the concave plates is developed. The susceptibility natural GV to introduced in a boundary layer to the longitudinal vortical systems formed by means of developed generators of longitudinal vortices is investigated. Conditions of formation steady GV, including, and behind a site of curvature are found out. It is developed new bionics profiles which hydrodynamic properties have been investigated in modeling experiment. Comparison with hydrodynamic characteristics of a serial rudder of a vessel is executed. Lift coefficient of the bionics rudder exceeded characteristics of serial profiles of a rudder in a wide range of corners of attack. Recommendations for increase in efficiency of a bionics rudder are given.

KEY WORDS: Goertlers vortices, boundary layer, bionics rudder

ВВЕДЕНИЕ

Влияние формы тел на их интегральные характеристики исследуется на протяжении длительного времени. В монографии Ноегнер С. Ф. [1] приведены зависимости коэффициентов сопротивления и подъемной силы от числа Рейнольдса Re для различных форм аппаратов, движущихся на земной поверхности, на воде и под водой, а также в воздухе. Диапазон чисел Re очень широкий. Так, при движении в водной среде рассматриваются, в частности, режимы кавитационного обтекания, а в воздушной среде – дозвуковые, звуковые

и гиперзвуковые скорости движения. Приводятся некоторые методы снижения сопротивления тел при изменении формы тела, а также при некоторых методах управления пограничного слоя (ПС). Даны зависимости коэффициента сопротивления от коэффициента подъемной силы при различной форме носовой оконечности тела вращения. Приведено распределение давления на двух симметричных профилях, имеющих различное расположение максимума толщины профиля по хорде, а также зависимости коэффициента сопротивления от числа Re для различных ламинаризованных форм профилей. Показано, что в зависимости от формы

профиля переход к турбулентному режиму ПС колеблется в диапазоне $0.4 \div 0.8\%$ хорды профиля s .

Аналогичные результаты приведены у Шлихтинга [2, стр. 475]: сравниваются такие же зависимости, как и в [1] для обычных и ламинаризованных форм профилей НАСА. Показано, что у обычных форм профилей законы сопротивления соответствуют турбулентному режиму течения в ПС, а у ламинаризованных профилей – переходному режиму течения в ПС, при этом критическое число перехода Re_1 от ламинарного закона сопротивления к переходному увеличивается на 2 порядка.

В [3] приведены результаты исследований влияния формы профиля на его интегральные характеристики, в основном при обтекании тел воздушным потоком. Исследовано также влияние формы осесимметричных тел и формы их носовой части, а также особенности поверхности тел в виде организованных шероховатостей.

В ЦНИИ им. А. Н. Крылова и в ЦАГИ на протяжении длительного времени проводятся систематические исследования указанной проблемы при обтекании тел воздушным и водным потоками.

Белюсов А. Г. [4] исследовал особенности равноускоренного движения в воде осесимметричных тел различной формы в сравнении с плоскими пластинами. Эксперименты проводились в вертикальной прозрачной трубе, заполненной водой, при погружении тел под действием силы тяжести.

В [5] рассмотрена концепция влияния вогнутой кривизны тела на снижение вязкостного сопротивления. Подробно рассмотрены различные варианты формирования тейлоровских вихрей при продольном обтекании осесимметричного тела, влияния небольших углублений и поперечных прямоугольных выступов, а также результаты исследования мечевидного наконечника, приведенных в работах [6, 7]. Рассмотрена концепция обтекания осесимметричного тела, носовая часть которого имеет три стадии изменения диаметра [5]. Выполнен теоретический расчет сопротивления такого тела. Передняя секция носовой части тела имеет обычную эллиптическую форму, переходящую в цилиндрическую часть. Затем под некоторым радиусом вогнутой кривизны эта секция переходит в следующую секцию. Далее на некотором расстоянии этот переход повторяется еще два раза. Таким образом, диаметр тела изменяется четыре раза. Был выполнен расчет распределения давления и касательного сопротивления вдоль тела с указанной формой носовой части. Вогнутость δ/R должна быть не больше $0.5 - 1\%$. В расчетах диаметр $d=6.7$ дюйма. Носовая часть была эллиптической

с соотношением осей $b/a=0.2$. Для всех выпуклых и вогнутых участков тела $2R/d=0.6$. Отношения трех цилиндрических участков составляли 0.4, 0.6 и 0.8 от основного диаметра тела. Длина каждого цилиндра составляла $0.4a$.

В технике накоплен большой опыт определения оптимальных форм тела и профилей. Однако продолжается поиск новых закономерностей данной задачи в природе. В [7–9 и др.] приведены формы тела и плавников различных видов гидробионтов. Показано, что продольное сечение тела и поперечные сечения плавников хорошо вписываются в классические типы профилей Жуковско-го. При этом носовая часть тела гидробионтов не точно вписывалась в типовые аэрогидродинамические профили. Поэтому было исследовано распределение давления на моделях различных гидробионтов, в достаточной мере точно отражающих реальное строение формы тела гидробионтов. Большое внимание было уделено изучению осесимметричных тел с мечевидными наконечниками, моделирующих форму меч-рыбы [6, 7]. Распределение давления вдоль этих тел было исследовано теоретически и экспериментально. В [9] приведен подробный анализ этих исследований.

Баннаш Р. выполнил многочисленные и наиболее существенные исследования гидродинамических особенностей плавания пингвинов [10–12 и др.]. Он рассмотрел кинематику плавания трех видов живых пингвинов в специально разработанном канале, установленном в Антарктиде, и выполнил многие другие гидробионические и биологические исследования. Были изучены пять видов пингвинов, имеющих различные размеры тела. На рис. 1 приведены геометрические параметры трех видов пингвинов: *Pygoscelis* (P) Antarctica, *P. Adeliae*, *P. Papua*. У пингвина *P. Antarctica* относительная длина $l/d=4.54$ и относительное расположение максимальной толщины тела $x_d/l=0.44$. Соответственно у *P. Adeliae* – 4.35; 0.47 и у *P. Papua* – 4; 0.44. Здесь l – длина тела, м; x_d – расстояние до максимальной толщины тела от конца клюва, м. С помощью специально разработанной методики изготавливались гипсовые слепки указанных видов пингвинов, на основании которых производились геометрически идентичные с природой пластмассовые модели. Некоторые детали оперения и отверстий в носовой части тела отсутствовали на моделях обобщенного тела вращения. На моделях пингвинов осталась необычная волнообразная форма в передней части тела, которая следует из вогнуто-выпуклого перехода между клювом, головой и корпусом. На изготовленных моделях указанных пингвинов и обоб-

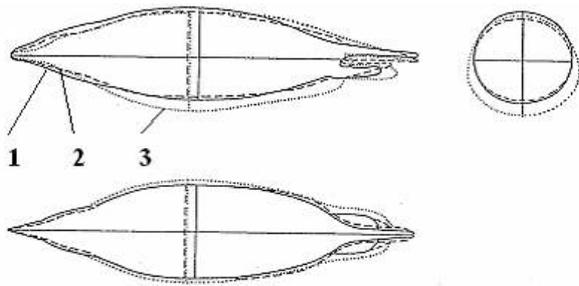


Рис. 1. Модели пингвинов:
1 (штриховая линия) – *P. Antarctica*; 2 (сплошная линия) – *P. Adeliae*;
3 (точки) – *P. Papua*, [12]

ценной модели были выполнены гидродинамические исследования в большой гидродинамической трубе для гидротехники и судостроения, (Берлин), а также при буксировке в канале и в аэродинамической трубе Технического университета Дрездена. Было исследовано распределение давления вдоль модели, гидродинамическое сопротивление и профили скорости в различных местах формы тела, имеющего ламинаризованный профиль продольного сечения. Носовая часть этого сечения, по мнению Баннаша, может быть аппроксимирована двумя окружностями, плавно сопрягающимися между собой.

На рис. 2 приведено распределение давления вдоль обобщенной модели тела пингвина при измерении в аэродинамической трубе двумя независимыми методами. Модель имела параметры $l/d=4.237$, $x_d/l=0.443$ и была изготовлена в виде пустотелого корпуса. Вдоль контура продольного сечения в корпусе модели просверлены отверстия для измерения давления. В эти отверстия вклеивались изнутри металлические трубочки, а присоединенные к ним шланги для измерения давления выводились в хвостовой части модели. Кроме того, проводились измерения с помощью зонда давления диаметром 1 мм, который перемещался снаружи тела. Измерения сравнивались с теоретическими расчетами, выполняемыми панельным методом без учета толщины вытеснения (программа Н. Stricker, Techn.Univ.Berlin).

Найденные значения коэффициента распределения давления c_p не зависели от скорости обтекания. В хвостовой части модели различие экспериментов обусловлено отсутствием хвостовой части модели из-за выхода трубочек для определения распределения давления и ввиду того, что панельный метод не учитывает характеристики пограничного слоя. При измерении зондами возмо-

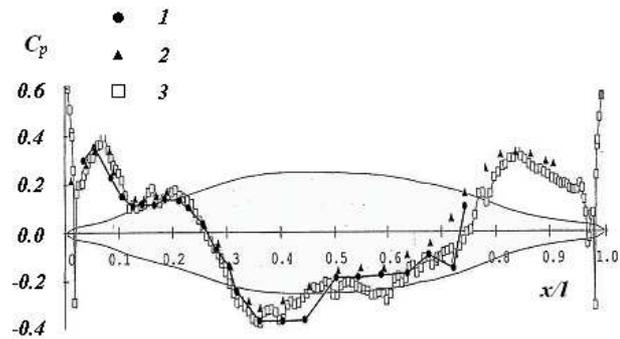


Рис. 2. Распределение давления вдоль обобщенной модели тела пингвина при скорости обтекания 13.2 м/с:
1 – сверление отверстий вдоль тела; 2 – измерение давления зондом, перемещающимся вдоль тела;
3 – расчет панельным методом

жный источник ошибок был в районе головы в попеременно вогнутых и соответственно выпуклых поверхностях тела, вследствие чего не гарантировалось точное прилегание датчика на расстоянии 20 мм от начала модели. При обтекании модели на основании условия неразрывности течение ускоряется перед передней точкой полного торможения потока (которое, к сожалению, не могло быть зарегистрировано) вплоть до максимального размера сечения модели и затем снова замедляется. Соответственно давление должно снижаться и затем подниматься снова. В данном случае ускорение и торможение потока происходило не непрерывно, а поэтапно. В ступенчатом распределении давления фиксируются равные подъемы (градиент давления) в районе части лба, в начале корпуса и (с противоположным знаком) также в конце корпуса, т.е. в этих областях течение ускоряется и соответственно замедляется. В некоторых частях тела образуются плато давления, в которых течение не ускоряется и не замедляется. Исключение образует область клюва, над которой распределение давления приводит к ускорению. Впадина давления над серединой клюва исчезала, когда модель оснащали проволочным турбулизирующим кольцом.

В водном канале испытательного центра водного строительства и судостроения (Берлин) было исследовано сопротивление трех моделей пингвинов, приведенных на рис. 1. Результаты измерений приведены на рис. 3. Скорость потока составляла 4.5 м/с. Число Рейнольдса вычислено по длине тела. Измеренный коэффициент сопротивления $c_{wf}=0.03$ на 30 – 35% меньше, чем у лучших аэродинамических тел. У модели карликового пингвина $c_{wf}=0.025$. У обобщенного тела

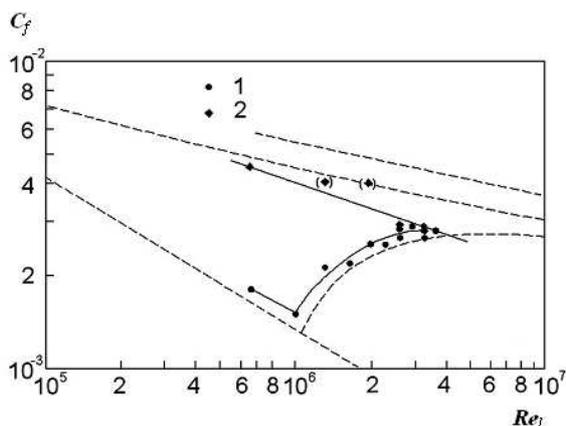


Рис. 3. Коэффициенты сопротивления модели пингвина, вычисленные с учетом площади поверхности модели:
1 – без турбулизатора, 2 – с турбулизатором [12]

вращения вначале при скорости 2 м/с $c_{wf}=0.0156$ и было значительно меньше, чем у моделей пингвинов. С ростом скорости коэффициент сопротивления обобщенной модели c_{wf} приближался к приведенным значениям коэффициента сопротивления моделей пингвинов. Измеренные величины c_{wf} размещались вблизи классической кривой перехода для плоской пластины. При визуализации обтекания модели пингвинов в аэродинамической трубе после установки турбулизирующего кольца отрыв потока был смещен в область хвостовой части примерно на $7/8$ длины модели. Из этого можно заключить, что форма тела пингвина с $l/d = (4 \div 4.5)$ и $x_d/l=0.45$ хотя и является идеальной ламинарной веретенообразной, но приводит к турбулентному обтеканию. Несмотря на вызванный турбулизирующим кольцом турбулентный ПС, значения c_{wf} отчетливо оставались ниже турбулентного закона сопротивления пластины. При 5 м/с ($Re_l = 7.7 \cdot 10^5$) значение c_{wf} было примерно на 35% ниже, чем при хорошем техническом теле вращения с вызванным турбулентным ПС. Баннаш предположил, что полученные результаты обусловлены приспособлением к переменному условию обтекания в верхних слоях южного ледовитого моря, турбулентность которых существенно больше, чем в более глубоких слоях моря. Известно, что при турбулентном ПС обтекание тела становится существенно стабильнее, предотвращая отрыв ПС в концевой части тела. Число Фруда, вычисленное по глубине, изменялось в диапазоне $F_H = \nu/gH - 112 = (0,8 \div 1,1)$.

Обнаруженные низкие значения c_{wf} на моделях исследованных трех видов пингвинов и

на обобщенной модели тела пингвинов Баннаш объясняет вероятностью эластичных свойств перьевой поверхности тела пингвинов, а также их тонко-структурированной структурой покрова. Он утверждает, что под микроскопом тонко-структурированная перьевая структура покрова пингвинов похожа на бороздовую структуру кожи акулы, которая отсутствовала у неподвижных моделей пингвинов. В данном случае учитывалась исключительная форма тела. К сожалению, несмотря на правильное понимание особенности строения покрова и тела пингвинов, а также кинематики их плавания, не были сделаны оценочные вычисления указанных особенностей пингвинов. Кроме того, эксперименты были выполнены без учета влияния на поток эластичных свойств перьевого покрова, нестационарности движения и влияния на сопротивление микропузырьков.

Анализ форм скоростных гидробионтов и птиц позволил сделать следующие выводы. Носовая часть тела менее скоростных гидробионтов имеет выпуклую форму, например, у акул, тунцов и некоторых видов дельфинов и китов. Характерные скорости плавания гидробионтов приведены в [8]. У скоростных гидробионтов, например, у некоторых видов дельфинов, в головной части имеется область, где линии тока становятся вогнутыми. У скоростных птиц, таких как буревестник, альбатрос, сокол, беркут, ястреб и др., в носовой области тела имеются два явно выраженных участка с вогнутыми линиями тока. У самых быстрых гидробионтов (меч-рыба) в носовой части тела имеется меч. В области сопряжения меча с головой на теле имеется вогнутый участок с малым радиусом кривизны. Птицы олуши, которые входят в воду с большой скоростью, так видоизменяют свою форму тела, что в головной части тела, как и у меч-рыбы, формируется мечевидная форма.

На рис. 4 приведены фотография буревестника и аппроксимации формы его тела. Контур тела буревестника аппроксимируется тремя сферами: первая сфера аппроксимирует носовую часть клюва, которая сопрягается с конусообразной частью клюва. Вторая часть носовой части тела аппроксимирует область головы. Вторая сфера имеет значительно больший диаметр. Эта часть сопрягается эллиптическим конусом с третьей сферой большего диаметра (начальную область туловища). Между собой эти три секции имеют два участка поверхности тела с вогнутой поверхностью большого, но разного радиуса кривизны. Представленные на рис. 4 контуры тела аппроксимированы по фотографии, что вносит некоторые искажения в реальные геометрические параметры тела. Со-

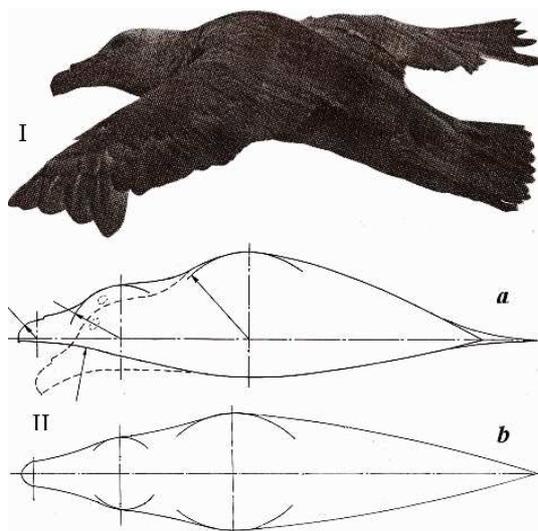


Рис. 4. Фотография буревестника I и аппроксимации его формы тела II:
a – контур тела буревестника,
b – контур профиля или осесимметричного тела

гласно приведенной аппроксимации, если принять первый радиус R_1 за единицу, то радиус второй сферы составит примерно $3R_1$, а третьей сферы – $5R_1$. Расстояния центров сфер вдоль продольной оси тела от начала тела в размерах первого радиуса составили 1, 5.7 и 12.9. Величины радиусов вогнутости между сферами составили $12.4R_1$.

Тремя сферами можно аппроксимировать и тело пингвина (рис. 1). Но среда обитания у пингвина другая, поэтому третья сфера имеет больший радиус. У пингвинов при сопряжении этих сфер образуются вогнутости с большими радиусами, чем у буревестника и других скоростных птиц. На участках вогнутости в носовой части тела имеются все предпосылки для формирования в ПС гертлеровских вихрей (ГВ). При точном измерении пингвинов и скоростных птиц можно определить радиусы этих сфер и координаты центров сфер вдоль длины тела.

Эти геометрические параметры можно определить также на основании закономерности, обнаруженной Першиным С. В. в результате обработки и обобщения большого количество экспериментальных данных в различных областях биологии, техники, астрофизики и др. На основании применения им единого алгоритма общей теории систем приведены доказательства обнаруженной и сформулированной им закономерности, состоящей в том, что структурная организация систем инвариантна [13–16]. Все объекты рассмотрены им в виде трехзвенных систем, структурные отноше-

ния которых выражаются безразмерно на основании единого алгоритма. Согласно этому подходу, первичными элементами каждого объекта – системы общей длины s – являются три звена длиной s_1, s_2, s_3 , так что

$$s_1 + s_2 + s_3 = s.$$

В виде простых соотношений получено

$$\bar{s}_1 = s_1/s, \quad \bar{s}_2 = s_2/s, \quad \bar{s}_3 = s_3/s.$$

Единство взаимосвязи звеньев систем определяется безразмерным уравнением:

$$\bar{s}_1 + \bar{s}_2 + \bar{s}_3 = 1.$$

В качестве условия, ограничивающего отношения единства взаимосвязей принято двойное отношение звеньев, известное в математической теории групп и проективной геометрии как инвариант W :

$$W = \frac{(s_1 + s_2)(s_2 + s_3)}{s_2 s}.$$

Из этого выражения видно, что для W особое значение имеет звено s_2 как связующего, которое в трехзвенных системах сопряжено с двумя другими звеньями $(s_1 + s_2)$ и $(s_2 + s_3)$. Совокупность имеющихся экспериментальных данных по живым трехзвенным биосистемам показывает, что численные значения \bar{s}_2 наиболее устойчивы из всех звеньев. Обычно $\bar{s}_2 = 0.25 \div 0.41$. В среднем $\bar{s}_2 \approx 1/3$. Звенья \bar{s}_1 и \bar{s}_3 изменяются в широком интервале $0.1 \div 0.55$. Обычно $\bar{s}_1 \leq \bar{s}_3$. Наиболее устойчивое численное значение имеет инвариант проективного двойного отношения звеньев, который по тем же многочисленным экспериментальным данным принимает вид:

$$W_i \approx 1.31.$$

Таким образом, отличительная особенность форм тела скоростных гидробионтов и птиц по сравнению с известными техническими формами заключается, наряду с другими их особенностями, в наличии в носовой части тела участков с одним или двумя вогнутостями, радиус кривизны которых зависит от скорости движения гидробионта или птицы. Для выяснения роли этих вогнутых участков необходимо экспериментально или теоретически определить гертлеровскую устойчивость при обтекании указанной вогнутости. Сложность таких исследований состоит в том, что задача должна решаться в трехмерной постановке. Ниже будут приведены результаты экспериментальных исследований гертлеровской устойчивости при обтекании плоских пластин с различными радиусами кривизны.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ГЕРТЛЕРОВСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ

Эксперименты были выполнены в Институте гидромеханики НАН Украины на гидродинамическом стенде малой турбулентности, устройство и особенности которого приведены в [6, 9, 17, 18]. Общая длина стенда составляет 7 м, а размеры рабочего участка $3 \times 0.25 \times 0.09$ м. Скорость основного потока U изменялась в пределах (0.05–1.5) м/с. Поджатие в конфузоре составляло 10, а степень турбулентности – 0.04%. По бокам снаружи рабочего участка гидродинамического стенда располагались швеллеры, по которым на колесах перемещалась тележка. На тележке устанавливались датчики термоанемометра и оптическая система лазерного анемометра, излучающая трубка которого была смонтирована сбоку рабочего участка неподвижно. Оптическая система позволяла проводить измерения в любом месте вдоль рабочего участка без ее корректировки. Визуализация поля течения при любой продольной координате x осуществлялась с помощью теллур-метода Вортмана, особенности которого подробно приведены в [6, 9, 17, 18, 34]. Вдоль рабочего участка в месте измерения устанавливались также державки для закрепления теллуровых проволок и генераторов двух и трехмерных возмущений. Боковые стенки рабочего участка выполнены из силикатного стекла толщиной 0.01 м, а крышка, пластина дна рабочего участка и конфузور выполнены из органического стекла такой же толщины. Гидродинамический стенд имел двойное дно: первое дно было сплошным металлическим. На него устанавливалась плоская сменная пластина, которая имела металлический каркас, на котором сверху закреплялся лист оргстекла. С помощью юстировочных винтов, вмонтированных в дно каркаса этой пластины, ее передний и задний торцевые края устанавливались заподлицо с нижними поверхностями конфузора и диффузора. Весь гидродинамический стенд с помощью мощных юстировочных винтов также выравнивался таким образом, чтобы конфузор, рабочий участок и диффузор были горизонтальными.

Для проведения исследования гертлеровской устойчивости были спроектированы и изготовлены три пластины (рис. 5).

Криволинейные пластины имели такую же конструкцию, как и плоская пластина: каркас пластин имел продольный и поперечный силовые наборы, к которым снаружи прикреплялись криво-

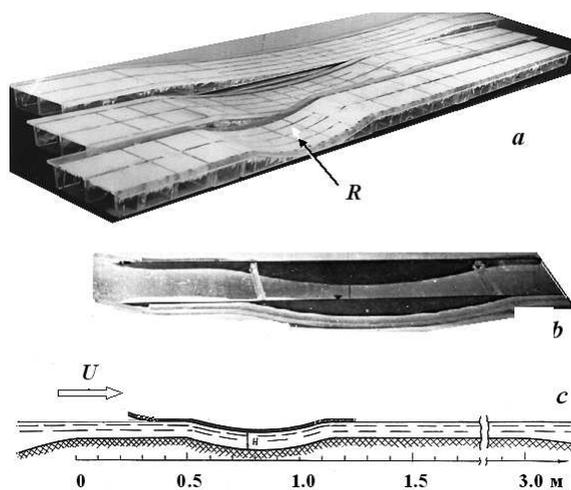


Рис. 5. Криволинейные пластины (а), криволинейная крышка (б) и взаимное расположение криволинейных крышки и пластины (с)

линейные пластины, выполненные из оргстекла толщиной 0.01 м. Снизу в каркасе были вмонтированы юстировочные винты. Длина и ширина трех пластин были равны аналогичным размерам сменной плоской пластины и, соответственно, размерам рабочего участка. У всех криволинейных пластин в начале был плоский участок длиной 0.5 м, который плавно сопрягался с криволинейными участками. Радиус кривизны пластин R составлял 1; 4 и 12 м.

Криволинейный участок для пластины с $R=1$ м заканчивался при $x \approx 1.2$ м, при $R=4$ м $x \approx 1.7$ м и при $R=12$ м $x \approx 2.5$ м. Криволинейный участок плавно сопрягался с плоским участком, расположенным в конце пластины.

При исследовании гертлеровской устойчивости вместо плоской пластины (второго дна) устанавливались криволинейные пластины в виде второго дна. При этом проводилась проверка горизонтальности каждого криволинейного дна таким же образом, как это выполнялось и для горизонтальной пластины, включая и проверку горизонтальности всей установки. После установки каждой криволинейной пластины выполнялась визуализация структуры течения вдоль всей пластины. Экспериментальные исследования гертлеровской устойчивости проводились в зависимости от радиуса кривизны, скорости потока и длины волны λ_z в трансверсальном направлении. Для определения влияния параметра $\alpha = 2\pi/\lambda_z$ на гертлеровскую устойчивость были разработаны генераторы продольных вихрей, расстояние между которыми в трансверсальном направлении определяли дли-

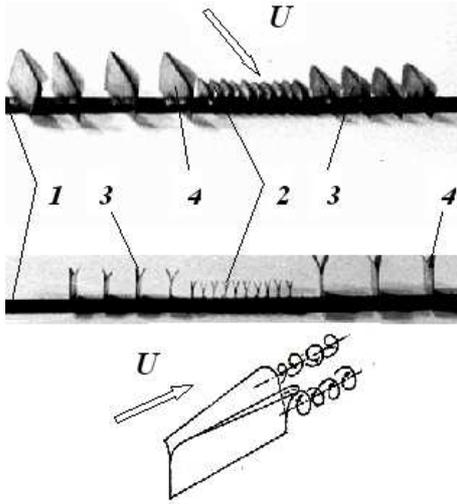


Рис. 6. Генераторы трехмерных возмущений:
 1 – пластина для размещения генераторов вихрей,
 2 – маленькие генераторы вихрей гв1,
 3 – средние гв2, 4 – большие гв3

ну волны λ_z (рис. 6.).

Генераторы вихрей изготавливались из тонких металлических пластинок различных размеров. Каждая пластинка сгибалась пополам в продольном направлении. После этого полученные две пластинки разгибались вдоль длины с помощью специального изготовленного приспособления таким образом, что разворачивались по конусной поверхности приспособления. 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 вверх были скруглены. 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 скоростного 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 плоскости лепестка в нижней его части. Верхний слой жидкости накладывался на нижний слой и еще больше закручивал нижний слой жидкости. За каждым крылышком формировалась пара продольных вихрей. Размер и интенсивность этих вихрей определялась как размером крылышек, так и расстоянием между соседними крылышками λ_z и местом измерения за крылышками (степенью развития продольных вихрей).

Генераторы вихрей имели следующие размеры: гв1 – высота $h=0.003$ м и длина $b=0.009$ м; гв2 – $h=0.005$ м и $b=0.015$ м; гв3 – $h=0.007$ м и $b=0.018$ м. Угол раскрытия крылышек – переменный по высоте и в крайнем верхнем положении составлял $\beta = 10^\circ$. Безразмерный параметр b/h для гв1 и гв2 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 [6, 9, 17, 18]. С помощью микрометра имелась возможность вносить в ПС системы продольных вихрей различного масштаба на различных расстояниях от обтекаемой поверхности. Была изготовлена также пластинка длиной 0.12 м, шириной 0.007 м и толщиной 0.0008 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 0.002 м. На этой пластинке в прорезы поочередно устанавливались указанные три типа крылышек, расстояние между которыми варьировалось.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГЕРТЛЕРОВСКИХ ВИХРЕВЫХ СИСТЕМ

Исследования структуры потока вдоль криволинейных поверхностей проводились в Японии (Тани, Аихара, Ито и др.), в Европе (Бишпс, Перхусени, Вайсфред и др.), в Америке (Халл, Саррик, Блэквэлдер Бандиопадхайя и др.), в Канаде (Флориан и др.), на Украине (Бабенко, Никишова, Авраменко, Халатов, Воропаев, Птуха, Юрченко и др.). В работе Бишпса [19] получены системы гертлеровских вихрей (ГВ), формирующиеся на вогнутых поверхностях при исследовании в водном канале. Визуализация осуществлялась с помощью метода водородных пузырьков. Была зафиксирована картина формирования когерентных

вихревых структур (КВС) при естественном переходе ПС при обтекании криволинейной пластины с радиусом кривизны $R=0.5$ м. Параметр Гертлера $G = (U\delta_2/\nu)(\delta_2/R)^{0.5}$ составил 9. Здесь δ_2 – толщина потери импульса ПС, а ν – коэффициент кинематической вязкости. На фотографии запечатлены этапы формирования Λ -образных вихрей, сливающихся ниже по потоку в продольные вихри. При обтекании криволинейной пластины с $R=1.0$ м и $G=9$ искусственно стимулировались системы продольных вихрей с помощью регулярного местного нагрева пластины. В отличие от естественного перехода в ПС формировались продольные вихри, которые ниже по потоку начинали меандрировать, а на периферии продольных вихрей возникали с их обеих сторон в шахматном порядке вторичные вертикальные вихри.

В работе Ито [20] выполнена визуализация ГВ при обтекании криволинейной пластины в аэродинамической трубе ($R=1$ м, $U=2.5$ м/с). На фотографии зафиксирован участок от $x=0.2$ м до $x=1.2$ м. Ширина криволинейной пластины была 0.2 м. Визуализация осуществлялась с помощью дыма, выдуваемого через систему сопел, расположенных на расстоянии 0.2 м от начала рабочего участка. Дымовые струйки были параллельными на участке плоской поверхности и частично в начале криволинейной поверхности (до $x=0.5$ м). В районе $x=0.5$ –0.6 м начинали формироваться ГВ и струйки сливались между собой в соответствии с λ_z этих вихрей: расстояние между дымовыми струйками увеличивалось. При $x=0.75$ м размер λ_z снова уменьшался, а при $x=0.85$ м на периферийных областях ГВ начинали формироваться вертикальные вихри. В отличие от экспериментов Бипса [19], ГВ формировались естественным образом, поэтому они не меандрировали, как в [19], а вертикальные вихри, формирующиеся по бокам ГВ, располагались симметрично.

На рис. 7 приведена фотография развития ГВ при $x=0.8$ –1.1 м, а на рис. 8 – фотография развития ГВ при фотографировании с торца рабочего участка.

Это дало возможность проследить развитие поперечной структуры ГВ по мере их развития вплоть до образования грибовидной формы и дальнейшего их разрушения. Следует отметить, что белые линии и участки на фотографиях обозначают области заторможенности потока, в которых скорость движения меньше, чем в промежуточных черных областях рисунка. Например, в той части рис. 7, а и рис. 8, где зафиксированы прямые светлые линии ($x=0.8$ м), сформировались пары продольных вихрей, вращающихся навстре-

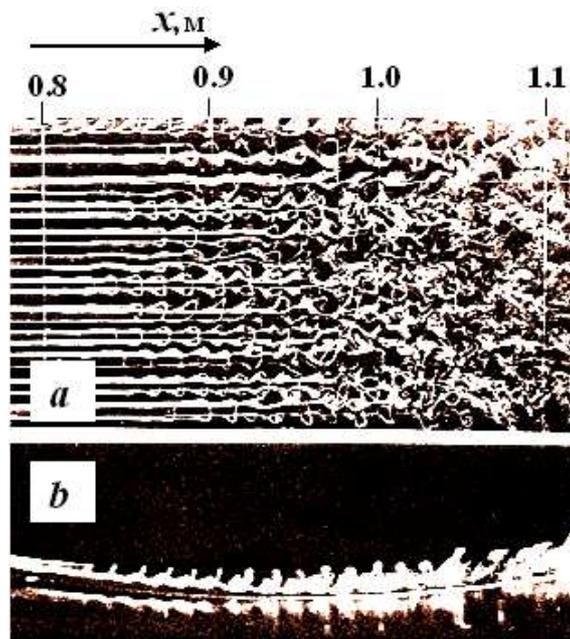


Рис. 7. Формирование ГВ при $U=2.5$ м/с и $R=1$ м: а – вид сверху, б – вид сбоку [20]

чу друг другу к стенке. Линии тока между этими вихрями направлены по винтовой линии к обтекаемой поверхности. Эту область вращения к стенке называют впадиной. Дым заполняет эту область между вихрями. У соседних пар вихрей вращение направлено навстречу друг другу от стенки. Эту область между вихрями называют пик. Поток в этой области направлен вверх вдоль координаты y , где скорости в ПС возрастают по сравнению с местом расположения вихрей, поэтому дым в этих районах диффундирует. Фотографирование с торца (рис. 8) позволило зафиксировать формирование под действием центробежных сил системы ГВ. Обнаружено отличие полученных в эксперименте форм продольных вихревых структур от теоретических расчетов Гертлера. Как показали наши опыты [9, 18], свойства жидкости такие, что закономерности формирования когерентных вихревых структур (КВС) одни и те же для любых случаев сдвиговых течений. На рис. 7 видно, что ГВ формируются подобным образом, как показано на макете КВС переходного пограничного слоя [9, 18, 21]. Подковообразные вихри, возникающие в процессе развития ГВ, подобны Λ -образным вихрям в переходном ПС на плоской пластине и вихрям Кляйна в вязком подслое турбулентного ПС.

Наши эксперименты показали [21–24], что формирующиеся на вогнутой поверхности ГВ при переходе с этой поверхности на горизонтальную пла-

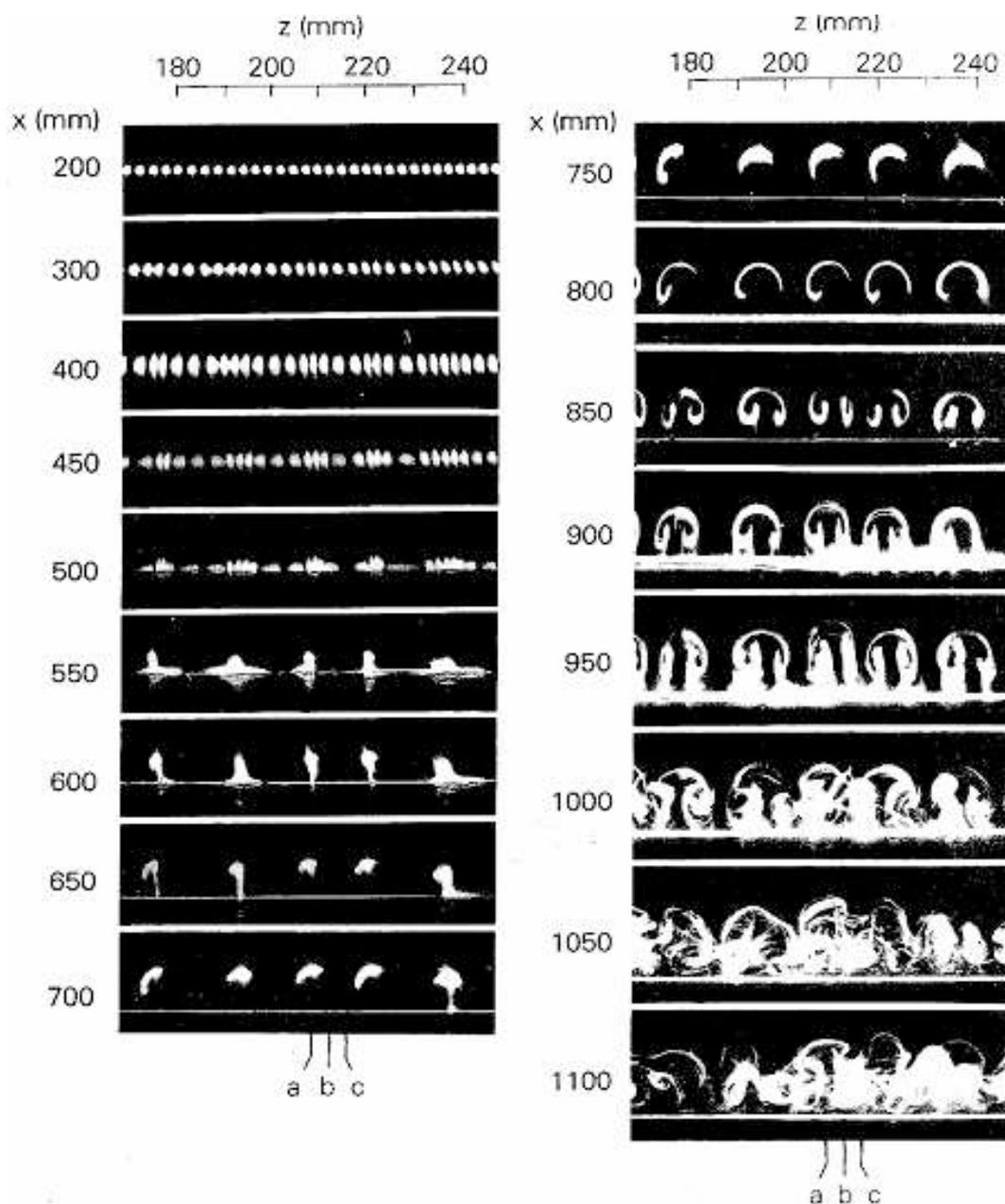


Рис. 8. Формирование ГВ при $U=2.5$ м/с и $R=1$ м: вид с торца на криволинейную пластину [20]

стину продолжают существовать и влияют на поток существенно дальше за вогнутым участком.

Кохама [25] получил такие же выводы. В этой работе были выполнены экспериментальные исследования в аэродинамической трубе с открытым рабочим участком 0.4×0.4 м в DFVLR, Göttingen. Скорость потока была до 12 м/с. С помощью термоанемометра и дымовой визуализации исследованы особенности обтекания модели сверхкритического (SC) профиля крыла LFC NASA

998A (LFC – управление ламинарным потоком). Модель крыла имитировала только одну напорную вогнуто-выпуклую сторону профиля крыла, а вместо выпуклой стороны профиля была плоская поверхность (рис. 9). Поэтому распределение давления вдоль такого макета крыла не соответствовало указанному типу крыла. На рис. 9,а приведена форма профиля модели крыла. Радиусы кривизны выпуклости и вогнутости модели профиля крыла были одинаковы и составляли 0.3 м.

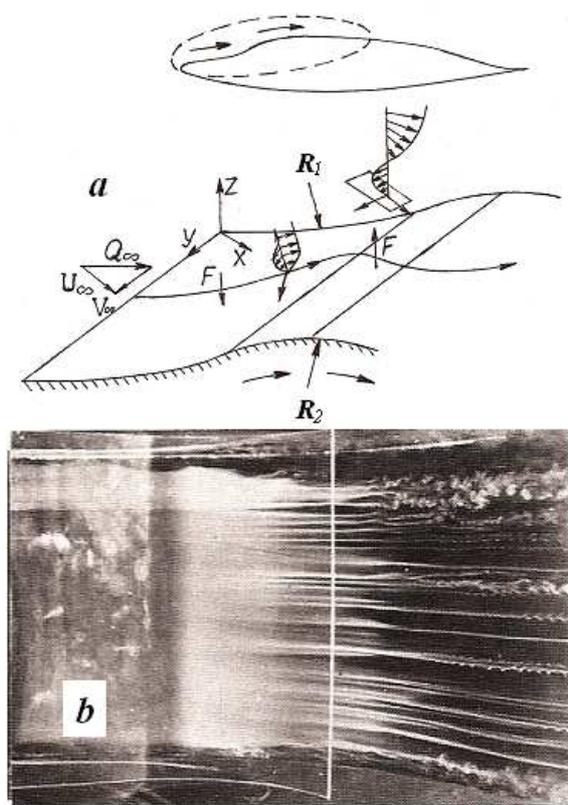


Рис. 9. Схема обтекания и визуализация суперкритического профиля крыла LFC NASA 998A [25]:
 а – контуры профиля и поле скоростей в районе вогнутости крыла;
 б – визуализация поля течения при $U=8.9$ м/с

Неизогнутый участок до начала кривизны составлял 0.2 м. Характерные ГВ на рис. 9, б формируются в конце вогнутого участка. На выпуклой стороне профиля вплоть до его середины формируются вторичные вихри, которые ниже по потоку увеличиваются в трансверсальном направлении. Визуализация ГВ показала, что при скорости $U=10.3$ м/с вихри становятся более устойчивыми, а эволюция развития вихрей смещается существенно ниже по потоку в район выпуклой части модели профиля крыла.

Аналогичные измерения были выполнены в водном потоке при скорости 10 м/с [26]. Радиус кривизны составлял 0.15 м. Авторы обнаружили, что ГВ начинают формироваться на вогнутой поверхности и продолжают развиваться на выпуклой поверхности.

В отличие от работы [25], Пфеннингер [27] выполнил фундаментальные исследования по разработке класса ламинаризованных S-образных

типов профилей SC LFC при их обтекании воздушным потоком в суперзвуковом диапазоне скоростей. Число Маха свободного потока варьировалось в пределах $(0.75 \div 0.783)$. Были исследованы профили крыла X63T18S, Y927S, X782S, PENIR2, X25 D5. Как и в [25], профиль с напорной стороны имел вогнутость в носовой и хвостовой частях. Приведена геометрия этих профилей. При анализе варьируются следующие параметры: число Маха, коэффициент подъемной силы, коэффициент кабрирования, угол атаки, угол прогиба концевой кромки хорды закрылка, коэффициент отношения высоты и длины суперзвукового пузыря. В работе анализировались распределения давления указанных профилей крыла при различных вариантах приведенных параметров. Основная задача анализа заключалась в определении набора параметров, при которых уменьшались размеры суперзвуковых пузырей с обеих обтекаемых поверхностей профиля. Для каждого типа профиля найден набор параметров с минимальными размерами этих пузырей. Определены названные автором предельными величины коэффициентов подъемной силы. Пфеннингер приводит подробное физическое обоснование геометрии ламинаризованных профилей. Он утверждает, что роль кривизны в носовой части профилей состоит в стабилизации возмущений ПС типа волн Т-Ш. Учитывается формирование вторичных поперечных возмущений при развитии волн Т-Ш. Очень коротко реферированы работы R. Kobayashi и J. M. Flogyan, в которых исследуется гертлеровская устойчивость при наличии отсасывания пограничного слоя. Рассматривается преимущество S-образных профилей крыла по сравнению с методом отсасывания ПС, которое способствует минимизации возмущений в ПС и ламинаризации ПС. Как следует из приведенных выше результатов визуализации возмущений в ПС, реальный физический эффект в работе Пфеннингера состоит в стабилизации ПС с помощью ГВ. Формирующиеся в передней вогнутой части ГВ стабилизируют ПС и сдвигали область возникновения турбулентного ПС. В кормовой части S-образных профилей вогнутость способствует уменьшению области отрыва ПС при нулевых и отрицательных углах атаки, а при положительных углах атаки ГВ предотвращают отрыв на задней кромке профиля снизу и стабилизируют ПС на верхней части профиля.

В работе [28] исследованы особенности формирования ГВ на конусах с углами раствора от 30° до 80° . Измерения проводились на вертикальной установке, когда сверху вытекала осесимметри-

чная струя воды. Поток изменялся от ламинарного до турбулентного. По оси струи размещался конус, и на его поверхности фиксировалась структура потока. За счет резкого изменения направления струи при ее натекании на конус на поверхности конуса формировались устойчивые ГВ. Приведены фотографии таких вихрей.

Таким образом, визуализация обтекания криволинейных пластин, профилей крыла с криволинейной поверхностью и осесимметричных тел с соответствующими условиями обтекания показали формирование на вогнутых поверхностях ГВ.

Гертлер является основоположником нового направления [29], которое успешно развивали в теоретическом плане Смит [30], Флориан, Сарик [31], Никишова [21], Авраменко, Халатов [32-34] и другие исследователи. Спустя более 20 лет, Тани [35, 36], Вортман [37] и Биппс [19] сделали попытку экспериментально подтвердить теорию Гертлера. В дальнейшем эксперименты были выполнены и другими авторами. Основная методика проведения всех этих экспериментов заключалась в определении параметра Гертлера G и волнового числа ГВ $\alpha\delta_2$, формирующихся на криволинейной поверхности. Для вычисления G и $\alpha\delta_2$ необходимо определить толщину потери импульса δ_2 . Так как профиль скорости в трансверсальном направлении существенно зависит от места его определения относительно ГВ, то величина δ_2 определяется с некоторой степенью погрешности. Профили скорости измерялись в различных местах по z относительно сформировавшихся ГВ: в "пиках" и "впадинах", а также в промежуточных местах. Для различных форм этих профилей продольной скорости вычислялись толщины потери импульса δ_2 . Среднее значение этих величин принималось для расчета указанных параметров. Волновое число $\alpha = 2\pi/\lambda_z$ определяет длину волны ГВ в трансверсальном направлении. Вычисление длины волны λ_z проводится либо по результатам измерений профилей скорости в трансверсальном направлении с помощью термоанемометра, либо на основании полученных картин визуализации, приведенных, например, на рис. 7–9. Как видно на рис. 8, расстояние между ГВ в трансверсальном направлении λ_z зависит от координат x и y места измерения. В процессе развития ГВ изменяются расстояние λ_z между вихрями и величина δ_2 . Кроме того, датчик термоанемометра не может близко располагаться от стенки, так как вблизи стенки искажаются результаты измерений. Таким образом, и параметр λ_z определяется с некоторой степенью погрешности. Поэтому вычисленные значения наносились на диаграмму Гертлера в виде от-

дельных точек, которые располагались в основном внутри области неустойчивости гертлеровской кривой. Экспериментальные точки располагались вдоль прямых $P = (U\lambda_z/\nu)(\lambda_z/R)^{0.5}$ или кривых $\beta^* = \beta\delta_2/\nu$, характеризующих степень усиления развития ГВ. Кривая, соответствующая нижней ветви нейтральной гертлеровской кривой, имеет коэффициент $\beta^*=0$.

Бандиопадхая [38] провел тщательные экспериментальные исследования турбулентного пограничного слоя при течении в S-образной трубе с поперечным сечением 0.254×0.102 м.

Эксперименты были выполнены в незамкнутом воздушном канале. Диффузор сделан из фибerglassа, внутри которого были установлены хонейкомб, изготовленный из бумаги, и три сетки для выравнивания и уменьшения степени турбулентности основного потока. Выходное сечение диффузора составляло 0.381×0.381 м. К диффузору примыкала труба, составленная из четырех секций длиной 0.504 м. Первая секция была прямолинейной, вторая – криволинейной, поднимающейся вверх. Третья секция была также криволинейной, но направлена была вниз. Четвертая секция была прямолинейной и оканчивалась конфузуром длиной 0.252 м. Радиус кривизны был одинаков и составил 0.504 м. У второй секции верхняя стенка канала была вогнутой, а нижняя – выпуклой, а у третьей секции – наоборот. Скорость потока составила 9.0 м/с. Измерялось статическое распределение давления. Параметры ПС измерялись трубкой Пито. Трение на стенке измерялось трубками Престона диаметром 0.71, 1.45 и 2.0 мм. Использовалась также термоанемометрическая аппаратура DISA 55P11 с проволочным датчиком шириной 1 мм и диаметром 5 микрон. В работе получено много новых результатов. В частности, интересные результаты дефекта скорости в угловых областях канала. Все результаты продемонстрировали различия параметров течения при обтекании выпуклой и вогнутой поверхностей квадратной трубы. Были измерены распределения пристеночного трения и давления в зависимости от координаты вдоль длины криволинейной трубы и в зависимости от координаты z . По результатам распределения пристеночного трения в трансверсальном направлении были определены параметры λ_z ГВ. Вычисленные соответствующие параметры G и $\alpha\delta_2$ были нанесены в виде соответствующих точек на гертлеровскую кривую, вычисленную Смитом. Там же нанесены для сравнения точки измерений в работе Тани. Сравнение выполнено при турбулентной и ламинарной формах течения. Получено хорошее совпадение с эк-

спериментами Тани.

На рис. 10 приводятся результаты исследования гертлеровской устойчивости при обтекании жесткой горизонтальной и наклонной пластин, а также на мембранной горизонтальной пластине, установленных в рабочем участке гидродинамического стенда [22]. Исследования выполнены с помощью теллур-метода Вортмана [37]. В гидродинамическом стенде малой турбулентности [6, 9, 17, 18] устанавливались держатели, на которых были закреплены теллуровые проволоочки. На переднем держателе теллуровые проволоочки устанавливались параллельно пластине вдоль потока, а на держателе, расположенном ниже по потоку, теллуровые проволоочки устанавливались вертикально к обтекаемой пластине. При подаче тока на эти проволоочки (катоды) и расположенные ниже по потоку пластинки (аноды) в поток стекали с переднего держателя теллуровые продольные струйки, а с заднего держателя – теллуровые облака, характеризующие мгновенный продольный профиль скорости. Устанавливались также теллуровые проволоки в трансверсальном направлении. Картины визуализации, приведенные в [6, 9, 17, 18], показали, что мгновенные картины потока позволяли определить пространственное развитие возмущений и вычислить необходимые величины развития возмущений на различных этапах перехода.

Для проверки данной методики были выполнены эксперименты при обтекании наклонной пластины. Для этого было снято второе дно. В рабочем участке гидродинамического стенда устанавливалась наклонная пластина, которая была состыкована заподлицо с конфузуром, а задняя кромка пластины была опущена ниже передней кромки диффузора на 0.03 м. Эта ступенька позволила получить в конце рабочего участка искривление линий тока и тем самым имитировать течение на вогнутой стенке, радиус кривизны которой составлял примерно 1.25 м. В зависимости от скорости потока этот радиус изменялся. Скорость потока варьировалась в диапазоне $0.07 \div 0.13$ м/с. Кривизна линий тока определялась по фотографиям линий тока в районе ступеньки. Фотографирование сверху профилей скорости в трансверсальном направлении позволяло определить λ_z , а фотографирование профилей скорости сбоку позволяло определить δ_2 . Примеры фотографий таких профилей скорости приведены в [6, 9, 17, 18]. Полученные данные позволили рассчитать параметры G и $\alpha \delta_2$. В начале рабочего участка на наклонной жесткой пластине получена точка (на рис. 10 обозначение 4), расположенная в устойчивой области гертлеровской кривой. Это

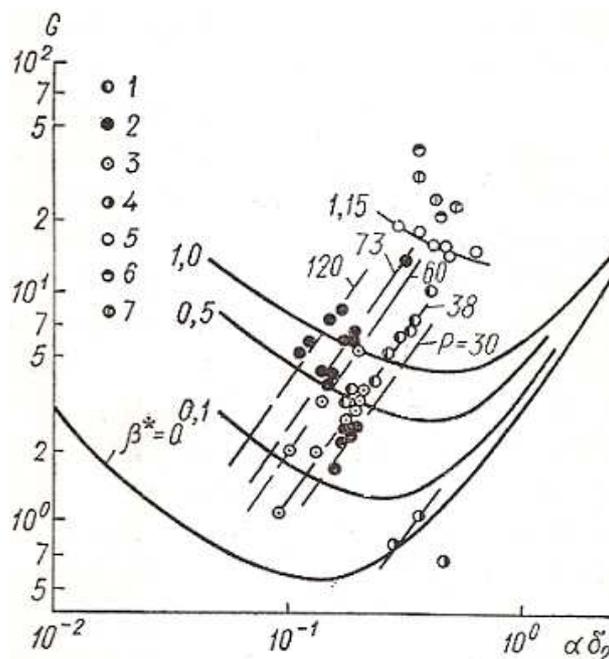


Рис. 10. Устойчивость продольных вихревых систем на вогнутых и плоских поверхностях: расчет Гертлера – сплошные кривые [29], эксперименты Тани и Айхара на вогнутых поверхностях [36] – штриховые кривые: 1 – $R=3$ м, $U=7$ м/с, $P=38$; 2 – $R=5$ м, $U=3$ м/с, $P=30$; 7 м/с, $P=73$; 13 м/с, $P=120$; 3 – $R=10$ м, $U=11$ м/с, $P=38$; 16 м/с, $P=60$; измерения авторов [22]: 4 – при обтекании наклонного дна; в районе вогнутых участков линий тока на горизонтальной (5), наклонной жесткой (6) и мембранной пластинах (7)

объясняется тем, что радиус кривизны линий тока в этом месте очень большой. Системы ГВ еще не сформировались (см. рис. 7–9). Вблизи расположения ступеньки радиус кривизны уменьшился, сформировались ГВ и точки 4 располагаются вблизи нейтральной кривой.

При построении диаграммы линейной устойчивости [6, 9] для фиксированных значений x и U фотографировались полученные теллур-методом профили скорости, по которым определялись величины δ_2 . Одновременно фиксировались частоты колебаний, соответствующие значениям второй ветви нейтральной кривой. Фотографирование вносимых малых колебаний показало, что в области частот, соответствующих второй ветви нейтральной кривой, амплитуды колебаний максимальные. Эти колебания расположены при малых значениях x . По фотографиям колебаний с максимальными амплитудами по y были графически определены радиусы кривизны линий тока волны Т-Ш. По

результатам фотографирования профилей скорости в трансверсальном направлении определялись значения λ_z искаженного фронта профилей скорости в результате развития волны Т-Ш (соответствующие фотографии приведены в [6, 9, 17, 18]). В соответствии с полученными значениями вычисленных параметров G и $\alpha\delta_2$ на рис. 10 наносились точки 5, которые расположились вдоль кривой $\beta^*=1.15$. Коэффициенты усиления гертлеровской неустойчивости вторичных течений вдоль криволинейной поверхности плоских волн Т-Ш при обтекании плоской жесткой пластины оказались существенно больше сформировавшихся ГВ в экспериментах Тани и Айхара, а также при обтекании наклонной пластины (точки 4). Это объясняется малым радиусом кривизны волны Т-Ш и большими центробежными силами. Из этого следует, что кривизна линий тока плоской волны Т-Ш приводит к формированию существенной гертлеровской неустойчивости и, как следствие, к формированию деформации волны Т-Ш в трансверсальном направлении.

Аналогичные измерения гертлеровской неустойчивости волны Т-Ш были выполнены при обтекании наклонной жесткой пластины (точки 6) и мембранной горизонтальной поверхности (точки 7), устройство которой и данные ее маханических характеристик приведены в [6]. Гертлеровская неустойчивость волн Т-Ш при обтекании этих пластин возрастает по сравнению с плоской жесткой пластиной. Это объясняется тем, что при обтекании наклонной жесткой пластины на большей ее длине существует положительный градиент давления, а при обтекании мембранной горизонтальной пластины длина волны Т-Ш уменьшается и уменьшается радиус кривизны волны Т-Ш.

Были исследованы также параметры ГВ, формирующиеся на внутренней поверхности круглой трубы вихревой камеры при втекании воздуха из входного сопла [39]. Входящий в вихревую камеру поток распространялся вдоль внутренней поверхности трубы в виде криволинейной пристеночной струи. Радиус внутренней поверхности трубы составлял 0.05 м. Визуализация потока, приведенная в [40], зафиксировала развивающиеся ГВ и позволила определить величину λ_z . Величины δ_2 и U определялись по результатам измерения параметров потока, формирующегося на внутренней поверхности трубы за входным соплом, с помощью термоанемометра DISA. Вычисленные координаты точек расположились на диаграмме гертлеровской кривой в области неустойчивости. В [39] на диаграмме устойчивости ГВ приведены результаты экспериментальных исследований других авто-

ров: Тани, Никишовой, Бишпса, Мангалама, Вортмана.

В [41, 42] приводятся результаты исследования ГВ, формирующихся в ПС скоростных водных животных. Тело гидробионтов при активном движении искривляется с радиусом кривизны, зависящем от скорости плавания. При гидробионических экспериментальных исследованиях были получены значения скорости плавания гидробионтов и соответствующих радиусов кривизны тела во время движения. Морфологические исследования позволили определить геометрические параметры продольной регулярности наружных покровов кожи, расстояние между которыми были приняты для вычисления λ_z . Величина δ_2 вычислялась путем определения толщины пограничного слоя на твердом осесимметричном теле, обтекаемом со скоростью движения гидробионта. Контуры твердого тела выбирались подобными форме тела соответствующего гидробионта. В этом случае вносилась погрешность при вычислении параметров G и $\alpha\delta_2$, так как ПС на движущемся изгибающемся попеременно теле гидробионта отличается от ПС неподвижного твердого тела. Для проверки вносимой ошибки при вычислении δ_2 произвольно изменялась эта величина. Полученные точки параметров G и $\alpha\delta_2$ наносились на график гертлеровской устойчивости. В отличие от всех экспериментальных результатов, приведенных выше и полученных другими авторами (см. в [39]), у скоростных гидробионтов параметры ГВ располагаются в области устойчивости. Это позволяет стабилизировать возмущения в ПС и уменьшить сопротивление трения.

В соответствии с методикой экспериментального исследования гертлеровской устойчивости, приведенной выше, были выполнены экспериментальные исследования на вогнутых пластинах (рис. 5), а также в цилиндрическом канале. Исследовалось развитие естественных вихревых структур в пограничном слое при визуализации потока теллур-методом. В дальнейшем на криволинейных поверхностях устанавливались генераторы вихрей (рис. 6). Варьировались скорость потока и координата x размещения генераторов вихрей. Визуализация потока при этом позволяла определить характер взаимодействия естественных продольных вихревых структур с вносимыми продольными вихревыми структурами в соответствии с [43]. Метод восприимчивости ПС различных возмущений позволил разработать способы управления кинематических характеристик ГВ и экспериментально определить нейтральную кривую ГВ.

На рис. 11 приведены копии фотографий визуа-

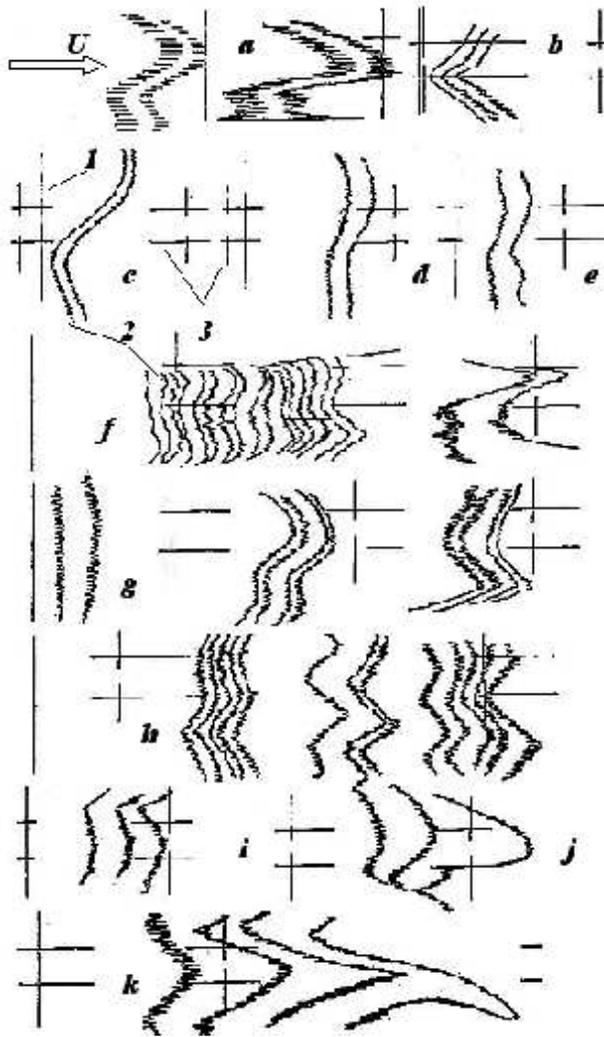


Рис. 11. Копии фотографий визуализации профилей $U(z)$ при обтекании криволинейной пластины в зависимости от координат x, y при $U=0.04$ м/с (1 – теллуровая проволока; 2 – теллуровое облако, характеризующее $U(z)$; 3 – продольные и поперечные геометрические метки на криволинейной пластине, расстояние между продольными метками 0.1 м и между поперечными метками – 0.5 м. $R=4$ м): а – $x=0.3$ м, $y=0.006$ м; б – $x=0.6$ м, $y=0.006$ м; с – $x=1.1$ м, $y=0.01$ м; д – $x=1.1$ м, $y=0.02$ м; е – $x=1.52$ м, $y=0.01$ м; ф – $x=1.8$ м, $y=0.004$ м; г – $x=1.8$ м, $y=0.006$ м; h – $x=2.15$ м, $y=0.006$ м. $R=12$ м: и – $x=0.6$ м, $y=0.004$ м; j – $x=0.6$ м, $y=0.006$ м. $R=1$ м: k – $x=2.22$ м, $y=0.003$ м

лидации развития профилей $U(z)$ вдоль оси x при обтекании криволинейных пластин с различными радиусами кривизны.

При анализе полученных результатов следует учесть, что в начальном диффузорном участке криволинейных вогнутых частей пластин на развитие возмущений влияет положительный гра-

диент давления. На конфузорной части криволинейного участка пластин возмущения стабилизируются под влиянием центробежных сил и отрицательного градиента давления. При радиусе кривизны пластины $R=4$ м до начала диффузорной области уже на горизонтальной части пластины (рис. 5,а) при $x=0.3$ м (рис. 11,а) зафиксировано сильное искривление профиля скорости $U(z)$ по сравнению с обтеканием плоской пластины. В начале диффузорной части при $x=0.6$ м (рис. 11,б) происходит устойчивое во времени торможение потока по оси канала.

Измерения в районе центра криволинейного участка (выше по оси y , над заторможенной областью потока) показали, что профиль скорости $U(z)$ слабо изогнут в направлении оси z : при $x=1.1$ м (рис. 11,с, д) деформация профиля такая же, как и при $x=1.52$ м (рис. 11,е). На конфузорном участке в конце кривизны при $x=1.8$ м (рис. 11,ф,г) и за участком кривизны при $x=2.15$ м (рис. 11,h) длина волны продольной вихревой системы и амплитуда деформации фронта профиля $U(z)$ уменьшаются – происходит стабилизация потока под действием центробежных сил. При этом проявляется нестационарность распределения $U(z)$ значительно интенсивнее, чем при обтекании горизонтальной пластины. Изменение вида $U(z)$ происходит в течение $3 \div 8$ с, в 4–6 раз быстрее, чем при обтекании горизонтальной пластины, особенно при $y > \delta_1$ (рис. 11,г, h). При $y < \delta_1$ (рис. 11,ф) нестационарность проявляется не столько в изменении формы $U(z)$, сколько в колебательном движении возмущений в трансверсальном направлении. Это свидетельствует о специфическом поэтажном развитии возмущений. Зигзагообразность поведения профиля $U(z)$ зарождается при $y < \delta_1$ (рис. 11,ф), а затем распространяется на всю толщину ПС.

При возрастании радиуса кривизны криволинейной пластины распределение $U(z)$ по всей длине рабочего участка постоянно: при $R=12$ м $x=0.6$ м, $y=0.004$ м (рис. 11,и); $x=0.6$ м, $y=0.006$ м (рис. 11, j). При уменьшении радиуса кривизны ($R=1$ м) происходит более интенсивная деформация профиля скорости $U(z)$ за криволинейным участком: $x=2.22$ м, $y=0.003$ м (рис. 11,к). Эксперименты показали, что при естественном развитии ГВ на пластинах с $R=1$ м и 4 м на горизонтальной части пластины за криволинейным участком формируются продольные вихревые системы, величина λ_z которых составляет соответственно 0.28 м и 0.15 м.

В 1980 г. нами была выдвинута гипотеза [44]: в вязком подслое ТПС развитие КВС происхо-

дит 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 [45]. В [46] Блэквэлдер, как и другие авторы, утверждает, что на границе слоев жидкости с большими сдвиговыми напряжениями развиваются вихревые структуры. Он продолжает развивать аналогию между вихревыми структурами переходного и турбулентного пограничных слоев. В частности, на основании собственных экспериментальных исследований естественных гертлеровских вихревых систем он определил волновое число ГВ. Длину волны в районе распада упорядоченной формы ГВ он обозначает Δ . Имеющиеся в распоряжении данные представлены в безразмерном виде $\Delta^+ = \Delta u_\tau / \nu$. Несмотря на то, что физическая длина Δ в экспериментах различных авторов варьируется, Δ^+ имеет постоянную величину, равную примерно 10. Здесь Δ^+ обозначает вариацию используемого масштаба вязкости ν и u_τ . Следовательно, длина волны $\lambda_z = 2\pi/\alpha_z$ для большинства усиливающихся возмущений должна составить $\lambda_z^+ \approx 150$. Некоторые исследователи определили величины безразмерной длины волны: Биппс (1972) – $\lambda_z^+ \approx 130$, Ито (1988) – $\lambda_z^+ \approx 90$, Айхара и Сонда (1981) – $90 < \lambda_z^+ < 230$. По данным Блэквэлдера $\lambda_z^+ \approx 175$.

На рис. 12 приведены фотографии визуализации развития профилей $U(z)$ вдоль оси x при обтекании криволинейных пластин с радиусом кривизны $R=4$ м при внесении в ПС искусственных продольных возмущений, формируемых генераторами вихрей гв1 (для рис. 12,b) и генераторами вихрей гв2 (для остальных фотографий). Исследования выполнены при $U=0.05$ м/с ($G=1.45$) при различных значениях расстояния λ_z между генераторами вихрей.

При анализе результатов, приведенных на рис. 11 и 12, следует обратить внимание на координату x места проведения измерений. Для всех радиусов кривизны начало кривизны расположено при $x=0.5$ м, а заканчивается кривизна при различных координатах x : для пластины с радиусом кривизны $R=1$ м – $x=1.3$ м, для $R=4$ м – $x=1.9$ м, для $R=12$ м – $xq=2.5$ м.

На рис. 11,h при $x=2.15$ м и $R=4$ м при естественном развитии возмущений зафиксирована $\lambda_z=0.016$ м, а на рис. 11,k при $x=2.22$ м и $R=1$ м – $\lambda_z=0.028$ м. На рис. 12,a при $x=2.1$ м $\lambda_z=0.021$ м. Различие длин волн λ_z обусловлено тем, что при проведении опытов, приведенных на рис. 12, скорость потока была больше, а измерения проводились ближе к стенке при $y_{\text{тп}}=0.002$ м. При анализе

полученных результатов следует учитывать, что измерения проводились на плоской поверхности пластины примерно на расстоянии 0.4 м за кривизной. В этом районе под действием центробежных сил сформировались системы продольных вихрей, на которые накладывались вводимые в ПС с помощью генераторов вихрей системы продольных вихрей различного масштаба. Теллуровая проволока l размещалась на всех фотографиях примерно на расстоянии 0.25 м от расположения генераторов вихрей. На рис. 12,b внесение возмущений с помощью генераторов вихрей гв1 с $\lambda_z=0.004$ м приводит не к затуханию, согласно диаграмме устойчивости, а к преобразованию их в укрупненную структуру с $\lambda_z=0.01$ м, при развитии которой λ_z уменьшается до 0.008 м. Масштаб вносимых возмущений удваивался. В дальнейшем продольные вихревые системы вносились при более крупных генераторах вихрей гв2. На рис. 12,c в ПС вносились возмущения $\lambda_z=0.006$ м. Дальнейшее увеличение длины волны дает все более четкие волновые картины (рис. 12,d, e) с тенденцией к образованию жгутов (рис. 13,f–h), свидетельствующей об ускорении нарастания возмущающего движения. При $\lambda_z=0.024$ м такое увеличение нарастания прекращается: амплитуда $U(z)$ уменьшается на рис. 13,i, j по сравнению с рис. 13,h.

Отсюда можно сделать следующие выводы. Масштаб $\lambda_z=0.024$ м соответствует возмущениям с максимальным усилением. Сформировавшиеся продольные возмущения с $\lambda_z=0.012$ м являются нейтральными. Возрастание λ_z от 0.012 м до 0.024 м на диаграмме Гертлера отображается перемещением точки вдоль оси абсцисс влево. При этом перемещении точка пересекает ряд кривых равного усиления $\beta\delta_2/\nu$ с нарастающими значениями β до достижения максимальных значений, определяемых кривой максимальных усилений. При последующем увеличении λ_z точка пересекает ряд кривых равного усиления с меньшими значениями β , что следует из уменьшения амплитуд $U(z)$. Подобная картина зафиксирована и на графике нейтральной кривой волн Т-Ш.

Распространение вниз по течению возмущения с фиксированной величиной λ_z отображается на диаграмме Гертлера движением точки с координатами $G = (U\delta_2/\nu)(\delta_2/R)^{0.5}$, $\alpha_z\delta_2$ вверх вдоль линии $P=\text{const}$ в соответствии с нарастанием δ_2 . Тогда для $G < 1.5$ возмущения из устойчивой области при достаточной их интенсивности могут достигать области неустойчивости. Для $G > 1.5$ линии $P=\text{const}$, начинающиеся в устойчивой области, не пересекают область неустойчивости; поэтому в таких условиях возмущения с устойчивыми

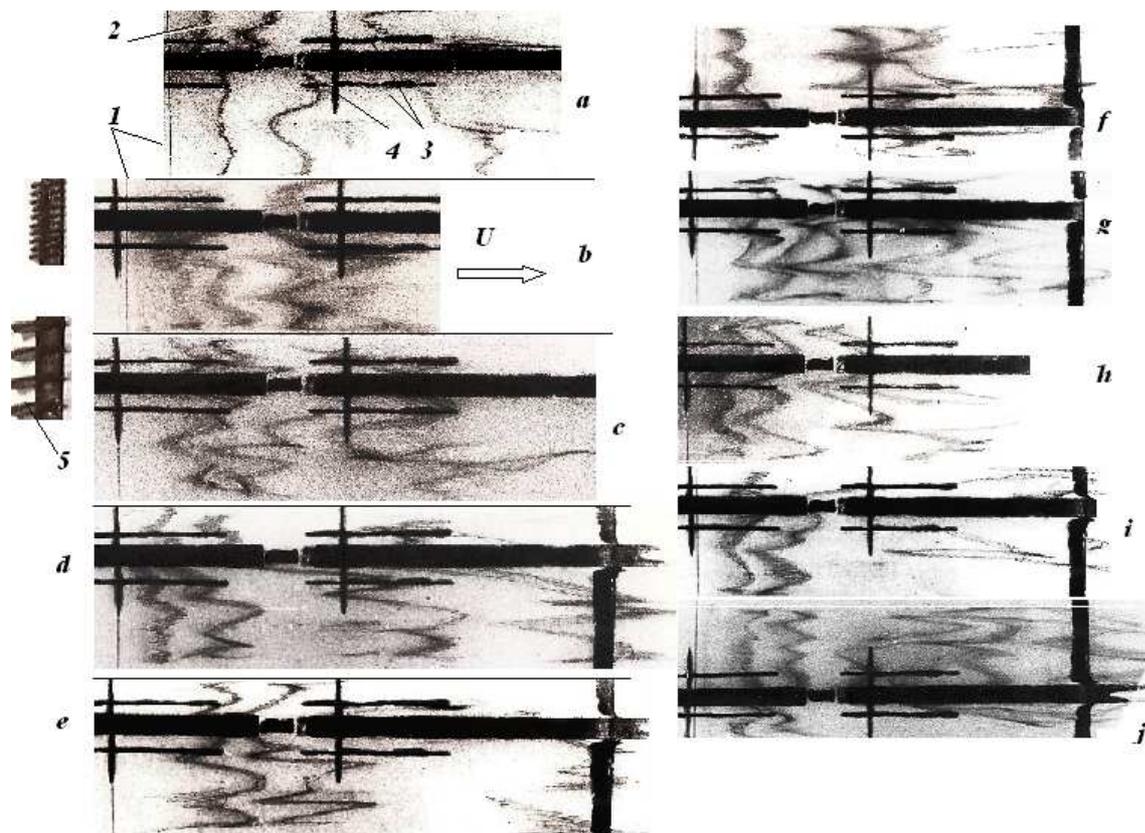


Рис. 12. Фотографии визуализации профилей $U(z)$ при обтекании криволинейной пластины с $R=4$ м, $U=0.05$ м/с, $x=2.1$ м, $y_{tw}=0.002$ м:
 а – без внесения возмущений, б–е – при внесении возмущений с $\lambda_z=0.004$ м (б); 0.006 м (с); 0.016 м (д); 0.018 м (е); ф–j – при внесении возмущений с $\lambda_z=0.02$ м (ф); 0.022 м (г); 0.024 м (h); 0.026 м (i); 0.028 м (j);
 1 – теллуровая проволока, 2 – теллуровые облака, 3 – продольные метки, 4 – поперечные метки на дне рабочего участка (расстояние между продольными метками – 0.1 м и поперечными метками – 0.5 м, 5 – генераторы вихрей

параметрами должны затухать при распространении вниз по течению.

Иванов В. П. и Блохин В. А. разработали лазерный доплеровский измеритель скорости [47], с помощью которого были измерены профили скорости $U(y)$ в характерных местах по z , которые были определены согласно полученным визуализационным картинам (рис. 12). Характерными местами являются пики, впадины и промежуток между ними. Полученные профили скорости позволили вычислить толщину вытеснения в каждом месте измерения. При каждом x были получены соответствующие три значения толщины вытеснения. Среднеарифметическое значение толщины вытеснения и вычисленное по фотографиям соответствующее значение λ_z позволили определить координаты точки на диаграмме устойчивости Гертлера (рис. 13). Вертикальная линия III соответствует значению $\alpha\delta_2$, рассчитанному по величине

$\lambda_z=0.045$ м, характерной для естественного перехода на плоской пластине. В этой области должно находиться критическое число Гертлера или экстремум нейтральной кривой. Так как нижняя точка получена для плоской пластины при условии $\delta_2/R = 10^{-4}$, т. е. при малой кривизне, то экстраполяция позволила определить, что $G_{cr} \approx 0.3$.

В таблице 1 приведены параметры экспериментальных кривых. Кривые I и II на рис. 13 расположены правее соответствующих расчетных кривых. Это объясняется тем, что эксперимент был выполнен при большом значении степени турбулентности основного потока ($\epsilon > 1\%$). Кроме того, определение параметров экспериментальных точек было выполнено в районе горизонтальных участков – за участками с вогнутостью, так как форма ГВ проявлялась в результате процесса восприимчивости ниже по потоку за вогнутым участком.

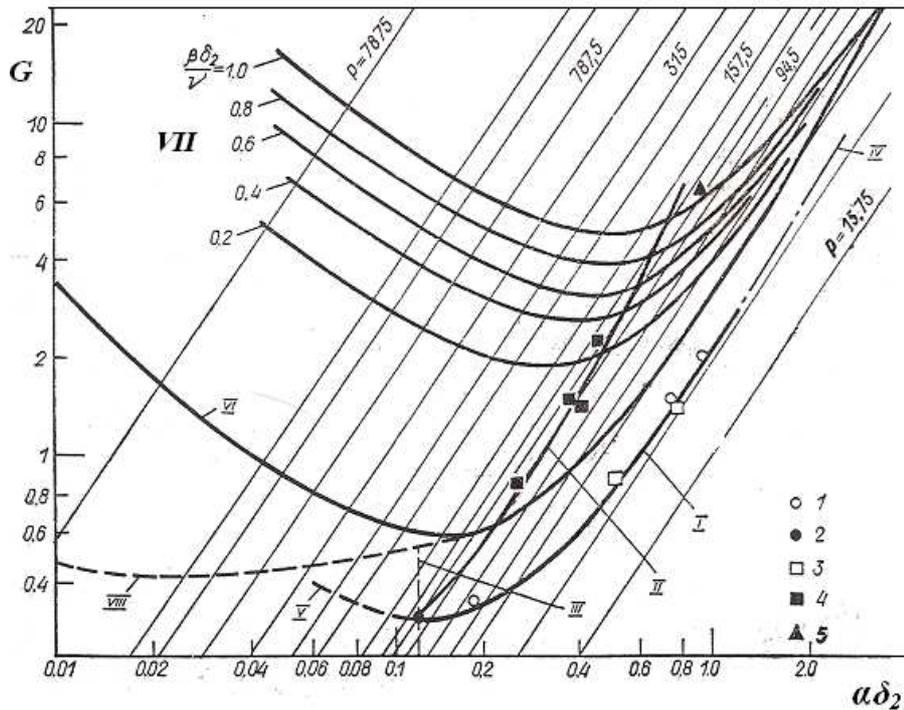


Рис. 13. Диаграмма устойчивости Гертлера на вогнутой жесткой поверхности: I – экспериментальная нейтральная кривая (1, 3 – обтекание поверхности с $R=12$ м и 4 м); II – кривая максимальных усиления (2, 4, 5 – обтекание поверхности с $R=12$ м, 4 м и 1 м); III – линия критического значения $\alpha_z \delta_2=0.12$; IV – экспериментальные данные [31]; V – экстраполяция кривых I и IV; VI, VII – нейтральная кривая и кривые равного усиления по [29]; VIII – расчетная кривая [30]

Табл. 1. Параметры гертлеровской нейтральной кривой

R м	U м/с	x м	$\lambda_z \cdot 10^2$ м	$\delta_2 \cdot 10^3$ м	$\alpha_z \delta_2$	G
12	0.03	0.6	2.4	2.8	0.73	1.5
12	0.035	0.73	2.4	3.5	0.92	2.1
12	0.03	2.2	4	1.2	0.18	0.36
12	0.08	2.2	2.4	1.45	0.38	1.48
4	0.03	1.8	1.6	1.3	0.5	0.84
4	0.03	1.8	3.2	1.3	0.25	0.84
4	0.05	2.1	1.2	1.5	0.78	1.45
4	0.05	2.1	2.4	1.5	0.39	1.45
4	0.128	1.8	1.6	1.1	0.43	2.4
1	0.087	1.35	1.2	1.75	0.92	6.3

3. ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ВЫПОЛНЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Во втором разделе было показано, что скоростные животные, движущиеся в воде, и скоростные птицы имеют специфическую форму носовой части тела и соответствующие контуры все-

го тела. Экспериментальные исследования показали, что обнаруженная специфическая форма тела приводит к формированию ГВ, способствующих повышению устойчивости КВС пограничного слоя. В [25, 26] было исследовано формирование ГВ при обтекании S-образных профилей крыла. В [27] были разработаны различные типы S-образных авиационных профилей, которые находят в настоящее время широкое применение в авиационной промышленности.

В [48, 49] экспериментально исследована возможность формирования нового гидродинамического профиля рулевого комплекса судна. На основе гидробионического подхода предложена новая форма кронштейна полубалансировочного руля. Были выполнены экспериментальные исследования модели рулевого комплекса в гидродинамической трубе замкнутого типа. Определены зависимости коэффициента подъемной силы от угла перекладки (угла атаки профиля), а также визуализация обтекания различных форм профиля при различных углах атаки.

На основании результатов исследований, приведенных во введении, была предложена новая

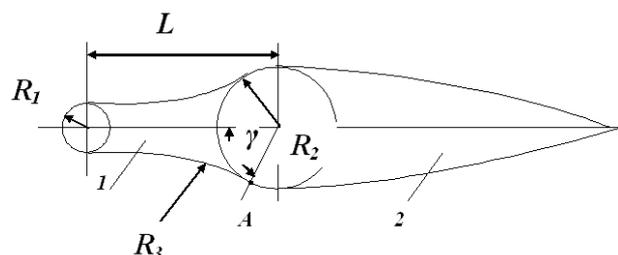


Рис. 14. Схема полубалансировочного руля бионического типа: 1 – кронштейн бионического типа, 2 – руль за кронштейном

форма профиля рулевого комплекса судна [50]. На рис. 14 приведены основные особенности формы разработанного профиля. За основу может быть выбран любой типовой профиль крыла. Например, если выбрать типовой профиль крыла NASA 0020, то предложенный бионический профиль крыла формируется следующим образом. Ось вращения руля расположена на расстоянии $0.364b$, где b – хорда профиля. Следовательно, $R_1 + L = 0.364b$. При построении бионического профиля предложены следующие соотношения: $R_2 = 0.1b$, $R_1 = 0.0454b$, $R_2 = 2.2R_1$, $L = 0.315b$, $R_3 = 8.545R_2 = 0.8545b$. Угол γ точки сопряжения A кронштейна и руля составляет 70° .

На рис. 1 приведена форма тела пингвинов, а на рис. 4 – буревестника. На этих рисунках переднюю часть тела можно аппроксимировать с помощью сопрягающихся трех сфер разного диаметра. Форму тела птиц рода олуши, альбатросов и других скоростных водных животных и птиц можно аппроксимировать таким же образом. Форму бионического полубалансировочного руля можно более упрощенно аппроксимировать с помощью двух сопрягающихся цилиндров. Продольное сечение такой формы руля лучше всего совпадает по соотношению характерных размеров с формой продольного сечения тела альбатроса. Отличие такой бионической формы полубалансировочного руля от типовой формы руля судна основано на результатах экспериментальных исследований, приведенных во втором разделе. Конструкция полубалансировочного руля совпадает с авиационными профилями, снабженными отклоняющимися предкрылками. В авиационных профилях основная часть профиля неподвижна, а отклоняются предкрылки и закрылки. В судостроении передняя часть профиля (кронштейн) неподвижна, а отклоняется основная часть профиля – руль. При отклонении стандартного руля напорная часть профиля вогнута, так что на этой части

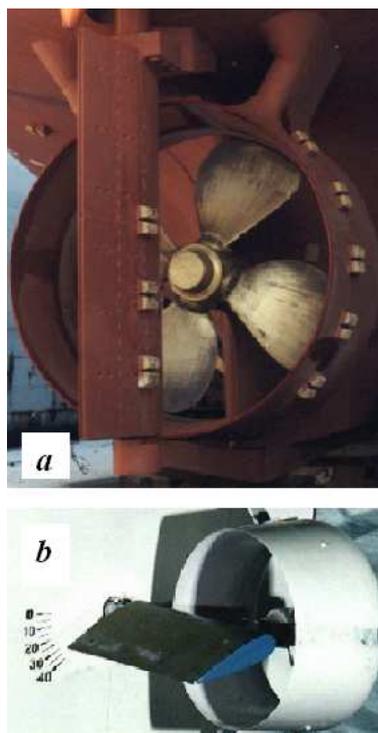


Рис. 15. Руль судна (a) и его макет (b)

профиля формируются ГВ. На верхней части профиля при возрастании углов отклонения профиля (углов атаки) возникает отрывное обтекание, как это показано на картинах визуализации в [48, 49]. В авиации для устранения отрыва применяют интерцепторы или системы различных видов генераторов продольных вихрей [51, 52].

Обтекание полубалансировочного руля бионического типа отличается от обтекания стандартных рулей тем, что при отклонении руля на его верхней обтекаемой поверхности также формируются системы ГВ. Таким образом, при отклонении полубалансировочного руля бионического типа практически при любых углах атаки с обеих сторон профиля формируются ГВ. Результаты экспериментальных исследований, приведенных выше, показали, что сформированные ГВ продолжают существовать ниже по потоку за вогнутым участком вследствие эффекта течения Коанда.

Эффективность предложенного руля была экспериментально исследована при моделировании реального руля судна. На рис. 15 приведены фотографии стандартного полубалансировочного руля и его модели.

Профиль указанного руля и его модели соответствовали профилю NASA 0020. Характерные размеры профиля модели полубалансировочного

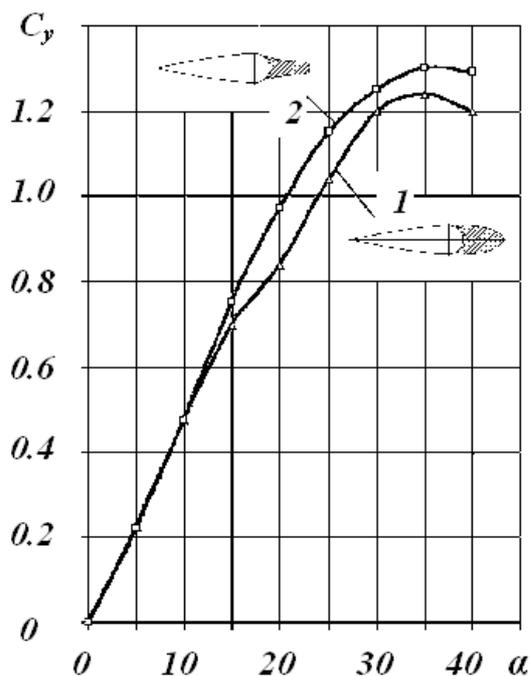


Рис. 16. Зависимости $C_y = f(\alpha)$ модели полубалансировочного руля с кронштейном в виде профиля NACA 0020 (1) и с кронштейном бионического типа (2)

чного руля бионического типа составили $R_1=5$ мм, $R_2=11$ мм, $R_3=94$ мм, $L=35$ мм. Была разработана платформа, на которой размещалась модель руля. На платформе закреплялся тензометрический динамометр для регистрации гидродинамических характеристик модели руля в зависимости от угла атаки. Платформа закреплялась в средней части рабочего участка замкнутой гидродинамической трубы. Скорость потока воды в гидродинамической трубе во время проведения экспериментов составляла 2 м/с. При температуре воды 14°C число Рейнольдса, вычисленное по хорде, составило $Re = 1.7 \cdot 10^5$.

Результаты экспериментов приведены на рис. 16. Зависимости коэффициентов подъемной силы руля от угла атаки для стандартного и бионического кронштейнов до $\alpha = 12^\circ$ практически совпали. Начиная с $\alpha = 15^\circ$, бионический кронштейн имеет преимущество по сравнению со стандартным кронштейном. Полученные интегральные результаты соответствуют результатам физических исследований формирования ГВ на криволинейных поверхностях.

4. ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

В [53] рассмотрены основные особенности функционирования гидробионтов с точки зрения оптимизации работы всех систем организма и минимизации затраты энергии, необходимой для их существования. В [53] были систематизированы также принципы функционирования гидробионтов, отличающие их от современных технических аппаратов. Всего сформулировано различными авторами 40 принципов, из них Бабенко сформулировал 10 принципов функционирования организмов и их систем у быстро плавающих гидробионтов. В настоящей работе исследованы физические особенности обтекания потоком тел гидробионтов в связи со специфической формой тела гидробионтов, выработанной в результате эволюции. Экспериментальные исследования на моделях тел гидробионтов позволили обнаружить закономерности, отличные от известных аналогичных закономерностей для жестких тел. В результате была разработана, в частности, новая конфигурация профиля руля судна, гидродинамические характеристики которой были лучшие по сравнению с современными профилями крыла. Однако предложенная конструкция бионического профиля крыла не является оптимальной. В [54] приводятся результаты исследования изменения формы тела дельфинов при их нырянии в связи со сжатием воздуха в легких и подвижностью скелета тела. Очевидно, что это приводит к изменению формы тела и распределения давления вдоль тела. В других экспериментальных исследованиях при моделировании особенностей тела дельфинов Бабенко показал, что кожная мышца позволяет изменять геометрические параметры кожного покрова, что оптимизирует механические свойства кожи для оптимального снижения сопротивления трения при различных режимах движения тела.

Баннаш при проведении экспериментов на живых пингвинах и на моделях их тел сделал выводы, что покровы пингвинов способствуют снижению сопротивления. Он обнаружил, что мускулатура пингвинов может управлять положением перьев и напряженностью кожи. Он также утверждает, что пингвины при нырянии могут изменять форму тела. Таким образом, в соответствии с принципами гидробионтов у живых организмов выработана аддитивность формы тела для оптимизации снижения сопротивления и затрат энергии при нестационарном движении гидробионтов и изменении глубины движения. В процессе дви-

жения гидробионтов и скоростных птиц изменяется положение головной и хвостовой частей тела, что также приводит к изменению распределения давления вдоль тела.

Бабенко исследовал также особенности терморегуляции тела дельфинов, что, в частности, приводит к регулированию стабилизирующих свойств кожных покровов [55]. В [56] экспериментально исследовано охлаждения модели руля, выполненного из профиля NASA 0015. Это позволило увеличить коэффициент подъемной силы профиля руля на 11.5% при $Re = 1.0 \cdot 10^5$ и отношении температуры охлаждающей жидкости к температуре воды, равной 2.1. С увеличением Re эффективность уменьшается и при $Re = 8.0 \cdot 10^5$ эффективность равна нулю. Бионический профиль имеет максимальное значение коэффициента подъемной силы, равное 1.3 при $\alpha = 35^\circ$. Охлаждаемый руль с тонким профилем NASA 0015 имеет максимальное значение коэффициента подъемной силы профиля руля, равное 0.95 при $\alpha = 20^\circ$ и $Re = 4.0 \cdot 10^5$. Эти и другие факторы [23, 57] могут улучшить гидродинамические характеристики руля судна.

ВЫВОДЫ

Анализ экспериментальных результатов обтекания различных форм тела позволил сделать следующие выводы:

1. Формы тела скоростных гидробионтов и птиц имеют специфическую форму носовой части тела, которую можно аппроксимировать с помощью трех сфер с возрастающими размерами диаметра по длине. Сферы сопрягаются между собой криволинейными вогнутыми поверхностями, при обтекании которых имеются необходимые условия для формирования гертлеровских вихрей (ГВ). С помощью методики Першина можно определить оптимальные геометрические параметры размер сфер и их взаимного расположения.

2. Приводятся результаты экспериментальных исследований других авторов, в которых с помощью методов визуализации исследована структура и физическая картина формирования ГВ при течении вдоль плоской криволинейной пластины и вдоль профиля крыла с вогнутой носовой частью на одной стороне профиля. Разработаны авиационные S-образные профили с вогнутой поверхностью на верхней стороне профиля.

3. Разработана экспериментальная методика исследования устойчивости ГВ на вогнутых жестких и эластичных пластинах. С помощью визуализации теллур-методом Вортмана исследована восприимчивость естественных ГВ, возникающих

на криволинейной поверхности, к вносимым в пограничный слой продольным вихревым системам, формируемым с помощью разработанных генераторов продольных вихрей. Обнаружены условия формирования устойчивых ГВ, которые сохраняются на поверхности за участком кривизны за счет, в частности, эффекта Коанда.

4. На основании выполненного анализа формы носовой части тела скоростных гидробионтов и птиц разработан новый бионический профиль руля судна, гидродинамические свойства которого были исследованы в модельном эксперименте. Сравнение выполнено со стандартным профилем NASA 0020 руля судна. Начиная с $\alpha = 12^\circ$, коэффициент подъемной силы бионического руля превышал характеристики серийного профиля руля. Величина коэффициента подъемной силы серийного профиля руля имела максимум при $\alpha = 35^\circ$, а затем эффективность руля уменьшалась. У бионического руля максимум коэффициента подъемной силы профиля руля был больше. Этот максимум сохранялся практически при $\alpha = 40^\circ$. Эффективность руля можно увеличить за счет моделирования некоторых принципов гидробионтов, в частности, при формировании в пограничном слое продольных вихрей, создаваемых с помощью генераторов вихрей.

1. *Hoerner Sighard F.* FLUID-DYNAMIC DRAG.— Practical Information on Aerodynamic Drag and Hydrodynamic Resistance: Published by the Author, 1965.— 467 p.
2. *Шлихтинг Г.* Теория пограничного слоя.— М.: Наука, 1974.— 712 с.
3. *Чжен П.* Управление отрывом потока.— М.: Мир, 1979.— 552 с.
4. *Белюсов А. Г.* Особенности равноускоренного движения в воде тел различной формы // Прикладная гидромеханика.— 2000.— 2(74), №2.— С. 106–109.
5. *Bandyopadhyay P. R.* Convex Curvature Concept of Viscous Drag Reduction.— Progress in Astronautics and Aeronautics: AIAA, Vol. 123. Washington: DC, 1990.— 285–324 p.
6. *Козлов Л. Ф., Бабенко В. В.* Экспериментальные исследования пограничного слоя.— Киев: Наукова думка, 1978.— 184 с.
7. *Козлов Л. Ф.* Теоретическая биогиродинамика.— Киев: Вища школа, 1983.— 238 с.
8. *Першин С. В.* Основы гидробионики.— Л.: Судостроение, 1988.— 263 с.
9. *Babenko V. V., Chun H. H., Inwon Lee.* Boundary Layer Flow over Elastic Surfaces. Compliant Surfaces and Combined Methods for Marine Vessel Drag Reduction.— Elsevier publishers: Butterworth-Heinemann, 2012.— 461 p.
10. *Bannasch R., Wilson R. P. and Culik B.* Hydrodynamic aspects of design and attachment of a back-mounted device in penguins // J. experimental Biology.— 1994.— 194.— P. 83–96.

11. *Bannasch R.* Mechanismen der biologischen Formgebung – neue Ergebnisse der bionischen Forschung an Meerestieren. Tagungsunterlagen // Proc. LUFTSCHIFF - KOLLOQUIUM II. Lighter Than Air Flight Systems. Schloss Lubbenau.– Spreewald. 13/14 Mai, 1994.– P. 1–6.
12. *Bannasch R.* Widerstandsarme Stromungskörper – Optimalformen nach Patenten der Natur.– In: Nachtigall W. and Wissler (editors). BIONA-report 10.: Akademische Wissenschaft und Lit., Mainz: G.Fischer. Stuttgart, Jens, New York, 1996.– 151–176 p.
13. *Першин С. В.* Инвариантная структура и различные морфотипы позвоночного столба китообразных // Бионика.– 1991.– 24.– С. 60–66.
14. *Першин С. В.* Закономерность инвариантной структурной организации трехзвенных биосистем тел и конечностей животных и человека // Бионика.– 1993.– 26.– С. 104–107.
15. *Першин С. В.* Инвариант и симметрия структурной организации многозвенных пространственно-временных систем // Бионика.– 1998.– 27–28.– С. 136–143.
16. *Першин С. В.* Инвариант и стадии симметрии структурной организации размерно-возрастного роста организмов // Прикладная гидромеханика.– 2000.– 2(74), №2.– С. 76–82.
17. *Бабенко В. В., Гнитецкий Н. А., Козлов Л. Ф.* Гидродинамический стенд малой турбулентности, аппаратура и методика проведения исследований устойчивости ламинарного пограничного слоя // Бионика.– 1972.– 6.– С. 84–90.
18. *Babenko V. V.* Experimental investigation of the boundary layer over rigid and elastic plates // Pros. AGARD FDP Report 827. Workshop on High Speed Body Motion in Water.– Kiev, Ukraine, 1998.– P. 9–1–9–24.
19. *Bippes H.* Experimentelle Untersuchungen des laminar turbulent umschlags an einer parallel angestromten konkaven wand // Heidelb. Akad. Wiss., Math. Naturwiss. Kl., Sitzungsberg.– 1972.– N3.– P. 103.
20. *Ito A.* Breakdown Structure of longitudinal vortices along a concave wall // J. Japan Soc. Aero Space Sci.– 1988.– N36.– P. 272–279.
21. *Козлов Л. Ф., Бабенко В. В., Цыганюк А. И. и др.* Формирование турбулентности в сдвиговых течениях.– К.: Наукова думка, 1985.– 284 с.
22. *Бабенко В. В., Юрченко Н. Ф.* Экспериментальные исследования гертлеровской устойчивости на жесткой и эластичной плоских пластинах // Гидромеханика.– 1980.– 41.– С. 103–108.
23. *Юрченко Н. Ф., Бабенко В. В.* Критерии устойчивости трехмерных возмущений на вогнутых эластичных поверхностях // ИФЖ.– 1987.– 52, N5.– С. 781–788.
24. *Yurchenko N. F., Babenko V. V., Kozlov L. F.* Development of three-dimensional disturbances over compliant surface // Intern. Conf. EAHE (Engineering aero-hydroelasticity).– Praque, Czeskoslovensko, 1989.– P. 63–69.
25. *Kohama Y.* Three-dimensional Boundary Layer Transition on a Concave-Convex Curved Wall.– In: Liepman H. W., Narasimha (editors). Turbulence Management and Relaminarisation: Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo, 1988.– 215–226 p.
26. *Chomaz J. M., Perrier H.* Nature of the Gortler instability. A forced experiment // Proc. Colloquium on Gortler Vortex Flows. Euromech 261.– Nantes, France, 1990.– P. 79.
27. *Pfenninger W., Viken J., Vemuru C. S. and Volpe G.* All Laminar Supercritical LFC Airfoils with Natural Laminar Flow in the Region of the Main Wing Structure.– In: Liepman H. W., Narasimha (editors). Turbulence Management and Relaminarisation: Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo., 1988.– 349–405 p.
28. *Skaug J. A.* On Gortler vortexes on cones // Proc. Colloquium on Gortler Vortex Flows. Euromech 261.– Nantes, France, 1990.– P. 64–65.
29. *Gortler H.* Uber eine dreidimensionale Instabilitat laminarer Grenzschichten an konkaven Wanden // Nach. Ges. Wiss. Gottingen Math.-Phys. Kl.– 1940.– Bd. 2, N1.– P. 1–26.
30. *Smith A. M. O.* On the growth of Taylor-Gortler vortices along highly concave walls // Quart. Appl. Math.– 1955.– 13, N3.– P. 233–262.
31. *Floryan J. M., Saric W. S.* Stability of Gortler vortices in boundary layers // AIAA J.– 1982.– V.10, N3.– P. 316–324.
32. *Авраменко А. А., Халатов А. А.* Критерии устойчивости трехмерных возмущений на вогнутых эластичных поверхностях // Пром. теплотехника.– 1993.– 15, N3.– С. 29–33.
33. *Халатов А. А., Авраменко А. А., Шевчук И. В.* Теплообмен и гидродинамика в полях центральных массовых сил. Том 1. Криволинейные потоки.– Киев: НАН Украины. Институт технической теплофизики, 1996.– 284 с.
34. *Avramenko A. A., Kobzar S. G., Khalatov A. A.* Experimental and theoretical investigation of Taylor-Gortler instability in the boundary layer on a concave surface // J. Engineering Physics and Thermophysics.– 1997.– 70, N 2.– P. 278–282.
35. *Tani I.* Production of longitudinal vortices in the boundary layer along a concave wall // J. Geophys. Res.– 1962.– 67, N8.– P. 3075–3080.
36. *Tani I., Aihara Y.* Gortler vortices and boundary layer transition // ZAMP.– 1969.– 20, N5.– P. 609–618.
37. *Wortmann F. X.* Experimentelle Untersuchungen laminarer Grenzschichten bei instabiler Schichtung // Proc. 11th Int. Congr. Appl.Mech.– Munich, 1966.– P. 815–825.
38. *Bandyopadhyay P. R. and Ahmed A.* Turbulent boundary layers subjected to multiple curvatures and pressure gradients // J. Fluid Mech.– 1993.– 246.– P. 503–527.
39. *Бабенко В. В., Воскобийник А. В., Воскобийник В. А., Турик В. Н.* Вихори Гьортлера над увігнутою поверхнею вхідної частини вихрової камери // Прикладна гідромеханіка.– 2007.– 9(81), № 2–3.– С. 25–36.
40. *Бабенко В. В., Турик В. Н.* Макет вихревых структур течения в вихровой камере // Прикладная гидромеханика.– 2008.– 10(82), №3.– С. 3–19.
41. *Бабенко В. В., Воропаев Г. А., Юрченко Н. Ф.* К проблеме моделирования взаимодействия наружных покровов водных животных с пограничным слоем // Гидромеханика.– 1980.– 42.– С. 73–81.
42. *Бабенко В. В.* О взаимодействии гидробионтов с потоком // Бионика.– 1992.– 25.– С. 3–11.
43. *Бабенко В. В.* Проблема восприимчивости пограничным слоем различных возмущений // Бионика.– 1988.– 22.– С. 15–23.

44. Бабенко В. В. К взаимодействию потока с эластичной поверхностью.– В кн.: Механика турбулентных потоков: М.: Наука, 1980.– 292–301 с.
45. Blackwelder Ron F. Analogies between transitional and turbulent boundary layers // *Phys. Fluids.*– 1983.– N 26.– P. 2807–2815.
46. Blackwelder Ron F. An Experimental Model for Near-Wall Structure.– In: *Self-Sustaining Mechanism of Wall Turbulence*. Editor: R. L. Panton. Computational Mechanics Publications: Southampton, UK and Boston, USA, 1997.– 49–64 p.
47. 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 // *Инж.-физ. журнал.*– 1979.– 37, № 5.– С. 818–824.
48. Бабий В. В., Мороз В. В. О выборе профиля рулевого комплекса // *Прикладная гидромеханика.*– 2000.– 2 (74), №2.– С. 18–22.
49. Babij V. V., Moroz V. V. On Choice of the Profile of a Ship's Steering Complex // *Inter. J. of Fluid Mech. Research.*– 2002.– Vol. 29, No. 5.– P. 534–543.
50. Бабенко В. В., Бабий В. В., Мороз В. В. Профиль стернового комплекса судна // *Патент України.*– №52328А.– 2002.– С. Бюлл. №12, 16.12.2002.
51. Бабенко В. В., Abbas F. Mahmood, Гнищецкий Н. А. Взаимодействие пограничного слоя с трехмерными возмущениями // *Прикладная гидромеханика.*– 2011.– 13 (85), № 3.– С. 3–22.
52. Бабенко В. В., Abbas F. Mahmood, Ищенко С. А. Управление пограничного слоя профиля крыла при генерировании трехмерных возмущений // *Прикладная гидромеханика.*– 2012.– 14 (86), №1.– С. 3–13.
53. Бабенко В. В. Гидробионические принципы снижения сопротивления // *Прикладная гидромеханика.*– 2000.– 2 (74), №2.– С. 3–17.
54. Бабенко В. В., Морозов Д. А. Некоторые физические закономерности при нырянии дельфинов.– В кн.: *Механизм передвижения и ориентации животных.*– Киев: Наукова думка, 1968.– 49–57 с.
55. Бабенко В. В. Некоторые особенности терморегуляции наружных покровов водных животных // *Бионика.*– 1983.– 17.– С. 35–39.
56. Rakamaric M. and Korlevic J. On the possibility to simulate higher Reynolds number condition for rudder model by increasing its surface temperature // *Proc. 12 Inter. Towing Tank Conference.*– Rome, 1969.– P. 1–7.
57. Babenko V. V. Interaction of quickly swimming Hydrobionts with Flow // *Proc. of the 2-nd Intern. Symp. on Seawater drag reduction. ISSDR 2005.*– Busan, Korea, 2005.– P. 579–592.