УДК 533.6.011.5

Развитие возмущений, генерируемых электрическим разрядом, в области взаимодействия ударной волны с пограничным слоем^{*}

О.И. Вишняков, П.А. Поливанов, А.А. Сидоренко, А.Д. Будовский

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск

E-mail: vis_ol@itam.nsc.ru

Представлены результаты экспериментального исследования развития возмущений, генерируемых электрическим разрядом, в области взаимодействия пограничного слоя с падающей ударной волной при числе Маха M = 1,43. Эксперименты проведены в сверхзвуковой аэродинамической трубе при единичном числе Рейнольдса $Re_1 = 11 \cdot 10^6$ 1/м. Измерения скорости течения выполнены с использованием метода PIV и термоанемометрии. Для возбуждения искусственных возмущений применялся импульсно-периодический электрический разряд, расположенный на поверхности модели выше по потоку от области взаимодействия. Время горения разряда составляло менее 100 нс, что позволяло вводить в пограничный слой возмущения широкого спектра. При помощи фазово-синхронизированных измерений с осреднением реализаций по ансамблю получены пространственные и временные характеристики распространения введенных возмущений в зоне взаимодействия. Было показано, что основной рост вводимых возмущений происходит в сдвиговом слое за областью взаимодействия ударной волны с пограничным слоем, где течение становится турбулентным.

Ключевые слова: взаимодействие ударной волны с пограничным слоем, отрыв потока, электрический разряд.

Введение

Процесс взаимодействия ударной волны с турбулентным пограничным слоем является классической задачей газовой динамики на протяжении более чем полувека ввиду своей большой практической значимости. В результате исследований этого явления было показано, что нестационарные процессы, возникающие в области взаимодействия, оказывают определяющее влияние на формирование подобных течений [1, 2].

В настоящее время рассматривается практическая возможность повышения летных характеристик летательных аппаратов за счет обеспечения ламинарного режима обтекания несущих поверхностей. Современные суда гражданской авиации совершают свой полет

^{*} Экспериментальное исследование было выполнено в рамках государственного задания ИТПМ СО РАН. В части разработки методики введения искусственных возмущений поддержана РНФ (грант 18-19-00547). Исследование выполнено с использованием оборудования ЦКП «Механика» ИТПМ СО РАН.

[©] Вишняков О.И., Поливанов П.А., Сидоренко А.А., Будовский А.Д., 2023

в основном на трансзвуковых скоростях. При этом неизбежно возникновение в потоке локальных сверхзвуковых зон, замыкающихся ударными волнами, которые взаимодействуют с пограничным слоем. При ламинарном состоянии пограничного слоя такое взаимодействие, как правило, приводит к значительной перестройке течения в силу слабой сопротивляемости пограничного слоя положительному градиенту давления. Поэтому исследование влияния неблагоприятного градиента давления на ламинарный пограничный слой при значениях числа Маха, близких к трансзвуковым, является особенно актуальным.

С результатами исследований взаимодействия ударной волны с ламинарным, переходным и турбулентным пограничным слоем при трансзвуковых скоростях можно ознакомиться, например, в работах [3-5]. В них показано, что в большинстве случаев ламинарно-турбулентный переход происходит вблизи области взаимодействия падающей ударной волны с пограничным слоем. Вместе с тем отмечено, что в случае ламинарного набегающего пограничного слоя не наблюдается значительного негативного эффекта, обусловленного увеличением размеров отрывного пузыря. Формирование протяженной отрывной зоны не приводит к значительному увеличению потерь полного давления в пограничном слое по сравнению со случаем турбулентного набегающего пограничного слоя. Кроме того, было показано, что минимальный размер отрывного пузыря, вызванного неблагоприятным градиентом давления от падающей ударной волны, и минимальный размер толщины пограничного слоя ниже по потоку от области взаимодействия наблюдаются в случае переходного состояния набегающего пограничного слоя [3, 6]. В этих работах было сделано заключение о том, что причиной уменьшения длины отрывного пузыря является наличие турбулентных пятен в зоне перехода. В этом случае наблюдается уменьшение зоны отрыва за счет того, что частота следования турбулентных пятен не позволяет полностью восстановиться протяженному ламинарному пузырю. Результаты работ [3-5] показывают, что существенное влияние на параметры области взаимодействия оказывают нестационарные характеристики набегающего пограничного слоя.

Вопросы применения устройств управления течением, основанных на подводе энергии с помощью электрического разряда, широко исследуются в настоящее время [7]. Пример использования такого способа управления взаимодействием падающей ударной волны с ламинарным набегающим пограничным слоем, основанного на применении искрового разряда, можно найти, например, в [8]. В этой работе предполагалось, что искровой разряд, инициируемый выше по потоку области взаимодействия, способен генерировать достаточно интенсивные возмущения в виде турбулентных пятен. Турбулентные пятна, в свою очередь, способны предотвратить формирование ламинарного отрывного пузыря в области взаимодействия. Было получено, что такое воздействие способно привести к значительному уменьшению зоны отрыва, вызванной падением ударной волны. Вместе с тем было обнаружено значительное увеличение толщины пограничного слоя ниже по потоку области взаимодействия. По результатам [8] было высказано предположение, что причиной такого роста толщины пограничного слоя может являться генерация разрядом тепловых пятен, т.е. локализованных в пространстве неоднородностей поля температуры, сносимых вниз по потоку.

С целью проверки этого вывода были проведены эксперименты по использованию влияния локализованного в пространстве разряда на параметры зоны взаимодействия в случае сохранения ламинарного состояния набегающего пограничного слоя. Применение метода введения искусственных возмущений с помощью электрического разряда в сверхзвуковой ламинарный пограничный слой широко использовалось для изучения линейной и нелинейной стадий ламинарно-турбулентного перехода [9–11]. Например, в [12] исследовано влияние стохастических возмущений, генерируемых электрическим разрядом, на нестационарные характеристики пограничного слоя. Следует отметить, что в большинстве работ электрический разряд используется для исследования развития возмущений в пограничном слое без неблагоприятного градиента давления. Одним из примеров использования возмущений, генерируемых двумерным диэлектрическим барьерным разрядом, для исследования переходных процессов в зоне взаимодействия падающей волны с ламинарным пограничным слоем являются результаты работы [13]. В этой работе исследования были выполнены для двумерных возмущений ограниченного диапазона частот.

Для того чтобы расширить область частот и пространственных волновых чисел возмущений, были проведены исследования развития возмущений в области взаимодействия с их введением при помощи локализованного искрового разряда короткой длительности. Такой разряд позволяет вносить в поток возмущения в широком диапазоне частот и возбуждать собственные возмущения пограничного слоя, распространяющиеся с полным спектром углов наклона волнового фронта.

Экспериментальное оборудование

Эксперименты проведены в сверхзвуковой аэродинамической трубе Т-325 ИТПМ СО РАН при числе Маха набегающего потока M = 1,43, давлении торможения 70 кПа, температуре торможения 290 К и единичном числе Рейнольдса $\text{Re}_1 = 10,6 \cdot 10^6 \text{ l/m}$. Схема течения показана на рис. 1. В качестве экспериментальной модели использовалась прямоугольная плоская пластина с заостренной передней кромкой, установленная на пилонах под нулевым углом атаки. Над моделью располагался генератор падающей ударной волны в виде клина, отклоняющего поток на угол $\beta = 4^\circ$. Модель занимает всю ширину рабочей части — 200 мм, ширина клина составляет 160 мм. Данная конфигурация обеспечивала место падения ударной волны на поверхность модели в точке X = 132 мм от ее передней кромки. В результате взаимодействия ударной волны с пограничным



Рис. 1. Схема эксперимента.

I — камера, 2 — лазер, 3 — призма, 4 — лазерный нож, 5 — разрядник,
6 — модель-пластина, 7 — генератор ударной волны, 8 — ламинарный пограничный слой, 9 — волны сжатия, 10 — падающая ударная волна,
11 — отраженная волна, 12 — отрывная волна,

13 — турбулентное присоединенное течение.

слоем, развивающимся на поверхности модели, возникает локальный отрыв потока. Отклонение потока при обтекании отрывного пузыря ведет к возникновению волн сжатия. Процесс ламинарно-турбулентного перехода развивается в сдвиговом слое отрывного пузыря вблизи места падения ударной волны. За падающей ударной волной наблюдается отраженная ударная волна. Далее происходят присоединение потока и переход течения в турбулентное состояние с образованием веера волн разрежения на задней кромке отрывного пузыря.

Для введения искусственных контролируемых возмущений применялся искровой электрический разряд, расположенный на расстоянии X = 100 мм от передней кромки модели в плоскости симметрии. Конструкция разрядника состоит из двух медных электродов диаметром 1 мм, вмонтированных заподлицо в диэлектрический корпус. Расстояние между центрами электродов 1,5 мм. Плазменный канал образуется вблизи поверхности модели выше по потоку области взаимодействия и ориентирован перпендикулярно направлению потока. Для питания разряда использовалась электрическая схема, представленная на рис. 2. К источнику питания подключался повышающий трансформатор, к одному из выводов его высоковольтной обмотки подключался один из электродов разрядника. Второй электрод подключался к заземлению через конденсатор. Частота возбуждения искрового разряда составляла 760 Гц. При такой частоте возмущения, возбуждаемые разрядом, успевают покинуть область измерений до образования последующих. Разность потенциалов между электродами была выбрана минимальной для обеспечения электрического пробоя. Недостатком использования такого электрического разряда с крайне коротким временем жизни является невысокая точность измерения вносимой мощности. Осциллограммы тока и напряжения представлены на рис. 2. Время горения разряда составляет около 100 нс. Как отмечено выше, прямое вычисление мощности по осциллограмме затруднено. Однако можно сделать примерную оценку, учитывая измеренные амплитуды напряжения и тока, а также продолжительность импульса. По данной оценке энергия в импульсе составляет около 0,5 мДж.

Время горения разряда существенно меньше характерных времен возмущений, существующих в исследуемом ламинарном пограничном слое. Кроме того, характерный диаметр стримерного канала разряда не более 0,2 мм, что меньше локальной толщины пограничного слоя.



3 — источник питания, 4 — конденсатор.

Пространственный размер возмущений, характерных для этого пограничного слоя, например, нарастающих волн Толмина – Шлихтинга, приблизительно равен 5 – 10 толщинам пограничного слоя, т.е. 2,5 – 5 мм. Вносимые возмущения имеют гораздо меньшую протяженность по времени и пространству, поэтому их можно рассматривать как дельта-импульс. В результате можно предположить, что в пограничный слой вносятся возмущения широкого спектра.

Измерения проводились с использованием метода PIV (Partical Image Velocimetry) и термоанемометра. Система координат при измерениях связана с экспериментальной моделью следующим образом: *X* — направление набегающего потока, *Y* — нормаль к поверхности модели, *Z* — направление вдоль размаха модели. Точка начала координат находится в плоскости симметрии модели на ее передней кромке.

Применение метода PIV к исследованию взаимодействия ударной волны с пограничным слоем в T-325 подробно описано в работе [14]. В настоящем исследовании использовался PIV-комплекс «ПОЛИС», включающий в себя Nd:YAG-лазер Vilite-Hi-100, состоящий из двух источников излучения с общей апертурой, частотой импульсов до 100 Гц и длиной волны 732 нм и камеру Fastcam NovaS9 с объективом Nikkor 105 mm f/2.8D. Засев потока осуществлялся частицами DEHS размером порядка 1 мкм с помощью генератора частиц эжекторного типа через трубку, расположенную в форкамере аэродинамической трубы. Лазерный луч заводился через окно в боковой стенке рабочей части ниже по течению исследуемой области, разворачивался с помощью призмы в направлении потока и формировался в «лазерный нож» толщиной 1 мм (см. рис. 1).

Измерения проводились в плоскости XY, соответственно, лазерный нож был ориентирован по потоку. Физический размер измеряемой области составлял 49×25 мм при разрешении изображения 1024×640 пиксел. Частота сбора пар кадров составляла 90 Гц с задержкой между кадрами 2,1 мкс. Для того чтобы отследить эволюцию отдельного возмущения, система PIV была синхронизирована с электрическим разрядом. Измерения выполнялись при варьировании временной задержки t_i между моментом измерений PIV и моментом зажигания электрического разряда. В течение цикла развития возмущения были получены 16 полей скорости с интервалом 15 мкс. Для обработки данных использовалось программное обеспечение ActualFlow, реализующее итерационный кросскорреляционный алгоритм с 50 %-м смещением окна и однократным разбиением окна на каждой итерации. Финальный размер окна — 32×4 пиксел. Каждое из полей скорости было получено путем осреднения по ансамблю 1000 мгновенных полей. Таким образом, в каждом аэродинамическом эксперименте выполнялась запись 16 000 пар изображений PIV.

Для проведения термоанемометрических измерений использовался термоанемометр постоянного сопротивления ТПС 18-8, настроенный на частотный диапазон до 200 кГц. Все измерения выполнялись при одном значении перегрева $a_w = R_w/R_0 = 1,74$, где R_w — сопротивление нагретого датчика, R_0 — сопротивление холодного датчика. Диаметр и длина нити датчика составляли 10 мкм и 2 мм соответственно. Датчик термоанемометра располагался в рабочей части трубы на координатном устройстве микропозиционирования, что позволяло проводить измерения вдоль оси Z при различных значениях X.

Результаты

Для определения пространственных характеристик введенного разрядом возмущения были выполнены термоанемометрические измерения в двух сечениях X = 117



Рис. 3. Распределение по оси Z пульсаций массового расхода в зависимости от времени t при X = 117 (*a*) и 135 (*b*) мм.

и 135 мм. Первое сечение расположено в ламинарном отрывном пузыре, а второе — в турбулентном слое за точкой падения ударной волны.

На рис. 3 приведено распределение пульсационной составляющей массового расхода m по поперечной координате Z в зависимости от времени t. Данные получены датчиком термоанемометра на постоянной высоте Y = 0,6 мм. Для переднего сечения X == 117 мм эта высота соответствует максимуму пульсаций в ламинарном сдвиговом слое. Сечение X = 135 мм находится в области турбулентного пограничного слоя. Непосредственно за местом падения ударной волны распределение пульсаций по Z имеет равномерный характер. Временная шкала начинается с 80 мкс, поскольку до этого момента в сигнале присутствует шум, вызванный разрядом.

Видно, что в первом сечении моменту прихода возмущения от разряда (150 мкс) соответствует резкий рост массового расхода. Это не может соответствовать тепловому пятну, которое должно детектироваться термоанемометром как уменьшение массового расхода.

В первом сечении видно, что возмущение, введенное разрядом, локализовано в области $Z = \pm 3$ мм, а форма возмущения близка к двумерной. Сначала наблюдается фаза нарастания, а через 400-500 мкс — фаза спада уровня массового расхода.

В сечении X = 135 мм распределение пульсаций вдоль оси Z также равномерно. Размер возмущения по Z существенно не изменился. Оценка фазовой скорости возмущения по максимумам массового расхода в двух сечениях составляет 170 м/с. Это согласуется со значением, которое далее будет получено по изменению толщины вытеснения, измеренной методом PIV.

На рис. 4 представлено осредненное поле скорости, полученное методом PIV путем осреднения по всей реализации (16 000 мгновенных полей скорости). Данные позволяют



четко увидеть структуру течения: падающую ударную волну; отрывную зону, распространяющуюся вверх по потоку от точки падения ударной волны; волны сжатия над отрывной зоной; отраженную ударную волну; волны разрежения на заднем фронте отрывной области; турбулентный пограничный слой ниже по потоку от отрывного пузыря. В дальнейшем поля скорости,

Рис. 4. Поле скорости в зоне взаимодействия.

полученные при разных значениях временной задержки, сравниваются с осредненным по времени полем скорости.

На рис. 5 представлены поля дефекта скорости $(v_{avr} - v(t))$, полученные путем вычитания из осредненного поля скорости, представленного на рис. 4, полей скорости при различных временных задержках t_i . При таком представлении данных области отрицательного дефекта скорости соответствуют разгону течения, а положительные — зоне торможения.

Начальная задержка между измерением поля скорости PIV и моментом зажигания разряда составляла $t_i = 80$ мкс. В данный момент времени возмущение уже достигло отрывной зоны, что приводит к ее уменьшению, что видно на рисунке как разгон потока в пристенной области 127 мм < X < 150 мм. Наиболее вероятной причиной подавления отрыва является то, что введенные возмущения приводят к более ранней турбулизации течения. Следующее поле разности скоростей соответствует задержке 110 мкс. В этот момент времени в отрывной зоне наблюдается область замедления потока, а над ней — небольшая область с возросшей скоростью. Далее при t = 140 мкс область заторможенного потока возрастает и смещается вниз по течению. Выше по течению перед



 $t_i = 80$ (a), 110 (b), 140 (c), 170 (d), 200 (e), 230 (f), 260 (g), 290 (h) мкс.

ударной волной в отрывной зоне возникает область ускорения. Изменения в области отрыва потока приводят к искажению ударных волн.

На полях, соответствующих $t_i = 170$ и 200 мкс, область заторможенного потока смещается вниз по течению, покидая отрывную зону, и существенно усиливается. В момент времени $t_i = 200$ мкс наблюдается максимальная по амплитуде и занимаемому пространству область торможения потока вблизи стенки при X = 150 мм, над ней расположена небольшая область слабого разгона. В тот же момент выше по течению наблюдается подавление отрыва, что следует из возрастания скорости в зоне 125 мм < X < 140 мм. Полученный результат можно объяснить дальнейшим развитием искусственных возмущений в области за ударной волной, что сопровождается ростом толщины турбулентного пограничного слоя.

При временной задержке 230 мкс область заторможенного потока практически покинула зону измерений, а область ускорения потока, следующая за областью торможения, соответственно, вышла из зоны отрыва. В дальнейшем при временных задержках 260 и 290 мкс наблюдается постепенное восстановление картины течения. Однако в рассматриваемый временной промежуток течение не успевает полностью восстановиться.

Полученных в настоящей работе данных недостаточно для однозначного ответа на вопрос о природе наблюдаемых искусственных возмущений. Поскольку в продольном направлении течение испытывает значительные изменения, переходя от ламинарного пограничного слоя к сдвиговому течению над отрывным пузырем и далее к турбулентному следу за ним, возмущение имеет более сложную природу, чем, например, собственные моды неустойчивости пограничного слоя. Можно предположить, что возмущения, порожденные зажиганием разряда, приводят к образованию турбулентной структуры в слое сдвига. Эта структура, в свою очередь, изменяет конфигурацию отрывной области и приводит к утолщению пограничного слоя в следе.

Поэтому распространение областей дефекта скорости через зону взаимодействия можно рассматривать как развитие некоторого возмущения в пограничном слое. При прохождении через зону взаимодействия оно претерпевает эволюцию. Можно выделить две ее характерные фазы, соответствующие ламинарному отрывному пузырю и турбулентному следу. При этом воздействие возмущения приводит к подавлению ламинарного пузыря. При достижении зоны следа возмущение резко усиливается и, как следствие, наблюдается рост толщины вытеснения.

Изменение интегральных характеристик течения за цикл работы разряда представлено на рис. 6. На рис. 6*а* показана эволюция во времени продольного распределения дефекта толщины вытеснения $\Delta \delta^*$. Маркерами на рисунке отмечены положения максимума толщины вытеснения для каждой временной задержки. С помощью этой информации можно рассчитать скорость продольного перемещения для возмущения. Используя линейную аппроксимацию, можно получить скорость распространения возмущений, равную примерно 220 м/с.

На рис. 6b показаны продольные распределения двух величин. Символами показаны амплитуды дефекта толщины вытеснения $\Delta \delta^*$, нормированные на максимальное значение. Здесь толщина вытеснения δ^* определяется без учета сжимаемости по данным PIV. Каждая точка соответствует положению максимального изменения толщины вытеснения при определенной временной задержке. Сплошной линией показано продольное распределение интеграла среднеквадратичных пульсаций скорости поперек пограничного слоя $\int v_{\rm rms} dy$, полученное по всей реализации PIV-данных — 16 000 полям скорости. Таким образом, эта величина характеризует пространственный рост естественных возмущений.



Рис. 6. Продольные распределения интегральных характеристик течения: a — зависимость амплитуды дефекта толщины вытеснения $\Delta \delta^*$ от времени; b — интеграл среднеквадратичных пульсаций скорости (линия l) и $\Delta \delta^*$ (символы 2).

Наибольший дефект толщины вытеснения пограничного слоя наблюдается за точкой падения ударной волны в турбулентном пограничном слое. Максимум этой величины расположен в точке X = 152 мм, затем толщина вытеснения резко уменьшается. Максимум в распределении интеграла пульсаций скорости наблюдается в точке падения ударной волны (X = 134 мм), что приблизительно соответствует положению ламинарнотурбулентного перехода. Ниже по потоку эта величина изменяется незначительно.

Поскольку полученное значение скорости распространения возмущения значительно отличается от скорости набегающего потока (410 м/с), можно утверждать, что наблюдаемый процесс не является распространением теплового пятна, как предполагалось в работе [8]. Таким образом, несмотря на то, что основной эффект воздействия электрического разряда заключается в формировании локальной области нагрева, наблюдаемые изменения течения связаны с откликом зоны взаимодействия на возмущения в пограничном слое.

Выводы

Проведено исследование воздействия искрового электрического разряда на область взаимодействия ударной волны с ламинарным пограничным слоем. Выполнены измерения при помощи термоанемометра и метода PIV.

Получено, что развитие возмущений, созданных разрядом, приводит к подавлению ламинарного отрыва, но в то же время вызывает рост толщины пограничного слоя в области турбулентного течения за ударной волной.

Показано, что скорость распространения возмущений значительно отличается от скорости набегающего потока. Из этих наблюдений следует, что отклик зоны взаимодействия на приходящее возмущение не является результатом пролета теплового пятна, а наиболее вероятным механизмом воздействия разряда является введение широкополосных возмущений в пограничный слой.

Отмечено существенное различие в поведении естественных возмущений и возмущений, введенных разрядом, в области турбулентного следа. Естественные возмущения достигают максимума в области ламинарно-турбулентного перехода, после чего медленно затухают, в то время как созданные разрядом возмущения продолжают интенсивно расти в зоне турбулентного следа. Использованный в работе искровой разряд можно применять для исследования процессов ламинарно-турбулентного перехода и эволюции крупномасштабных структур в турбулентном пограничном слое.

Список литературы

- 1. Doerffer P., Hirsch C., Dussauge A., Babinsky H. et al. Unsteady effects of shock wave induced separation. N.Y.: Springer Science & Business Media, 2010. Vol. 114. 348 p.
- Поливанов П.А., Сидоренко А.А., Маслов А.А. Корреляционные исследования пульсаций при взаимодействии ударной волны с турбулентным пограничным слоем // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36, № 3. С. 23–30.
- 3. Поливанов П.А., Сидоренко А.А., Маслов А.А. Влияние ламинарно-турбулентного перехода на взаимодействие ударной волны с пограничным слоем при малом сверхзвуковом числе Маха // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41, № 19. С. 29–37.
- 4. Dussauge J.P., Bur R., Davidson T., Babinsky H., Bernardini M., Pirozzoli S., Dupont P. et al. Wp-1 reference cases of laminar and turbulent interactions // Transition Location Effect on Shock Wave Boundary Layer Interaction: Experimental and Numerical Findings from the TFAST Project. 2021. Vol. 144. P. 25–127.
- 5. Babinsky H., Dupont P., Polivanov P., Sidorenko A., Bur R., Giepman R., Schrijer F., van Oudheusden B., Sansica A. et al. Wp-2 basic investigation of transition effect // Transition Location Effect on Shock Wave Boundary Layer Interaction: Experimental and Numerical Findings from the TFAST Project. 2021. Vol. 144. P. 129–225.
- 6. Polivanov P.A., Sidorenko A.A., Maslov A.A. Transition effect on shock wave/boundary layer interaction at M = 1,47 // 53rd AIAA Aerospace Sci. Meeting. 2015 (Kissimmee, Florida, USA, 5–9 Jan. 2015): Conf. Papers. S.I., 2015. Vol. 18. P. 15299–15309.
- 7. Сидоренко А.А., Будовский А.Д., Поливанов П.А., Вишняков О.И., Судаков В.Г., Ищенко В.Н. Подавление трансзвукового бафтинга с помощью плазменных вихрегенераторов // Теплофизика и аэромеханика. 2019. Т. 26, № 4. С. 503–519.
- 8. Поливанов П.А., Сидоренко А.А. Подавление ламинарной отрывной зоны искровым разрядом при числе Маха M = 1,43 // Письма в ЖТФ. 2018. Т. 44, № 18. С. 60–68.
- 9. Гапонов С.А., Маслов А.А. Развитие возмущений в сжимаемых потоках. Новосибирск: Наука, 1980. 134 с.
- 10. Яцких А.А., Ермолаев Ю.Г., Косинов А.Д., Семенов Н.В. Эволюция волновых пакетов в сверхзвуковом пограничном слое плоской пластины // Теплофизика и аэромеханика. 2015. Т. 22, № 1. С. 17–28.
- Kolosov G.L., Kosinov A.D., Semenov A.N., Yatskikh A.A. Experimental and numerical investigation of controlled disturbances development from two sources in supersonic boundary layer // Adv. Aerodynamics. 2019. Vol. 1, No. 1. P. 1–13.
- 12. Moralev I., Selivonin I., Ustinov M. On the stochastic forcing of the boundary layer by plasma actuators // Exp. Fluids. 2019. Vol. 60. P. 1–9.
- **13. Vishnyakov O.I., Polivanov P.A.** Evolution of artificial disturbances in separation area of laminar boundary layer for M = 1,43 // AIP Conf. Proc. XX Int. Conf. on the Methods of Aerophys. Res. (ICMAR–2020) (Novosibirsk, 1–7 Nov. 2020). S.I.: AIP Publ. LLC, 2021. Vol. 2351, No. 1. P. 030019-1–030019-7.
- 14. Вишняков О.И., Поливанов П.А., Сидоренко А.А. К проблеме использования PIV-метода для измерений в тонких высокоскоростных сдвиговых слоях // Прикл. механика и техн. физика. 2020. Т. 61, № 5. С. 77–87.

Статья поступила в редакцию 16 февраля 2023 г., после доработки — 11 апреля 2023 г., принята к публикации 16 июня 2023 г.