Научная статья

УДК 532.526.4 + 533.15 + 533.696.5 + 532.522.2 DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-1-80-88

К вопросу о визуализации течения в области вдува воздуха через перфорированный участок поверхности тела вращения

Владимир Иванович Корнилов¹, Андрей Александрович Пивоваров² Анатолий Николаевич Попков³

¹⁻³Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН

Новосибирск, Россия ¹kornilov@itam.nsc.ru

²pivovarov@itam.nsc.ru ³popkov@itam.nsc.ru

Аннотация

Представлены результаты визуализации пристенного турбулентного течения при вдуве воздуха варьируемой интенсивности через перфорированный участок поверхности на осесимметричном теле удлинением 25,3 в условиях его обтекания несжимаемым потоком. Показано, что использование метода лазерного ножа с засевом потока светорассеивающими частицами размером 1–2 мкм, сформированными из смеси на основе воды, в состав которой входит полигликоль, позволяет визуализировать структурные элементы пристенной области течения, технически трудно выявляемые традиционными методами измерений.

Ключевые слова

тело вращения, вдув воздуха, визуализация потока, лазерный нож

Источник финансирования

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (Проект № 22-29-00003). Эксперименты выполнены с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Механика» ИТПМ СО РАН.

Для цитирования

Корнилов В. И., Пивоваров А. А., Попков А. Н. К вопросу о визуализации течения в области вдува воздуха через перфорированный участок поверхности тела вращения // Сибирский физический журнал. 2024. Т. 19, № 1. С. 80–88. DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-1-80-88

© Корнилов В. И., Пивоваров А. А., Попков А. Н., 2024

Towards Flow Visualization in the Region of Air Blowing through the Perforated Section of a Body of Revolution

Vladimir I. Kornilov¹, Andrey A. Pivovarov² Anatoly N. Popkov³

¹⁻³Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS Novosibirsk, Russian Federation

> ¹kornilov@itam.nsc.ru ²pivovarov@itam.nsc.ru ³popkov@itam.nsc.ru

Abstract

The results of visualization of a near-wall turbulent flow with air blowing of various intensity through a perforated surface area on an axisymmetric body with an aspect ratio of 25.3 under conditions of an incompressible flow around are presented. It is shown that the use of the laser knife method with seeding the flow with light-scattering particles 1-2 µm in size, formed from a water-based mixture that includes polyglycol, makes it possible to visualize the structural elements of the near-wall flow region, which are technically difficult to detect by traditional measurement methods.

Keywords

body of revolution, air blowing, flow visualization, laser knife

Funding

The research was supported by the Russian Science Foundation (Project No. 22-29-00003). The study was conducted at the Equipment Sharing Center «Mechanics» of ITAM SB RAS.

For citation

Towards Flow Visualization in the Region of Air Blowing Through the Perforated Section of a Body of Revolution. *Siberian Journal of Physics*, 2024, vol. 19, no. 1, pp. 80–88 (in Russ.). DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-1-80-88

Введение

Инжекция (вдув) газа через проницаемую поверхность обтекаемого тела является одним из привлекательных методов управления турбулентным пограничным слоем (ПС), использующихся в настоящее время в аэродинамике дозвуковых течений [1-10]. С появлением новых технологий создания современных проницаемых, прежде всего мелкоперфорированных, материалов возможности управляемого вдува существенно возросли. Однако, несмотря на имеющиеся в настоящее время впечатляющие экспериментальные и расчетные данные, структура пристенного течения в области вдува остается не вполне ясной, и, за исключением относительно простых случаев, точные ее предсказания по-прежнему затруднительны. Особенно остро этот вопрос стоит при обтекании тела вращения большого удлинения, где возникает ряд особенностей, затрудняющих эффективное применение данного метода управления [11]. В этом случае существенным подспорьем могли бы стать подходящие для этой цели методы визуализации такого течения. Однако выбор эффективных методов, обзор которых представлен в [12], применительно к пристенной области течения весьма ограничен. Например, известный метод визуализации предельных линий тока, основанный на использовании смеси, в простейшем случае состоящей из основы (трансформаторное или иное масло) и пигмента (газовая сажа, диоксид титана и др.), не годится в принципе из-за опасности загрязнения микроотверстий. По этой же причине вызывает сомнение использование жидкокристаллической термографии или сублимирующих и бароиндикаторных покрытий.

Авторам известна единственная работа [13], посвященная визуализации течения в области вдува, в которой для регистрации изображения в рассеянном на микрочастицах свете, использовался плоский световой нож. Эксперименты выполнены на плоской пластине, расположенной в канале, рабочей жидкостью которого является машинное масло или глицерино-водная смесь и, как видно, характеризуются весьма специфическими условиями, существенно отличающимися от настоящих. С учетом отмеченного более предпочтительным в данной ситуации представляется использование метода дымовых струй. Проблема состоит в том, что в «чистой» аэродинамической трубе (АТ) Т-324 ИТПМ СО РАН любая визуализация, требующая засева потока микрочастицами, особенно табачным дымом, по существу исключена. Заметим, однако, что понятие «дым» является более широким, поскольку в качестве трассеров, которые делают картину течения видимой, используют не только частицы, образующиеся в процессе горения, но и водяной пар, туман, различные аэрозоли и другие видимые частицы. В настоящей работе сделана попытка реализации такого подхода. Данные [14], полученные в пристенной области течения с использованием цифровой трассерной визуализации, показывают, что в принципе это возможно.

1. Методика эксперимента и численного расчета

Опыты проводились в дозвуковой АТ Т-324 ИТПМ СО РАН с размерами рабочей части $1 \times 1 \times 4$ м при двух режимных скоростях потока $U_{\infty} = 6,5$ и 15 м/с, что соответствовало значению числа Рейнольдса Re_I, вычисленному по длине модели L, равному, соответственно, 1,65 · 10⁶ и 3,81 · 10⁶. В качестве объекта исследования использовалась модель удлиненного осесимметричного тела (УОТ) (рис. 1) длиной L = 2530,9 мм, установленная в рабочей части АТ на пилоне с помощью хвостовой державки. Модель состоит из головной части, представляющей собой эллипсоид вращения с большой полуосью 300 мм, цилиндрического участка диаметром 100 мм, длиной 1976,9 мм, и хвостовой части, контур которой описывается соотношением $r/r_{\text{цил}} = [1 - (x_{xB}/l_{xB})^2]^{0,9}$, где l_{xB} – длина хвостовой части, x_{xB} – продольная координата, отсчитываемая от сечения сопряжения хвостовой и цилиндрической частей УОТ. Вдоль одной из образующих УОТ расположено 17 приемников давления диаметром 0,4 мм. Чтобы обеспечить развитое турбулентное течение на большей части модели, ПС был искусственно турбулизован путем установки кольца из прутка диаметром 0,8 мм и самоклеящейся противоскользящей ленты средней зернистости высотой h = 0,6 мм и длиной 25 мм, установленных в месте сопряжения головной части и цилиндрического участка. Для организации распределенного вдува воздуха смонтирована заделанная заподлицо с основной поверхностью УОТ цилиндрическая перфорированная секция длиной 120 мм ($\Delta l/L = 0.0474$), передняя граница которой располагалась на расстоянии 904,4 мм (x/L = 0.357) от носка УОТ. Использовался перфорированный материал со средним диаметром расположенных в шахматном порядке отверстий, равным 0,165 мм, а соотношение между длиной микроканалов и диаметром отверстий t/d = 2,5.

Чтобы выявить особенности формирования структуры течения в ПС УОТ при наличии распределенного вдува через перфорированный участок поверхности, применялась методика визуализации течения методом лазерного ножа. Схема визуализации (рис. 2) включает непрерывный твердотельный лазер с диодной накачкой длиной волны излучения 532 нм и мощностью 200 мВт, закрепленный на подвеске с возможностью регулировки на потолке рабочей части трубы, цифровую камеру DO3THINK GX2500 с высоким пространственным разрешением (5120 × 5120 пикселей), установленную перед смотровым окном АТ, и генератор Martin Magnum 550 с дополнительным контейнером для засева потока светорассеивающими микрочастицами размером 1–2 мкм, расположенный на противоположной стороне АТ. Рабочей жидкостью генератора является смесь на основе воды, в состав которой входит полигликоль. Инжекция светорассеивающих частиц в рабочую область осуществлялась с помощью телескопической подводящей трубки, конечный участок которой крепился на миниатюрной вертикальной стойке, установленной на потолке рабочей части АТ. Положение выходного сечения трубки могло в широких пределах регулироваться в плоскости лазерного ножа как по высоте исследуемой области, так и по длине УОТ.



Рис. 1. Модель тела вращения и схема ее размещения в рабочей части АТ (не в масштабе): 1 – тело вращения; 2 – секция вдува воздуха; 3 – приемники давления; 4 – турбулизатор ПС; 5 – дополнительная стойка,; 6 – пилон; 7 – магистраль подвода воздуха; 8 – термопара; 9 – трубка Пито-статики; 10 – смотровое окно. Размеры – в миллиметрах

Fig. 1. Model of the body of revolution and scheme its arrangement in wind tunnel-test section (not to scale): 1 - body of revolution; 2 - air injection section; 3 - pressure taps; 4 - boundary-layer tripping device; 5 - strut; 6 - pylon; 7 - air supply pipeline; 8 - thermocouple; 9 - Pitot-static tube; 10 - observation window. Sizes are in millimeters



Рис. 2. Схема визуализации ПС на теле вращения в условиях вдува воздуха через перфорированную поверхность: 1 – тело вращения; 2 – магистраль подвода воздуха; 3 – пилон; 4 – компьютер; 5 – цифровая камера DO3THINK GX2500; 6 – дополнительная стойка; 7 – секция вдува воздуха; 8 – трубка Пито-статики; 9 – термопара; 10 – генератор микрочастиц Martin Magnum 550; 11 – контейнер; 12 – трубка подвода микрочастиц в исследуемую область; 13 – лазер с системой линз

Fig. 2. Scheme of boundary-layer visualization on the body of revolution under condition of air blowing through perforated surface: 1 - body of revolution; 2 - air supply pipeline; 3 - pylon; 4 - computer; 5 - digital camera DO3THINK GX2500; 6 - strut; 7 - air injection section; 8 - Pitot-static tube; 9 - thermocouple; 10 - microparticle generator Martin Magnum 550; 11 - container; 12 - tube for supplying microparticles into the studied area; 13 - laser with lens system

Возможно, более приемлемым способом подвода микрочастиц было бы использование для этой цели магистрали подвода воздуха УОТ. Однако наличие мелкоячеистой подложки,

ISSN 2541-9447 Сибирский физический журнал. 2024. Том 19, № 1 Siberian Journal of Physics, 2024, vol. 19, no. 1 расположенной непосредственно под перфорированной поверхностью со стороны камеры давления, не позволило получить на выходе необходимую концентрацию частиц.

Эксперименты показали, что засев потока светорассеивающими частицами указанных размеров, сформированными из смеси на основе воды, в состав которой входит полигликоль, практически не загрязняет поток.

Численное решение задачи осуществлялось в рамках осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье – Стокса (RANS) в предположении стационарного, несжимаемого турбулентного потока воздуха. Для замыкания системы уравнений использовалась k- ω -модель турбулентности. С целью разрешения вязкого подслоя применялась версия низкорейнольдсовой модели турбулентности (Low-Re Stress-Omega). Как известно, в этом случае важно, чтобы для безразмерного расстояния от центра первой пристеночной ячейки до стенки было выполнено условие $y_1^+ \le 1$ [15]. Данное требование, безусловно, соблюдалось.

Расчетная область имела С-топологию и ее основные размеры определялись поперечным размером рабочей части АТ, равным 5D, и продольным размером, равным 29D (в осевом направлении), где D – диаметр цилиндрической части УОТ. Внутри этой области строилась четырехугольная сетка, сгущение которой по мере приближения к поверхности УОТ выбиралось исходя из обеспечения указанного выше условия высоты пристенных ячеек. Следуя принятой в ANSYS Fluent формализации, на входной границе задавался однородный профиль скорости, соответственно, для продольной $V_x = U_{\infty}$ и нормальной $V_y = 0$ компонент. Значение характеристик турбулентности, соответствующее отношению турбулентной и молекулярной вязкости v_t/v , принято равным единице, а интенсивность турбулентности – Tu = 0,05 %. На стенке (нижняя граница) задавалось условие прилипания, а на свободной верхней границе – условие симметрии. На выходной границе задавался постоянный уровень относительного давления P = 0.

Допустимые максимальные остаточные значения невязок для всех моделируемых переменных выбирались равными $\varepsilon = 10^{-8}$. Общее количество узлов в окрестности перфорированного участка – порядка 50 000.

2. Результаты

Хотя метод лазерного ножа считается одним из наиболее информативных методов визуализации течения, ясно, что этапу непосредственных измерений должна предшествовать тщательная настройка оптической системы. Это особенно важно для дозвуковых течений, которые, как правило, характеризуются невысокими значениями градиентов плотности потока. При качественной настройке и строгой ориентации плоскости лазерного ножа вдоль оси симметрии УОТ удается наблюдать отчетливые структурные особенности потока, такие как форма течения (ламинарное или турбулентное), характерные неоднородности потока, формирование вихрей и их масштаб, отрыв потока и др. Подтверждением этому является рис. 3, на котором показана



Рис. 3. Визуализация вихревого движения, формирующегося при периодическом воздействии воздуха через кольцевую щель в стенке УОТ: 1 – синтетическая струя; 2 – ядро вихря

Fig. 3. Visualization of the vortex motion formed at the periodic air forcing through an annular slot in the wall of the body of revolution: 1 - synthetic jet; 2 - vortex core

ISSN 2541-9447 Сибирский физический журнал. 2024. Том 19, № 1 Siberian Journal of Physics, 2024, vol. 19, no. 1



 Рис. 4. Типичная визуализация пристенной области течения при наличии вдува через перфорированную поверхность
Fig. 4. Typical visualization of the near-wall flow region at the presence of air blowing through perforated surface

фотография визуализации вихревого движения, инициированного периодическим воздействием (синтетическая струя) через наклонную кольцевую щель в стенке УОТ и формирующегося в результате взаимодействия струи с набегающим турбулентным сдвиговым потоком. Можно отчетливо видеть не только ядро вихря, но и спиральную часть вихря с направлением вращения по часовой стрелке. Механизм возникновения вихря состоит в следующем. На фазе вдува набегающий сдвиговый поток временно блокируется струйным движением, направленным от стенки. Это приводит к резкому уменьшению давления вниз по течению от щели. Последующая затем противоположная фаза (струйное движение к стенке) способствует обрушению потока с формированием области рециркуляции с указанным выше направления вращения.

Тщательная настройка оптической системы с акцентом на пристенную область течения УОТ позволяет визуализировать тонкий промежуточный слой между поверхностью модели и основным потоком, который выглядит в виде темной полосы. Пример визуализации такого слоя, толщина которого, например, посередине перфорированного участка, составляет доли миллиметра, приведен на рис. 4. Отметим, кстати, что типичные значения толщины подслоя технически сложно измерить традиционными методами зондирования потока.

Сравнение полученных результатов с данными численного расчета дает основание полагать, что указанный слой можно идентифицировать как вязкий подслой турбулентного ПС, оказывающий решающее влияние на развитие течения и особенно на величину сопротивления. Действительно, на рис. 5 представлена зависимость $\delta_L = f(Q)$, отражающая характер изменения толщины вязкого подслоя δ_L при увеличении расхода Q через перфорированную поверхность. Здесь приведены данные разных серий экспериментов, проведенных с интервалом около года.



Рис. 5. Зависимость толщины вязкого подслоя от объемного расхода воздуха через перфорированную поверхность. Темные символы – $U_{\infty} = 6,5$ м/с (эксперименты разных серий), красные символы – $U_{\infty} = 15$ м/с; крестик – численный расчет; кривые – аппроксимация экспериментальных данных *Fig. 5.* Dependence of the thickness of viscous sublayer on the volumetric air flow rate through perforated surface. Black: $U_{\infty} = 6.5$ m/s (experiments of different series), red: $U_{\infty} = 15$ m/s; cross: numerical calculation; curves: approximation of experimental data

Как видно, величина δ_L непрерывно возрастает при увеличении расхода воздуха, что не противоречит динамике изменения этой величины, полученной прямыми измерениями на плоской пластине [5]. Кроме того, поскольку данные измерений разных серий экспериментов укладываются в доверительный интервал ±0,025 мм, определяемый разрешением цифровой камеры (вертикальные линии), можно с уверенностью утверждать, что δ_L уменьшается с увеличением скорости потока U_{∞} , что согласуется с характером изменения этой величины в классическом случае. Отметим также тот важный факт, что результаты эксперимента находятся в качественном согласии с данными численного расчета. Правда, имеет место отклонение расчетной локальной скорости в подслое от линейного характера зависимости U = f(y), которое составляет порядка 2–3 % от скорости потока. Поэтому толщина вязкого подслоя δ_L в этом случае определялась из условия $U/U_{лин} = 0,98$, где $U_{лин}$ – скорость потока, полученная на основе линейной аппроксимации расчетного профиля скорости.

Заключение

Метод лазерного ножа с засевом потока светорассеивающими частицами размером 1–2 мкм, сформированными из смеси на основе воды, позволяет визуализировать тонкую пристенную область течения, идентифицируемую как вязкий подслой, формирующийся при осесимметричном обтекании тела вращения несжимаемым потоком. Полученные данные показывают, что толщина подслоя возрастает при увеличении расхода вдуваемого воздуха через перфорированный участок поверхности, что не противоречит динамике изменения этой величины при моделировании эффекта вдува на плоской стенке. Результаты эксперимента находятся в качественном согласии с данными численного расчета. Засев потока указанными светорассеивающими частицами не загрязняет поток, что очень важно для аэродинамических труб, основным измерительным инструментом в которых является термоанемометр.

Список литературы

- 1. **Hwang D.** Review of research into the concept of the microblowing technique for turbulent skin friction reduction // Progress in Aerospace Sci. 2004. Vol. 40. P. 559–575.
- 2. Li J., Lee C.-H., Jia L., Li X. Numerical study on the flow control by micro-blowing // Proc. of the 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting, Orlando, Fl. (USA) 2009. AIAA No. 2009-779.
- Kornilov V. I., Boiko A. V. Flat-plate drag reduction with streamwise noncontinuous microblowing // AIAA J. 2014. Vol. 52. P. 93–103.
- 4. Базовкин А. В., Ковеня В. М., Корнилов В. И., Лебедев А. С., Попков А. Н. Влияние микровдува газа с поверхности пластины на ее сопротивление // ПМТФ. 2012. Т. 53, № 4. С. 26–37.
- 5. Kornilov V. I. Current state and prospects of researches on the control of turbulent boundary layer by air blowing // Progress in Aerospace Sci. 2015. Vol. 76. P. 1–23.
- 6. Шквар Е. А., Джамеа А., Е. Ш.-Ю., Цай Ц.-Ч, Крыжановский А. С. Улучшение аэродинамики высокоскоростных поездов посредством микровдува // Теплофизика и аэромеханика. 2018. Т. 25, № 5. С. 701–714.
- Atzori M., Vinuesa R., Schlatter P., Gatti D., Stroh A., Frohnapfel B. Effects of uniform blowing and suction on turbulent wing boundary layers // Proc. of the Eur. Drag Reduction and Flow Control Meeting (EDRFCM), March 26–29, 2019, Bad Herrenalb, Germany. 2019. P. 93–126.
- Eto K., Kondo Y., Fukagata K., Tokugawa N. Assessment of friction drag reduction on a Clark-Y airfoil by uniform blowing // AIAA J. 2019. Vol. 57. P. 2774–2782.
- 9. Хабошан Х. Н., Юсефи Э., Своркан Е. Анализ турбулентного пограничного слоя и возможности уменьшения поверхностного сопротивления на плоской пластине с использованием микрообдува // ПМТФ. 2022. Т. 63, № 3. С. 62–74.

- 10. Корнилов В. И., Меньщикова И. В., Пивоваров А. А. Численное моделирование процесса взаимодействия массива микроструй с турбулентным сдвиговым потоком // Теплофизика и аэромеханика. 2023. Т. 30, № 4. С. 651–667.
- 11. Корнилов В. И., Попков А. Н. Состояние и перспективы исследований по управлению турбулентным пограничным слоем с помощью вдува воздуха на теле вращения (обзор) // Прикладная механика и техническая физика. 2023. OnlineFirst на eLIBRARY ID: 54386974 https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54386974. DOI: 10.15372/PMTF202315344
- 12. Merzkirch W. Flow Visualization: Orlando e.a.: Acad. Press Inc., Second Edition, 1987. 260 p.
- 13. Liu S., Li H., Braun M. J. Experimental study on skin friction reduction with micro-blowing // Proc. of HT-FED04 2004 ASME Heat Transfer/Fluids Engineering Summer Conference, July 11–15, 2004, Charlotte, North Carolina, USA. P. 1–5.
- 14. **Бильский А. В., Гобызов О. А., Корнилов В. И., Маркович Д. М.** Исследование влияния вдува воздуха в турбулентный пограничный слой методом цифровой трассерной визуализации // Вестник НГУ. Серия: Физика. 2013. Т. 8, вып. 2. С. 79–85.
- 15. Menter F. R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications // AIAA J. 1994. Vol. 32, no. 8. P. 1598–1605.

References

- 1. **Hwang D.** Review of research into the concept of the microblowing technique for turbulent skin friction reduction. *Progress in Aerospace Sci*, 2004, vol. 40, pp. 559–575.
- 2. Li J., Lee C.-H., Jia L., Li X. Numerical study on the flow control by micro-blowing. *Proc. of the 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting, Orlando, Fl. (USA) 2009.* AIAA No. 2009-779.
- 3. Kornilov V. I., Boiko A. V. Flat-plate drag reduction with streamwise noncontinuous microblowing. AIAA J, 2014, vol. 52, pp. 93–103.
- 4. Bazovkin A. V., Kovenya V. M., Kornilov V I., Lebedev A. S., Popkov A. N. Effect of microblowing of a gas from the surface of a flat plate on its drag. *J. Appl. Mech. Tech. Phys*, 2012, vol. 53, no. 4, pp. 490–499. (in Russ.)
- 5. Kornilov V. I. Current state and prospects of researches on the control of turbulent boundary layer by air blowing. *Progress in Aerospace Sci*, 2015, vol. 76, pp. 1–23.
- Shkvar E. O., Jamea A., E S.-J., Cai J.-C., Kryzhanovskyi A. S. Effectiveness of blowing for improving the high-speed trains aerodynamics. *Thermophys Aeromechanics*, 2018, vol. 25, no. 5. pp. 675–686. (in Russ.)
- Atzori M., Vinuesa R., Schlatter P., Gatti D., Stroh A., Frohnapfel B. Effects of uniform blowing and suction on turbulent wing boundary layers. *Proc. of the Eur. Drag Reduction and Flow Control Meeting (EDRFCM), March 26–29, 2019, Bad Herrenalb, Germany*, 2019, pp. 93– 126.
- 8. Eto K., Kondo Y., Fukagata K., Tokugawa N. Assessment of friction drag reduction on a Clark-Y airfoil by uniform blowing. *AIAA J*, 2019, vol. 57, pp. 2774–2782.
- 9. Khaboshan H. N., Yousefi E., Svorcan J. Analysis of the Turbulent Boundary Layer and Skin-Friction Drag Reduction of a Flat Plate by using the Micro-Blowing Technique. J. *Appl. Mech. Tech. Phys*, 2022, vol. 63, no. 3, pp. 62–74. (in Russ.)
- Kornilov V. I., Menshchikova I. V., Pivovarov A. A. Numerical simulation of interaction of a microjet array with a turbulent shear flow. *Thermophys Aeromechanics*, 2023, vol. 30, no. 4, pp. 615–631. (in Russ.)
- Kornilov V. I., Popkov A. N. Current state and prospects of researches on the control of turbulent boundary layer by air blowing on a body of revolution (review). J. Appl. Mech. Tech. Phys, 2023. OnlineFirst на eLIBRARY ID: 54386974 https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54386974. DOI: 10.15372/PMTF202315344 (in Russ.)
- 12. Merzkirch W. Flow Visualization. Orlando e.a.: Acad. Press Inc., Second Edition, 1987. 260 p.

- Liu S., Li H., Braun M. J. Experimental study on skin friction reduction with micro-blowing. Proc. of HT-FED04 2004 ASME Heat Transfer/Fluids Engineering Summer Conference, July 11–15, 2004, Charlotte, North Carolina, USA, 2004, pp. 1–5.
- Bilsky A. V., Gobyzov O. A., Kornilov V. I., Markovich D. M. Effect of air blowing into turbulent boundary layer with particle tracking velocimetry method. *Vestnik NSU. Series: Physics*, 2013, vol. 8, no. 2, pp. 79–85. (in Russ.)
- 15. Menter F. R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA J*, 1994, vol. 32, no. 8, pp. 1598–1605.

Сведения об авторах

Корнилов Владимир Иванович, доктор физико-математических наук Пивоваров Андрей Александрович, младший научный сотрудник Попков Анатолий Николаевич, кандидат физико-математических наук

Information about the Authors

Vladimir I. Kornilov, Doctor of Science (Physics and Mathematics) Andrey A. Pivovarov, Junior Scientist Anatoly N. Popkov, PhD (Physics and Mathematics)

> Статья поступила в редакцию 27.12.2023; одобрена после рецензирования 09.01.2024; принята к публикации 15.01.2024 The article was submitted 27.12.2023; approved after reviewing 09.01.2024; accepted for publication 15.01.2024