

Научная статья
УДК 620.18
DOI: 10.34759/vst-2023-1-91-97

О ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ «МНОГОМАСШТАБНЫХ» КРИТЕРИЯХ ПОДОБИЯ ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ОТРАБОТКИ ИЗДЕЛИЙ АЭРОКОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

Ольга Николаевна Хатунцева¹ ✉, Анастасия Михайловна Шувалова²

^{1,2} Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королёва,
Королёв, Московская область, Россия

¹ Московский физико-технический институт (государственный университет),
Долгопрудный, Московская область, Россия

¹ olga.khatuntseva@rsce.ru, ol-khatun@yandex.ru ✉

² nuts97@inbox.ru

Аннотация. При создании изделий аэрокосмической техники особую роль играет этап их экспериментальной отработки [1–5]. Функционирование изделий в условиях возможного турбулентного режима создает определенные трудности для корректного проведения экспериментов на аэродинамических моделях с целью дальнейшего правильного переноса полученных данных на натурное изделие. Учет производства энтропии за счет стохастических возмущений при моделировании турбулентных режимов течения позволил определить дополнительные критерии подобия, которые, по сути, являются аналогами известных критериев подобия, но описывают «многомасштабные» гидро- и аэродинамические процессы. Исследованы вопросы, связанные с учетом «многомасштабных» критериев подобия для выбора «правильного» размера шероховатости поверхности и соответствующих технологических подходов при создании аэродинамических моделей для проведения экспериментальных исследований.

Ключевые слова: натурные и численные аэродинамические эксперименты, аэродинамическая модель, турбулентное течение, критерии подобия, технологии на основе SLS-печати

Для цитирования: Хатунцева О.Н., Шувалова А.М. О дополнительных «многомасштабных» критериях подобия для экспериментальной отработки изделий аэрокосмической техники // Вестник Московского авиационного института. 2023. Т. 30. № 1. С. 91–97. DOI: 10.34759/vst-2023-1-91-97

Original article

ON ADDITIONAL “MULTI-SCALE” SIMILARITY CRITERIA FOR EXPERIMENTAL WORK-OUT OF AEROSPACE ENGINEERING PRODUCTS

Ol'ga N. Khatuntseva¹✉, Anastasiya M. Shuvalova²

^{1,2} Korolev Rocket and Space Corporation “Energia”,
Korolev, Moscow region, Russia

¹ Moscow Institute of Physics and Technology,
Dolgoprudny, Moscow region, Russia

¹ olga.khatuntseva@rsce.ru, ol-khatun@yandex.ru ✉

² nuts97@inbox.ru

Abstract. Despite the rapid development of mathematical modeling methods, the stage of experimental work-out in the design and creation of aerospace vehicles still plays a particularly important role. On the one hand, it allows exploring the most difficult modes for mathematical modeling, and on the other hand, it allows validating numerical methods. The products functioning under conditions of a possible turbulent mode creates certain difficulties for the correct conduct of experiments on aerodynamic models with a view to further correct transfer of the obtained data to a full-scale object.

In earlier studies of one of the authors, the issues related to the possibility of accounting for additional entropy production due to the stochastic perturbations excitation while a turbulent flow mode implementation were considered in details. This allowed modifying the Navier-Stokes (NSE) equations by posing them in an expanded phase space. In this case, the left part of the NSE, i.e. the full derivative in time, is being supplemented by a term characterizing the change in velocity when an additional “stochastic” variable changes. Inclusion of an additional term characterized by entropy production (which is always non-negative) in the equations allows, in particular, to account for the irreversibility of physical processes in time in cases where this production is non-zero. Based on this approach, both “laminar” and “turbulent” solutions for the Hagen-Poiseuille problem [8], the plane Couette problem [7] and the plane Poiseuille problem [6] were analytically obtained for large values of the Reynolds number.

This article shows that the “modified” Navier-Stokes equations allow obtaining extra similarity criteria, which, in fact, are analogs of the well-known similarity criteria obtained for “classical” NSE, but wielding a multiscale character: starting from the scales of a viscous boundary layer and ending with a macroscale flow.

Multiscale similarity criteria can be useful for more complete and accurate experimental and numerical modeling of liquid and gas flow, in particular, when creating new products of aerospace equipment operated under conditions of possible turbulent mode. This approach will allow selecting the “right” size of the surface roughness and appropriate technological approaches when creating aerodynamic models for experimental research.

The article considered the issues of creating aerodynamic models with a controlled surface roughness size for conducting multiscale hydro- and aerodynamic experiments. It is noted that the most promising methods for such models creating can be technologies based on the SLS printing [13-17].

Keywords: full-scale and numerical aerodynamic experiments, aerodynamic model, turbulent flow, similarity criteria, technologies based on SLS printing

натурные и численные аэродинамические эксперименты, аэродинамическая модель, турбулентное течение, критерии подобия, технологии на основе SLS печати

Printed WORK-OUT OF AEROSPACE ENGINEERING PRODUCTS. *Aerospace MAI Journal*, 2023, vol. 30, no. 1, pp. 91–97.
DOI: 10.34759/vst-2023-1-91-97

Введение

Несмотря на активное развитие методов математического моделирования, этап экспериментальной отработки при проектировании и создании изделий аэрокосмической техники до сих пор имеет особо важное значение [1–5], так как позволяет исследовать наиболее трудные для математического моделирования режимы. Данные, полученные в результате проведения аэродинамических экспериментов, позволяют проводить валидацию численных методов, которые затем могут быть использованы для аэродинамических расчетов в широком диапазоне параметров предполагаемых режимов эксплуатации аэрокосмической техники.

Функционирование изделий в условиях возможного турбулентного режима создает определенные трудности для корректного проведения экспериментов на аэродинамических моделях с целью дальнейшего правильного переноса полученных данных на натурное изделие.

В более ранних исследованиях одного из авторов [6–8] подробно рассмотрены вопросы, связанные с возможностью учета дополнительного производства энтропии за счет возбуждения стохастических возмущений при реализации турбулентного режима течения по сравнению с соответствующим ему ламинарным режимом. Это позволило модифицировать уравнения Навье–Стокса (УНС), записывая их в расширенном фазовом пространстве. В этом случае левая часть УНС — полная производная по времени — дополняется слагаемым, характеризующим изменение скорости при изменении дополнительной «стохастической» переменной. В приближении несжимаемой жидкости с учетом возможного существования стохастического процесса система уравнений, состоящая из уравнения неразрывности (которое для несжимаемой жидкости не изменяется при расширении фазового пространства за счет введения дополнительной «стохастической» переменной) и модифицированных УНС, принимает вид:

$$\begin{cases} \nabla \vec{V} = 0; \\ \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \nabla) \vec{V} + \frac{1}{\tau} \frac{\partial \vec{V}}{\partial \tilde{s}} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \frac{\mu}{\rho} \Delta \vec{V}. \end{cases} \quad (1)$$

Здесь μ , ρ — вязкость и плотность жидкости; ∇P — градиент давления; τ — временной масштаб, на котором происходит изменение энтропии на единицу, $\tilde{s} = \tilde{s}(p) = -\varphi(p) \ln \varphi(p)$ — переменная, характеризующая плотностью вероятности φ возникновения стохастического возмущения p . Выражение для \tilde{s} является подинтегральным выражением для энтропии: $S = -\int \varphi(p) \ln \varphi(p) dp$ [11].

В качестве решения системы уравнений (1) выступают значения скорости $\vec{V} = \vec{V}(t, \vec{r}, \tilde{s}; \tau) = \vec{V}(t, \vec{r}, \tilde{s}(\varphi); \tau)$, которые могут реализоваться с вероятностью φ (на масштабе рассмотрения τ) в момент времени t , в точке $\vec{r}(x, y, z)$.

На основе этого подхода при больших значениях числа Рейнольдса аналитически были получены как «ламинарные», так и «турбулентные» решения для задачи Хагена–Пуазейля [8], плоской задачи Куэтта [7] и плоской задачи Пуазейля [6]. Здесь уместно подчеркнуть, что в «традиционном» (нерасширенном) фазовом пространстве уравнения Навье–Стокса допускают только «ламинарные» аналитические решения этих задач.

В данной статье покажем, что «модифицированные» уравнения Навье–Стокса позволяют получить дополнительные критерии подобия, которые, по сути, являются аналогами известных критериев подобия, полученных для «классических» УНС, но имеют многомасштабный характер: начиная от масштабов вязкого пограничного слоя и заканчивая макромасштабным течением.

«Многомасштабные» критерии подобия могут быть полезны для более полного и точного экспериментального и численного моделирования течения жидкости и газа, в частности при создании новых изделий аэрокосмической техники, эксплуатируемой в условиях возможного турбулентного режима. Такой подход позволит выбрать «правильный» размер шероховатости поверхности и соответствующие технологические подходы при создании аэродинамических моделей для проведения экспериментальных исследований.

Определение «многомасштабных» критериев подобия для модифицированных уравнений Навье–Стокса

Для того чтобы определить дополнительные — «многомасштабные» критерии подобия для модифицированного УНС (второго уравнения системы (1)), запишем его для продольной оси x :

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{\rho}{\tau} \frac{\partial u}{\partial \tilde{s}} = \\ = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь u , v , w — компоненты скорости в направлении осей x , y и z соответственно.

Введем параметры подобия физических величин, входящих в УНС: $a_t = t_1/t_2$, $a_l = l_1/l_2$, $a_u = u_1/u_2$, $a_\mu = \mu_1/\mu_2$, $a_\rho = \rho_1/\rho_2$, $a_P = P_1/P_2$, $a_\tau = \tau_1/\tau_2$, где индексы «1» и «2» относятся к физическим величинам для натурального изделия и модели. Линейные масштабы и масштабы скоростей в направлении

различных осей будем априори считать заданными с одинаковыми коэффициентами подобия. В зависимости от соотношения масштаба натурального изделия и модели константы подобия могут изменяться. Параметр подобия для «стохастической» переменной $\tilde{s} = -\phi \ln \phi$ не используется, поскольку эта переменная должна быть самоподобной на разных масштабах.

В уравнении (2) каждый из элементов умножим на соответствующие константы подобия и сгруппируем эти константы:

$$\frac{a_p a_u}{a_t} \rho \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{a_p a_u^2}{a_t} \rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{a_u a_p}{a_\tau} \frac{\rho}{\tau} \frac{\partial u}{\partial \tilde{s}} = \frac{a_p}{a_l} \left(-\frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{a_\mu a_u}{a_l^2} \mu \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}. \quad (3)$$

Для того чтобы уравнения (2) и (3) были тождественны, необходимо выполнение условий:

$$\frac{a_p a_u}{a_t} = \frac{a_p a_u^2}{a_t} = \frac{a_u a_p}{a_\tau} = \frac{a_p}{a_l} = \frac{a_\mu a_u}{a_l^2}. \quad (4)$$

Разделим все дроби в (4) на дробь $a_u a_p / a_\tau$. В результате получим равенства:

$$\frac{a_\tau}{a_t} = \frac{a_u a_\tau}{a_t} = \frac{a_p a_\tau}{a_l a_u a_p} = \frac{a_\mu a_\tau}{a_l^2 a_p} = 1.$$

Заменяя в полученных соотношениях константы подобия их значениями, получим:

$$\frac{\tau_1}{t_1} = \frac{\tau_2}{t_2}, \quad \frac{u_1 \tau_1}{l_1} = \frac{u_2 \tau_2}{l_2},$$

$$\frac{P_1 \tau_1}{l_1 u_1 \rho_1} = \frac{P_2 \tau_2}{l_2 u_2 \rho_2}, \quad \frac{\mu_1 \tau_1}{l_1^2 \rho_1} = \frac{\mu_2 \tau_2}{l_2^2 \rho_2}.$$

Поскольку выбор масштабов для натурального изделия и модели может быть произвольным, все полученные соотношения должны быть константами. Временной масштаб τ , на котором происходит необратимое изменение энтропии стохастической системы на единицу, можно представить в виде соотношения: $\tau = \gamma l / u$, где $\gamma_0 \leq \gamma \leq 1$ — безразмерный масштаб диссипации (роста энтропии). Введя соответствующие обозначения для констант, можно записать:

$$\text{Sh}^\gamma = \frac{\tau}{t} = \gamma \frac{l}{ut}, \quad \text{Ho}^\gamma = \frac{u\tau}{l} = \gamma,$$

$$\text{Eu}^\gamma = \frac{\Delta P \tau}{l \mu \rho} = \gamma \frac{\Delta P}{\rho u^2}, \quad \text{Re}^\gamma = \frac{l^2 \rho}{\mu \tau} = \frac{1}{\gamma} \frac{l u}{\nu}. \quad (5)$$

Числа подобия Sh^γ , Ho^γ , Eu^γ и Re^γ аналогичны «одномасштабным» критериям подобия: числу

Струхалия Sh , критерию гомохронности Ho , числу Эйлера Eu и числу Рейнольдса Re [9–11] соответственно, однако, в отличие от них, новые критерии подобия описывают гидродинамические процессы на разных масштабах γ . Например, значения числа Re^γ : $\text{Re}^\gamma \geq \text{Re} = l u / \nu$ показывают, насколько возрастает отношение инерционных сил к силам вязкого трения при уменьшении масштаба γ . Естественно, все значения чисел подобия можно сравнивать только с аналогичными числами с соответствующими значениями γ . При моделировании турбулентного процесса важно знать не только макрохарактеристики течения, но и то, на каком масштабе происходит производство энтропии. Эта информация важна при постановке экспериментов по моделированию течения и сравнению натуральных и экспериментальных данных.

Поскольку дополнительный член в левых частях уравнений (1)–(2) отвечает за производство энтропии за счет стохастического вихреобразования при турбулентном режиме течения, масштаб его действия должен быть ограничен снизу размером вязкого пограничного слоя y_* : $y_* V_* / \nu \sim 1$ [11], где V_* и ν — значения динамической скорости и вязкости соответственно. То есть в выражениях: $\tau = \gamma l / u$, $\gamma_0 \leq \gamma \leq 1$ значение γ_0 должно быть равно $\gamma_0 = y_* / l$.

$$\text{Поскольку } \tilde{V}_* = \frac{V_*}{V} = \frac{1}{V} \sqrt{\frac{\sigma}{\rho}} = \sqrt{\frac{2\mu}{\rho V l}} = \frac{2}{\sqrt{2 \text{Re}}}, \\ \tilde{y}_* = \frac{y_*}{l} = \frac{y_* V_* \rho}{\mu} \frac{\mu}{\rho V l} \frac{V}{V_*} \sim \frac{1}{\text{Re} \tilde{V}_*} = \frac{1}{\sqrt{2 \text{Re}}} \quad (\text{см. [6]}),$$

то в качестве множителей в выражения (5) входят значения:

$$\gamma_0 \leq \gamma \leq 1, \quad \gamma_0 = 1 / \sqrt{2 \text{Re}}. \quad (6)$$

В соответствии с первой теоремой теории подобия (теоремой Ньютона) подобные явления имеют равные критерии подобия, поэтому можно установить, какие именно величины необходимо измерять или фиксировать во время эксперимента, если возможно возбуждение случайных возмущений течения жидкости на разных масштабах, например при развитом турбулентном режиме течения или на режимах, когда формируются первые макромасштабные моды случайных возмущений (например, дорожки Кармана).

При развитом турбулентном режиме происходит стохастическое возмущение скорости течения практически на всех возможных масштабах. При этом, из-за нелинейности процесса, сильно воздействовать на течение могут даже самые малые масштабы, включая размеры вязкого пограничного слоя.

На реальных изделиях и моделях, используемых в аэродинамических экспериментах, на размер пограничного слоя может влиять шероховатость поверхности. Исследуя выражения (5), можно, в частности, сделать вывод, что значения γ имеют разнонаправленный характер влияния на число Рейнольдса и на остальные критерии подобия. Возможно, с этим связаны эффект стабилизации ламинарного течения и затягивание процесса турбулизации потока при обтекании моделей с определенной степенью шероховатости [12].

Все это говорит о том, что при моделировании процесса течения при экспериментальной отработке, а также в вычислительных экспериментах необходимо учитывать разномасштабные критерии подобия и, возможно, проводить эксперименты с разной степенью шероховатости поверхности моделей. Это необходимо как для корректного моделирования гидро- и аэродинамических процессов на моделях, так и для правильного соотнесения их с процессами, происходящими при обтекании натуральных изделий.

В последнее время довольно активно развивается направление, связанное с созданием аэродинамических моделей на основе технологий 3D-печати, в частности SLS-печати (последовательного селективного лазерного спекания порошка) [13–17]. Эти технологии имеют ряд преимуществ перед традиционным способом создания моделей из металла (см., например, [13–14]); в частности, они позволяют создавать детали и конструкции, которые невозможно произвести другими методами. Однако развитию технологий на основе SLS-печати для создания аэродинамических моделей мешает малая изученность влияния свойств материала и его структуры на свойства моделируемого течения. Исследования, направленные на создание технологии по заданию контролируемого масштаба шероховатости поверхности, помогут сделать шаг вперед в новом направлении проведения натуральных и вычислительных гидро- и аэродинамических экспериментов.

Создание контролируемого масштаба шероховатости поверхности аэродинамических моделей для проведения натуральных экспериментов

Идея создания некоторой структуры (шероховатости) на поверхности летательных аппаратов не нова — это предлагалось делать, например, с целью затягивания процесса перехода от ламинарного к турбулентному режиму течения. Обсуждению этой проблемы, а также проблемам постановки

правильных граничных условий на шероховатой поверхности посвящен ряд работ (см., например, [12], [18–20]). Как правило, предполагалось наклеивать или напылять на поверхность изделий мелкозернистые структуры, позволяющие повышать устойчивость ламинарного пограничного слоя.

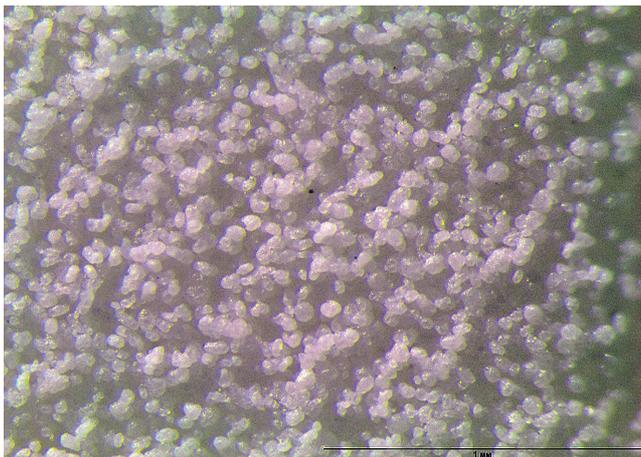
В данной статье, наряду с процессом затягивания ламинарно-турбулентного перехода, предлагается исследовать и другой аспект влияния шероховатости на течение жидкости или газа, а именно возможность «правильного» экспериментального моделирования турбулентного режима обтекания летательного аппарата на модели с учетом влияния шероховатости поверхности на основе разномасштабных критериев подобия.

Построение аэродинамических моделей на основе SLS-печати дает более широкие возможности по созданию структуры (шероховатости) на поверхности по сравнению с аналогичной процедурой на их металлических аналогах [13–14]. Помимо уже упомянутых способов по наклеиванию и напылению мелкозернистой структуры, можно предложить обработку поверхности механическим воздействием с помощью абразивного инструмента, а также задание (на этапе подготовки 3D-геометрии для печати внешней поверхности) в виде кристаллической решетки с заданным шагом и высотой ячеек, фрактальной или стохастической структурой.

При механической обработке необходим контроль (например, с помощью микроскопа) за структурой поверхности. Этот метод может дать хорошие результаты, однако для получения необходимой точности нужна очень высокая квалификация специалиста.

Способ задания печати с заданным масштабом кристаллической, фрактальной или стохастической структуры поверхности представляется наиболее перспективным.

Размеры частиц порошка, используемого в технологии SLS-печати, составляют 20–70 микрон. Размеры гранул, образуемых при спекании, расположены в диапазоне 1100–13300 микрон (см. рисунок). Верхнее значение этого диапазона размеров можно считать нижней границей задания контролируемой шероховатости поверхности. Это значение сопоставимо с толщиной пограничного слоя при гиперзвуковом обтекании. С уменьшением скорости течения толщина пограничного слоя растет, и неконтролируемая неоднородность поверхности оказывается меньше его размера. Структуры большего размера можно печатать задавая программу для 3D-принтера.



Поверхность образца, изготовленного с помощью SLS-печати

Выводы

При экспериментальной отработке изделий аэрокосмической техники, функционирующей в условиях возможного турбулентного режима, возникают определенные проблемы, связанные с корректным исследованием многомасштабных стохастических возмущений и корректным переносом полученных данных на натурное изделие. Эти трудности обусловлены, в частности, отсутствием многомасштабных критериев подобия, описывающих стохастические гидро- и аэродинамические процессы.

В работах [6–8] было предложено рассматривать уравнения Навье–Стокса в фазовом пространстве, расширенном за счет введения дополнительной — стохастической — переменной. В результате в выражении для полной производной по времени появляется дополнительное слагаемое, характеризующее производство энтропии за счет возбуждения стохастических возмущений.

Включение в уравнения дополнительного слагаемого, характеризующего производство энтропии (которое всегда неотрицательно), позволяет, с одной стороны, учесть необратимость физических процессов по времени в тех случаях, когда это производство ненулевое; с другой стороны, позволяет определить дополнительные критерии подобия, которые, по сути, являются аналогами известных критериев подобия, полученных для «классических» УНС, но имеющие многомасштабный характер. Интервал масштабов, описываемых дополнительными критериями подобия, начинается от размеров вязкого пограничного слоя и заканчивается макромасштабом течения.

Рассмотрены вопросы создания аэродинамических моделей с контролируемым размером

шероховатости поверхности для проведения многомасштабных гидро- и аэродинамических экспериментов. Отмечено, что наиболее перспективными методами создания таких моделей могут быть технологии на основе SLS-печати.

Список источников

1. *Пигусов Е.А.* Экспериментальное исследование адаптивной механизации крыла транспортного самолета на взлетно-посадочном режиме // Вестник Московского авиационного института. 2021. Т. 28. № 4. С. 39–47. DOI: 10.34759/vst-2021-4-39-47
2. *Петроневиц В.В., Лютов В.В., Манвелян В.С., Куликов А.А., Зимогоров С.В.* Исследования по калибровке шестикомпонентных вращающихся тензометрических весов для испытаний винтов летательных аппаратов // Вестник Московского авиационного института. 2021. Т. 28. № 4. С. 48–61. DOI: 10.34759/vst-2021-4-48-61
3. *Ермаков В.Ю.* Экспериментально-математическое моделирование длинномерной конструкции на основе результатов частотных испытаний // Вестник Московского авиационного института. 2022. Т. 29. № 3. С. 29–40. DOI: 10.34759/vst-2022-3-29-40
4. *Вовк М.Ю., Лещенко И.А., Даничев А.В., Гребеньков П.А., Горшков А.Ю.* Калибровка математической модели газотурбинного двигателя по данным стендовых испытаний с помощью методов комбинаторного анализа в программном комплексе THERMOGTE // Вестник Московского авиационного института. 2022. Т. 29. № 2. С. 144–157. DOI: 10.34759/vst-2022-2-144-157
5. *Болсуновский А.Л., Бузоверя Н.П., Крутов А.А., Куршилов В.Б., Сорокин О.Э., Чернышёв И.Л.* Расчетные и экспериментальные исследования возможности создания семейства транспортных самолетов различной грузоподъемности // Вестник Московского авиационного института. 2022. Т. 29. № 2. С. 7–19. DOI: 10.34759/vst-2022-2-7-19
6. *Хатунцева О.Н.* Обобщенное аналитическое решение плоской задачи Пуазейля для турбулентного режима течения несжимаемой жидкости // Труды МАИ. 2022. № 123. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=165492>
7. *Хатунцева О.Н.* О нахождении обобщенного аналитического решения плоской задачи Куэтта для турбулентного режима течения жидкости // Труды МАИ. 2022. № 122. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=164194>
8. *Хатунцева О.Н.* О нахождении обобщенного аналитического решения задачи Хагена–Пуазейля для турбулентного режима течения жидкости // Труды МАИ. 2021. № 118. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=158211>
9. *Лифшиц Е.М., Питаевский Л.П.* Теоретическая физика: Учебное пособие: В 10 т. Т. X. Физическая кинетика. — М.: Наука, 2002. — 536 с.
10. *Дразин Ф.* Введение в теорию гидродинамической устойчивости. — М.: Физматлит, 2005. — 288 с.
11. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Теоретическая физика: Учебное пособие. В 10 т. Т. VI. Гидродинамика. — М.: Физматлит, 2001. — 736 с.
12. *Брутян М.А., Будаев В.П., Волков А.В. и др.* Влияние фрактальной микроструктуры обтекаемой поверхности

- на характеристики турбулентного пограничного слоя // Учёные записки ЦАГИ. 2013. Т. 44. № 4. С. 15–30.
13. Шувалова А.М., Трашков Г.А. Проблемы изготовления аэродинамических моделей для испытаний и их решения с использованием аддитивных технологий // XXII Научно-техническая конференция учёных и специалистов (13–17 сентября 2021, Королев): Сб. тез. докл. — Королёв: РКК «Энергия», 2021. С. 59.
 14. Филимонов А.С., Шувалова А.М., Галиновский А.Л., Королёв А.Н. Анализ качества поверхности и внутренней структуры материала деталей ракетно-космической техники при использовании технологии селективного лазерного спекания // XLVI Академические чтения по космонавтике (25–28 января 2022): Сб. тез. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2022. Т. 4. С. 209–201.
 15. Flodberg G., Petterson H., Yang L. Pore analysis and mechanical performance of selective laser sintered objects // Additive Manufacturing. 2018. Vol. 24, pp. 307–315. DOI: 10.1016/j.addma.2018.10.001
 16. Bourell D., Watt T., Leigh D.K., Fulcher B. Performance limitations in polymer laser sintering // Physics Procedia. 2014. Vol. 56, pp. 147–156. DOI: 10.1016/j.phpro.2014.08.157
 17. Gibson I., Rosen D., Stucker B. Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing. — 2nd ed. — New York: Springer-Verlag, 2015. — 1519 p. DOI: 10.1007/978-1-4939-2113-3
 18. Никитченко Ю.А. Феноменологическая модель граничных условий на твердой поверхности // Вестник Московского авиационного института. 2012. Т. 19. № 3. С. 5–14.
 19. Никитченко Ю.А. Моментные модели для течений с большим числом Маха // Вестник Московского авиационного института. 2014. Т. 21. № 4. С. 39–48.
 20. Бойко А.В., Корнилов В.И. О возможности снижения турбулентного трения с помощью вертикальных устройств разрушения вихрей // Теплофизика и аэромеханика. 2009. Т. 16. № 4. С. 583–596.
- Engine Mathematical Model on the Test-Bench Data by Combinatorial Analysis Methods in the ThermoGTE Software. *Aerospace MAI Journal*, 2022, vol. 29, no. 2, pp. 144–157. DOI: 10.34759/vst-2022-2-144-157
5. Bolsunovskii A.L., Buzoverya N.P., Krutov A.A., Kurilov V.B., Sorokin O.E., Chernyshev I.L. Computational and Experimental Studies of the Possibility to Create a Various Load-Bearing Capability Transport Aircraft Family. *Aerospace MAI Journal*, 2022, vol. 29, no. 2, pp. 7–19. DOI: 10.34759/vst-2022-2-7-19
 6. Khatuntseva O.N. *Trudy MAI*, 2022, no. 123. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=165492>
 7. Khatuntseva O.N. *Trudy MAI*, 2022, no. 122. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=164194>
 8. Khatuntseva O.N. *Trudy MAI*, 2021, no. 118. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=158211>
 9. Lifshits E.M., Pitaevskii L.P. *Teoreticheskaya fizika. V 10 t. T. X. Fizicheskaya kinetika* (Theoretical physics in 10 vols. Vol. X. Physical kinetics), Moscow, Nauka, 2002, 536 p.
 10. Drazin F. *Vvedenie v teoriyu gidrodinamicheskoi ustoychivosti* (Introduction to the hydrodynamic stability theory), Moscow, Fizmatlit, 2005, 288 p.
 11. Landau L.D., Lifshits E.M. *Teoreticheskaya fizika. V 10 t. T. VI. Gidrodinamika* (Theoretical physics in 10 vols. Vol. VI. Hydrodynamics), Moscow, Fizmatlit, 2001, 736 p.
 12. Brutyan M.A., Budaev V.P., Volkov A.V. et al. *Uchenye zapiski TsAGI*, 2013, vol. 44, no. 4, pp. 15–30.
 13. Shuvalova A.M., Trashkov G.A. *Materialy XXII Nauchno-tehnicheskoi konferentsii uchenykh i spetsialistov* (13–17 September 2021, Korolev), RKK “Energiya”, 2021, p. 59.
 14. Filimonov A.S., Shuvalova A.M., Galinovskii A.L., Korolev A.N. *Materialy XLVI Akademicheskikh chtenii po kosmonavtike* (25–28 January 2022), Moscow, MGTU im. N.E. Bauman, 2022, vol. 4, pp. 209–201.
 15. Flodberg G., Petterson H., Yang L. Pore analysis and mechanical performance of selective laser sintered objects. *Additive Manufacturing*, 2018, vol. 24, pp. 307–315. DOI: 10.1016/j.addma.2018.10.001
 16. Bourell D., Watt T., Leigh D.K., Fulcher B. Performance limitations in polymer laser sintering. *Physics Procedia*, 2014, vol. 56, pp. 147–156. DOI: 10.1016/j.phpro.2014.08.157
 17. Gibson I., Rosen D., Stucker B. *Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing*. 2nd ed. New York, Springer-Verlag, 2015, 519 p. DOI: 10.1007/978-1-4939-2113-3
 18. Nikitchenko Y.A. Phenomenological model for boundary conditions on a solid surface. *Aerospace MAI Journal*, 2012, vol. 19, no. 3, pp. 5–14.
 19. Nikitchenko Y.A. The moment model for large Mach number flows. *Aerospace MAI Journal*, 2014, vol. 21, no. 4, pp. 39–48.
 20. Boiko A.V., Kornilov V.I. *Teplofizika i aeromekhanika*, 2009, vol. 16, no. 4, pp. 583–596.

References

1. Pigusov E.A. Experimental study on wing adaptive high-lift devices of transport aircraft on takeoff-landing mode. *Aerospace MAI Journal*, 2021, vol. 28, no. 4, pp. 39–47. DOI: 10.34759/vst-2021-4-39-47
2. Petronevich V.V., Lyutov V.V., Manvelyan V.S., Kulikov A.A., Zimogorov S.V. Studies on six-component rotating strain-gauge balance calibration for aircraft propellers testing. *Aerospace MAI Journal*, 2021, vol. 28, no. 4, pp. 48–61. DOI: 10.34759/vst-2021-4-48-61
3. Ermakov V.Y. Experimental-Mathematical Modeling of a Long-Length Structure Based on the Frequency Tests Results. *Aerospace MAI Journal*, 2022, vol. 29, no. 3, pp. 29–40. DOI: 10.34759/vst-2022-3-29-40
4. Vovk M.Yu., Leshchenko I.A., Danichev A.V., Greben'kov P.A., Gorshkov A.Yu. Calibration of Gas Turbine

Статья поступила в редакцию 11.01.2023; одобрена после рецензирования 24.01.2023; принята к публикации 28.01.2023.

The article was submitted on 11.01.2023; approved after reviewing on 24.01.2023; accepted for publication on 28.01.2023.