

Тепловые процессы в технике. 2025. Т. 17. № 11. С. 526–532
Thermal processes in engineering, 2025, vol. 17, no. 11, pp. 526–532

Научная статья
УДК 629.7.036.34, 532.526, 536.244
URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=186740>
EDN: <https://www.elibrary.ru/CVOADF>

Влияние свойств перспективных топлив на гидродинамически нестационарный эффект в топливных системах ГТД

А.Р. Асланов¹, В.М. Краев^{2✉}, А.С. Мякочин³, М.В. Силуянова⁴

¹АО «Национальный центр вертолетостроения имени М.Л. Миля и Н.И. Камова», Москва, Российская Федерация

^{2,3,4}Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Российская Федерация

²kraevvm@mail.ru✉

Аннотация. В работе приведены результаты численного моделирования воздействия гидродинамически нестационарных условий на коэффициент трения. Нестационарные процессы присущи работе каждого газотурбинного двигателя (ГТД) поскольку сопровождают все переходные режимы ГТД. При применении перспективных топлив, таких как жидкие водород, пропан и метан, нестационарные условия существенно могут влиять на процессы теплообмена и гидродинамики, и такое влияние требует оценки и учета. Наиболее распространенным видом нестационарных условий для авиационных топлив является гидродинамическая нестационарность, т.е. существенное изменение расхода топлива при переходе с режима малого газа на взлетный режим, а также активация реверса тяги при торможении воздушного судна. Полученные результаты показывают существенную зависимость влияния физических свойств жидкого водорода, пропана и метана на изменение гидравлического сопротивления при нестационарном воздействии на поток, и будут полезны при проектировании топливных систем перспективных авиационных двигателей.

Ключевые слова: авиационные газотурбинные двигатели, взлетный режим авиационных ГТД, устойчивая работа ГТД, криогенное топливо, метан, нестационарные процессы, гидродинамика и теплообмен в каналах

Для цитирования. Асланов А.Р., Краев В.М., Мякочин А.С., Силуянова М.В. Влияние свойств перспективных топлив на гидродинамически нестационарный эффект в топливных системах ГТД // Термовые процессы в технике. 2025. Т. 17. № 11. С. 526–532. URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=186740>

Original article

Influence of the properties of advanced fuels on the hydrodynamic non-stationary effect in GTE fuel systems

A.R. Aslanov¹, V.M. Kraev^{2✉}, A.S. Myakochin³, M.V. Siluyanova⁴

¹JSC “M.L. Mil and N.I. Kamov National Helicopter Center”, Moscow, Russian Federation

^{2,3,4}Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation

²kraevvm@mail.ru✉

Abstract. The creation of new aircraft engines sets the task of new types aviation fuels implementation, such as hydrogen, propane, methane, etc. In the history of the Russian aircraft industry, options for creating aircraft engines using alternative fuels to kerosene have already been considered. For example, in the 90s, as part of the tests, the aircraft Tu-155 flights provided test flights, both on hydrogen and methane. However, these promising works were closed due to the difficult economic situation in the country. Nevertheless, the research conducted at that time showed the fundamental possibility and significant economic feasibility of switching to new types of fuels. Based on the results of the Tu-155 project, the developers have introduced new requirements for the fuel system, which are related to the specific thermal and physical properties of promising fuels. These requirements necessitate the development and creation of mathematical models to account for the effects of non-stationary operating conditions of new-generation aircraft engines. Essentially non-steady modes of an aircraft engine are transitions from idle mode to take-off mode during take-off and to thrust reverse engagement mode during landing. If non-stationary conditions are not taken into account, an uncalculated operation mode is possible until the engine shut off. The results of numerical modeling of the effect of hydrodynamically unsteady conditions on the coefficient of friction presented. Unsteady processes are inherent in the operation of each gas turbine engine because they accompany all transient modes. This effect is insignificant for traditional aviation fuels, such as kerosene. However, when using advanced fuels such as liquid hydrogen, propane and methane, unsteady conditions can significantly affect the heat transfer and hydrodynamics processes, and such an influence requires assessment and accounting. The most common type of unsteady conditions for aviation fuels is hydrodynamic unsteadiness, i.e. a significant change in fuel consumption during the transition from low-gas mode to take-off mode, as well as activation of thrust reversal during aircraft braking. The aim of the work is to identify the effect of dependence of the scale of unsteady impact on the properties of promising fuels. The result shows a significant dependence of the physical properties influence of liquid hydrogen, propane and methane on the change in hydraulic resistance under unsteady impact on the flow, and will be useful in the design of fuel systems of promising aircraft engines.

Keywords: aviation gas turbine engines, cryogenic fuel, non-stationary processes, hydrodynamics and heat transfer in channels

For citation. Aslanov A.R., Kraev V.M., Myakochin A.S., Siluyanova M.V. Influence of the properties of advanced fuels on the hydrodynamic non-stationary effect in GTE fuel systems. *Thermal processes in engineering*. 2025, vol. 17, no. 11, pp. 526–532. (In Russ.). URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=186740>

Введение

Нестационарные процессы в технических системах требуют особого внимания, особенно в таких критически важных областях, как авиацион-

ная техника. В авиационных газотурбинных двигателях (ГТД) использование жидкого криогенного топлива, таких как жидкий водород, пропан или метан, требует тщательной проработки топливных систем. Изменения в работе ГТД, свя-

занные с изменением расхода топлива, например при переходе с одного режима работы ГТД на другой, представляют существенное гидродинамическое воздействие на топливную систему. Ускорение потока, в частности, приводят к изменению турбулентной структуры, что, в свою очередь, изменяет коэффициенты теплоотдачи и гидравлического сопротивления. В результате этого могут возникать ситуации, связанные с выходом процессов теплообмена и гидродинамики за диапазоны расчетных параметров. Такие случаи приводят к снижению эффективности работы топливной системы, нестабильной работе ее агрегатов и даже останову ГТД. Это подчеркивает важность тщательного моделирования и анализа нестационарных процессов в системах подачи топлива.

Материалы и методы

Проектирование криогенной топливной системы (КТС) необходимо проводить с учетом влияния нестационарных процессов и использованием моделей, компенсирующих такое влияние, в каналах. Нестационарные процессы могут быть вызваны изменениями расхода топлива, температурой топлива и плотностью теплового потока, что приводит к изменению структуры турбулентного потока, что, в свою очередь, влияет на теплообменные и гидродинамические процессы. При проектировании КТС необходимо использовать модели, способные учитывать такие эффекты, как, например, модели сплошной жидкости с учетом турбулентности, а также численные методы, позволяющие проводить моделирование течений в условиях нестационарных воздействий.

Весомый вклад в изучение нестационарных процессов внесли научные школы МАИ [1, 2] и МЭИ [3]. Современные исследования Валуевой Е.П. демонстрируют существенный вклад в понимание нестационарных процессов [4, 5].

Метод исследований базируются на комплексном подходе проведения численных экспериментов, математическая модель которых прошла верификацию на данных физических экспериментальных исследований.

При расчетах нестационарных процессов важен правильный выбор модели турбулентности. Модель турбулентности SST $k-\omega$ (Shear Stress Transport) является широко используемой и по-

пулярной моделью, которая позволяет достаточно точно описывать внутриканальные течения, включая расчеты вблизи стенки. Эта модель может быть особенно полезной для инженерных расчетов, поскольку обычно не требует таких значительных вычислительных ресурсов, как, например, прямое численное моделирование – Direct Numerical Simulation (DNS) [6]. Для моделирования течения в каналах топливных магистралей жидких криогенных топлива в канале была разработана расчетная модель гидравлического сопротивления в нестационарных условиях на основе модели турбулентности SST $k-\omega$ [7]. Разработанная математическая модель была верифицирована путем сопоставления с экспериментальными данными.

Полученные ранее экспериментальные данные по влиянию гидродинамической нестационарности на теплообмен и гидродинамику течения для газа [8] и жидкости [9] были использованы для проверки корректности предлагаемой модели [7] разработана для изучения структуры турбулентных газовых потоков в стационарных и нестационарных, изотермических и неизотермических условиях.

Результаты

Проведение экспериментов в нестационарных условиях может быть чрезвычайно сложным и трудоемким процессом, особенно при исследовании процессов в различных средах и различных топливах. Это приводит к недостатку экспериментальных данных, особенно при процессах с применением других рабочих тел, кроме воздуха и воды. Также наблюдаются отличия в результатах экспериментов разных авторов. Расхождения в полученных результатах могут быть вызваны различными факторами, такими как различия в методологии эксперимента, используемом оборудовании и даже в использовании разных рабочих сред. Для формирования более полной картины понимания нестационарных процессов важно проводить дальнейшие исследования и сравнивать результаты натурных и численных экспериментов.

Несмотря на определенное различие в данных изменениях коэффициента сопротивления трения в нестационарных условиях, можно сформулировать определенные выводы.

Получение однозначных выводов об изменении коэффициента сопротивления трения в нестационарных условиях может быть затруднено из-за различных факторов, таких как погрешности в измерениях, методах определения коэффициента трения и недостаточном количестве повторений опытных режимов. Инерционность датчиков также может внести свои дополнительные погрешности при измерении в условиях большой нестационарности потока.

Для получения более надежных результатов и формирования более полной картины изменения коэффициента сопротивления трения в нестационарных условиях необходимы дальнейшие исследования с учетом возможных погрешностей измерений и улучшением методологии эксперимента. Также важно выполнять проверку результатов с использованием различных методов измерения и сравнение их для установления более точных и достоверных выводов.

Физические свойства жидкостей и газов, такие как вязкость, плотность и теплопроводность, могут значительно отличаться друг от друга, и эти различия могут сказываться на характеристиках сопротивления и теплообмена в нестационарных условиях.

Ранее проведенные в МАИ исследования показали влияние ускорения течения жидкого метана на гидродинамическое сопротивление, а именно, существенный его рост в несколько раз в момент максимального ускорения потока [7].

В предложенной модели [7] для дальнейших расчетов на жидкое метане разрабатывалась на основе экспериментальных данных по воде. Данные по гидравлическому сопротивлению и теплоотдаче при нестационарных условиях существенно отличаются друг от друга при исследованиях на воде и на воздухе. Так при исследовании теплоотдачи и сопротивления на воздухе авторами [8] было установлено, что и теплоотдача, и сопротивление возрастают при ускорении потока.

Это подчеркивает сложность моделирования переходных процессов в течении и необходимость учета динамики изменения турбулентности во времени при анализе экспериментальных данных. Для более полного понимания и описания переходных процессов важно учитывать не только начальные условия и динамику измене-

ния параметров потока, но и различие в нестационарных эффектах от природы топлива.

Понимание того, что теплоотдача и сопротивление трения для разных жидкостей могут по-разному изменяться в нестационарных условиях, важно для различных технических и научных приложений. Уменьшение теплоотдачи и сопротивления трения при ускорении, а также увеличение при замедлении, может быть объяснено изменениями в динамике потока и его турбулентности, что может привести к различиям в теплоотдаче и сопротивлении трения.

Для анализа влияния нестационарных условий введем понятие относительного коэффициента сопротивления трения, который представляет собой отношение коэффициента сопротивления трения в нестационарных условиях ζ_τ к коэффициенту сопротивления трения в стационарных условиях $\zeta_{\text{кк}}$:

$$\Lambda = \frac{\zeta_\tau}{\zeta_{\text{кк}}}. \quad (1)$$

Влияние нестационарных условий на теплообмен, как и в случае с относительным коэффициентом сопротивления трения Λ , будем учитывать путем сравнения нестационарного значения коэффициента теплоотдачи Nu_τ и квазистационарного аналога $Nu_{\text{кк}}$.

$$K = \frac{Nu_\tau}{Nu_{\text{кк}}}. \quad (2)$$

Полученные результаты численного моделирования [7] представлены на рис. 1.

На основании представленных результатов численного моделирования можно сделать вывод о том, что характер изменения относительного коэффициента сопротивления трения совпадает с данными по воде. Это означает, что при исследовании нестационарных эффектов, связанных с изменением относительных коэффициентов сопротивления и теплоотдачи, можно ожидать схожие результаты для данной жидкости.

Также отмечается, что нестационарный эффект увеличивается с уменьшением числа Рейнольдса (расхода жидкости). Этот вывод подтверждается как численным моделированием, так и предыдущими экспериментальными исследованиями.

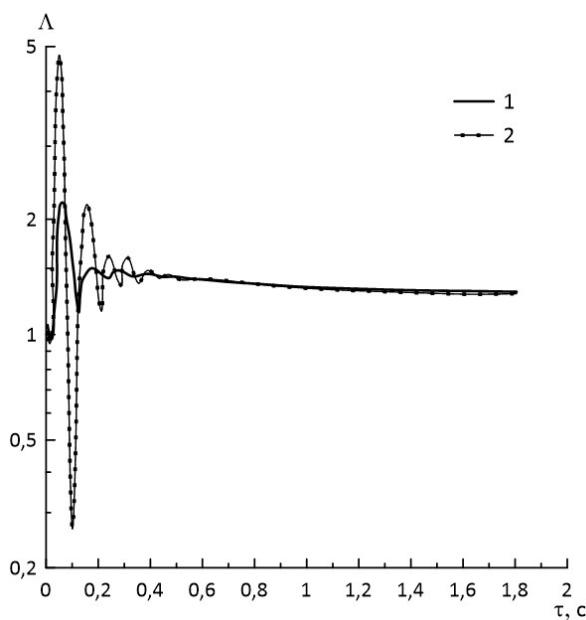


Рис. 1. Относительный коэффициент сопротивления трения при течении жидкого метана в нестационарном процессе в трубе $d = 59$ мм: 1 – $Re = 4,6 \times 10^5 \dots 5,33 \times 10^6$, 2 – $2,3 \times 10^5 \dots 2,77 \times 10^6$

Таким образом, представленные результаты подтверждают важность учета нестационарных эффектов при анализе турбулентных потоков, особенно при различных значениях числа Рейнольдса, и указывают на возможность их существенного влияния на коэффициенты сопротивления и теплоотдачи [1, 2].

По результатам расчета метановой топливной системы при различных режимах работы и диаметров топливной магистрали, авторами в МАИ [7] получена аппроксимационная зависимость для относительного коэффициента сопротивления трения Λ :

$$\Lambda = \frac{a + bx + c \ln z + d (\ln z)^2}{1 + ex + f \ln z + g (\ln z)^2}, \quad (3)$$

где $a = 2,3147926$, $b = -0,00022239719$, $c = -0,47994197$, $d = 0,025274826$, $e = -0,00013180057$, $f = -0,22689097$, $g = 0,01312809$, x – диаметр топливной магистрали в мм, z – число Рейнольдса.

На рис. 2 представлен вариант расчета по зависимости (3) при температуре метана $T_f = 116$ К, давлении на входе в канала $P_{BX} = 0,37$ МПа и темпе изменения расхода $\frac{d\bar{G}}{d\tau} = 0,275$ кг/с².

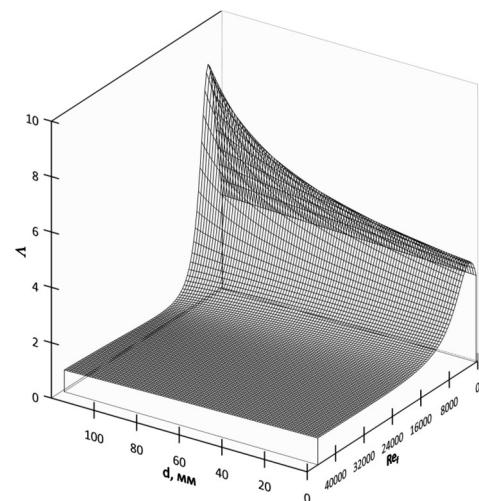


Рис. 2. Относительный коэффициент сопротивления трения в зависимости от диаметра топливной магистрали и числа Рейнольдса; $T_f = 116$ К, $P_{BX} = 0,37$ МПа, $\frac{d\bar{G}}{d\tau} = 0,275$ кг/с²

Приведенная в выше модель (3), которая более подробно описана в [7], и позволяет провести расчеты влияния гидродинамически нестационарных эффектов на течение не только жидкого метана, но других перспективных топлив, например, жидкого водорода и пропана.

Сравним теперь результаты расчета нестационарного гидравлического сопротивления Λ топливной системы на жидком метане с другими видами альтернативных топлив (рис. 3) в неизотермических условиях и соотношении температур стенки канала и потока $T_w/T_f = 1,8$. Диаметр канала $d = 59$ мм, а его длина $L = 3,835$ м.

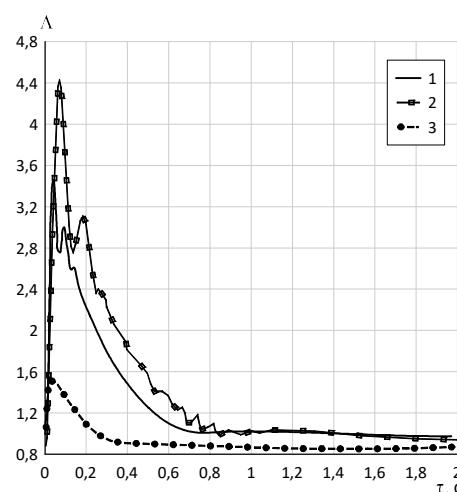


Рис. 3. Изменение относительного коэффициента сопротивления трения при ускорении потока; $T_w/T_f = 1,8$, $P_{BX} = 0,37$ МПа, $\frac{d\bar{G}}{d\tau} = 0,325$ кг/с², $d = 59$ мм, $L = 3,835$ м: 1 – жидкий метан; 2 – жидкий водород; 3 – жидкий пропан

Как видно из рис. 3, влияние гидродинамической нестационарности на гидродинамику сильно зависит от свойств жидкости.

Нестационарный эффект роста сопротивлениям для водорода в начальный момент времени более чем в 4,4 раза превышает квазистационарный расчет. Для метана и пропана такое отличие несколько ниже. 3,6 и 1,6 раз, соответственно. Т.е. для жидкого водорода нестационарный эффект почти в три раза выше, чем у жидкого пропана.

С практической точки зрения такие данные показывают сильный «отклик» на нестационарные воздействия у жидкостей с разной плотностью, и ставят дополнительные требования по учету более сильного влияния нестационарных воздействий при применении водорода.

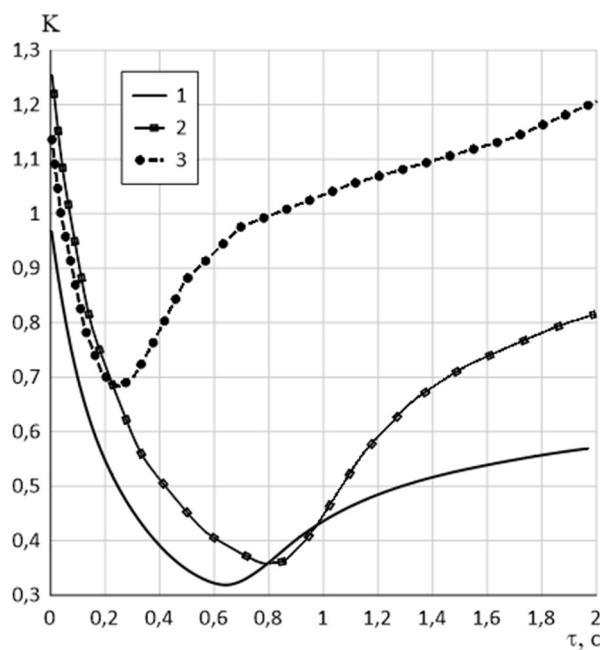


Рис. 4. Изменение относительного коэффициента теплоотдачи при ускорении потока; $T_w/T_f = 1,8$, $P_{BX} = 0,37$ МПа, $\frac{d\bar{G}}{d\tau} = 0,325$ кг/с², $d = 59$ мм, $L = 3,835$ м: 1 – жидкий метан; 2 – жидкий водород; 3 – жидкий пропан

Рис. 4 демонстрирует влияние гидродинамической нестационарности на относительный коэффициент теплоотдачи для разных топлив.

Обсуждение

Нестационарный эффект изменения теплоотдачи для метана и водорода начальный момент времени составляет 0,36 и 0,32 соответственно

от квазистационарных значений. Для пропана такое отличие несколько ниже – 0,68. Также стоит отметить существенное смещение по времени максимума нестационарного эффекта для разных жидкостей: 0,2 сек для пропана, 0,6 сек для водорода и 0,8 сек для метана.

Можно предположить, что такое количественное различие напрямую связано с физическими свойствами топлив, например, разными плотностями, коэффициентами теплопроводности, теплоемкостями веществ и т.д.

Также требуется дополнительные исследования для проведения обоснования возможности валидации моделей для различных жидкостей, на базе экспериментальных данных по воде.

Заключение

Представленные в работе результаты, показывают отличие эффект нестационарного воздействия от свойств перспективных топлив.

Нестационарный эффект роста сопротивления при ускорении потока жидкого водорода более чем в 4,4 раза выше квазистационарного значения, а при ускорении жидких метана и пропана такое отличие несколько ниже – 3,6 и 1,6 раз, соответственно. Т.е. для жидкого водорода нестационарный эффект почти в три раза выше, чем у жидкого пропана.

Изменения теплоотдачи при ускорении потоков для жидких метана и водорода близки и составляют 0,36 и 0,32 соответственно от квазистационарных значений. Для пропана такое отличие несколько меньше – 0,68.

С практической точки зрения такие данные показывают сильный «отклик» на нестационарные воздействия у жидкостей с разной плотностью и другими физическими свойствами. Полученные результаты ставят дополнительные требования по учету более сильного влияния нестационарных воздействий для разных криогенных топлив, а также требуют более тщательного подхода для верификации математических моделей, полученных для других веществ.

Список источников

1. Kalinin E.K., Dreitser G.A. Unsteady convective heat transfer for turbulent flows of gases and liquids in tubes // International Journal of Heat and Mass Transfer. 1985. Vol. 28. № 2. pp. 361–369.

2. Dreitser G.A., Bukharkin V.B., Kraev V.M. et al. Experimental study of effect of hydrodynamic unsteadiness on a turbulent gas flow structure and heat transfer // Heat Transfer Research. 1998. Vol. 3. pp. 93.
3. Попов Д.Н. Об особенностях нестационарных потоков в трубах // Изв. вузов. Машиностроение. 1972. № 7. С. 78.
4. Валуева Е.П., Попов В.Н. Нестационарное турбулентное течение жидкости в круглой трубе. Известия Академии наук СССР. Механика жидкости и газа. 1993. № 5. С. 150.
5. Валуева Е.П., Гидродинамика и теплообмен при турбулентном течении жидкости в трубе в условиях монотонного изменения расхода во времени // ТВТ. 2005. Т. 43. Б. 2. 212–222 с.
6. He K., Seddighi M., He S. DNS study of a pipe flow following a step increase in flow rate // International Journal of Heat and Fluid Flow. 2016.
7. Асланов А.Р., Краев В.М., Молчанов А.М. Модель расчета переходных процессов в криогенных топливных магистралях современных авиационных двигателей // Тепловые процессы в технике. 2023. Т. 15. № 4. С. 185–192.
8. Дрейцер Г.А., Краев В.М. Турбулентные течения газа при гидродинамической нестационарности. Красноярск: САА, 2001. 148 с.
9. Никифоров А.Н., Герасимов С.В. Изменение параметров турбулентного течения при ускорении и замедлении потока // Инженерно-физический журнал. 1985. № 49(4). С. 533–539.

References

1. Kalinin EK, Dreitser GA. Unsteady convective heat transfer for turbulent flows of gases and liquids in tubes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1985; 28(2):361–369.
2. Dreitser GA, Bukharkin VB, Kraev VM et al. Experimental study of effect of hydrodynamic unsteadiness on a turbulent gas flow structure and heat transfer. *Heat Transfer Research*. 1998;3:93.
3. Popov DN. On the features of unsteady flows in pipes. *Izv. vuzov. Mashinostroenie*. 1972;(7):78.
4. Valueva EP, Popov VN. Unsteady turbulent flow of liquid in a round pipe. *Izvestiya Akademii nauk SSSR. Mekhanika zhidkosti i gaza*. 1993;(5):150.
5. Valueva E.P. Hydrodynamics and heat transfer in turbulent fluid flow in a pipe under conditions of monotonic change in flow rate over time. *TVT*. 2005;43(2):212–222.
6. He K, Seddighi M, He S. DNS study of a pipe flow following a step increase in flow rate. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2016.
7. Aslanov AR, Kraev VM, Molchanov AM. Model for calculating transient processes in cryogenic fuel lines of modern aircraft engines. *Thermal processes in engineering*. 2023;15(4):185–192.
8. Dreitser GA, Kraev VM. *Turbulent gas flows under hydrodynamic unsteadiness*. Krasnoyarsk: CAA. 2001. 148 p.
9. Nikiforov AN, Gerasimov SV. Changing the parameters of the turbulent flow during acceleration and deceleration of the flow. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal*. 1985;49(4): 533–539.