

## **Метод исследования лабиринтных уплотнений газотурбинных двигателей с помощью программного обеспечения для автоматизированного расчета и проектирования Genesis 1.3**

© С.А. Загородников, М.В. Силуянова

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, 125993, Российская Федерация

*Цель исследования заключалась в разработке и апробации специализированного программного инструмента для расчета и оптимизации лабиринтных уплотнений газотурбинных двигателей. В работе использован комплексный подход, сочетающий математическое моделирование, методы вычислительной гидродинамики (CFD) и алгоритмы параметрической оптимизации. Материалы и методы исследования включают уравнения гидродинамики и термодинамики, адаптированные для описания течения рабочего тела через систему каналов лабиринтных уплотнений. В расчетах учитывались турбулентность, перепады давления и температурные градиенты. Для верификации результатов использовалось программное обеспечение ANSYS CFX. Результаты показали, что даже незначительное изменение геометрических параметров (зазора, высоты зуба, угла расширения) приводит к существенному изменению характеристик потока. При увеличении высоты зуба с 3 до 7 мм снижается утечка рабочего тела на 12 %, но требуется применение более сложных технологических решений. Программа Genesis 1.3 продемонстрировала возможность эффективной оптимизации уплотнений и интеграции с промышленными CFD-пакетами.*

**Ключевые слова:** газотурбинный двигатель, турбореактивный двигатель, лабиринтное уплотнение, оптимизация, моделирование, CFD, Genesis 1.3

**Введение.** Газотурбинные двигатели (ГТД) являются основным типом силовой установки в авиации, обеспечивая высокую удельную мощность, надежность и длительный ресурс. Одним из ключевых элементов конструкции ГТД выступают уплотнительные устройства, минимизирующие утечки воздуха между зонами высокого и низкого давления. Среди них особое место занимают лабиринтные уплотнения благодаря простоте конструкции и способности обеспечивать требуемый уровень герметичности.

Несмотря на кажущуюся простоту, проектирование оптимальных лабиринтных уплотнений является сложной инженерной задачей. Расчет должен учитывать аэродинамические и тепловые процессы, геометрические особенности конструкции и технологические ограничения. Ошибки на этапе проектирования приводят к снижению КПД двигателя и ускоренному износу элементов конструкции.

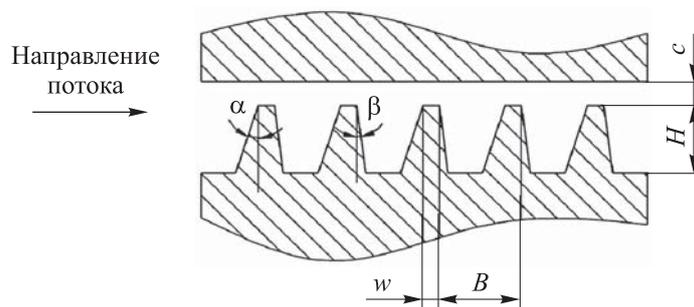
Цель настоящей статьи заключается в разработке программного инструмента, предназначенного для расчета и оптимизации лабиринтных

уплотнений газотурбинных двигателей [1]. Данный инструмент позволит инженерам и конструкторам эффективно решать задачи проектирования, обеспечивая повышение надежности и долговечности двигателей. Описание предлагаемого подхода включает теоретические основы, методологию расчетов и практические рекомендации по использованию разработанного программного продукта.

С развитием вычислительной техники появилась возможность моделировать процессы течения с использованием численных методов, что позволило значительно повысить точность расчетов. Однако для применения универсальных CFD-пакетов требуются значительные вычислительные ресурсы, а также инженеры высокой квалификации [2]. В связи с этим возникает необходимость разработать специализированные программные продукты, ориентированные на задачи проектирования лабиринтных уплотнений.

**Материалы и методы.** Для разработки программного инструмента расчета и оптимизации лабиринтных уплотнений газотурбинных двигателей был использован комплексный подход, включающий математическое моделирование, численное решение дифференциальных уравнений и алгоритмы оптимизации. Основой расчетной модели послужили уравнения гидродинамики и термодинамики, адаптированные для описания течения рабочего тела через лабиринтные каналы уплотнений.

Оптимизация потока через лабиринтное уплотнение является одной из ключевых задач при оптимизации температуры в областях, подверженных критическим тепловым нагрузкам [3, 4]. Предлагается исследовать и разработать возможность автоматического расчета геометрии областей лабиринтных уплотнений при определенных граничных условиях. На рис. 1 обозначены ключевые элементы конструкции (зубья, зазор, шаг, угол расширения), которые в совокупности определяют характеристики течения рабочего тела.



**Рис. 1.** Основной эскиз для учета геометрических параметров:

$\alpha$  — угол расширения зуба (задняя часть);  $\beta$  — угол расширения зуба (передняя часть);  $w$  — ширина зуба;  $B$  — шаг между зубьями;  $H$  — высота зуба;  $c$  — зазор между зубьями

В качестве исходных данных для моделирования применялись геометрические параметры типовых лабиринтных уплотнений, а также физические свойства рабочих сред, соответствующие условиям эксплуатации газотурбинных двигателей.

**Программное обеспечение Genesis 1.3 для оптимизации и расчета лабиринтных уплотнений.** При создании Genesis 1.3 учитывалось, что границы изменения геометрии будут увеличиваться с повышением версии программы. Однако на данном этапе для решения задач в областях протекания воздуха в ТРД/ТРДД условий достаточно.

Основные конструктивные параметры геометрии лабиринтных уплотнений, которые использовались в расчетах и оптимизационных процедурах [5], приведены ниже:

Зазор между зубьями $s$ , мм .....	0,2–0,6
Ширина зуба $w$ , мм .....	0,1–0,7
Высота зуба $H$ , мм .....	3–7
Шаг между зубьями $B$ , мм .....	3–9
Угол расширения зуба, град:	
задняя часть $\alpha$ .....	0–15
передняя часть $\beta$ .....	0–15

Указаны диапазоны возможных значений для зазора, ширины и высоты зуба, а также углов их расширения. Представленные пределы основаны на анализе практики проектирования и учитывают производственные ограничения, что позволяет применять разработанный программный инструмент в реальных условиях конструкторских расчетов [3, 5].

**Модель геометрии в классах C#.** Для реализации автоматического расчета был применен язык программирования C#. Приложение Genesis 1.3 является экземпляром класса Genesis Application (рис. 2), его ключевые модули описываются следующим образом [1]:

PointsToModelConverter — преобразует точки в строку, получаемую при копировании в буфер обмена;

ClipboardService — копирует точки объекта лабиринта;

Repository — база данных и методы общения с ней;

GenesisMainForm — основное окно отрисовки;

Data — данные, которые в «настоящий момент» отображаются в окне (модель данных);

GeometryCalculator — рассчитывает геометрию, т. е. все контуры и площадь;

DialogHandler — связывает между собой практически все события; связывает диалог с моделью данных.

Программа отражает объектно-ориентированную архитектуру разработанного программного комплекса. Взаимодействие вышеперечисленных компонентов обеспечивает формирование и хранение

геометрических параметров, проведение расчетов и визуализацию результатов. Такое решение повышает модульность системы, упрощает сопровождение кода и расширяет возможности интеграции с промышленными CFD-пакетами.

```

{
  11 references
  public class GenesisApplication
  {
    1 reference
    public PointsToModelConverter<Point3D> PointsToModelConverter { get; }
    2 references
    public ClipboardStringDataHandler ClipboardService { get; }
    4 references
    public SQLiteRepository Repository { get; }
    2 references
    public MainForm GenesisMainForm { get; }
    3 references
    public GenesisData Data { get; }
    2 references
    public GeometryCalculator GeometryCalculator { get; }
    2 references
    public GenesisDialogHandler DialogHandler { get; }

    public static readonly string ImageStoragePath = Path.Combine(AppDomain.CurrentDomain.BaseDirectory, "Images");
    public static readonly JsonSerializerOptions JsonSerializerOptions = new();

    1 reference
    internal GenesisApplication()
    {
  }
}
    
```

Рис. 2. Экземпляр класса GenesisApplication (Genesis 1.3)

Пример построения лабиринтного уплотнения представлен на рис. 3. Показан интерфейс программы Genesis 1.3 при вводе исходных данных. Пользователь задает диапазоны параметров: зазор, высоту и шаг зуба, углы расширения (рис. 4), что обеспечивает проведение параметрических расчетов без ручного построения геометрии.

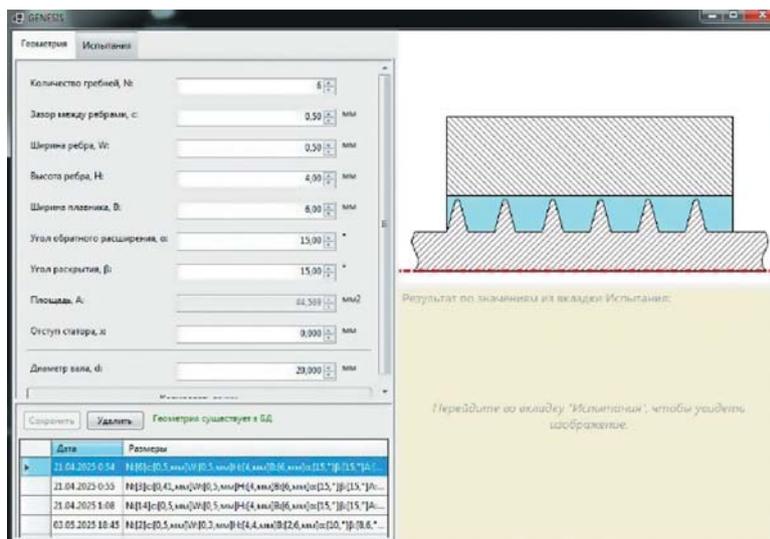


Рис. 3. Пример построения лабиринтного уплотнения со случайными геометрическими параметрами

Зазор между ребрами, с:	0,60	мм
Ширина ребра, W:	0,50	мм
Высота ребра, H:	6,00	мм
Ширина плавника, B:	6,00	мм
Угол обратного расширения, α:	15,00	°
Угол раскрытия, β:	15,00	°
Площадь, A:	48,169	мм <sup>2</sup>

Рис. 4. Пример задания параметров

Визуализация позволяет оценить корректность работы алгоритма построения и подтверждает универсальность разработанного программного инструмента. Для проверки работы программы было проведено исследование на геометрии определенного типа.

На рис. 5–7 представлены геометрические параметры уплотнений 1–3, а также результаты автоматически рассчитанной площади для каждой модели, что позволяет предварительно вычислить допустимый теоретический расход, проходящий через область течения [3]:

$$m_i = \frac{p_0 A}{\sqrt{kRT_0}} \sqrt{\frac{2k^2}{k-1} \left(\frac{p_n}{p_0}\right)^{\frac{2}{k}} \left[1 - \left(\frac{p_n}{p_0}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]},$$

где  $p_0$  — полное давление на входе в область;  $A$  — площадь сечения области;  $k$  — коэффициент адиабаты;  $R$  — газовая постоянная;  $T_0$  — полная температура на входе в область;  $p_n$  — статическое давление на выходе.

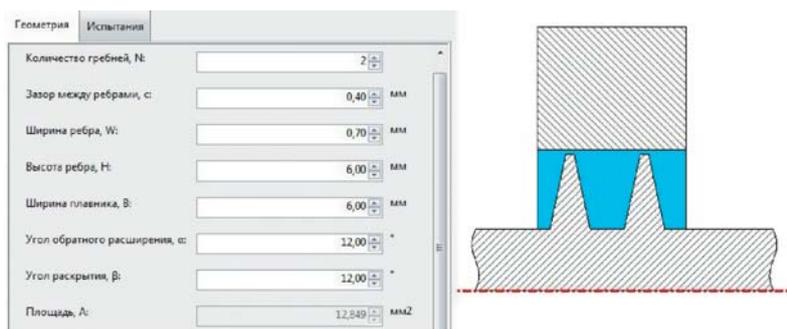
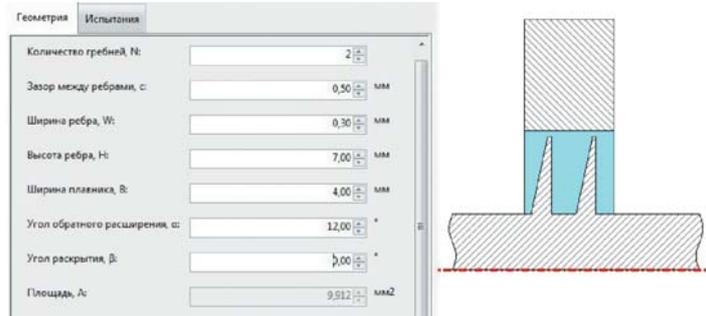
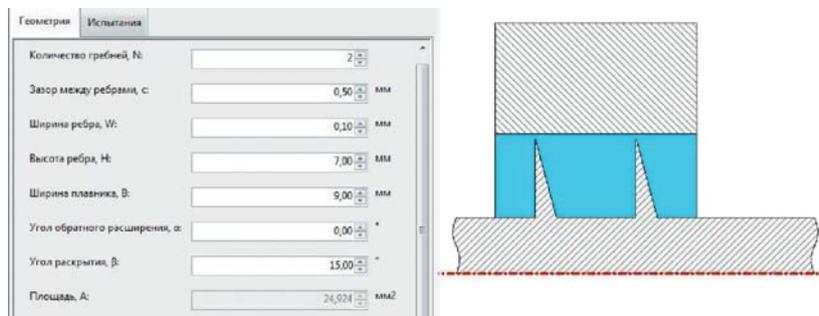


Рис. 5. Построение геометрии исследуемого «лабиринтного уплотнения 1»  
( $c = 0,4$  мм,  $w = 0,7$  мм,  $H = 6$  мм,  $B = 7$  мм,  $\alpha = 12^\circ$ ,  $\beta = 12^\circ$ )

Модифицированная конструкция уплотнения отличается изменением ширины межзубцовых каналов [6]. На рис. 7 отражено влияние параметрической корректировки на формирование потоков.



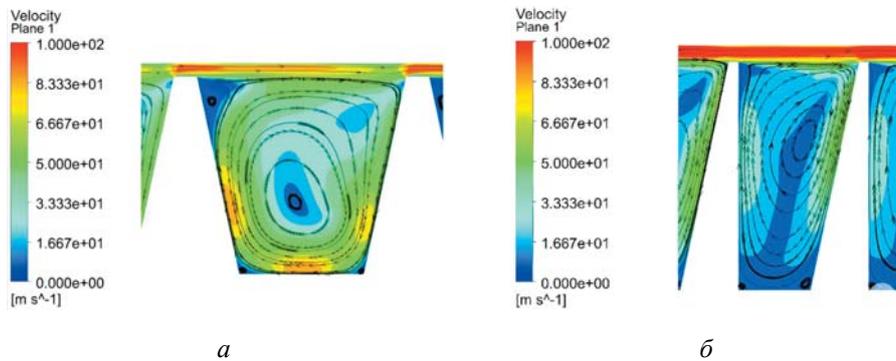
**Рис. 6.** Построение геометрии исследуемого «лабиринтного уплотнения 2»  
 ( $c = 0,5$  мм,  $w = 0,3$  мм,  $H = 7$  мм,  $B = 4$  мм,  $\alpha = 12^\circ$ ,  $\beta = 0^\circ$ )



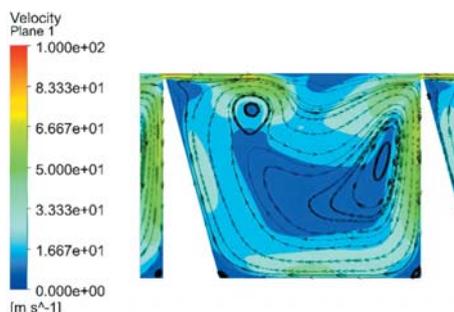
**Рис. 7.** Построение геометрии исследуемого «лабиринтного уплотнения 3»  
 ( $c = 0,2$  мм,  $w = 0,1$  мм,  $H = 7$  мм,  $B = 9$  мм,  $\alpha = 0^\circ$ ,  $\beta = 15^\circ$ )

Приведенный пример демонстрирует возможности программы по моделированию различных конфигураций и сравнительной оценке их эффективности [5, 7, 8].

Результаты каждого лабиринтного уплотнения, рассчитанного в среде ANSYS CFX благодаря выгрузке геометрии течения (точек координат), представлены на рис. 8. Важно учитывать, что выгружается область проходного течения, а не всей геометрической части (ротора или статора).



**Рис. 8 (начало).** Распределение скоростей исследуемого «лабиринтного уплотнения 1» (а) и «лабиринтного уплотнения 2» (б)



6

Рис. 8 (окончание). Распределение скоростей исследуемого «лабиринтного уплотнения 3» (6)

**Заключение.** Проведенное исследование подтвердило эффективность применения специализированного программного инструмента Genesis 1.3 для автоматизированного расчета и оптимизации лабиринтных уплотнений газотурбинных двигателей. Разработанная модель позволяет учитывать комплекс факторов, включая турбулентность, перепады давления и температурные градиенты, что обеспечивает достоверность расчетных результатов.

Использование объектно-ориентированного подхода в программной реализации обеспечивает гибкость и возможность масштабирования приложения. Проведенные вычислительные эксперименты показали, что изменение даже одного из геометрических параметров (зазора, высоты зуба или угла расширения) заметно влияет на характеристики течения. Это подтверждает важность параметрической оптимизации и необходимость применения специализированного программного обеспечения.

Сопоставление результатов автоматизированных расчетов с моделированием в ANSYS CFX выявило хорошую сходимость данных, что свидетельствует о корректности разработанного инструмента. Представленная методика может быть использована на ранних этапах проектирования газотурбинных двигателей, позволяет снизить трудоемкость расчетов и повысить эффективность разработки.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Загородников С.А., Силуянова М.В. *Программное обеспечение для автоматизированного расчета и проектирования лабиринтных уплотнений газотурбинных двигателей с открытой накопительной базой (Genesis 1.3)*. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025665053 Российская Федерация, заявитель ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт», заявл. 30.05.2025, опубл. 10.06.2025. EDN VWLGKD.
- [2] Загородников С.А., Силуянова М.В. Исследование течения воздушного тракта под камерой сгорания двухконтурного турбореактивного двигателя.

- 23-я Международная конференция «Авиация и космонавтика». 18-22 ноября 2024 года. Москва. Тезисы. Москва, Изд-во «Перо», 2024, с. 66–67. EDN ХТQBVVO.
- [3] Силуянова М.В. *Основы проектирования, конструкция и расчет основных характеристик авиационных газотурбинных двигателей*. Москва, Изд-во «Доброе слово и Ко», 2023, 166 с.
- [4] Загородников С.А., Самойлов А.В., Силуянова М.В. Разработка математической модели воздушного потока в области под камерой сгорания перспективного авиационного ТРДД классом тяги 70 кН. *III Науч.-практ. конф. аспирантов: сборник тезисов, Жуковский, 3 декабря 2024 года*. Жуковский, Центральный аэрогидродинамический институт им. профессора Н.Е. Жуковского, 2024, с. 25–28. EDN RLJWYF
- [5] Трошенский Б.А., Трошенский В.Б. Совершенствование термодинамических циклов газотурбинных установок. *Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии*, 2014, № 2 (15), с. 45–48.
- [6] Краев В.М., Силуянова М.В., Тихонов А.И. Задачи создания сверхзвуковой гражданской авиации в России. *СТИН*, 2020, № 4, с. 2–7. EDN: DIXCCW
- [7] Щенников В.С. Перспективы разработки сверхзвуковых пассажирских самолетов. *Вестник экономической безопасности*, 2018, № 2, с. 369–373.
- [8] Ланшин А.И., Комратов Д.В., Постников А.А. НЦМУ «Сверхзвук» в тематике разработки авиационных двигателей. *Авиационные двигатели*, 2022, № 1 (14), с. 69–78. DOI: 10.54349/26586061\_2022\_1\_69
- [9] Шмаков А.Ф., Модорский В.Я. Исследование зазоров в лабиринтных уплотнениях при действии газодинамических и тепловых нагрузок в FSI-постановке. *Научно-технический вестник Поволжья*, 2016, № 5, с. 216–218.

Статья поступила в редакцию 25.11.2025

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Загородников С.А., Силуянова М.В. Метод исследования лабиринтных уплотнений газотурбинных двигателей с помощью программного обеспечения для автоматизированного расчета и проектирования Genesis 1.3. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2026, вып. 1. EDN AUWVNG

**Загородников Сергей Анатольевич** — аспирант, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет).  
e-mail: zagorodnikovsergey@yandex.ru

**Силуянова Марина Владимировна** — д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Технология производства и эксплуатации двигателей летательных аппаратов», Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). e-mail: dc2mati@yandex.ru

## **Investigating Method of Gas Turbine Engine Labyrinth Seals Using Genesis 1.3 Software for Automated Calculation and Design**

© S.A. Zagorodnikov, M.V. Siluyanova

Moscow Aviation Institute (National Research University),  
Moscow, 125993, Russian Federation

*The purpose of the study was to develop and test a specialized software tool for calculating and optimizing labyrinth seals of gas turbine engines (GTE). In this work a comprehensive approach, integrating mathematical modeling, computational fluid dynamics (CFD) and parametric optimization algorithms, was applied. The materials and research methods include hydrodynamics and thermodynamics equations, adapted to describe the flow of working fluid through a system of channels of labyrinth seals. Turbulence effects, pressure differences, and temperature gradients were considered in the calculations. The ANSYS CFX software was used to verify the results. The results showed that even a slight change in geometric parameters (gap, tooth height, angle of expansion) leads to a significant change in flow characteristics. Increasing the tooth height from 3 to 7 mm reduces leakage of the working fluid by 12%, but requires the use of more complex technological solutions. The Genesis 1.3 program has demonstrated the possibility of effective seal optimization and integration with industrial CFD packages.*

**Keywords:** gas turbine engine, turbojet engine, labyrinth sealing, optimization, modeling, CFD, Genesis 1.3

### REFERENCES

- [1] Zagorodnikov S.A., Siluyanova M.V. *Programmnoe obespechenie dlya avtomatizirovannogo rascheta i proektirovaniya labirintnykh uplotnenii gazoturbinnnykh dvigatelei s otkrytoi nakopitel'noi bazoii (Genesis 1.3)* [Software for computer-aided calculation and design of labyrinth seals of gas turbine engines with an open cumulative database (Genesis 1.3)]. Certificate of state registration of a computer program No. 2025665053, Russian Federation. Applicant: Moscow Aviation Institute, filed May 30, 2025, published June 10, 2025. EDN VWLGKD.
- [2] Zagorodnikov S.A., Siluyanova M.V. *Issledovaniye techeniya vozdušnogo trakta pod kameroy sgoraniya dvukhkoturnogo turboreaktivnogo dvigatelya* [Investigation of the air flow under the combustion chamber of a two-circuit turbojet engine]. In: *The 23rd International Conference "Aviation and Cosmonautics". Moscow, November 18–22, 2024: Abstracts*. Moscow, Pero Publ., 2024, pp. 66–67. EDN XTQBVO.
- [3] Siluyanova M.V. *Osnovy proyektirovaniya, konstruktsiya i raschet osnovnykh kharakteristik aviatsionnykh gazoturbinnnykh dvigateley* [Fundamentals of design, design and calculation of the main characteristics of aviation gas turbine engines]. Moscow, Dobroe Slovo i Ko. Publ., 2023, 166 p.
- [4] Zagorodnikov S.A., Samoilov A.V., Siluyanova M.V. *Razrabotka matematicheskoy modeli vozdušnogo potoka v oblasti pod kameroy sgoraniya perspektivnogo aviatsionnogo TRDD klassom tyagi 70 kN* [Development of a mathematical model of air flow in the area under the combustion chamber of a promising aviation turbofan engine with a thrust class of 70 kN]. In: *III Nauchno-prakticheskaya konferentsiya aspirantov. Sbornik tezisov* [III Scientific and

- Practical Conference of graduate students: collection of abstracts]. *Zhukovsky, December 3, 2024*. Zhukovsky, Central Aerohydrodynamic Institute named after Professor N.E. Zhukovsky Publ., 2024, pp. 25–28. EDN RLJWYF.
- [5] Troshenkin B.A., Troshenkin V.B. Sovershenstvovaniye termodinamicheskikh tsiklov gazoturbinnnykh ustanovok [Improvement of thermodynamic cycles of gas turbine installations]. *Sovremennaya nauka: issledovaniya, idei, rezultaty, tekhnologii — Modern Science: Researches, Ideas, Results, Technology*, 2014, no. 2 (15), pp. 45–48.
- [6] Kraev V.M., Siluyanova M.V., Tikhonov A.I. Zadachi sozdaniya sverkhzvukovoy grazhdanskoj aviatsii v Rossii [The tasks of creating supersonic civil aviation in Russia]. *STIN*, 2020, no. 4, pp. 2–7. EDN: DIXCCW
- [7] Shchennikov V.S. Perspektivy razrabotki sverkhzvukovykh passazhirsikh samoletov [Prospects for the development of supersonic passenger aircraft]. *Vestnik ekonomicheskoy bezopasnosti — Vestnik of Economic Security*, 2018, no. 2, pp. 369–373.
- [8] Lanshin A.I., Komratov D.V., Postnikov A.A. NTSMU «Sverkhzvuk» v tematike razrabotki aviatsionnykh dvigateley [The World-Class Research Center “Supersonic” in the field of aircraft engine development]. *Aviatsionnyye dvigateli — Aviation Engines*, 2022, no. 1 (14), pp. 69–78. DOI: 10.54349/26586061\_2022\_1\_69
- [9] Shmakov A.F., Modorskiy V.Ya. Research gaps in labyrinth seal from the actions gasdynamic and thermal loads in the FSI formulation. *Nauchno-tekhnicheskij vestnik Povolzhiya — Scientific and Technical Volga region Bulletin*, 2016, no. 5, pp. 216–218.

**Zagorodnikov S.A.**, Postgraduate student, Moscow Aviation Institute (National Research University). e-mail: zagorodnikovsergey@yandex.ru

**Siluyanova M.V.**, Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department “Technology of Production and Operation of Aircraft Engines”, Moscow Aviation Institute (National Research University). e-mail: dc2mati@yandex.ru