

УДК 533.6.04

PACS: 43.28.-g

## Численное исследование аэродинамических характеристик осесимметричного профиля с целью его оптимизации

Н. Н. Чернов, А. В. Палий, А. В. Саенко, Д. А. Кравчук, Ю. Г. Чернега, А. М. Маевский

*На сегодняшний день одной из важных и актуальных задач науки аэродинамики является исследование и оптимизация аэродинамических характеристик форм тел в потоке газа. Данная проблема возникает при проектировании летательных аппаратов и различных судов и связана с рациональным выбором формы профиля по большому количеству различных характеристик и, в частности, по величине аэродинамического сопротивления.*

*В данной работе описываются методы оптимизации осесимметричного аэродинамического профиля в стационарном ламинарном невязком потоке газа под различными углами атаки. Предлагаемый метод решения подобной проблемы оптимизации и численного исследования аэродинамических характеристик описанного тела в потоке является актуальным ввиду сложности ее решения, например, традиционными методами на основе системы дифференциальных уравнений Навье-Стокса. Экспериментальные методы имеют своей основой дорогостоящие и затратные по времени инструменты, не гарантирующие нахождения оптимума. Такой вычислительный инструмент, например, как Ansys Fluent хорошо приспособлен для решения подобных задач гидроаэродинамики и позволяет не только ускорить и удешевить процесс проведения вычислительного эксперимента, но и повысить эффективность его проведения.*

*В статье описывается процесс поиска оптимума, сводящийся к минимизации лобового сопротивления ранее описанного нами осесимметричного профиля. Также приводится описание параметризации геометрии профиля крыла и его анализ посредством предлагаемого программного комплекса.*

*Результатом проведенного численного исследования является полученное описание аэродинамических характеристик оптимизированной формы профиля для различных скоростей потока газа.*

**Ключевые слова:** численное моделирование, вычислительный эксперимент, авиационная техника, программная система Ansys Fluent, аэродинамический профиль, процесс оптимизации, минимизация аэродинамического сопротивления.

DOI: 10.51368/1996-0948-2021-1-5-11

### Введение

Авиационная техника постоянно развивается, и с ростом развития актуальной стано-

вится комплексная задача постоянного совершенствования конструкций летательных аппаратов [1–4]. Одной из важнейших частей описанной задачи является расчет, проектиро-

Чернов Николай Николаевич<sup>1</sup>, д.т.н., профессор.

Палий Александр Викторович<sup>2</sup>, к.т.н., доцент.

E-mail: a.v.\_paliy@mail.ru

Саенко Александр Викторович<sup>1</sup>, к.т.н., доцент.

Кравчук Денис Александрович<sup>1</sup>, к.т.н., доцент.

Чернега Юрий Геннадиевич<sup>2</sup>, старший преподаватель.

Маевский Андрей Михайлович<sup>1</sup>, аспирант.

<sup>1</sup> Южный федеральный университет ИНЭП.

Россия, 347922, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2.

<sup>2</sup> Политехнический институт (филиал) Донского государственного технического университета

в г. Таганроге.

Россия, 347904, г. Таганрог, ул. Петровская, 109-а.

Статья поступила в редакцию 29 января 2021 г.

© Чернов Н. Н., Палий А. В., Саенко А. В., Кравчук Д. А., Чернега Ю. Г., Маевский А. М., 2021

вание и оптимизация профиля крыла, обладающего необходимыми параметрами в заданном диапазоне ограничений [5, 6]. В основе классических фундаментальных исследований аэродинамического сопротивления известных профилей лежат проводимые в лабораториях дорогостоящие и длительные исследования аэродинамических характеристик [7–10]. В основе подобных исследований лежат многочисленные экспериментальные материалы, обобщенные для вывода зависимости аэродинамических характеристик профилей от их геометрических характеристик [11, 12].

В данной работе, авторами предлагаются результаты численного исследования, оптимизированного нами ранее [13, 14] осесимметричного аэродинамического профиля в потоке газа, параметры которого будут получены при помощи CFD анализа в универсальной программной системе конечно-элементного анализа Ansys Fluent. CFD анализ – это численное моделирование газодинамических процессов, отражающее влияние воздействия рабочей среды на рассматриваемый объект, при помощи метода конечных элементов [15–18].

В программной системе Ansys Fluent основой проводимого вычислительного эксперимента являются уравнения сохранения параметров аэродинамического потока в центре ячейки строящейся расчетной сетки, что позволяет получать точное решение на любой группе контрольных объемов, а, следовательно,

но, и на всей расчетной области. Проводимый вычислительный эксперимент разбивается на три основных этапа: генерация расчетной сетки, разработка числового алгоритма и численное моделирование течения газа [19–22].

### Предлагаемая модель оптимизированного профиля

Для исследования аэродинамических параметров профиля крыла самолета и дальнейшего описания его оптимизации, была создана численная модель осесимметричного профиля в системе Ansys Fluent, изображенная на рис. 1.

Как видно из рисунка, модель состоит из построенного исследуемого профиля, рабочей зоны по торцам которой расположены сток и исток газа. Далее была построена расчетная сетка, для построения которой была выбрана функция proximity and curvature, что позволило создать оптимальную сетку с минимальным размером 0,00095 м изображенную на рис. 2.

Как видно из рис. 2 показатель ортогонального качества сетки находится в пределах от 0,8–1, что является хорошим результатом для продолжения расчета.

Для расчета была выбрана модель турбуленции Spalart-Allmaras, что представляет собой модель с одним уравнением, что позволяет с необходимой точностью провести расчет аэродинамических параметров профиля.

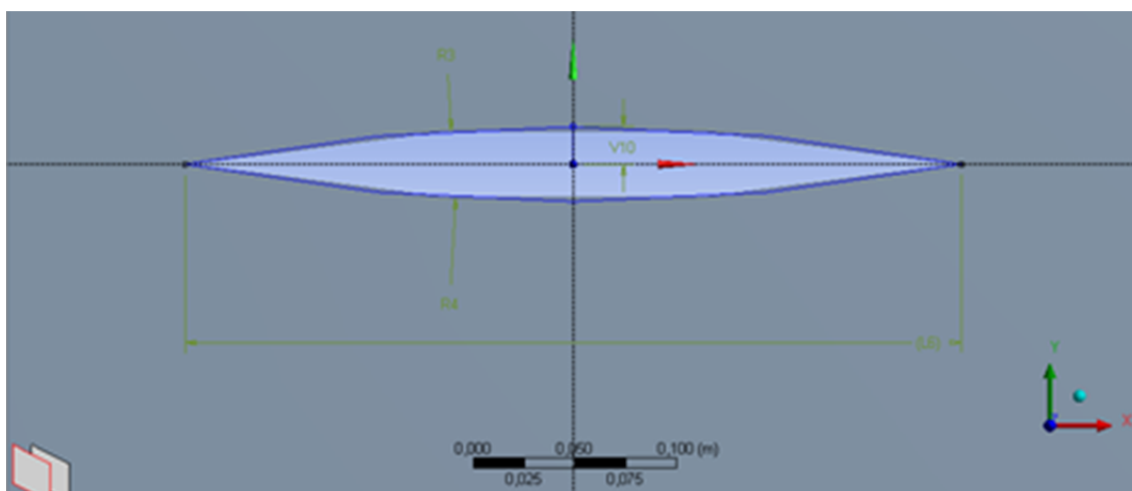


Рис. 1. Численная модель исследуемого осесимметричного профиля в системе Ansys Fluent.

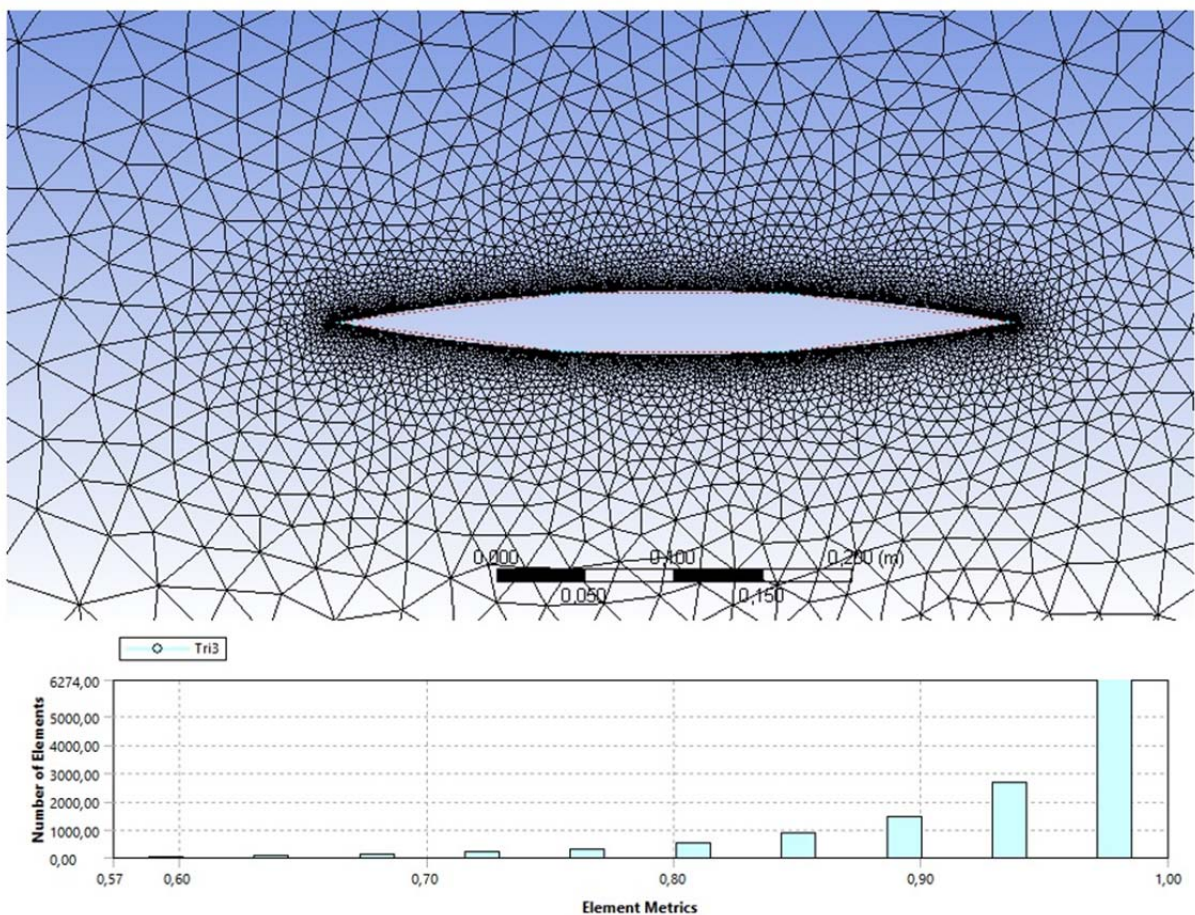


Рис. 2. Оптимизированная расчетная сетка для исследуемого аэродинамического профиля

### Результаты

В проведенном вычислительном эксперименте исследовался оптимизированный аэродинамический профиль при различных скоростях потока газа в диапазоне от 2 до

20 м/с и углах атаки от -10 до 10. Результаты моделирования частично показаны в таблице и полностью приводятся на графике зависимости силы лобового сопротивления исследуемого профиля от скорости набегающего потока газа на рис. 3.

Таблица

#### Результаты моделирования

Угол атаки	Скорость потока газа, м/с	Сила лобового сопротивления, Н
-10	2	0,219928
-10	5	1,387449
-10	7	2,67455
-10	10	5,476504
-10	12	7,919643
-10	15	12,4373
-10	18	18,00932
-10	20	22,32795
-8	2	0,100311
-8	5	0,428622

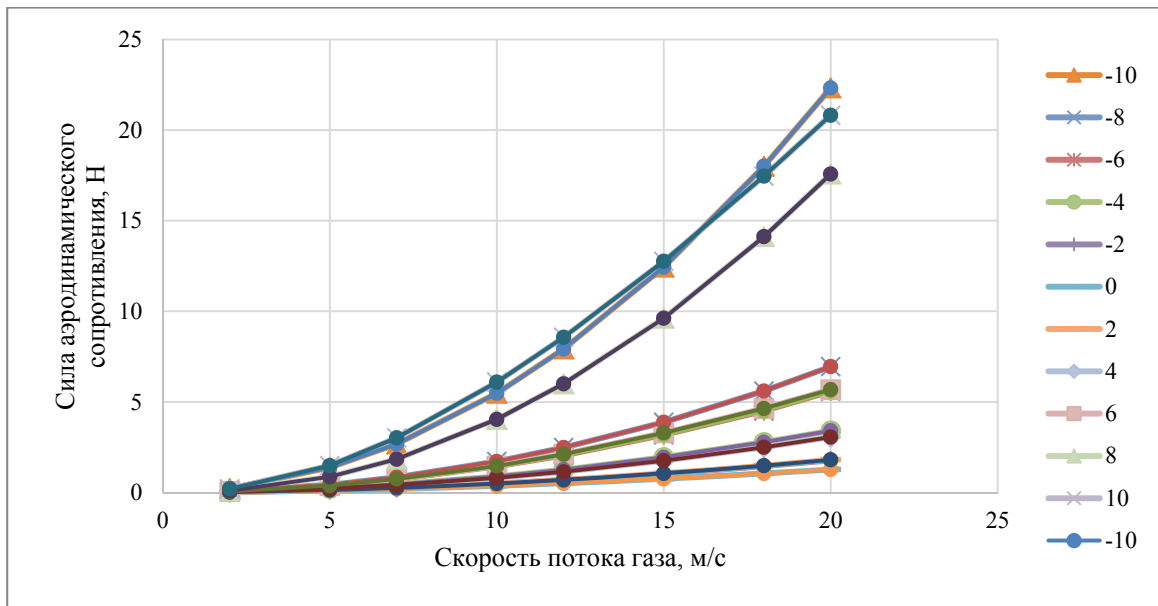


Рис. 3. Зависимости силы аэродинамического сопротивления исследуемого профиля от скорости набегающего потока газа.

Так же в работе было произведено оптимизирование созданного профиля по средствам варьирования параметром  $V_{10}$  в пределах от 70 % до 100 %, изображенных на рис. 1. Для этого был применен Design Exploration подход, используемый DesignXplorer для проектирования и понимания реакции анализа деталей и сборок. Он использует детерминированный метод, основанный на проектировании экспериментов в различных методах оптимизации, с параметрами в качестве его основных компонентов. Эти параметры могут поступать из любой поддерживаемой системы анализа различных CAD-систем. Ответы могут быть изучены, количественно оценены и представлены на графике. Используя метод целевой оптимизации, детерминированный метод может получить множество точек проектирования.

Можно также исследовать вычисленную поверхность отклика и создавать расчетные точки непосредственно с поверхности, показанные на рис. 4.

Процесс оптимизации в модуле Design Exploration, по сути, проходит итерационно. Система генерирует набор точек с определенным шагом и выявляет зависимости. Данная зависимость проводится между всеми параметрами и ищется минимум по заданному параметру. Анализируются изменения этих точек в сопоставлении с предыдущими в итоге строится график изменения параметра от контрольной точки. В нашем случае этих контрольных точек сто. На рис. 4 показано как меняется выбранный параметр с течением времени или текущей контрольной точки расчета.

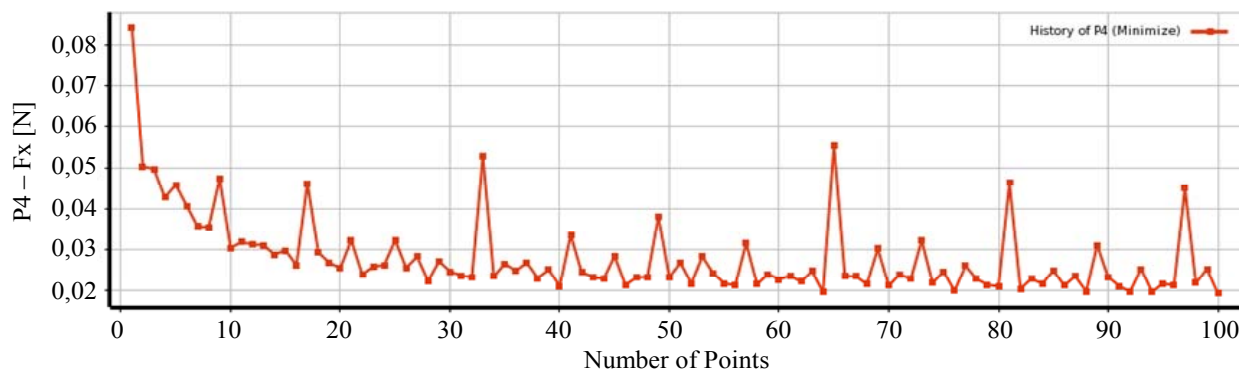


Рис. 4. Структура проекта по оптимизации аэродинамического профиля.

### Заключение

В данной работе, авторами был проведен численный эксперимент по исследованию оптимизированного осесимметричного аэродинамического профиля в потоке газа, параметры которого были получены при помощи CFD анализа в программной системе Ansys Fluent.

Для исследования аэродинамических параметров профиля и дальнейшего описания его оптимизации, была создана численная модель и выбрана модель турбуленции Spalart-Allmaras представляющая собой модель с одним уравнением, позволяющая с необходимой точностью провести расчет аэродинамических параметров профиля.

В проведенном вычислительном эксперименте исследовался оптимизированный аэродинамический профиль при различных скоростях потока газа в диапазоне от 2 до 20 м/с и углах атаки от -10 до +10.

Так же в работе было произведено оптимизирование созданного профиля по средствам варьирования параметром V10 в пределах от 70 % до 100 % в программе Design Exploration использующей подход DesignXplorer для проектирования и понимания реакции анализа деталей и сборок. Он использует детерминированный метод, основанный на проектировании экспериментов в различных методах оптимизации, с параметрами в качестве его основных компонентов.

Таким образом, в результате проведенных исследований были найдены оптимальные аэродинамические параметры профиля. Сравнение оптимизированного профиля и первоначального показали разницу около 8 %, что доказывает правильность выбранного метода оптимизации.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Pradhan S. // 8th AIAA Theoretical Fluid Mechanics Conference. 2017. P. 214–220.
2. Yin Z., Gao C., Yang X. // Taiyangneng Xuebao/Acta Energetica Solaris Sinica. 2017. Vol. 38 (12). P. 3363.

3. Вишневков Ю. Ф., Галушко Е. А., Кривель С. М. // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 7. С. 207.
4. Вожадаев В. // САПР и графика. 2012. № 6 (188). С. 90.
5. Ziemkiewicz D. Simple analytic equation for airfoil shape description, <https://arxiv.org/abs/1701.00817>, 2016.
6. Mokhtari M., Permoon M. R., Haddadpour H. // Journal of Fluids and Structures. 2019. Vol. 85. P. 1.
7. Garbuzov V. M., Ermakov A. L., Kublanov M. S., Tsipenko V. G. Aeromechanics. – Moscow: Transport, 2000.
8. Chung T. J. Computational Fluid Dynamics. – Cambridge University Press, UK. 2002.
9. Moallemi M., Clifford J., Neighbors J., Pesce J., Towhidnejad M. // AIAA/IEEE Digital Avionics Systems Conference - Proceedings. 2016. P. 7778002.
10. Chernov N. N., Kovalev A. V., Palii A. V., Sayenko A. V., Maevskiy A. M. / IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 862 (3). P. 032028.
11. Chernov N. N., Palii A. V., Ignatyev V. V., Maevskiy A. M., Maksimov A. V. // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. Vol. 1224 AISC. P. 380.
12. Голубев А. Г., Калугин В. Т., Луценко А., Столярова Е. Г. Симметричный профиль крыла в дозвуковом несжимаемом потоке. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2017.
13. Николаев Н. В. // XXVI научно-техническая конференция по аэродинамике. 2015. С. 173–174.
14. Chernov N. N., Palii A. V., Maevskiy A. M., Ignatyev V. V., Spiridonov O. B. / Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. 2019. Vol. 11163. P. 111630K.
15. Chernov N. N., Palii A. V., Saenko A. V., Maevskii A. M. Technical Physics Letters. 2018. Vol. 44 (4). P. 328.
16. Терехин А. А., Сидельников Р. В., Павлюк Ю. С. // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2009. № 1. С. 72.
17. Фролов В. А. Аэродинамические характеристики профиля и крыла. – Самара: Самарский гос. аэрокосмический ун-т им. акад. С. П. Королева, 2007.
18. Чернов Н. Н., Палий А. В., Саенко А. В., Костомаров А. Е. // Инженерный вестник Дона. 2018. № 4. <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5389>.
19. Шалаев В. И. // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. 2007. № 3. С. 71.
20. Котов В. Л., Линник Е. Ю. // Вычислительная механика сплошных сред. 2014. Т. 7. № 2. С. 142.
21. Фарапонов В. В., Савкина Н. В., Биматов В. И. Математическое моделирование движения неуправляемого осесимметричного тела в однородном поле силы тяжести. – Томск, 2017.
22. Башкин В. А., Егоров И. В., Ежов И. В. // Ученые записки ЦАГИ. 2015. Т. 46. № 2. С. 15.

## Numerical study of the aerodynamic characteristics of an axisymmetric profile of an optimized shape

*N. N. Chernov<sup>1</sup>, A. V. Palii<sup>2</sup>, A. V. Sayenko<sup>1</sup>, D. A. Kravchuk<sup>1</sup>, Y. G. Chernega<sup>2</sup>,  
and A. M. Maevskiy<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Southern Federal University

2 Schevchenko st., Taganrog, 347922, Russia

<sup>2</sup> Polytechnic Institute (branch) Don State Technical University in Taganrog  
109-a Petrovskaya st., Taganrog, 347904, Russia

*Received January 29, 2021*

*Today, one of the important and urgent tasks of the aerodynamics science is the study and optimization of aerodynamic characteristics of optimized profile shapes in a gas flow. This problem arises in the design of aircraft and various vessels and is associated with a rational choice of profile shape for a large number of different characteristics and, in particular, in terms of aerodynamic drag.*

*In this paper, consider methods for optimizing an axisymmetric aerodynamic profile in a stationary laminar inviscid gas flow at different angles of attack. The proposed method of solving such a problem of optimization and numerical study of aerodynamic characteristics of the described body in the flow is relevant due to the complexity of its solution, for example, by traditional methods based on the Navier-Stokes system of differential equations. Experimental methods are based on expensive and time-consuming tools that do not guarantee finding the optimum. Such a computing tool as Ansys Fluent is well suited for solving such problems of hydroaerodynamics and allows not only to speed up and reduce the cost of the computational experiment, but also to increase the efficiency of its implementation.*

*The article describes the process of finding the optimum, which reduces to minimizing the drag force of the previously described axisymmetric profile. A description is also given of the wing profile geometry parameterization and its analysis through the proposed software package.*

*The result of the numerical study is the obtained description of the aerodynamic characteristics of the optimized profile shape for various gas flow rates.*

*Keywords:* Numerical simulation, computational experiment, aeronautical engineering, Ansys Fluent software system, airfoil, optimization process, drag minimization.

### REFERENCES

1. S. Pradhan, in *8th AIAA Theoretical Fluid Mechanics Conference*. (2017). pp. 214–220.
2. Z. Yin, C. Gao, and X. Yang, *Taiyangneng Xuebao/Acta Energetica Solaris Sinica* **38** (12), 3363 (2017).
3. Yu. F. Vshivkov, E. A. Galushko, and S. M. Krivel, *Bulletin of the Irkutsk State Technical University* **22** (7), 207 (2018) [in Russian].
4. V. Vozhdaev, CFX software package, No. 6(188), 90 (2012) [in Russian].
5. D. Ziemkiewicz, Simple analytic equation for airfoil shape description, <https://arxiv.org/abs/1701.00817>, (2016).
6. M. Mokhtari, M. R. Permoon, and H. Haddadpour, *Journal of Fluids and Structures* **85**, 1 (2019).
7. V. M. Garbuzov, A. L. Ermakov, M. S. Kublanov, and V. G. Tsipenko, *Aeromechanics* (Transport, Moscow, 2000).
8. T. J. Chung, *Computational Fluid Dynamics*. (Cambridge University Press, UK, 2002).

9. M. Moallemi, J. Clifford, J. Neighbors, J. Pesce, and M. Towhidnejad, in *AIAA/IEEE Digital Avionics Systems Conference – Proceedings*, p. 7778002 (2016).
10. N. N. Chernov, A. V. Kovalev, A. V. Palii, A. V. Sayenko, and A. M. Maevskiy, in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* **862** (3), 032028 (2020).
11. N. N. Chernov, A. V. Palii, V. V. Ignatyev, A. M. Maevskiy, and A. V. Maksimov, *Advances in Intelligent Systems and Computing* **1224 AISC**, 380 (2020).
12. A. G. Golubev, V. T. Kalugin, A. Lutsenko, and E. G. Stolyarova, *Symmetric wing profile in a subsonic incompressible flow*. (Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 2017) [in Russian].
13. N. V. Nikolaev, in *XXVI Scientific and Technical conference on Aerodynamics*. (2015), p. 173–174 [in Russian].
14. N. N. Chernov, A. V. Palii, A. M. Maevskiy, V. V. Ignatyev, and O. B. Spiridonov, *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering* **11163**, 111630K (2019).
15. N. N. Chernov, A. V. Palii, A. V. Sayenko, and A. M. Maevskii, *Technical Physics Letters* **44** (4), 328 (2018).
16. A. A. Terekhin, P. V. Sidelnikov, and Y. S. Pavlyuk, *News of higher educational institutions. Aviation equipment*, No. 1, 72 (2009) [in Russian].
17. V. A. Frolov, *Aerodynamic characteristics of the profile and wing*. (Samara State Aerospace University. akad. S. P. Koroleva, Samara, 2007) [in Russian].
18. N. N. Chernov, A. V. Palii, A. V. Sayenko, and A. E. Kostomarov, *Engineering Bulletin of the Don*, No. 4 (2018), <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5389> [in Russian].
19. B. I. Shalaev, *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Mechanics of liquid and gas*, No. 3, 71 (2007) [in Russian].
20. V. L. Kotov and E. Yu. Linnik, *Computational mechanics of continuous media* **7** (2), 142 (2014) [in Russian].
21. V. V. Faraponov, N. V. Savkina, and V. I. Bimatov, *Mathematical modeling of motion of an uncontrolled axisymmetric body in a homogeneous gravity field*. (Tomsk, 2017) [in Russian].
22. V. A. Bashkin, E. V. Egorov, and I. V. Yezhov, *Uchenye zapiski TsAGI* **46** (2), 15 (2015) [in Russian].