

## АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

Научная статья  
УДК 629.735.33; 629.7.026.63  
URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=182553>


### ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ОБТЕКАНИЯ МЕХАНИЗИРОВАННОГО ПРОФИЛЯ КРЫЛА НА ВЗЛЕТНО-ПОСАДОЧНЫХ РЕЖИМАХ ПОЛЕТА ВО ВЛАЖНОМ ВОЗДУХЕ

Мурад Абрамович Брутян<sup>1</sup>, Хгун Йе<sup>2</sup>, Ольга Викторовна Павленко<sup>3</sup> 

<sup>1,3</sup> Центральный аэрогидродинамический институт им. профессора Н.Е. Жуковского (ЦАГИ),  
Жуковский, Московская область, Россия

<sup>1,2,3</sup> Московский физико-технический институт (МФТИ),  
Долгопрудный, Московская область, Россия

<sup>2</sup> yetun53@gmail.com

<sup>3</sup> olga.v.pavlenko@yandex.ru 

**Аннотация.** Приведены результаты параметрических численных исследований влияния процентного содержания водяного пара в воздухе на аэродинамические характеристики механизированного профиля крыла. Установлено, что основное влияние влажности на взлетно-посадочные характеристики связано с развитием отрывных явлений на закрылке.

**Ключевые слова:** механизированный профиль, аэродинамические характеристики, влажность воздуха, CFD-методы

**Для цитирования:** Брутян М.А., Йе Х., Павленко О.В. Численное исследование особенностей обтекания механизированного профиля крыла на взлетно-посадочных режимах полета во влажном воздухе // Вестник Московского авиационного института. 2024. Т. 31. № 3. С. 7–13. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=182553>

## AERONAUTICAL AND SPACE-ROCKET ENGINEERING

Original article

### NUMERICAL STUDY OF THE MECHANIZED WING PROFILE FLOWING-AROUND SPECIFICS AT TAKEOFF AND LANDING MODES IN A HUMID AIR

Murad A. Brutyan<sup>1</sup>, Htun Ye<sup>2</sup>, Olga V. Pavlenko<sup>3</sup> 

<sup>1,3</sup> Central Aerohydrodynamic Institute named after N.E. Zhukovsky (TsAGI),  
Zhukovsky, Moscow Region, Russia

<sup>1,2,3</sup> Moscow Institute of Physics and Technology (MIPT),  
Dolgoprudny, Moscow Region, Russia

<sup>2</sup> yetun53@gmail.com

<sup>3</sup> olga.v.pavlenko@yandex.ru 

© Брутян М.А., Йе Х., Павленко О.В., 2024

### Abstract

Thermodynamic state of the atmosphere is being defined by the spatial distributions of such parameters as temperature, pressure, density, humidity, air turbulence etc. As a rule, the aircraft aerodynamic characteristics computing conditions are being set in accordance with the standard atmosphere, in which data for the dry air is presented. In reality, atmospheric air consists typically of dry air and water vapor mixture. The humid air parameters frequently differ from the standard values, which should be accounted for when the aerodynamic force acting on an aircraft computing, since this fact may under certain conditions affect drastically the final result and, as a consequence, the flight safety.

It is quite clear that in real conditions weather conditions affect the aircraft flow-around. Flight safety has enhanced, and the number of aviation accidents associated with the adverse weather conditions has reduced due to the aviation technology development, as well as airfield, aircraft and meteorological equipment improvement. Nevertheless, not all meteorological issues of the aircraft flight safety ensuring have been completely resolved. As of today, a real possibility of studying the environmental properties effect on the aircraft aerodynamic characteristics become real with the CFD methods development.

The article presents the results of parametric numerical studies of the water vapor percentage composition in the air impact on the aerodynamic characteristics and a wing mechanized profile flow-around specifics in both cruising and takeoff and landing configurations.

Computations were performed in dry and wet air, which represents the mixture of dry air with water vapor. With the volume content of water vapor increase, the air mixture density, its viscosity, and the Reynolds number of air mixture decrease.

Computations demonstrated the lift force increase, the drag reduction and aerodynamic quality enhancing at the humidity increase. It was found that the basic humidity impact on the takeoff-and-landing characteristics was associated with the development of flow-separation phenomenon on the flap.

The article demonstrates that the larger the separation zone, the stronger the relative effect of the air humidity on the aerodynamic characteristics of the mechanized wing profile. The presence of the water vapor in the air affects the separation zone so that when humidity in the air increases, the separation point position of the boundary layer on the flap shifts to its trailing edge. This phenomenon is explained by the fact that with the air humidity increase, the tangential stress on the flap surface increases as well. Consequently, the separation zone size decreases and, as a result, the lift force increases.

It should be noted herewith that the percentage composition of water vapor in the air affects most significantly on the drag.

The air humidity increase affects the separation zone and reduces its size. The larger the size of the separated backflow area, the stronger the relative effect of the humidity.

**Keywords:** mechanized wing profile, aerodynamic characteristics, air humidity, CFD methods

**For citation:** Brutyan M.A., Ye H., Pavlenko O.V. Numerical Study of the Mechanized Wing Profile Flowing-Around Specifics at Takeoff and Landing Modes in a Humid Air. *Aerospace MAI Journal*, 2024, vol. 31, no. 3, pp. 7-13. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=182553>

---

### Введение

Термодинамическое состояние атмосферы определяется пространственными распределениями таких параметров, как температура, давление, плотность, влажность, турбулентность воздуха и др. [1]. Обычно условия расчета аэродинамических характеристик летательных аппаратов (ЛА) задаются в соответствии со стандартной атмосферой, в которой представлены данные для сухого воздуха [2]. В реальности атмосферный воздух, как правило, представляет собой смесь сухого воздуха и водяного пара. Параметры влажного воздуха отличаются от стандартных значений, что следует учитывать при вычислении аэродинамической силы, действующей на ЛА, поскольку при определенных условиях

данное обстоятельство может заметным образом повлиять на окончательный результат и, как следствие, — на безопасность полета [3, 4].

Понятно, что на обтекание ЛА в реальных условиях должны влиять погодные условия: температура воздуха, атмосферное давление, направление и скорость набегающего потока и другие факторы. Благодаря развитию авиационной техники [5–7], совершенствованию аэродромного, самолетного и метеорологического оборудования повысилась безопасность полетов и снизилось количество авиационных происшествий, связанных с неблагоприятными метеоусловиями. Тем не менее не все метеорологические проблемы обеспечения безопасности полетов ЛА решены окончательно. За-

метим, что использование оборудования, которое в настоящее время применяется с целью обеспечения безопасности полетов в сложных метеоусловиях, не исключает полностью зависимость авиации от погодных условий [8–10]. В последнее время с развитием численных методов CFD появилась реальная возможность изучения влияния свойств окружающей среды на аэродинамические характеристики ЛА [11–14].

В настоящей работе представлены результаты численного исследования влияния влажности воздуха на аэродинамические характеристики и характер обтекания механизированного профиля крыла в крейсерской и во взлетно-посадочной конфигурации.

## 2. Методика и условия расчета

Расчеты проведены в стандартных условиях среды (сухом воздухе) и в особых метеорологических условиях (тумане). Для численного исследования в качестве исходного взят профиль CLARC Y+ с относительной толщиной  $\bar{c} = 12\%$ , хордой  $b = 0,64$  м (рис. 1,а) [15] и построены его взлетная ( $\delta_{\text{зак}} = 20^\circ$ ) и посадочная ( $\delta_{\text{зак}} = 40^\circ$ ) конфигурации (рис. 1,б и 1,в соответственно).

Для численных исследований в программе ANSYS ICEM была построена структурированная расчетная сетка, содержащая около 1 млн ячеек, из которых 150 расположены вдоль хорды профиля крыла (рис. 2). С целью разрешения пограничного слоя была создана специальная сетка типа *o-grid*, построенная по нормали к поверхности и содер-

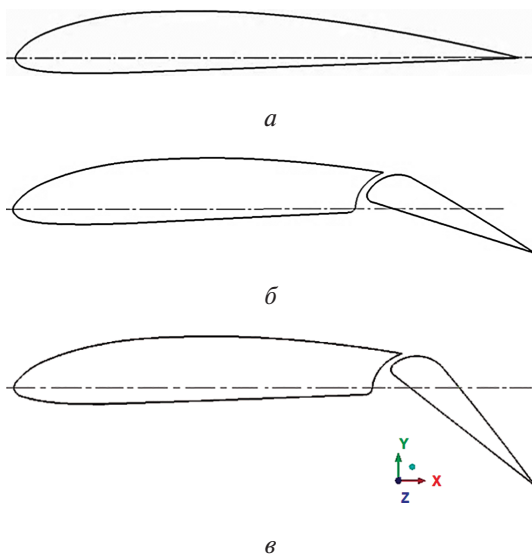


Рис. 1. Общий вид профилей:  
 а – крейсерская конфигурация,  $\delta_{\text{зак}} = 0$ ;  
 б – взлетное положение закрылка,  $\delta_{\text{зак}} = 20^\circ$ ;  
 в – посадочное положение закрылка,  $\delta_{\text{зак}} = 40^\circ$

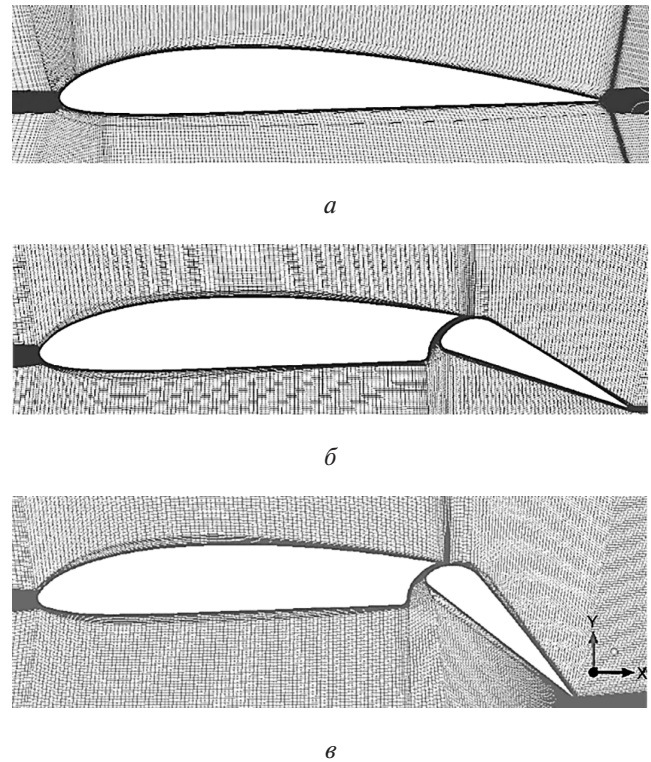


Рис. 2. Расчетная сетка вблизи профиля:  
 а –  $\delta_{\text{зак}} = 0$ ; б –  $\delta_{\text{зак}} = 20^\circ$ ; в –  $\delta_{\text{зак}} = 40^\circ$

жащая по высоте 20 ячеек. При моделировании области пограничного слоя высота первой ячейки, вблизи поверхности крыла, выбиралась такой, чтобы пограничный слой вместил достаточное количество ячеек для корректного расчета пристеночной функции. Значение параметра  $y^+$  в первом пристеночном узле было  $y^+ \leq 0,365$ . В расчете использована модель турбулентности *k-ε-realizable* с учетом влияния градиента давления и улучшенным моделированием параметров турбулентности вблизи стенки [16]. В пристеночной области использовалась однопараметрическая модель турбулентности, адаптированная к течениям в пограничном слое [17].

Расчеты выполнены по программе ANSYS FLUENT, основанной на решении осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса. Для расчета стационарного обтекания профиля с закрылком потоком влажного воздуха применялась упрощенная модель среды “Mixture” [18]. В этой модели используется уравнение неразрывности  $\nabla(\rho_m \mathbf{V}_m) = 0$ ,

где  $V_m = \frac{\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k V_k}{\rho_m}$  – средняя массовая скорость потока;

$\rho_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k$  – плотность смеси;

$n$  – количество компонентов смеси, в рассматриваемом случае  $n = 2$ .

Уравнение импульсов для данной модели среды получено путем суммирования соответствующих уравнений для каждого компонента:

$$\nabla(\rho_m \mathbf{V}_m \mathbf{V}_m) = -\nabla p + \nabla \left[ \mu_m (\nabla \mathbf{V}_m + \mathbf{V}_m^T) \right] - \nabla \left( \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \mathbf{V}_{dr,k} \mathbf{V}_{dr,k} \right),$$

где  $\mu_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \mu_k$  – вязкость смеси;

$\mathbf{V}_{dr,k} = \mathbf{V}_k - \mathbf{V}_m$  – относительная скорость компонентов смеси.

Уравнение энергии для рассматриваемой модели смеси газов имеет следующий вид:

$$\nabla \sum_{k=1}^n (\alpha_k \mathbf{V}_k (\rho_k E_k + p)) = \nabla (k_{eff} \nabla T),$$

где  $k_{eff}$  – коэффициент эффективной теплопроводности,

$$k_{eff} = \sum_{k=1}^n \alpha_k (k_k + k_t);$$

$k_k$  – коэффициент молекулярной теплопроводности  $k$ -го компонента смеси,

$k_t$  – коэффициент турбулентной теплопроводности, определяемый в соответствии с используемой моделью турбулентности;

$$E_k = \frac{h_k - p}{\rho_k} + \frac{V_k^2}{2}, \text{ где } h_k \text{ – энтальпия } k\text{-го компонента смеси [18].}$$

Плотность воздуха зависит от его температуры и влажности. Обычно стандартной плотностью считается значение  $\rho = 1,225 \text{ кг/м}^3$ , которое соответствует плотности сухого воздуха при  $15^\circ\text{C}$  на уровне моря. Наличие водяных паров приводит к уменьшению плотности воздуха, что объясняется более низкой молярной массой воды (18 г/моль) по сравнению с молярной массой сухого воздуха (29 г/моль).

Расчеты проведены в сухом и во влажном воздухе, который представляет собой смесь сухого воздуха с водяным паром. Согласно закону Дальтона, давление смеси газов, занимающих определенный объем, равно сумме парциальных давлений всех ее компонентов. Влажный воздух можно рассматривать как смесь совершенных газов, в каждом из

которых комбинация плотностей позволяет получить требуемое значение плотности смеси [19]. В настоящей работе данный подход используется для моделирования тумана, в котором относительная влажность воздуха обычно довольно высока. Условия проведения расчетов в среде, состоящей из воздуха и водяного пара в различных их пропорциях, показаны в табл. 1, из которой видно, что при увеличении объемного содержания пара уменьшается плотность воздушной смеси, ее вязкость, а также число Рейнольдса смеси  $Re = \rho V b / \mu$ .

Численное исследование обтекания механизированного профиля с хордой  $b = 0,64 \text{ м}$  проведено на угле атаки  $\alpha = 12^\circ$  при скорости набегающего потока  $V = 80 \text{ м/с}$ , атмосферном давлении  $p = 101325 \text{ Па}$ , температуре окружающей среды  $t = 15^\circ\text{C}$  как в сухом, так и во влажном воздухе с размером частичек пара 10 мкм.

### 3. Результаты расчета

Численное исследование обтекания механизированного профиля крыла показало, что в зависимости от влажности воздуха изменяются его аэродинамические характеристики. Результаты расчетов аэродинамических характеристик профиля с отклоненным закрылком представлены в табл. 2–4. Заметим, что при увеличении влажности увеличивается подъемная сила, уменьшается сопротивление и возрастает аэродинамическое качество.

Физическая картина обтекания профилей на угле атаки  $\alpha = 12^\circ$  показана на рис. 3. Наличие паров воды в воздухе воздействует на отрывную зону таким образом, что при увеличении влажности положение точки отрыва пограничного слоя на закрылке смещается к его задней кромке. Это явление объясняется тем, что при увеличении влажности воздуха касательное напряжение на поверхности закрылка возрастает [20]. Вследствие этого уменьшается размер отрывной зоны и возрастает подъемная сила.

Следует отметить важное обстоятельство. Оказывается, что чем больший размер имеет отрывная зона, тем сильнее относительное влияние влажности воздуха на аэродинамические характеристики механизированного профиля крыла. Отметим также, что наиболее существенное влияние процентное содержание пара в воздухе оказывает на

Таблица 1

Условия проведения расчетов

Процент объема пара в воздухе $\eta$ , %	Плотность смеси $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Динамическая вязкость смеси $\mu \cdot 10^5$ , Па · с	Число Рейнольдса $Re \cdot 10^{-6}$
0	1,2250	1,79	3,46
25	1,0573	1,68	3,23

Таблица 2

Результаты расчетов механизированного профиля,  $\delta_{зак} = 0, \alpha = 12^\circ$

Процент объема пара в воздухе $\eta, \%$	Коэффициент подъемной силы $c_y$	Коэффициент сопротивления $c_x$	Коэффициент тангажа $m_z$	Аэродинамическое качество $K$
0	1,4907	0,0440	-0,4296	33,9188
25	1,4958	0,0433	-0,4313	34,5282

Таблица 3

Результаты расчетов механизированного профиля,  $\delta_{зак} = 20, \alpha = 12^\circ$

Процент объема пара в воздухе $\eta, \%$	Коэффициент подъемной силы $c_y$	Коэффициент сопротивления $c_x$	Коэффициент тангажа $m_z$	Аэродинамическое качество $K$
0	1,7920	0,2610	-0,7005	6,8656
25	1,9341	0,2225	-0,7147	8,6922

Таблица 4

Результаты расчетов механизированного профиля,  $\delta_{зак} = 40, \alpha = 12^\circ$

Процент объема пара в воздухе $\eta, \%$	Коэффициент подъемной силы $c_y$	Коэффициент сопротивления $c_x$	Коэффициент тангажа $m_z$	Аэродинамическое качество $K$
0	2,3822	0,2038	-0,8572	11,6866
25	2,4641	0,1642	-0,8574	15,0067

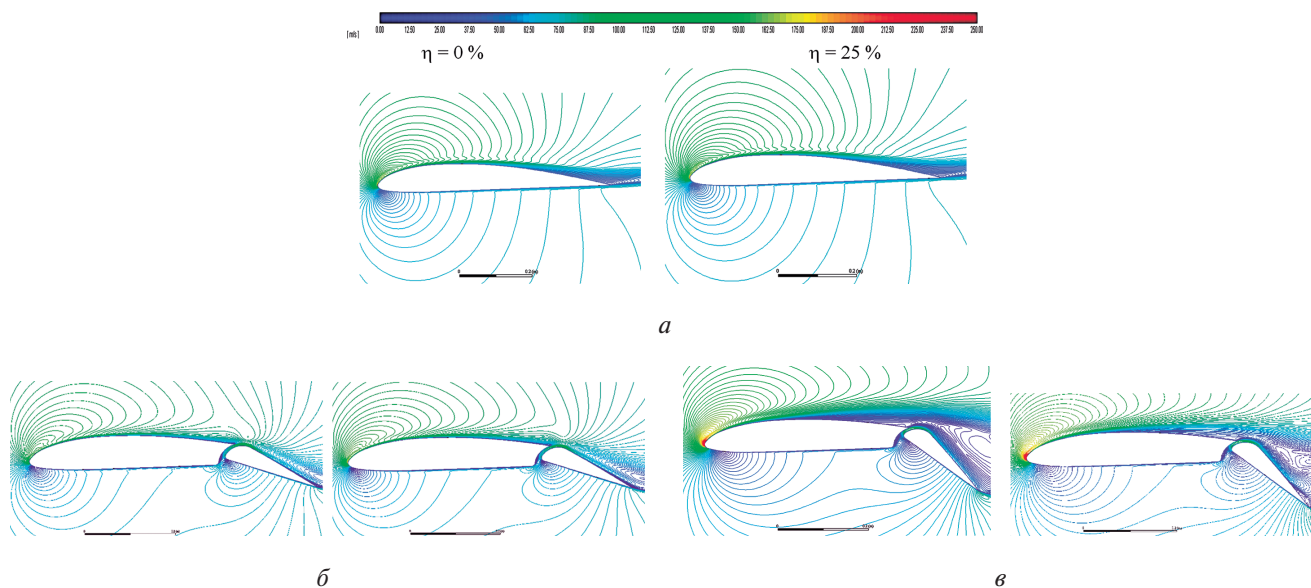


Рис. 3. Поле скоростей при обтекании профиля крыла с закрылком: а -  $\delta_{зак} = 0$ ; б -  $\delta_{зак} = 20^\circ$ ; в -  $\delta_{зак} = 20^\circ$

коэффициент сопротивления. Проведенные расчеты показали, что для профиля крыла в крейсерской конфигурации, когда отрывная зона сравнительно невелика, при увеличении влажности до  $\eta = 25\%$  коэффициент сопротивления уменьшается всего на 1,6%, в то время как во взлетной конфигурации при  $\delta_{\text{зак}} = 20^\circ$  он уменьшается уже на 14,7%, а в посадочной конфигурации при  $\delta_{\text{зак}} = 40^\circ$ , когда размер отрывной зоны наибольший, коэффициент сопротивления снижается на 19,4% по сравнению с его значением в сухом воздухе.

## Выводы

Численные исследования влияния влажности воздуха на аэродинамические характеристики механизированного профиля крыла во взлетно-посадочной конфигурации показали, что при увеличении влажности увеличивается подъемная сила профиля, снижается сопротивление и возрастает аэродинамическое качество. Повышение влажности воздуха воздействует на отрывную зону, уменьшает ее размеры, отодвигает точку отрыва пограничного слоя вниз по потоку.

Установлено, что основное влияние влажности воздуха на аэродинамические характеристики механизированного профиля крыла связано с течением в отрывной зоне. Относительное влияние влажности тем сильнее, чем больше размер области отрывного возвратного течения.

## Список источников

1. Струнин М.А. Методы исследования термодинамического состояния атмосферы с помощью самолета-лаборатории: Справочное пособие для научных работников и инженеров-метеорологов. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Шанс, 2020. – 211 с.
2. ГОСТ 4401–81. Атмосфера стандартная. Параметры. – М.: Изд-во стандартов, 2003. – 180 с.
3. Миняев В.В. Расчет параметров атмосферы с учетом влажности воздуха // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2004. № 2. С. 106–120.
4. Белоусов В.С., Нейская С.А., Ширяева Н.П., Ясников Г.П. Термодинамические свойства и процессы влажного воздуха: Учебное электронное текстовое издание. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ–УПИ, 2005. – 22 с.
5. Брутян М.А., Вышинский В.В., Ляпунов С.В. Основы дозвуковой аэродинамики. – М.: Наука, 2021. – 296 с.
6. Брутян М.А., Потапчик А.В., Раздобарин А.М., Слитинская А.Ю. Влияние струйных вихрегенераторов на взлетно-посадочные характеристики крыла с предкрылком // Вестник Московского авиационного института. 2019. Т. 26. № 1. С. 19–26.
7. Брутян М.А., Волков А.В., Потапчик А.В., Слитинская А.Ю. Крыло самолета. Патент RU 2672234 С1. Бюл. № 32, 12.11.2018.
8. Рыбалкина А.Л., Спиринов А.С., Трусова Е.И. Уменьшение влияния неблагоприятных внешних условий в аэропортах местного значения // Научный вестник МГТУ ГА. 2018. Т. 21. № 03. С. 101–114. DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-3-101-114
9. Ша М., Сунь И. Исследование повреждений оргстекла летательных аппаратов в условиях высокоскоростного дождевого каплеудара // Вестник Московского авиационного института. 2022. Т. 29. № 3. С. 65–76. DOI: 10.34759/vst-2022-3-65-76
10. Heymann F.J. On the Shock Wave Velocity and Impact Pressure in High-Speed Liquid-Solid Impact // Journal of Fluids Engineering. 1968. Vol. 90. No. 3, pp. 400–402. DOI: 10.1115/1.3605114
11. Monaghan B., Thomas R.J., Steaphen D. et al. Simulation of Stratified Two-phase Flow Regime using Air-Water Model in ANSYS Fluent // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1355, International Conference on Aerospace and Mechanical Engineering (17–19 December 2018; Kerala, India): 012014. DOI: 10.1088/1742-6596/1355/1/012014
12. Brill J.P., Arirachakaran S.J. State of Art in Multiphase Flow // Journal of Petroleum Technology. 1992. Vol. 44. No. 5, pp. 538–541. DOI: 10.2118/23835-PA
13. Issa R.I., Oliveira P.J. Numerical Prediction of Phase Separation in Two-Phase Flow through T-Junctions // Computers Fluid. 1993. Vol. 23. No. 2, pp. 347–372. DOI: 10.1016/0045-7930(94)90045-0
14. Walters L.C., Soliman H.M., Sims G.E. Two-Phase Pressure Drop and Phase Distribution at Reduced Tee Junctions // International Journal of Multiphase Flow, 1998. Vol. 24. No. 5, pp. 775–792.
15. Геометрия профилей, <http://airfoiltools.com/plotter/index?airfoil=clarky-il>.
16. Shih T.H., Liou W.W., Shabbir A. et al. New k-ε Eddy-Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows - Model Development and Validation // Computers Fluids. 1994. Vol. 24. No. 3, pp. 227–238.
17. Wolfshtein M. The Velocity and Temperature Distribution in One-Dimensional Flow with Turbulence Augmentation and Pressure Gradient // International Journal of Heat and Mass Transfer. 1969. Vol. 12. No. 3, pp. 301–318. DOI: 10.1016/0017-9310(69)90012-X
18. Руководство пользователя программы FLUENT, <http://goodrueach.netlify.app/category-1/fluently-6-rukovodstvo>
19. Сидорова Л.П. Метеорология и климатология. Часть 1. Метеорология: Учебное электронное текстовое издание. – Екатеринбург: ФГАОУ ВПО УрФУ, 2015. – 198 с.
20. Брутян М.А., Йе Х., Павленко О.В. Влияние влажности на взлетно-посадочные характеристики профиля крыла // Труды МФТИ. Механика. 2024. Т. 16. № 1(61). С. 112–118.

## References

1. Strunin M.A. *Metody issledovaniya termodinamicheskogo sostoyaniya atmosfery s pomoshch'yu samoleta-laboratorii* (Methods for studying thermodynamic condition of atmosphere with aircraft-observatory). 2nd ed. Moscow, Shans, 2020, 211 p.
2. *Atmosfera standartnaya. Parametry GOST 4401–81* (Standart atmosphere. Parameters. State Standard 4401–81). Moscow, Standarty, 2003, 180 p.
3. Minyaev V.V. *Vestnik MGTU im. N.E. Bauman. Ser. Estestvennye nauki*, 2004, no. 2, pp. 106–120.
4. Belousov V.S., Neiskaya S.A., Shiryayeva N.P., Yasnikov G.P. *Termodinamicheskie svoystva i protsessy vlazhnogo vozdukhа* (Thermodynamic properties and processes of humid air). Ekaterinburg, GOU VPO UGTU–UPI, 2005, 22 p.
5. Brutyanyan M.A., Vyshinskii V.V., Lyapunov S.V. *Osnovy dozvukovoi aerodinamiki* (Fundamentals of subsonic aerodynamics), Moscow, Nauka, 2021, 296 p.
6. Brutyanyan M.A., Potapchik A.V., Razdobarin A.M., Slitinskaya A.Y. Jet-type vortex generators impact on take-off and landing characteristics of a wing with slats. *Aerospace MAI Journal*, 2019, vol. 26, no 1, pp. 19–26.
7. Brutyanyan M.A., Volkov A.V., Potapchik A.V., Slitinskaya A.Yu. *Patent RU 2672234 C1*, 12.11.2018.
8. Rybalkina A.L., Spirin A.S., Trusova E.I. *Nauchnyi Vestnik MGTU GA*, 2018, vol. 21, no. 03, pp. 101–114. DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-3-101-114
9. Sha M., Sun Y. Studying aircraft organic glass damages under conditions of high-speed raindrops shock. *Aerospace MAI Journal*, 2022, vol. 29, no. 3, pp. 65–76. DOI: 10.34759/vst-2022-3-65-76
10. Heymann F.J. On the Shock Wave Velocity and Impact Pressure in High-Speed Liquid-Solid Impact. *Journal of Fluids Engineering*, 1968, vol. 90, no. 3, pp. 400–402. DOI: 10.1115/1.3605114
11. Monachan B., Thomas R.J., Steaphen D. et al. Simulation of Stratified Two-phase Flow Regime using Air-Water Model in ANSYS Fluent. *Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1355, International Conference on Aerospace and Mechanical Engineering (17–19 December 2018; Kerala, India)*: 012014. DOI: 10.1088/1742-6596/1355/1/012014
12. Brill J.P., Arirachakaran S.J. State of Art in Multiphase Flow. *Journal of Petroleum Technology*, 1992, vol. 44, no. 5, pp. 538–541. DOI: 10.2118/23835-PA
13. Issa R.I., Oliveira P.J. Numerical Prediction of Phase Separation in Two-Phase Flow through T-Junctions. *Computers Fluid*, 1993, vol. 23, no. 2, pp. 347–372. DOI: 10.1016/0045-7930(94)90045-0
14. Walters L.C., Soliman H.M., Sims G.E. Two-Phase Pressure Drop and Phase Distribution at Reduced Tee Junctions. *International Journal of Multiphase Flow*, 1998, vol. 24, no. 5, pp. 775–792.
15. Geometriya profilei, <http://airfoiltools.com/plotter/index?airfoil=clarky-il>.
16. Shih T.H., Liou W.W., Shabbir A. et al. New k-ε Eddy-Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows - Model Development and Validation. *Computers Fluids*, 1994, vol. 24, no. 3, pp. 227–238.
17. Wolfshtein M. The Velocity and Temperature Distribution in One-Dimensional Flow with Turbulence Augmentation and Pressure Gradient. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1969, vol. 12, no. 3, pp. 301–318. DOI: 10.1016/0017-9310(69)90012-X
18. *Rukovodstvo pol'zovatelya programmy FLUENT*, <http://goodrreach.netlify.app/category-1/fluent-6-rukovodstvo>
19. Sidorova L.P. *Meteorologiya i klimatologiya. Chast' 1. Meteorologiya* (Meteorology and climatology. Part 1. Meteorology), Ekaterinburg, FGAOU VPO UrFU, 2015, 198 p.
20. Brutyanyan M.A., Ye H., Pavlenko O.V. *Trudy MFTI. Mekhanika*, 2024, vol. 16, no. 1(61), pp. 112–118.

Статья поступила в редакцию 23.05.2024; одобрена после рецензирования 03.06.2024; принята к публикации 10.06.2024.  
The article was submitted on 23.05.2024; approved after reviewing on 03.06.2024; accepted for publication on 10.06.2024.