

УДК 532.5:004.94

В. В. ДУРШЛЯК, Н. Н. КИЗИЛОВА, О. А. КОРЯКИНА, А. И. ХАЛИН, Н. И. ШИШОВ
Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина, Харьков, Украина

ОЦЕНКА АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БИОНИЧЕСКИХ ФОРМ

В последние годы бионический дизайн, основанный на использовании формы тел и отдельных элементов летающих и водоплавающих животных, был использован в авиации и судостроении от малых дронов до супертяжелых транспортных средств. В работе приведен краткий обзор наиболее интересных технических решений и проанализированы принципы высокой эффективности плавания и полета в природе. С помощью метода конечных элементов проведен сравнительный анализ гидромеханических параметров некоторых видов рыб и рассчитаны их аэродинамические характеристики. Предложены модификации существующих аэродинамических профилей, которые помогут улучшить их аэродинамическое качество.

Ключевые слова: аэромеханика, подъемная сила, коэффициент трения, бионика.

Введение. Оптимизация аэродинамических форм, направленная как на повышение прочности, устойчивости и подъемной силы, так и снижение сопротивления, представляет собой важную задачу с самого начала истории развития аэромеханики и самолетостроения [1]. Интерес к исследованию и использованию в технике биологических форм возник в 1950–60 гг. в связи с бурным развитием подводных аппаратов, для которых особенно важными были повышение маневренности, снижение сопротивления и шумогенерации [2]. В те годы появилась наука бионика, и наиболее детальные теоретические и экспериментальные исследования были проведены с бионическими формами тел дельфинов [3], наиболее интересными свойствами которых было существенное снижение сопротивления и затягивание перехода от ламинарного к турбулентному обтеканию, что обеспечивается особым строением кожи дельфина, покрытой микроворсинками [4]. Подобные многослойные вязкоупругие покрытия были предложены для снижения гидродинамического сопротивления и поглощения шума в различных подводных и летательных аппаратах [5–7].

В последние десятилетия наблюдается всплеск исследований с использованием численных методов механики жидкостей (computational fluid dynamics, CFD) [8, 9], а идеи использования природных форм в технике относят к биомиметике (biomimetics). Помимо этого, результаты расчетов механических параметров позволяют понять и сравнить локомоторные возможности различных рыб, мелких и крупных водных животных, насекомых и птиц, включая вымершие организмы [10]. Сравнительный анализ показал, что зависимости между массой, размахом крыльев, максимальной скоростью,

подъемной силой и другими параметрами являются сходными для животных (от мелких насекомых до птиц, рыб, водных млекопитающих) и самолетов, что говорит об общности физических процессов, связанных с обтеканием тел и генерацией подъемной силы и трения [11].

Технологические решения природы часто рассматривают как оптимальные с точки зрения различных возможных критериев оптимальности. Считается, что в ходе приспособительных эволюционных изменений появились структуры и материалы, хорошо адаптированные к изменяющимся внешним условиям. Изучение оптимальных биомеханических систем привело к появлению новых технологий, в том числе на микро- и наноуровнях, которые воплощают эволюционно реализованный механический дизайн. Природа решила множество инженерных проблем, таких как повышенная прочность, способность к самовосстановлению, устойчивость к воздействию окружающей среды, гидрофобность, самосборка, использование солнечной энергии и др. Примерами успешного использования бионического дизайна в авиации является супертяжелый транспортный самолет Beluga фирмы Airbus (рисунок 1, а), форма корпуса которого была рассчитана на основе изучения аэродинамических свойств тела кита белухи (рисунок 1, б). Китовидная форма была использована и в дизайне подводного исследовательского дрона EchoVoyager фирмы Boeing (рисунок 2).



Рисунок 1 – Самолет Beluga (а) и его прототип кит белуха (б)

CFD и экспериментальные исследования тела акулы показали, что геометрия ее тела способствует плаванию с высоким коэффициентом подъемной силы (C_L) при относительно низких коэффициентах трения (C_D) и давления (C_P) [12]:

$$C_L = \frac{F_L}{\rho v^2 A_M / 2}, \quad C_D = \frac{F_D}{\rho v^2 A_M / 2}, \quad C_P = \frac{P - P_\infty}{\rho v^2 / 2}, \quad (1)$$

где F_L – подъемная сила; F_D – сила трения; ρ – плотность жидкости/газа; v – скорость набегающего потока; A_M – площадь миделева сечения; P – локальное гидростатическое давление; P_∞ – давление в потоке вдали от тела.



Рисунок 2 – Подводный дрон EchoVoyager фирмы Boeing

Также была исследована геометрия чешуек акулы, которая способствует снижению коэффициента лобового сопротивления на 3,75 % и обеспечивает более быстрое и плавное перемещение [13]. Формы тел акул и дельфинов используются для создания высокоскоростных устойчивых и маневренных транспортных средств, которые способны плыть как над, так и под водой со скоростями 80 и 40 км/ч соответственно при длине корпуса 5–8 м, нырять и планировать в воздухе подобно дельфину (новозеландская фирма HydroAttack и ряд других).

Разработка сверхскоростных поездов дальнего сообщения также связана с аэродинамической оптимизацией формы. Так, проблема повышенной шумогенерации при прохождении тоннеля, которая возникла у японского сверхскоростного поезда Shinkansen серии 100 [14], была успешно решена (рисунок 3, а) путем модификации локомотива в соответствии с формой головы птицы зимородка (рисунок 3, б). Видеосъемка орнитологов и детальные CFD расчеты показали, что эта форма обеспечивает полностью ламинарное обтекание потоком, без срыва вихрей и перехода к турбулентности. Модифицированная версия Shinkansen серии 500 является самым быстрым поездом в мире. Бионическая форма позволяет двигаться на 10 % быстрее, потреблять на 15 % меньше электроэнергии и при скоростях 285–320 км/ч генерировать уровень шума ниже предельно допустимого в жилых районах (70 дБ).

Форма тела рыбы кузовок-кубик (boxfish, рисунок 4, а), которая имеет малое лобовое сопротивление при высокой устойчивости на поворотах, была использована фирмой Мерседес-Бенц в качестве прототипа своей модели Mercedes-Benz bionic car 2005 г. (рисунок 4, б). Механизм устойчивости плавания boxfish связан с генерацией системы вихрей у нижней поверхности тела [15]. Благодаря низкому аэродинамическому сопротивлению этот автомобиль обеспечивает значительную экономию топлива.

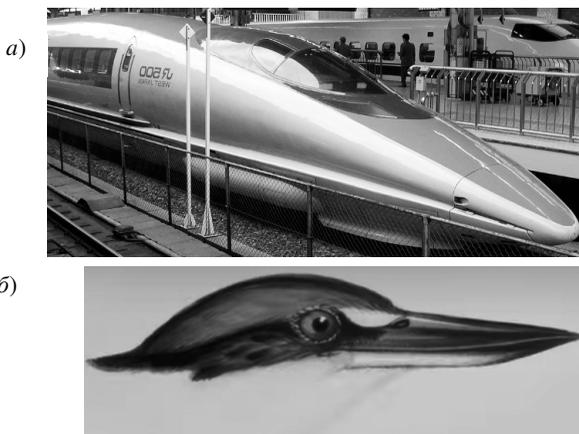


Рисунок 3 – Форма локомотива сверхскоростного поезда Shinkansen серии 500 (а), инспирированная формой головы зимородка (б)



Рисунок 4 – Форма тела рыбы boxfish (а) и основанный на ней автомобиль Mercedes-Benz bionic car (б)

Отдельные элементы формы тела плавающих и летающих животных, такие как крылья, надкрылья, хвост, плавники, чешуя и др. были использованы при модификации отдельных элементов конструкций автомобилей, включая гоночные и грузовые трейлеры, вертолетов и самолетов, надводных и подводных судов, дронов и других транспортных средств [16]. В частности, была предложена модификация передней кромки стандартного крылового профиля NACA0018 с использованием головы дельфина [17].

В данной работе проведен сравнительный CFD анализ форм разных видов дельфинов в целях дальнейшей оптимизации крыловых форм.

Постановка задачи. Оцифрованные крыловые формы и экспериментальные зависимости $C_L(\alpha)$, $C_D(\alpha)$, $C_M(\alpha)$, $C_L/C_D(\alpha)$, $C_L(C_D)$, $C_L^3/C_D^3(\alpha)$, где $C_L^3/C_D^3(\alpha)$ – аэродинамическое качество; C_M – коэффициент опрокидывающего момента; α – угол атаки (доступны на открытом онлайн-ресурсе airfoiltools.com.) Оцифрованные формы тела дельфинов 12 различных семейств (рисунок 5, а) с длинами тел от 1 до 8 м были нормированы на длину 1 м с целью сравнительного анализа их аэродинамических характеристик. Численные расчеты проводились в пакете прикладных программ ANSYS Fluent 2021 R2, который открыт для исследовательских целей на веб-странице разработчика ansys.com. Расчетная сетка измельчалась по направлению к поверхности обтекаемого тела с использованием bias-технологии (рисунок 5, б).

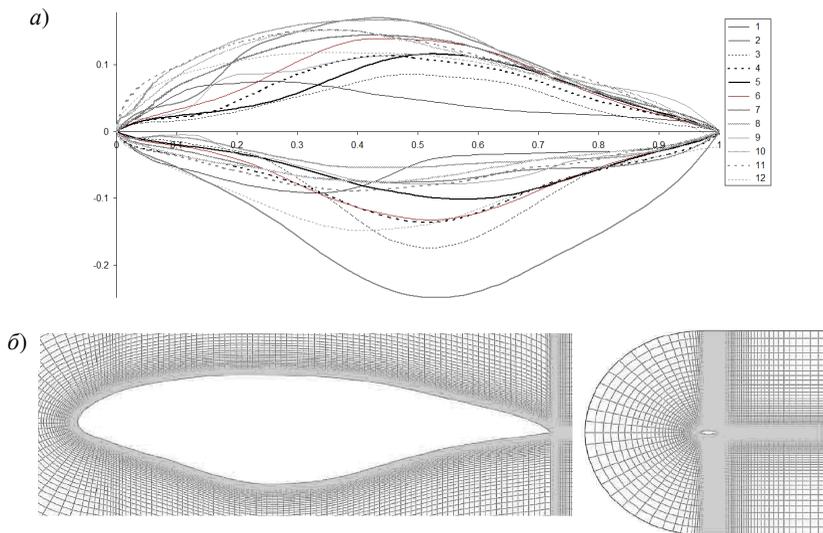


Рисунок 5 – Исследованные формы тел дельфинов (а) и пример расчетной сетки (б)

Течение жидкости вокруг обтекаемого тела моделировалось уравнениями Навье – Стокса в случае ламинарного течения ($Re < 1200$)

$$\operatorname{div}(\vec{v}) = 0, \quad \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v}, \nabla) \vec{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \Delta \vec{v}, \quad (2)$$

где ν – кинематическая вязкость жидкости, и уравнениями $k-\omega$ SST модели турбулентного течения, которая используется при аэродинамических расчетах [18]:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + (\bar{u}, \nabla) \bar{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \Delta \bar{u} - \overline{\bar{u}' \bar{u}'}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + (\bar{u} \nabla) k = P_k - \beta^* k \omega + \operatorname{div} \left[(\nu + \sigma_k \nu_t) \nabla k \right], \quad (4)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + (\bar{u} \nabla) \omega = \gamma S^2 - \beta \omega^2 + \operatorname{div} \left[(\nu + \sigma_\omega \nu_t) \nabla \omega \right] + 2(1 - F_1) \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \nabla k \cdot \nabla \omega, \quad (5)$$

где k и ω – кинетическая энергия и скорость диссипации турбулентного течения, \bar{u}' и \bar{u} – флуктуации скорости и их средние по времени,

$$\nu_t = \frac{ak}{\max(a\omega, SF_2)} - \text{турбулентная вязкость}, \quad S^2 = 2S_{ik}S_{ik}, \quad S_{ik} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_k} + \frac{\partial u_k}{\partial x_i} \right)$$

$$P_k = \min \left(\tau_{ik} \frac{\partial u_i}{\partial x_k}, 10\beta^* k \omega \right), \quad F_1 = \operatorname{th} \left(\left[\min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega z}, \frac{500\nu}{\omega z^2} \right), \frac{4k\sigma_{\omega 2}}{z^2 CD_{k\omega}} \right] \right]^4 \right),$$

$$CD_{k\omega} = \max \left(2\rho\sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \nabla k \cdot \nabla \omega, 10^{-10} \right), \quad F_2 = \operatorname{th} \left(\left[\max \left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta^* \omega z}, \frac{500\nu}{\omega z^2} \right) \right]^2 \right),$$

$a = 0,44$, $\gamma = 5/9$, $\beta^* = 0,09$, $\sigma_k = 0,85$, $\sigma_\omega = 0,5$, $\sigma_{\omega 2} = 0,856$.

В качестве граничных условий принимались условия прилипания для вязкой жидкости на поверхности тела, заданная скорость набегающего потока $\vec{v}_{in} = 5\text{--}25$ м/с и давление в потоке за телом $p_{out} = 0$.

Численное решение и результаты расчетов. Расчеты проводились методом конечных элементов с использованием схемы 2-го порядка точности. В качестве жидкости выбрана вода. Точность расчетов $\varepsilon = 10^{-3}$. Качество сетки проверялось с помощью опции Y^+ пакета Fluent. Сетка измельчалась до достижения соответствия последовательных вычислений с точностью $\varepsilon' = 10^{-3}$. Примеры результатов расчетов распределения гидростатического давления, скоростей и линий тока приведены на рисунке 6. Для большинства форм получено плавное ламинарное обтекание с образованием вихря только вблизи хвоста, о чем говорят и распределения величины k .

При значительных положительных и отрицательных углах атаки $|\alpha| > 5^\circ$ происходит разделение потока и образование цепочки вихрей (рисунок 7, а, б соответственно). При этом трение на соответствующих участках обтекаемого тела увеличивается (рисунок 8).

На рисунке 9 приведены результаты расчетов аэродинамических параметров для нескольких бионических форм. В силу несимметричной формы верхней и нижней поверхностей тела при $\alpha = 0^\circ$ подъемная сила положительная (рисунок 9, а), т. е. при горизонтальном перемещении возникает сила, которая вместе с силой Архимеда компенсирует силу тяжести.

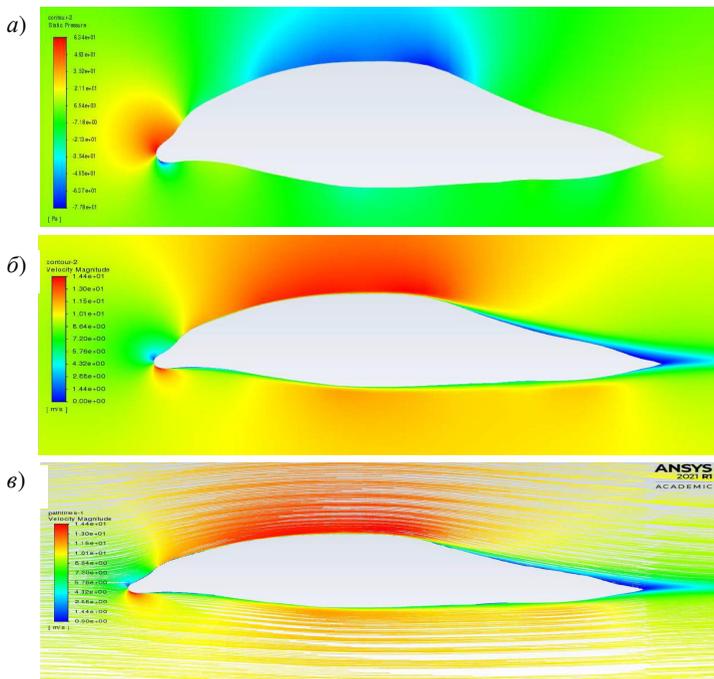


Рисунок 6 – Распределения давлений (а), скоростей (б) и линий тока (в) вокруг тела № 7 (рисунок 5, а)

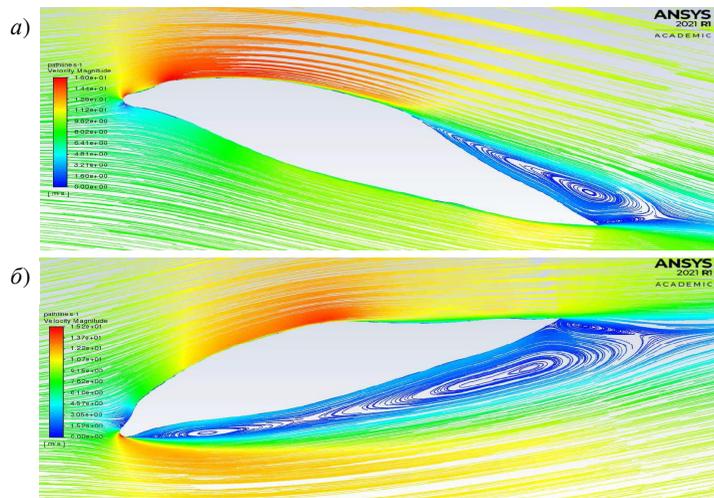


Рисунок 7 – Распределения линий тока при углах атаки $\alpha = 20^\circ$ (а) и -20° (б)

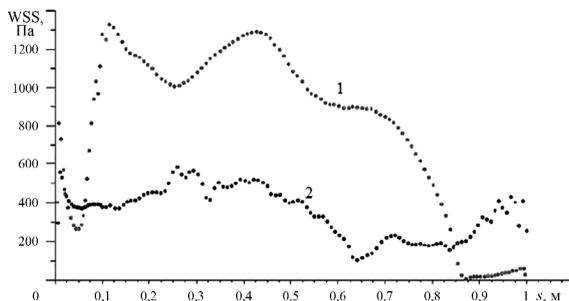


Рисунок 8 – Распределения трения (wall shear stress, WSS (Па)) вдоль верхней (1) и нижней (2) поверхностей тела № 9 (рисунок 5, а)

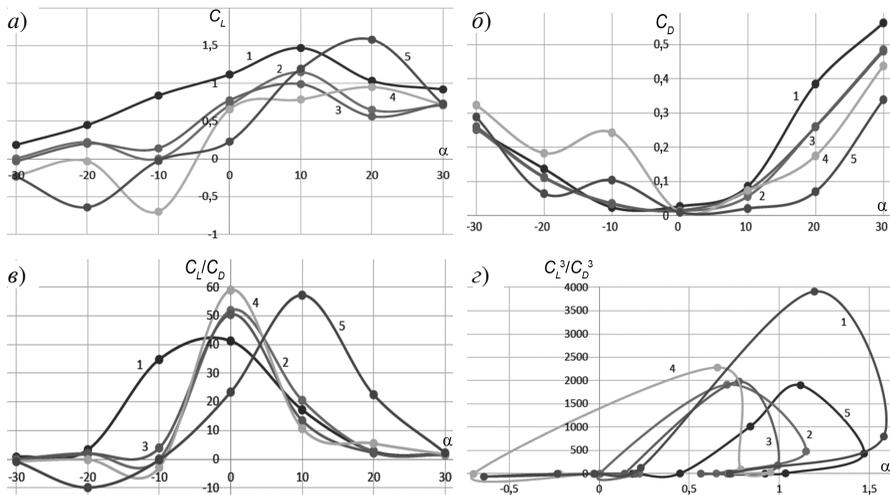


Рисунок 9 – Зависимости $C_L(\alpha)$ (а), $C_D(\alpha)$ (б), $C_L/C_D(\alpha)$ (в), $C_L^3/C_D^3(\alpha)$ (г) для бионических форм 1–5 (рисунок 5, а)

При малых углах атаки коэффициент трения достигает минимальных значений благодаря практически безотрывному обтеканию (рисунок 9, б), однако некоторых из форм имеют высокие сопротивления при отрицательных углах атаки (погружение в воду), например, форма 4 на рисунке 9, б. Из рисунков 9, а, б видно, что в случае формы 5 подъемная сила высока при очень малом трении практически при всех углах атаки. Зависимость $C_L/C_D(\alpha)$ подтверждает, что форма 5 обладает лучшими аэродинамическими характеристиками из всех приведенных, в том числе формы 2, которая была использована для оптимизации крыла НАСА0018 в [17]. Форма 1 имеет наилучшее аэродинамическое качество, наряду с формой 1 (рисунок 9, г) за счет большой подъемной силы при $\alpha < 0^\circ$ (рисунок 9, а) и высоких отношений C_L/C_D при $-20^\circ < \alpha < 20^\circ$.

Для использования приведенных бионических форм в воздушных судах необходимо провести расчеты с использованием воздуха вместо воды.

Выводы. Бионические формы тел и отдельных локомоторных органов животных успешно используются в технических средствах передвижения и позволяют обеспечить низкое трение при обтекании корпуса, значительные подъемные силы, повышенную устойчивость и маневренность, низкую шумогенерацию и расход топлива. CFD расчеты с использованием метода конечных элементов позволяют рассчитывать как параметры потока, так и напряжения в самом корпусе и интегральные силы (подъемную, трения, опрокидывающий момент), действующие на него. Однако из-за трудоемкости построения детальной геометрии и сетки удается провести лишь локальную оптимизацию, сравнить выбранные бионические формы и выбрать лучшие в соответствии с поставленными критериями.

Сопоставление аэродинамических характеристик показало, что некоторые формы имеют улучшенную плавучесть (ненулевая подъемная сила при $\alpha = 0$). Большинство форм имеют идеальную обтекаемость, когда линии тока повторяют форму тела и разделение потока происходит лишь в малой области вблизи хвоста. Там же начинается турбулизация ламинарного пристенного слоя. При ненулевых углах атаки образуются области вторичных циркуляций, особенно в хвостовой части. При углах $|\alpha| \geq 15^\circ$ образуется цепочка вихрей, протяженность которой растет с увеличением угла атаки. Выявлены бионические формы, которые лучше по своим аэродинамическим характеристикам, чем форма афалины (Bottlenose dolphin), которая была предложена ранее для улучшения характеристик стандартного крылового профиля NASA0018.

Для последующего использования в авто-, самолето- и судостроении целесообразно составление аэродинамического атласа бионических 2D и 3D профилей, соответствующих разным типам животных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Skinner, S. N. State-of-the-art in aerodynamic shape optimisation methods / S. N. Skinner, H. Zare-Behtash // *Applied Soft Computing*. – 2018. – Vol. 62. – P. 933–962.
- 2 Bionic shape design of electric locomotive and aerodynamic drag reduction / W. Zhenfeng [et al.] // *Archives of Transport*. – 2018. – Vol. 48, no. 4. – P. 99–109.
- 3 Романенко, Е. В. Гидродинамика дельфинов, рыб и ластоногих / Е. В. Романенко, С. Г. Пушков // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. – 2008. – № 2. – С. 13–28.
- 4 Carpenter, P. W. Hydrodynamics of dolphin skin and other compliant surfaces / P. W. Carpenter // *WIT Transactions on State of the Art in Science and Engineering*. – 2006. – Vol. 4. – P. 447–456.
- 5 Hamadiche, M. Suppression of absolute instabilities in the flow inside a compliant tube / M. Hamadiche, N. Kizilova, M. Gad-el-Hak // *Communications in Numerical Methods in Engineering*. – 2009. – Vol. 25, no. 5. – P. 505–531.
- 6 Kizilova, N. Flow in compliant tubes: control and stabilization by multilayered coatings / N. Kizilova, M. Hamadiche, M. Gad-el-Hak // *International Journal of Flow Control*. – 2009. – Vol. 1, no. 3. – P. 199–211.
- 7 Kizilova, N. Flow stabilization in compliant ducts: from nature-made to human-made / N. Kizilova, M. Hamadiche, M. Gad-el-Hak // *International Journal of Numerical Methods and Applications*. – 2011. – Vol. 6, no. 1. – P. 1–86.

8 **Vasudev, K. L.** Multi-objective shape optimization of submarine hull using genetic algorithm integrated with computational fluid dynamics / K. L. Vasudev, R. Sharma, S. K. Bhattacharyya // *Journal of Engineering for the Maritime Environment*. – 2019. – Vol. 233, no. 1. – P. 55–66.

9 **Khalin, A.** Performance comparison of different aerodynamic shapes for autonomous underwater vehicles / A. Khalin, N. Kizilova // *Archives of Mechanical Engineering*. – 2019. – Vol. 66, no. 2. – P. 171–189.

10 Effects of body plan evolution on the hydrodynamic drag and energy requirements of swimming in ichthyosaurs / S. Gutarra [et al.] // *Proceedings of the Royal Society London. Ser. B*. – 2019. – Vol. 286. – Paper 20182786. – 9 p.

11 **Bejan, A.** Constructing Animal Locomotion from New Thermodynamics Theory / A. Bejan, J. H. Marden // *American Scientist*. – 2006. – Vol. 94, no. 4. – P. 342–349.

12 **Muratoglu, A.** Hydrodynamic analysis of shark body hydrofoil using CFD methods / A. Muratoglu // *International Journal of Engineering Research and Development*. – 2019. – Vol. 11, no. 1. – P. 226–238.

13 The study of drag reduction on ships inspired by simplified shark skin imitation / M. D. Ibrahim [et al.] // *Applied Bionics and Biomechanics*. – 2018. – Vol. 2018. – Article 7854321. – 11 p.

14 **Tetsuya, H.** Annoyance due to railway noise before and after the opening of the Kyushu Shinkansen Line / H. Tetsuya, T. Yano, Y. Murakami // *Applied Acoustics*. – 2017. – Vol. 115, no. 1. – P. 173–180.

15 Boxfish swimming paradox resolved: forces by the flow of water around the body promote manoeuvrability / S. Van Wassenbergh [et al.] // *Journal of the Royal Society Interface*. – 2015. – Vol. 12, no. 103. – Article 20141146. – 11 p.

16 *Bionic Optimization in Structural Design* / Rolf Steinbuch, Simon Gekeler (Eds). – Berlin : Springer, 2016. – 251 p.

17 **Huang, S.** Research on aerodynamic performance of a novel dolphin head-shaped bionic airfoil / S. Huang, Y. Hu, Y. Wang // *Energy*. – 2021. – Vol. 214, no. 1. – Article 118179. – 15 p.

18 **Menter, F. R.** Zonal Two Equation $k-\omega$ Turbulence Models for Aerodynamic Flows / F. R. Menter // 23rd Fluid Dynamics, Plasmadynamics, and Lasers Conference, 6–9 July 1993, Orlando, FL, U.S.A. – 1993. – AIAA Paper 93-2906. – 21 p.

V. V. DURSHLAK, N. N. KIZILOVA, O. A. KORYAKINA, A. I. KHALIN, N. I. SHYSHOV
V. N. Karazin Kharkov National University, Kharkov, Ukraine

ASSESSMENT OF AERODYNAMIC PROPERTIES OF BIONIC FORMS

In recent years, bionic design, based on the shape of bodies and separate elements of flying and aquatic animals, is used in aviation and shipbuilding from small drones to super-heavy vehicles. The paper provides a brief overview of the most interesting recent technical solutions and analyzes the principles of high efficiency of swimming and flight in nature. Using the finite element method, a comparative analysis of the hydromechanical parameters of some fish species was carried out and their aerodynamic characteristics were calculated. There are proposed the modifications of the existing aerodynamic profiles, which will help to improve their aerodynamic quality.

Keywords: aeromechanics, lifting force, coefficient of friction, bionics.

Получено 29.11.2021