



Научная статья / Original Article

УДК 533.692

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=188108>

EDN: <https://www.elibrary.ru/QHFXA0>

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЛАКОИДНОЙ ЧЕШУИ НА АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОФИЛЯ

**А.В. Якимова** ✉

Акционерное общество «НЦВ Миль и Камов», г. о. Люберцы, Московская обл., Россия

✉ [nordwind056@gmail.com](mailto:nordwind056@gmail.com)

---

**Цитирование:** Якимова А.В. Численное моделирование влияния плакоидной чешуи на аэродинамические характеристики профиля // Труды МАИ: электрон. журнал. № 147. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=188108>

---

**Аннотация.** Наблюдение за приспособлением животных к условиям окружающей среды может послужить основой для новых открытий и изобретений. В данной работе при помощи программного комплекса ANSYS CFX было проведено исследование двух типов аэродинамических профилей с различным закреплением плакоидных чешуек, характерных для акул и скатов. Рассматривались положения чешуек в области задней кромки профиля. Подобное расположение имеют чешуеобразные структуры, недавно обнаруженные на плавниках ископаемых морских рептилий. Сравнение полученных аэродинамических характеристик «модифицированных» профилей с обычными при различных скоростях набегающего потока и углах атаки дало перспективные результаты. Был сделан вывод о преимуществах и недостатках использования чешуек на аэродинамическом профиле, и намечена возможная область применения подобных структур на летательных аппаратах.

**Ключевые слова:** численное моделирование; аэродинамические характеристики профиля; плакоидная чешуя; чешуя акулы.

---

# NUMERICAL SIMULATION OF THE EFFECT OF PLACOIDE SCALES ON THE AERODYNAMIC CHARACTERISTICS OF A PROFILE

A.V. Yakimova ✉

Joint-Stock Company National Helicopter Center Mil&Kamov,  
Lyubertsy, Moscow Region, Russia

✉ [nordwind056@gmail.com](mailto:nordwind056@gmail.com)

---

**Citation:** Yakimova A.V. Numerical simulation of the effect of placoide scales on the aerodynamic characteristics of a profile // Trudy MAI. 2026. No. 147. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=188108>

---

**Abstract.** Observing how animals adapt to their environmental conditions can serve as a foundation for new discoveries and inventions. In this study, a computational analysis of two types of aerodynamic profiles with different arrangements of placoid scales — characteristic of sharks and rays — was conducted using the ANSYS CFX software package. The focus was on the positioning of scales in the region of the profile’s trailing edge. This arrangement mirrors scale-like structures recently discovered on the fins of fossil marine reptiles. A comparison of the aerodynamic characteristics of the “modified” profiles (featuring scales) against conventional profiles was carried out across various freestream velocities and angles of attack. The results proved promising, revealing notable differences in performance. Based on the findings, the advantages and disadvantages of incorporating placoid-scale structures into aerodynamic profiles were identified. Furthermore, a potential application area for such bio-inspired structures on aircraft and other flying vehicles was outlined.

**Keywords:** numerical simulation; aerodynamic characteristics of a profile; placoide scales; shark skin.

---

## Введение

За миллионы лет эволюции живые существа выработали самые разнообразные приспособления для обеспечения мобильности в различных средах. Характер передвижения пингвинов по снегу и прыжки кенгуру вдохновили

инженеров на создание вездеходных машин [1]. Особенности структуры и свойства плакоидных чешуек, характерных для акул и скатов, издавна привлекали внимание учёных и инженеров. Существует большое количество работ, посвященных как изучению эффекта «акульей кожи» [2,3], так и созданию полноразмерных покрытий, имитирующих чешую акулы [4-8]. При исследовании расположения чешуек на искусственном покрытии в работе [9] было установлено, что самые высокие скорости плавания обеспечило расположение чешуек в шахматном порядке с перекрытием. Группа учёных из Гарвардского университета в статье [10] обнаружила, что чешуйки акулы-мако, установленные на передней части аэродинамического профиля, при малых скоростях набегающего потока дают большой прирост в аэродинамическом качестве. Отдельно можно выделить работы, где сложная для моделирования чешуя акулы заменяется оребрёнными поверхностями, снижающими лобовое сопротивление [11-13]. Что делает плакоидную чешую столь интересной для проведения различных форм исследований? Всё дело в так называемом эффекте «акульей кожи», который позволяет снизить гидравлическое сопротивление поверхности. В рассмотренных статьях нет единого мнения о причинах появления данного эффекта в пограничной области. Возможно, важную роль играют вихри, образующиеся на поверхностях чешуек. Упрощенные модели плакоидной чешуи планируют использовать в гидравлических турбинах, судостроении [14] и авиастроении. Подробный обзор иностранной литературы по данной тематике представлен в работе [15].

В данной статье проводилось численное моделирование двух аэродинамических профилей с плакоидной чешуёй. Для исследования выбрана не изученная ранее задняя часть профиля, такой выбор был вдохновлён особенностями строения плавников древних морских рептилий – плезиозавров [16].

## Используемые модели

Исследование проводилось на моделях профилей NASA23010 и NASA23012 (рисунки 1 и 2). Характеристики моделей представлены в таблице 1.

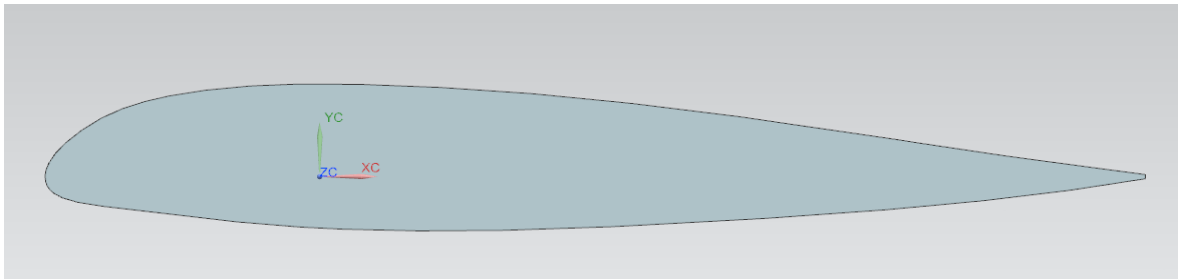


Рисунок 1 - Профиль NASA23010

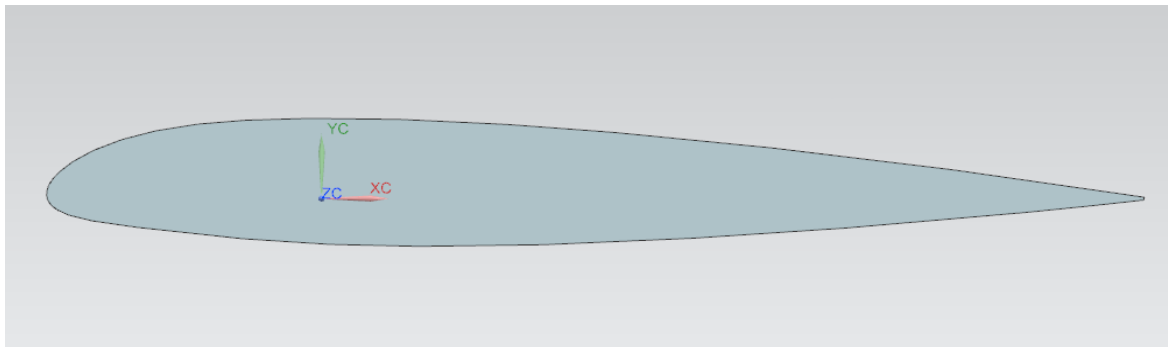


Рисунок 2 - Профиль NASA23012

Таблица 1

Характеристики моделей профилей

Тип профиля	Хорда, м	Ширина, м
NASA23010	0,2	0,2
NASA23012	0,52	0,2

На обоих профилях были установлены идентичные упрощённые модели чешуи акулы в три ряда в шахматном порядке (рисунки 3 и 4). Характеристики моделей чешуек представлены в таблице 2.

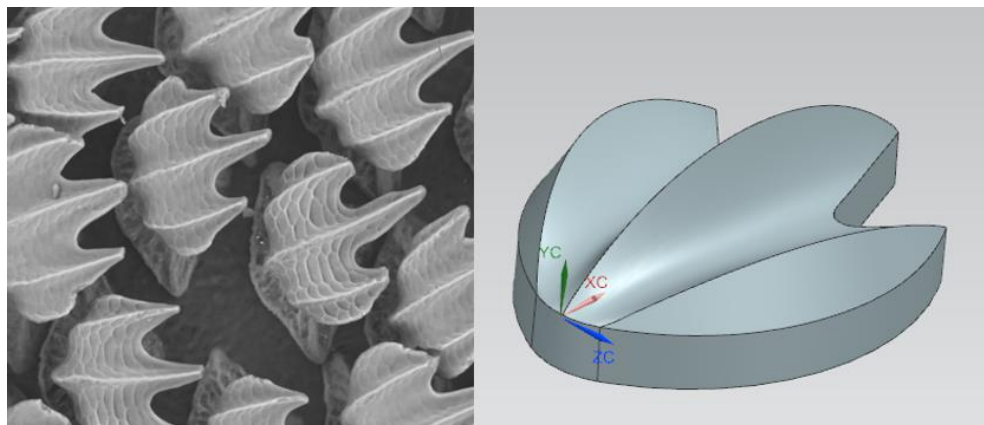


Рисунок 3 - Чешуя акулы (слева) и созданная модель (справа)

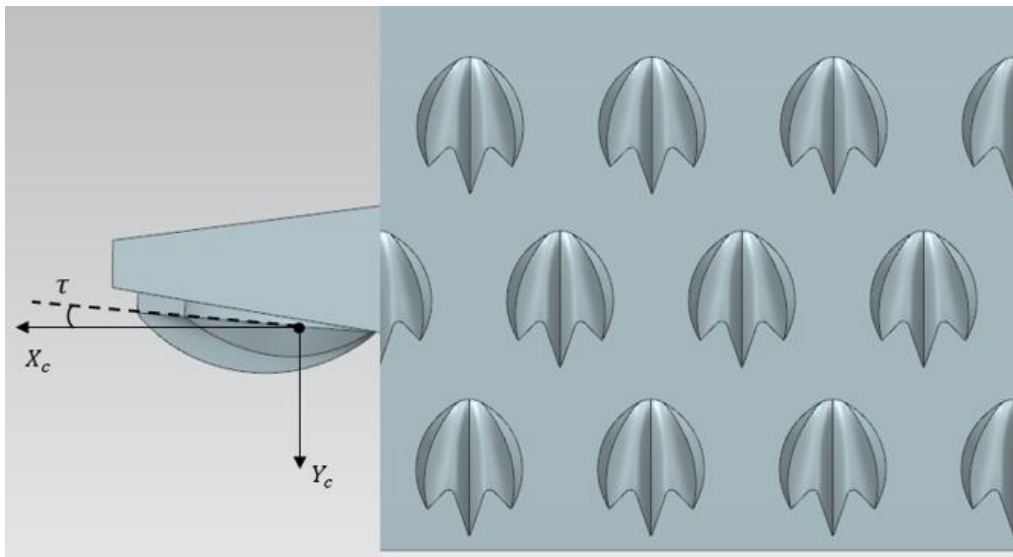


Рисунок 4 - Оси чешуйки на нижней поверхности профиля (слева). Общий вид чешуек на профиле (справа)

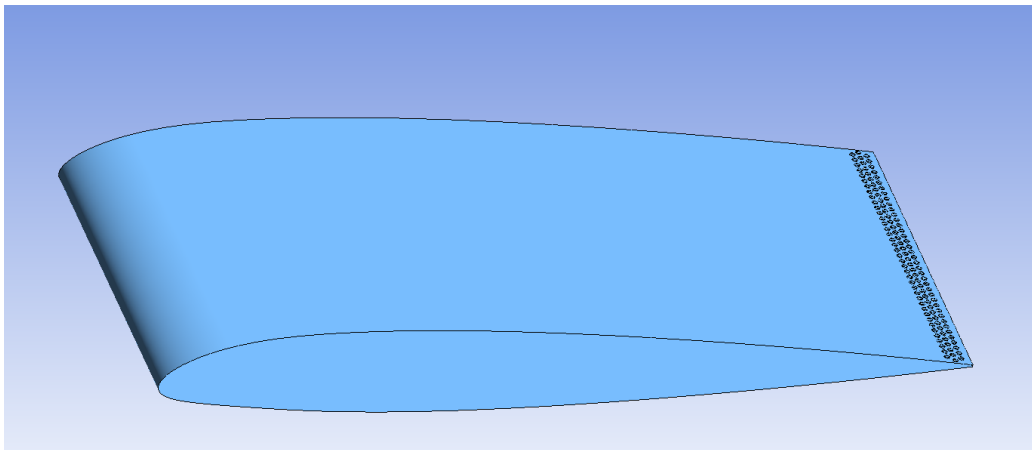


Рисунок 5 - Профиль NACA23012 с чешуйками на верхней поверхности

Таблица 2

Характеристики модели чешуйки

Длина	4 мм
Максимальная ширина	3 мм
Число чешуек на профиле	118
Шаг между соседними чешуйками	5 мм
Наклон относительно горизонтальной оси чешуйки, $\tau$	$\pm 5^\circ$

## Особенности расчетов

Расчеты производились с использованием следующих формул:

$$q = \frac{\rho \cdot V^2}{2} - \text{скоростной напор, Н/м}^2;$$

Где  $\rho = 1,225 \text{ кг/м}^3$  – плотность воздуха;  $V$  – скорость набегающего потока, м/с.

$$C_x = \frac{X}{q \cdot S} - \text{коэффициент силы сопротивления};$$

$$C_y = \frac{Y}{q \cdot S} - \text{коэффициент подъёмной силы};$$

Где  $X$  – сила сопротивления, Н;  $Y$  – подъёмная сила, Н;  $S$  – характерная площадь профиля,  $\text{м}^2$ .

Силы, действующие на профиль в скоростной системе координат, найдены с помощью уравнений:

$$X_a = X \cdot \cos \alpha + Y \cdot \sin \alpha ; Y_a = Y \cdot \cos \alpha - X \cdot \sin \alpha ;$$

Где  $\alpha$  – угол атаки, град.

Отсюда коэффициенты силы сопротивления и подъёмной силы в скоростной системе координат равняются, соответственно:

$$C_{xa} = \frac{X_a}{q \cdot S} \text{ и } C_{ya} = \frac{Y_a}{q \cdot S};$$

$$K = \frac{C_{ya}}{C_{xa}} - \text{аэродинамическое качество профиля.}$$

Расчеты проводились для квазидвухмерной задачи в программном комплексе ANSYS CFX на высоте 0 м в условиях стандартной атмосферы. Был применён метод, основанный на решении осреднённых по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (RANS) [17, 18]. В качестве модели турбулентности использовалась модель  $k-\omega$  SST (Shear Stress Transport). Для получения более точных результатов границы расчетной области находились на значительном расстоянии от профиля. Расчетная сетка была создана в ANSYS Fluent (рисунки 6 и 7).

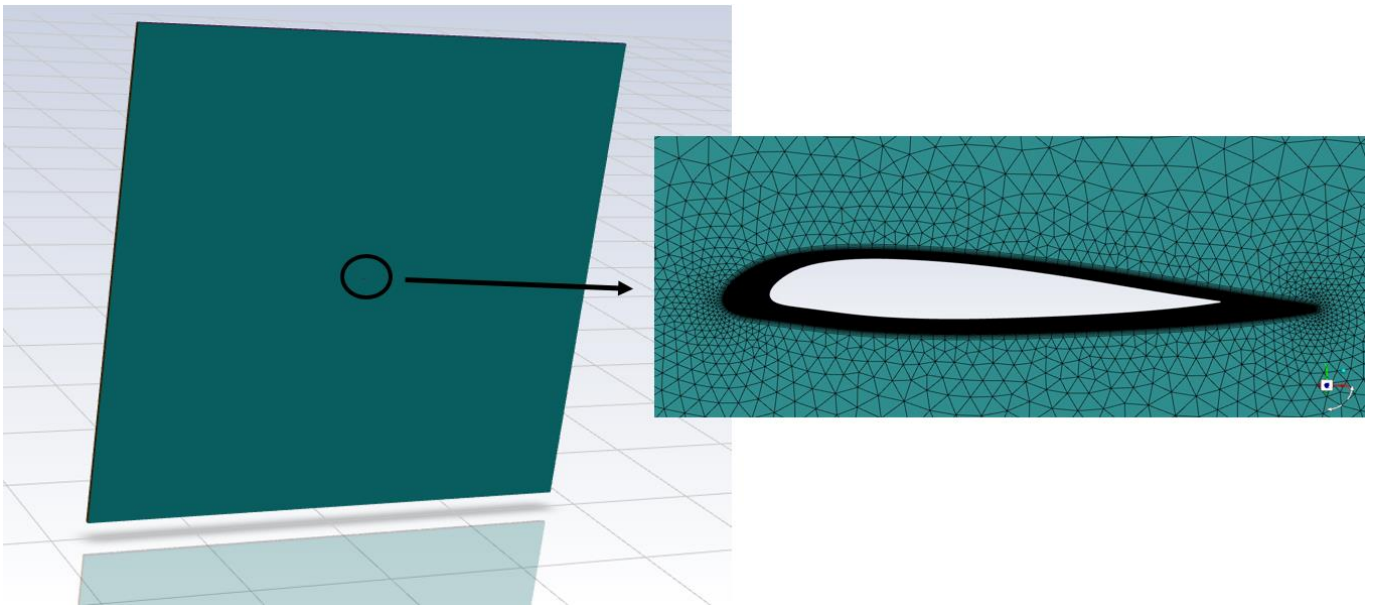


Рисунок 6 - Расчетная область и поверхностная сетка в ANSYS Fluent

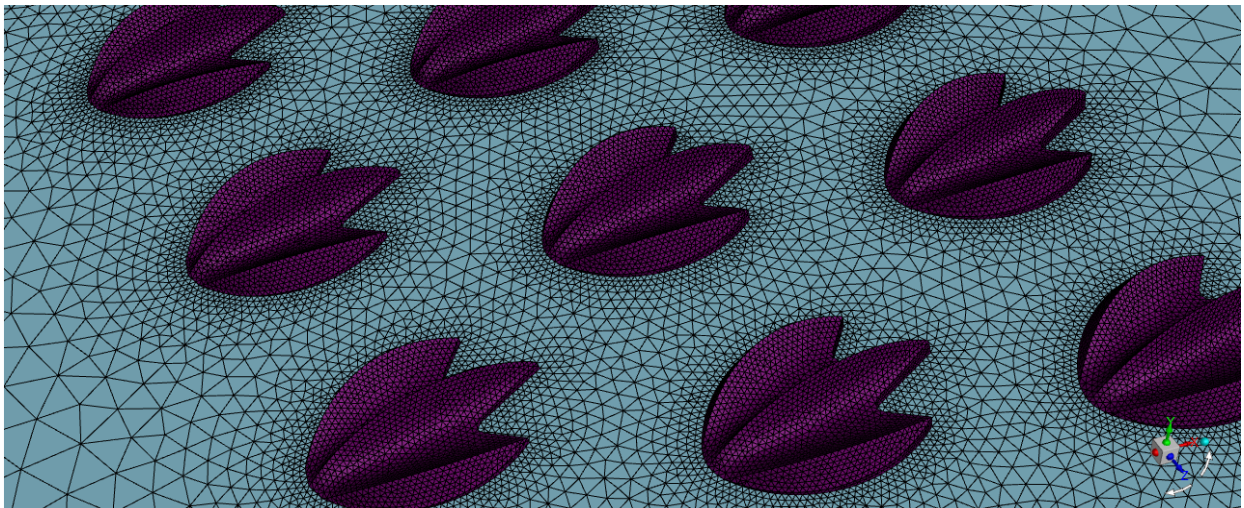


Рисунок 7 - Поверхностная сетка в области чешуек в ANSYS Fluent

Значение пристеночной функции  $y^+$  на поверхности профиля получилось порядка единицы, это является показателем удовлетворительного качества использованной сетки для низкорейнольдсовых моделей турбулентности [19].

Характеристики расчетных сеток для моделей профилей представлены в таблице 3. Из-за малых размеров чешуек ячейки сетки были сильно уменьшены, что привело к возрастанию общего числа элементов сетки в пять и более раз.

## Характеристики расчетных сеток

Тип профиля	NACA23010	NACA23012
Размер расчётной области	20 x 20 м	50 x 50 м
Общее число элементов сетки:		
Обычный профиль	2 млн	4,4 млн
Чешуйки на задней части профиля		
Верхняя поверхность (Тип 1)	-	24,3 млн
Нижняя поверхность (Тип 2)	48,3 млн	24,8 млн

## Валидация и верификация

Один из расчетов профиля NACA23012 проходил при  $M = 0,3$  и  $Re = 3,5 \cdot 10^6$ . На рисунке 8 представлено сравнение рассчитанных коэффициентов сил, действующих на профиль NACA23012, с экспериментом [20]. Как видно из графиков, полученные значения коэффициента подъемной силы согласуются с результатами эксперимента, однако значения коэффициента силы сопротивления получились немного выше экспериментальных данных.

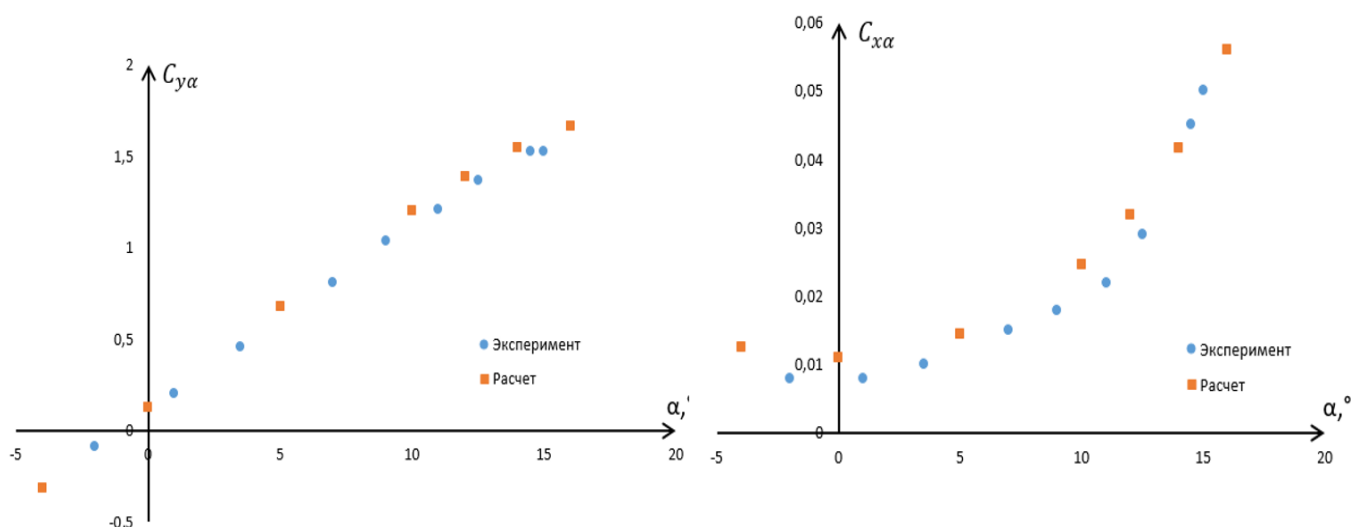


Рисунок 8 - Зависимости коэффициентов подъемной силы и силы сопротивления от угла атаки профиля NACA23012

Для профиля NACA23010 были построены поверхности  $Q = const$  (рисунок 9), представляющие собой критерии независимой верификации. Они позволяют анализировать полученное решение на предмет точности [21]. На рисунке можно увидеть вихревые структуры, сходящие с поверхностями чешуек. Схожие структуры

были продемонстрированы в эксперименте с оребрёнными поверхностями в статье [12].

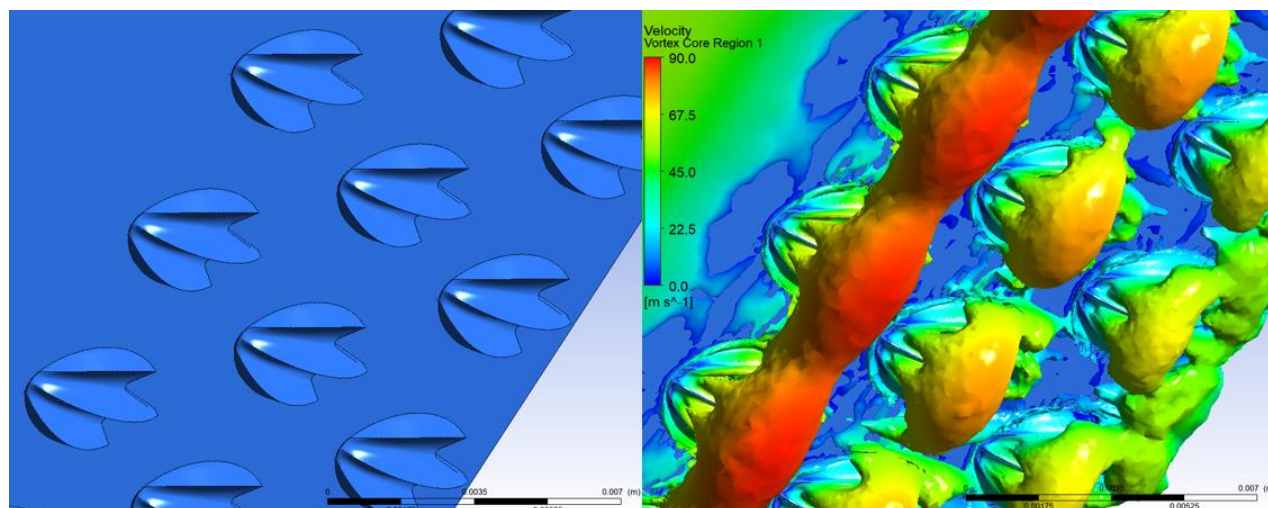


Рисунок 9 - Общий вид чешуек на нижней поверхности профиля NASA23010 (слева).  
Распределение скорости на поверхностях  $Q = 0,001 = const$  (справа)

### Результаты моделирования профиля NASA23010

В результате расчетов у профилей были определены коэффициенты подъёмной силы и силы сопротивления, а также аэродинамическое качество. Профиль, не имеющий чешуек, обозначен как «обычный». Вначале представлены расчеты для профиля NASA23010.

Сравнение характеристик профиля NASA23010 с чешуйками на нижней поверхности профиля (Тип 2) и обычного профиля при  $\alpha = 0^\circ$  и различных скоростях набегающего потока (Таблицы 4 и 5).

Таблица 4

Результаты моделирования обычного профиля NASA23010

Скорость (м/с)	$C_x$	$C_y$	$K$
40	0,0151	0,0999	6,6
70	0,0139	0,0995	7,2
100	0,0133	0,1015	7,7
150	0,0129	0,1096	8,5
200	0,0133	0,1279	9,6
250	0,0240	0,1731	7,2

## Результаты моделирования профиля NACA23010 с чешуйками Тип 2

Скорость (м/с)	$C_x$	$C_y$	$K$
40	0,0154	0,1293	8,4
70	0,0142	0,1285	9,0
100	0,0136	0,1301	9,6
150	0,0132	0,1396	10,5
200	0,0137	0,1636	12,0
250	0,0261	0,2261	8,7

Как видно из таблиц, профиль с чешуйками имеет повышенное сопротивление по сравнению с обычным профилем, что может быть связано с повышением давления перед чешуйками (Рисунок 10). За счет этого также наблюдается рост подъемной силы.

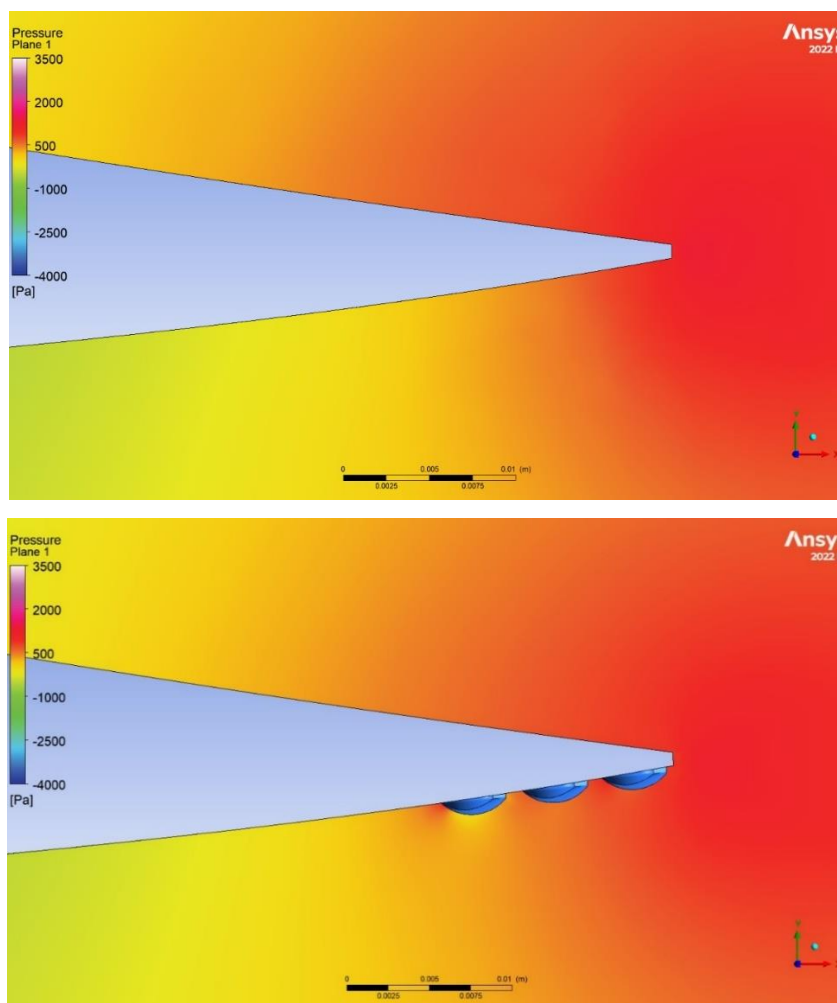


Рисунок 10 - Распределение давления на задней части профиля NACA23010. Обычный профиль (сверху) и профиль с чешуйками (снизу)

Сравнение аэродинамических характеристик обычного профиля и профиля с чешуйками при  $V = 100 \text{ м/с}$  и различных углах атаки (таблицы 6 и 7).

Таблица 6

Результаты моделирования обычного профиля NASA23010 при  $V = 100 \text{ м/с}$

$\alpha, ^\circ$	$C_x$	$C_{xa}$	$C_y$	$C_{ya}$	$K$
-10	-0,0522	0,0858	-0,7898	-0,7869	-9,2
-7	-0,0590	0,0203	-0,6470	-0,6494	-32,0
-4	-0,0091	0,0151	-0,3469	-0,3467	-23,0
-2	0,0091	0,0136	-0,1289	-0,1285	-9,4
0	0,0133	0,0133	0,0956	0,0956	7,2
7	-0,0868	0,0192	0,8647	0,8688	45,3
11	-0,2128	0,0295	1,2494	1,2670	42,9
13	-0,2839	0,0383	1,4001	1,4281	37,3

Таблица 7

Результаты моделирования профиля NASA23010 с чешуйками при  $V = 100 \text{ м/с}$

$\alpha, ^\circ$	$C_x$	$C_{xa}$	$C_y$	$C_{ya}$	$K$
-10	-0,0589	0,0636	-0,7006	-0,7002	-11,0
-7	-0,0505	0,0242	-0,6093	-0,6109	-25,3
-4	-0,0052	0,0166	-0,3126	-0,3124	-18,8
-2	0,0112	0,0146	-0,0966	-0,0961	-6,6
0	0,0140	0,0140	0,1257	0,1257	9,0
7	-0,0882	0,0202	0,8843	0,8885	43,9
11	-0,2079	0,0317	1,2358	1,2528	39,5
13	-0,2719	0,0420	1,3646	1,3908	33,1

Построенные поляры профилей представлены на рисунке 11. При одинаковом значении подъёмной силы профилей, профиль с чешуйками имеет большее сопротивление. Установка чешуек на профиль NASA23010 ухудшило его аэродинамические характеристики. Это может быть связано с неудачно выбранным размером самих чешуек.

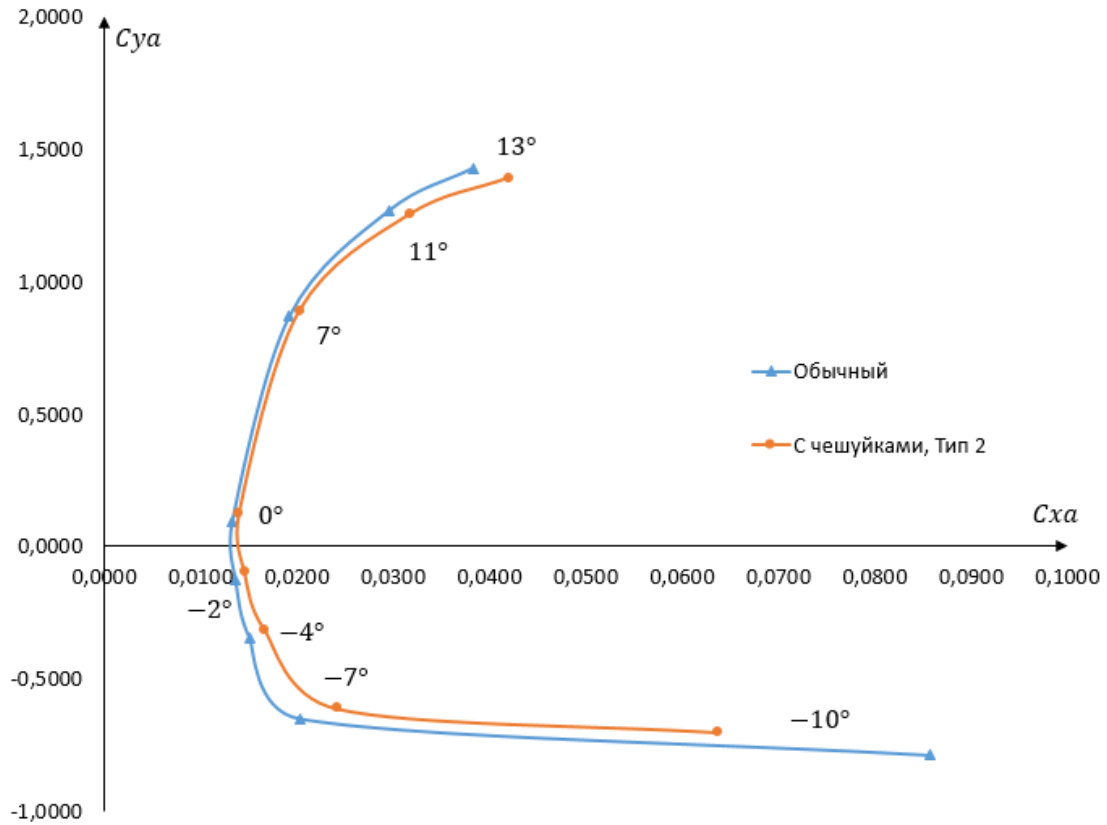


Рисунок 11 - Поляры профиля NASA23010

### Результаты моделирования профиля NASA23012

Характеристики профиля NASA23012 с различным расположением чешуек при  $V = 100 \text{ м/с}$  и  $\alpha = 0^\circ$  (таблица 8).

Таблица 8

Результаты моделирования профиля NASA23012

Наименование	$C_x$	$C_y$	$K$
Обычный	0,0111	0,1286	11,6
Тип 1	0,0109	0,1252	11,4
Тип 2	0,0110	0,1323	12,0

Расположение чешуек на верхней поверхности профиля в задней его части (Тип 1) дало уменьшение сопротивления. На рисунке 12 представлены пространственные линии тока, выпущенные с поверхности чешуек. Они демонстрируют наличие зон отрыва на моделях.

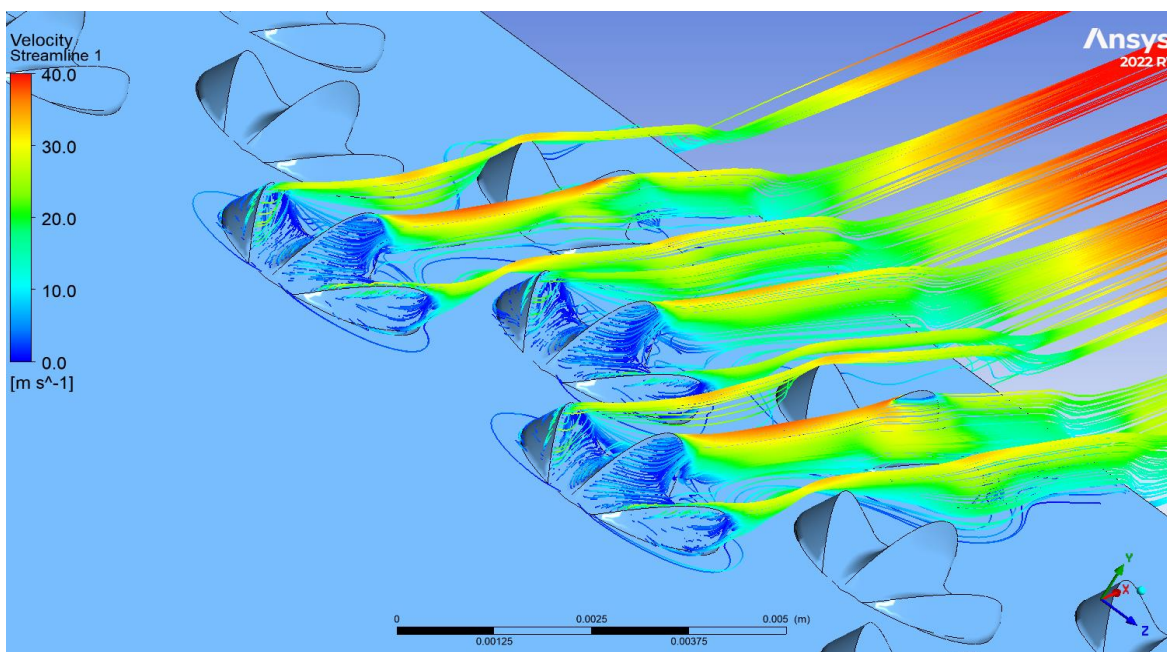


Рисунок 12 - Распределение скоростей на линиях тока, выпущенных с поверхностей трёх чешуек на верхней поверхности профиля NACA23012

Обратим внимание на положение чешуек на задней поверхности профиля (Тип 2), аналогичное рассчитанному ранее на профиле NACA23010. Расчет показал не только уменьшение сопротивления, но и возрастание подъёмной силы в сравнении с обычным профилем. Отсюда можно сделать вывод о необходимости подбора размеров чешуек под конкретный профиль.

Сравнение  $C_x$  обычного профиля и профиля Тип 1 при  $\alpha = 0^\circ$  и различных скоростях набегающего потока (таблица 9).

Таблица 9

Результаты моделирования профиля NACA23012 при различных скоростях набегающего потока

Скорость (м/с)	Обычный	Тип 1	$\Delta C_x$ (%)
10	0,0155	0,0153	1,24
15	0,0145	0,0143	1,07
25	0,0133	0,0132	0,87
30	0,0129	0,0128	0,80
50	0,0120	0,0119	0,77
100	0,0111	0,0109	0,81
150	0,0109	0,0108	0,95
170	0,0110	0,0109	1,04

Как можно увидеть из графика на рисунке 13, при малых скоростях набегающего потока профиль с чешуйками имеет наименьшее сопротивление. На больших скоростях разница  $\Delta C_x$  сначала падает, потом плавно начинает расти.

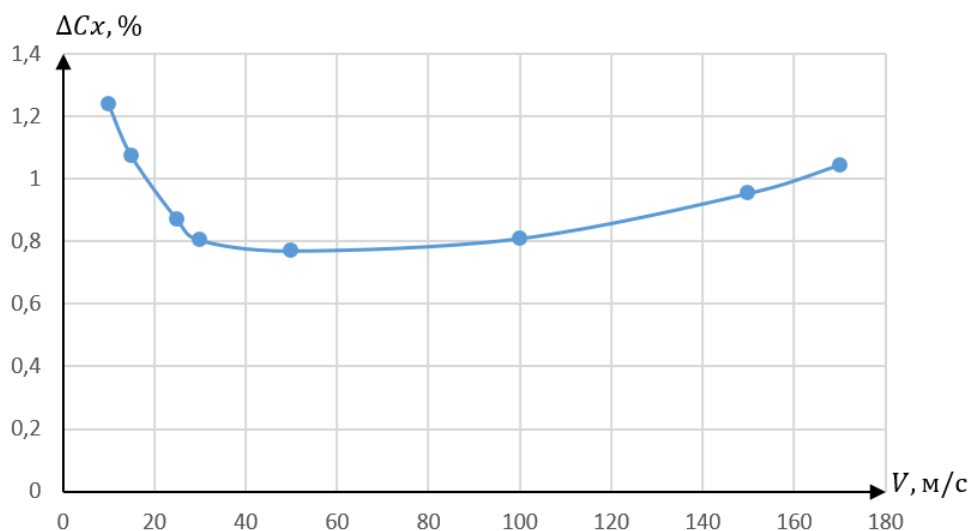


Рисунок 13 - График зависимости значений  $\Delta C_x$  от скорости набегающего потока

Сравнение аэродинамических характеристик обычного профиля и профиля с чешуйками при  $V = 100 \text{ м/с}$  и различных углах атаки (Таблицы 10 и 11).

Таблица 10

Результаты моделирования обычного профиля NACA23012 при  $V = 100 \text{ м/с}$

$\alpha, ^\circ$	$C_x$	$C_{xa}$	$C_y$	$C_{ya}$	$K$
-4	-0,0095	0,0125	-0,3151	-0,3149	-25,2
0	0,0111	0,0111	0,1286	0,1286	11,6
10	-0,1842	0,0247	1,1871	1,2011	48,6
12	-0,2573	0,0318	1,3633	1,3870	43,6
14	-0,3337	0,0417	1,5111	1,5469	37,1
16	-0,4043	0,0561	1,6133	1,6622	29,6

Таблица 11

Результаты моделирования профиля NACA23012 с чешуйками при  $V = 100 \text{ м/с}$

$\alpha, ^\circ$	$C_x$	$C_{xa}$	$C_y$	$C_{ya}$	$K$
-4	-0,0099	0,0124	-0,3192	-0,3191	-25,7
0	0,0109	0,0109	0,1252	0,1252	11,4
10	-0,1837	0,0245	1,1831	1,1970	48,9
12	-0,2558	0,0317	1,3556	1,3791	43,5
14	-0,3308	0,0416	1,4988	1,5343	36,9
16	-0,3998	0,0560	1,5974	1,6457	29,4

На рисунке 14 представлены поляры профиля NASA23012. Поляра профиля с чешуйками находится левее поляры обычного профиля до углов атаки более 10 градусов благодаря пониженному сопротивлению. При этом коэффициент подъёмной силы у такого профиля на всех углах атаки остаётся ниже, чем у профиля без чешуек. Для построения более подробного графика требуется провести ещё несколько расчетов.

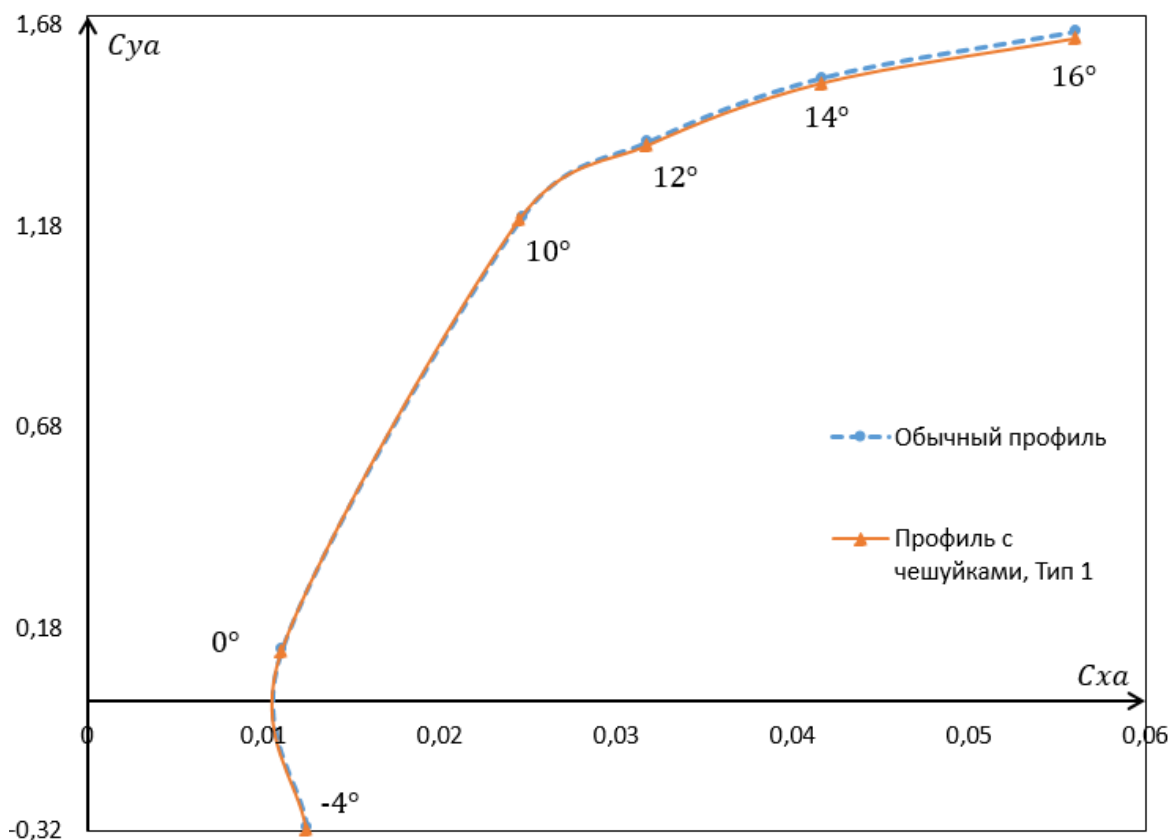


Рисунок 14 - Поляры профиля NASA23012

### Заключение

Автором статьи отработана методика моделирования аэродинамических профилей с плакоидной чешуёй в программном комплексе ANSYS CFX. Определены аэродинамические характеристики профилей при различных скоростях набегающего потока и углах атаки.

В данной работе рассматривался только один вариант установки чешуек на профиле - в три ряда в шахматном порядке. Проведение дальнейших расчетов позволит подобрать под каждый профиль оптимальное положение и размер чешуек, дающие более высокие результаты.

Ввиду большого количества элементов расчетных сеток, расчет профилей с чешуйками оказался ресурсоёмкой задачей. Для проверки точности используемых методов расчета, необходимо провести несколько экспериментов в аэродинамической трубе.

Из-за ограниченной вычислительной мощности, чешуйки были расположены на небольшой части профиля и дали уменьшение сопротивления в среднем на 1%. При увеличении количества чешуек на профиле, можно будет уменьшить сопротивление на 10% и более. Акульи чешуйки можно использовать для снижения сопротивления различных частей летательных аппаратов.

---

### **Конфликт интересов**

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

### **Conflict of interest**

The author declares no conflict of interest.

### **Список источников**

1. Литинецкий И. Б., Беседы о бионике – М.: Наука, 1968, С. 18 – 20.
2. Afroz F. et al. Experimental study of laminar and turbulent boundary layer separation control of shark skin // *Bioinspiration & biomimetics* 12.1 (2016): 016009 DOI:10.1088/1748-3190/12/1/016009
3. Lang A. W. et al. Bristled shark skin: a microgeometry for boundary layer control? // *Bioinspiration & biomimetics*. Vol (3) 2008, P. 046005, DOI:10.1088/1748-3182/3/4/046005
4. Dai, W., Alkahtani M. et al. Drag-reduction of 3D printed shark-skin-like surfaces // *Friction* 7, P. 603–612 (2019). URL: <https://doi.org/10.1007/s40544-018-0246-2>
5. Gabler-Smith, Molly K., and George V. Lauder Ridges and riblets: Shark skin surfaces versus biomimetic models // *Frontiers in Marine Science* 9 (2022): 975062.
6. Han X., Zhang D. Study on the micro-replication of shark skin // *Sci. China Ser. E-Technol. Sci.* 51, P. 890–896 (2008). URL: <https://doi.org/10.1007/s11431-008-0080-2>
7. Jo W., Kang H. S., Choi J. et al Light-Designed Shark Skin-Mimetic Surfaces // *Nano Lett.* 2021. Vol. 21 (13). P. 5500 – 5507. DOI: 10.1021/acs.nanolett.1c00436

8. Lu Y., Hua M., Liu Z. The Biomimetic Shark Skin Optimization Design Method for Improving Lubrication Effect of Engineering Surface // Journal of Tribology. 2014 Vol. 136 (3). P. 0317031–3170313. DOI: 10.1115/1.4026972.

9. Wen L., Weaver J. C., Lauder G. V. Biomimetic shark skin: design, fabrication and hydrodynamic function // The Journal of Experimental Biology. 2014. Vol. 217. P. 1656–1666. DOI: 10.1242/jeb.097097.

10. Domel A. G., Saadat M., Weaver J. C., Haj-Hariri H., Bertoldi K., Lauder G. V. Shark skin-inspired designs that improve aerodynamic performance // J. R. Soc. Interface. DOI: [10.1098/rsif.2017.0828](https://doi.org/10.1098/rsif.2017.0828)

11. Bechert D. W., Bruse M., Hage W. Experiments with three-dimensional riblets as an idealized model of shark skin // Experiments in Fluids 28 (2000), P. 403 – 412.

12. Dean B., Bhushan B. Shark-skin surfaces for fluid-drag reduction in turbulent flow: a review // Phil. Trans. R. Soc. A (2010) 368, P. 4775 – 4806. DOI: 10.1098/rsta.2010.0201

13. Lloyd C. J., Peakall J., Burns A. D. et al Hydrodynamic efficiency in sharks: the combined role of riblets and denticles // Bioinspiration & Biomimetics. 2021 Vol. 16 (4). DOI: 10.1088/1748 3190/abf3b1.

14. Ibrahim M. D., Amran S. N. A., Yunos Y. S. et al. The Study of Drag Reduction on Ships Inspired by Simplified Shark Skin Imitation // Applied Bionics and Biomechanics. 2018. 11 p. 7854321. DOI: 10.1155/2018/7854321.

15. Кромм Г. А., Волков А. В., Рыженков А. В., Ляпин В. Ю., Трушин Е. С. К вопросу перспективности применения природоподобных технологий для повышения эффективности лопастных гидромашин // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2023. Т. 7, № 2. С. 58–64. DOI: 10.25206/2588-0373-2023-7-2-58-64.

16. Marx M., Sjövall P., Kear B. P., et al. Skin, scales, and cells in a Jurassic plesiosaur // Current Biology, Vol. 35, p. 1113-1120. DOI: 10.1016/j.cub.2025.01.001

17. Усачов А. Е., Исаев С. А., Сапунов О. А., Сустин С.А. Оптимизация обтекания толстых профилей для повышения их аэродинамических характеристик // Труды МАИ. 2023. № 129. DOI: 10.34759/trd-2023-129-11

18. Брутян М. А., Вышинский В. В., Ляпунов С. В. Основы дозвуковой аэродинамики / Центральный аэрогидродинамический институт им. профессора Н. Е. Жуковского. – М.: Наука, 2021. 269 с.

19. Вышинский В. В., Судаков Г. Г. Применение численных методов в задачах аэродинамического проектирования // Тр. ЦАГИ. Вып. 2673. 2007. 143 с.

20. Миль М. Л., Некрасов А. В., Браверман А. С. и др. Вертолеты. Расчет и проектирование. Том 1. Аэродинамика. – М.: Машиностроение, 1966, 455 с; С. 183.

21. Брутян М. А., Волков А. В., Вышинский В. В. Основы вычислительной аэродинамики / Центральный аэрогидродинамический институт им. профессора Н. Е. Жуковского. – М.: Наука, 2024. 356 с.

### References

1. Litinetsky I. B., Besedy o bionike / Moscow, Nauka Publ., 1968, P. 18 – 20.

2. Afroz F. et al. Experimental study of laminar and turbulent boundary layer separation control of shark skin // Bioinspiration & biomimetics 12.1 (2016): 016009 DOI:10.1088/1748-3190/12/1/016009

3. Lang A. W. et al. Bristled shark skin: a microgeometry for boundary layer control? // Bioinspiration & biomimetics. Vol (3) 2008, P. 046005, DOI:10.1088/1748-3182/3/4/046005

4. Dai, W., Alkahtani M. *et al.* Drag-reduction of 3D printed shark-skin-like surfaces // Friction 7, P. 603–612 (2019). URL: <https://doi.org/10.1007/s40544-018-0246-2>

5. Gabler-Smith, Molly K., and George V. Lauder Ridges and riblets: Shark skin surfaces versus biomimetic models // Frontiers in Marine Science 9 (2022): 975062.

6. Han X., Zhang D. Study on the micro-replication of shark skin // Sci. China Ser. E- Technol. Sci. 51, P. 890–896 (2008). URL: <https://doi.org/10.1007/s11431-008-0080-2>

7. Jo W., Kang H. S., Choi J. et al Light-Designed Shark Skin-Mimetic Surfaces // Nano Lett. 2021. Vol. 21 (13). P. 5500 – 5507. DOI: 10.1021/acs.nanolett.1c00436

8. Lu Y., Hua M., Liu Z. The Biomimetic Shark Skin Optimization Design Method for Improving Lubrication Effect of Engineering Surface // Journal of Tribology. 2014 Vol. 136 (3). P. 0317031–3170313. DOI: 10.1115/1.4026972.

9. Wen L., Weaver J. C., Lauder G. V. Biomimetic shark skin: design, fabrication and hydrodynamic function // *The Journal of Experimental Biology*. 2014. Vol. 217. P. 1656–1666. DOI: 10.1242/jeb.097097.
10. Domel A. G., Saadat M., Weaver J. C., Haj-Hariri H., Bertoldi K., Lauder G. V. Shark skin-inspired designs that improve aerodynamic performance // *J. R. Soc. Interface*. DOI: 10.1098/rsif.2017.0828
11. Bechert D. W., Bruse M., Hage W. Experiments with three-dimensional riblets as an idealized model of shark skin // *Experiments in Fluids* 28 (2000), P. 403 – 412.
12. Dean B., Bhushan B. Shark-skin surfaces for fluid-drag reduction in turbulent flow: a review // *Phil. Trans. R. Soc. A* (2010) 368, P. 4775 – 4806. DOI: 10.1098/rsta.2010.0201
13. Lloyd C. J., Peakall J., Burns A. D. et al Hydrodynamic efficiency in sharks: the combined role of riblets and denticles // *Bioinspiration & Biomimetics*. 2021 Vol. 16 (4). DOI: 10.1088/1748 3190/abf3b1.
14. Ibrahim M. D., Amran S. N. A., Yunos Y. S. et al. The Study of Drag Reduction on Ships Inspired by Simplified Shark Skin Imitation // *Applied Bionics and Biomechanics*. 2018. 11 p. 7854321. DOI: 10.1155/2018/7854321.
15. Kromm G. A., Volkov A. V., Ryzhenkov A. V., Lyapin V. Yu., Trushin E. S. On the potential of using nature-based technologies to improve the efficiency of blade hydro-machines // *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2023. Vol. 7, no. 2. P. 58–64. DOI: 10.25206/2588-0373-2023-7-2-58-64.
16. Marx M., Sjövall P., Kear B. P., et al. Skin, scales, and cells in a Jurassic plesiosaur // *Current Biology*, Vol. 35, p. 1113-1120. DOI: 10.1016/j.cub.2025.01.001
17. Alexandr E. Usachov A. E., Isaev S. A., Sapunov O. A., Sustin S. A. Optimization of the flow around thick airfoils to improve their aerodynamic characteristics, *Trudy MAI*, 2023, no. 129. DOI: 10.34759/trd-2023-129-11
18. Brutyan M. A., Vyshinsky V. V., Lyapunov S. V. *Osnovy dozvukovoy aerodinamiki / Central Aerohydrodynamic Institute, Moscow, Nauka Publ., 2021. 269 p.*
19. Vyshinsky V. V., Sudakov G. G. *Primenenie chislennykh metodov v zadachakh aerodinamicheskogo proektirovaniya // TsAGI Science Journal, Vol 2673. 2007. 143 p.*

20. Mil M. L., Nekrasov A. V., Braverman A. S., et al. Vertolety. Raschet i proektirovanie. Tom 1. Aerodinamika / Moscow, Mashinostroenie Publ., 1966, 455 p; P. 183.

21. Brutyan M. A., Volkov A. V., and Vyshinsky V. V. Osnovy vychislitelnoy aerodinamiki / Central Aerohydrodynamic Institute, Moscow, Nauka Publ., 2024. 356 p.

---

Получено 23 ноября 2025 ● Принято к публикации 09 марта 2026 ● Опубликовано 30 апреля 2026  
Received 23 November 2025 ● Accepted 09 March 2026 ● Published 30 April 2026

---