

УДК 532.5+537.3

Порівняльне дослідження аеродинамічних властивостей тіл іхтіозаврів

В.В. Друшляк, Н.М. Кізілова, О.О. Корякіна, А.А. Халін

- Друшляк Владислав Віталійович** студент, кафедра прикладної математики, Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, пл. Свободи, 4, Харків-22, Україна, 61022; e-mail: vladislav.drushliak@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0003-3937-6139>
- Кізілова Наталія Миколаївна** д.ф.-м.н., професор; професор кафедри прикладної математики, Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, пл. Свободи, 4, Харків-22, Україна, 61022; e-mail: n.kizilova@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-9981-7616>
- Корякіна Ольга Олександрівна** студентка, кафедра прикладної математики, Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, пл. Свободи, 4, Харків-22, Україна, 61022; e-mail: korykina67@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0003-2510-3615>
- Халін Анатолій Андрійович** студент, кафедра прикладної математики, Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, пл. Свободи, 4, Харків-22, Україна, 61022; e-mail: akhalin221x@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-3828-5086>

Досліджується обтікання геометричних форм, які відповідають тілам іхтіозаврів різного еволюційного віку, потоком в'язкої нестисливої рідини. Проведені розрахунки розподілень тиску і швидкості рідини навколо тіл в пакеті прикладних програм AnSys Fluent 2021 R2. Показано, що при деяких кутах нахилу тіла до потоку з'являються вихори, пари вихорів або вихрові доріжки, які приводять до змін зсувних напружень вздовж тіла. Це може використовуватися водними тваринами для контролю швидкості та «кута атаки» при занурюванні або впливанні, а також для рецепції і комунікації між ними. Проведене порівняння гідродинамічних властивостей тіл іхтіозаврів з подібними за розмірами дельфінами і китами. Показано, що в термінах аеродинамічних індексів немає явних розрізень між формами з різним еволюційним віком. Ймовірно, різні підвиди по-різному змінювали особливості плавання, такі як швидкості, кути атаки, проживання у верхніх або нижніх шарах та інші, пристосовуючись до своїх умов проживання. Отримані результати дозволяють краще зрозуміти механізми пристосування і напрямки еволюції водних тварин.

Ключові слова: математичне моделювання, плавання, гідромеханіка, механічні напруження, еволюція

Comparative study of aerodynamic properties of ichthyosaur bodies

- Drushliak Vladyslav** student
V.N. Karazin Kharkov National University, 4 Svobody Sq., Kharkiv, 61022, Ukraine
- Kizilova Nataliya** Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor; Professor of the Department of Applied Mathematics
V.N. Karazin Kharkov National University, 4 Svobody Sq., Kharkiv, 61022, Ukraine
- Koryakina Olga** student
V.N. Karazin Kharkov National University, 4 Svobody Sq., Kharkiv, 61022, Ukraine
- Khalin Anatolii** student
V.N. Karazin Kharkov National University, 4 Svobody Sq., Kharkiv, 61022, Ukraine

The flow of viscous incompressible fluid around the geometric shapes corresponding to the bodies of ichthyosaurs of different evolutionary ages has been studied. The static pressure and flow velocity distributions around the bodies have been computed with the help of AnSys Fluent 2021 R2 software. It is shown that at some 'angles of attack' of the body to the flow there are vortices, pairs of vortices or vortex wakes, which lead to changes in the shear stress distribution along the body, that can be used by aquatic animals for purposes of sensing their environment and communicating. The hydrodynamic properties of the ichthyosaur bodies have been compared with dolphins and whales of a similar size. It is shown that in terms of aerodynamic indices there are no obvious differences between body forms of different evolutionary ages. Different species are most likely to have adapted the specifics of swimming, such as speed, angles of attack, habitation in the upper or lower layers, and others to

their living conditions. The obtained results allow us to understand better the adaptational mechanisms and direction of evolution of aquatic animals.

Keywords: *mathematical modeling, swimming, hydromechanics, mechanical stresses, evolution.*

Сравнительное исследование аэродинамических свойств тел ихтиозавров

Друшляк

Владислав Витальевич

Кизилова

Наталья Николаевна

Корякина

Ольга Александровна

Халин

Анатолий Андреевич

студент,

Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, пл. Свободы, 6, Харків-22, Украина, 61022

д.ф.-м.н., профессор; профессор кафедры прикладной математики, Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, пл. Свободы, 6, Харків-22, Украина, 61022

студентка,

Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, пл. Свободы, 6, Харків-22, Украина, 61022

студент,

Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, пл. Свободы, 6, Харків-22, Украина, 61022

Исследуется обтекание геометрических форм, соответствующих телам ихтиозавров разного эволюционного возраста, потоком вязкой несжимаемой жидкости. Произведены расчеты распределений давления и скорости жидкости вокруг тел в пакете прикладных программ AnSys Fluent 2021 R2. Показано, что при некоторых углах наклона тела к потоку появляются вихри, пары вихрей или вихревые дорожки, которые приводят к изменениям сдвиговых напряжений вдоль тела. Это может использоваться водными животными для контроля скорости и «угла атаки» при погружении или всплывании, а также для рецепции и коммуникации между ними. Проведено сравнение гидродинамических свойств тел ихтиозавров со сходными по размерам дельфинами и китами. Показано, что в терминах аэродинамических индексов нет явных различий между формами с разным эволюционным возрастом. Вероятно, что разные подвиды по-разному изменяли особенности плавания, такие как скорости, углы атаки, обитание в верхних или нижних слоях и другие, приспосабливаясь к своим условиям обитания. Полученные результаты позволяют лучше понять механизмы приспособления и направления эволюции водных животных.

Ключевые слова: *математическое моделирование, плавание, гидромеханика, механические напряжения, эволюция*

1 Вступ

Розуміння розширення біорізноманіття в природі є основною метою еволюційної біології, яка використовує морфологічні подібності і генетичний аналіз для пошуку подібностей і відмінностей у різних видів тварин [1]. В останні роки перевага дається моделі раннього сплеску, яка передбачає швидку та широку морфологічну диверсифікацію на початку еволюційної історії. Цей сплеск розглядається як результат високих темпів еволюції, що призвело до раннього максимального морфологічного різноманіття (невідповідності), за яким слідує помітне уповільнення темпів та зменшення диспропорції. Філогенетичні порівняльні методи є недостатніми і в останні роки використовуються також порівняння ефективності різних фізіологічних систем та локомоцій, тобто здатності переміщуватися. Оскільки перші форми життя з'явилися у воді і еволюційні перетворення форми і будови тіла проходили у водних тварин, для порівняння їх здатностей до руху в воді використовуються комп'ютерні симуляції (computational fluid dynamics, CFD) обтікання тіл потоком води та обчислення гідродинамічного опору Z , підйомної сили F_L , напружень тертя на поверхні тіла τ_s і загального тертя F_D [2]. Порівняння ефективності польоту різних тварин від комах до птахів з ефективністю літаків показало східні залежності між величинами Z , F_L , F_D , максимальною швидкістю і масою та розмірами тіла (довжина розмаху крил) [3]. Таким чином, можливості до польоту живих і технічних систем обумовлені тими ж самим фізичними законами генерації підйомної сили і опору в потоці повітря. Оскільки у водних тварин ті ж самі сили генеруються під час обтікання тіла водою, закономірності руху повинні бути такими ж, як і у тварин, що здатні до польоту або паріння.

Попередні CFD розрахунки на 9 формах іхтіозаврів з еволюційно різним віком від 250 до 150 млн.років тому (МРТ) не виявили значних змін коефіцієнту опору і витрат енергії на рух з постійною швидкістю [2]. Іхтіозаври протягом свого існування приблизно 160 млн. років еволюціонували від видовжених і змієвидних форм у більш кремезних тварин, схожих на сучасних акул та дельфінів. Розрахунки [2] показали, що навіть ранні іхтіозаври мали низькі значення Z в перерахунку на фіксований об'єм тіл, однак були проведені розрахунки тільки при «куті атаки» $\alpha = 0$ (нахил потоку до поздовжньої осі тіла).

В даній роботі проведений порівняльний аналіз ефективності руху в воді тіл, геометрія яких відповідає еволюційно різним формам іхтіозаврів при різних кутах $-30^\circ < \alpha < 30^\circ$.

2 Аналіз геометрії тіл іхтіозаврів

Досліджуються оцифровані тривимірні зображення тіл іхтіозаврів різного еволюційного віку (від 250 до 150 МРТ) і тіл сучасних дельфінів-афалін (Рис.1а). Еволюція форми тіл включала поступове збільшення довжини тіла L від 40-50 см до 20-23 м, яке змінилося зменшенням до 2-4 м, що відповідає довжині тіл сучасних дельфінів (від 2-4 м у афалін до 6-8 м у косаток). Модифікації підпали також відносні поздовжні розміри (міделевий перетин в аеродинамічних термінах): зростання від 0.15 (форма 1) до 0.45 (форма 6) змінилося зменшенням до 0.28 (форма 9). Еволюційні зміни торкнулися розміру, форми і розташування хвостових плавників, а також напрямку його рухів (з вертикальної до горизонтальної площини).

Тварини з більшими розмірами мають більший об'єм м'язів, а тому можуть розвивати більші локомоторні сили. Для порівняльного аналізу тільки гідродинамічних властивостей тіл тварин як аеродинамічних форм, їх розміри, як і в [2], були приведені до стандартної довжини $L=1$ м, а всі плавники усунені (Рис.1б).

Результати розрахунків розмірних величин і безрозмірних параметрів наведені в Табл.1. Безрозмірний параметр M/P характеризує відносний розмір тіла, безрозмірний параметр S/P^2 - звивистість контуру, а безрозмірні параметри V/P^3 і $V/S^{3/2}$ - складність форми. Деякі з параметрів збільшені в 10 та 100 разів для більш чіткої демонстрації на одному рисунку. Всі параметри по-різному характеризують відносну товщину і складність поверхні тіл (Рис.2). Так, практично всі криві мають максимум для форми 6 – найбільш крупного іхтіозавра з найбільшим

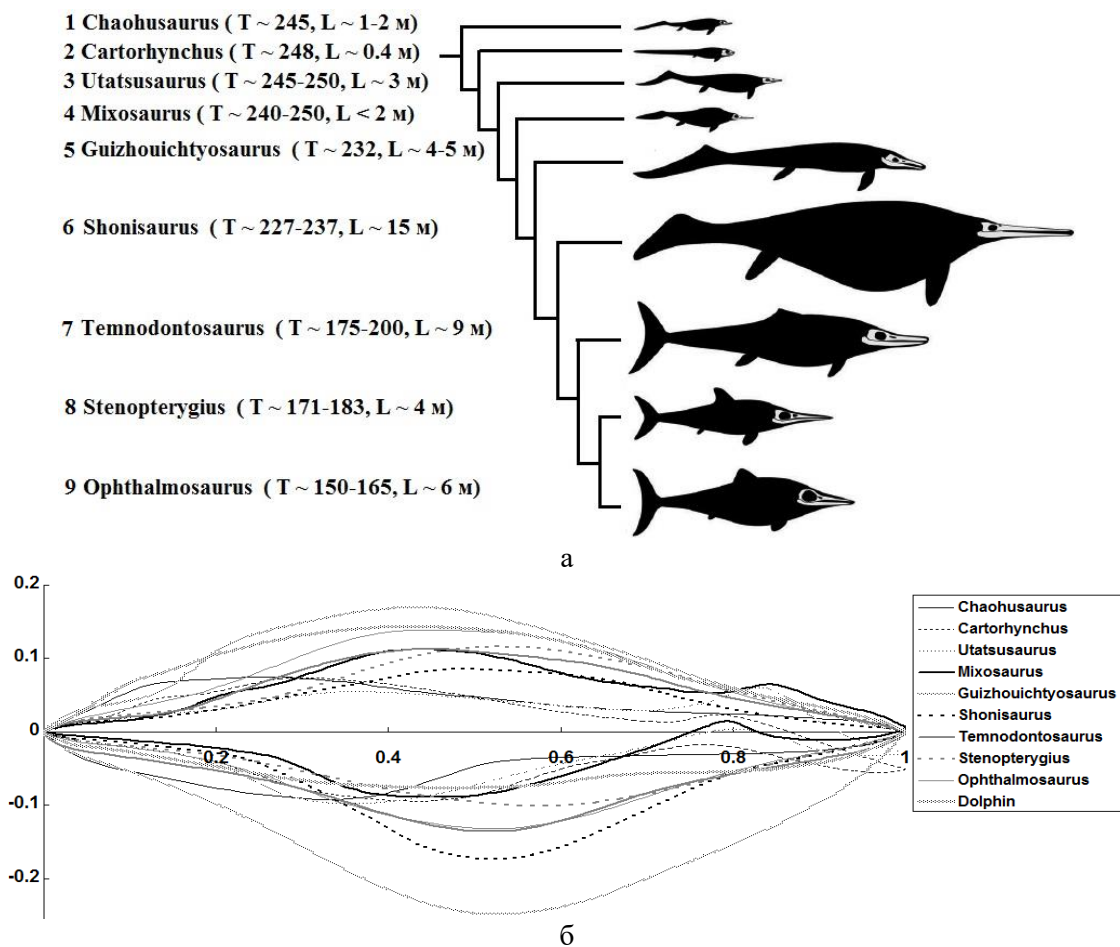


Рис.1 Початкові (а) і нормалізовані до довжини 1 м (б) тіла іхтіозаврів.

міделевим перетином, однак для форми 4 криві S/P^2 і $V/S^{3/2}$ мають максимум і мінімум відповідно, а інші параметри не мають екстремуму в цій точці. Можливі неточності порівняльного

аналізу пов'язані з розташуванням у найбільш архаїчних форм хвостового плавника, який був продовженням хребту, в вертикальній площині.

Таблиця 1. Геометричні параметри досліджуваних форм 1-10

	M (м)	P (м)	S (м ²)	V (м ³)	S/P^2	V/P^3	$V/S^{3/2}$	M/P
1	0.1682	2.1427	0.0873	0.0079	0.0190	0.0008	0.3080	0.0785
2	0.1670	2.1465	0.0912	0.0083	0.0198	0.0008	0.3003	0.0778
3	0.1578	2.1589	0.0893	0.0068	0.0192	0.0007	0.2531	0.0731
4	0.2017	2.1570	0.1912	0.0110	0.0411	0.0011	0.1320	0.0935
5	0.2593	2.0874	0.1219	0.0189	0.0280	0.0021	0.4442	0.1242
6	0.4183	2.4345	0.2439	0.0623	0.0412	0.0043	0.5170	0.1718
7	0.2489	2.1996	0.1353	0.0188	0.0280	0.0018	0.3779	0.1132
8	0.2171	2.0455	0.1174	0.0145	0.0281	0.0017	0.3593	0.1062
9	0.2710	2.2041	0.1463	0.0228	0.0301	0.0021	0.4082	0.1230
10	0.2199	2.0668	0.1426	0.0208	0.0334	0.0024	0.3862	0.1064

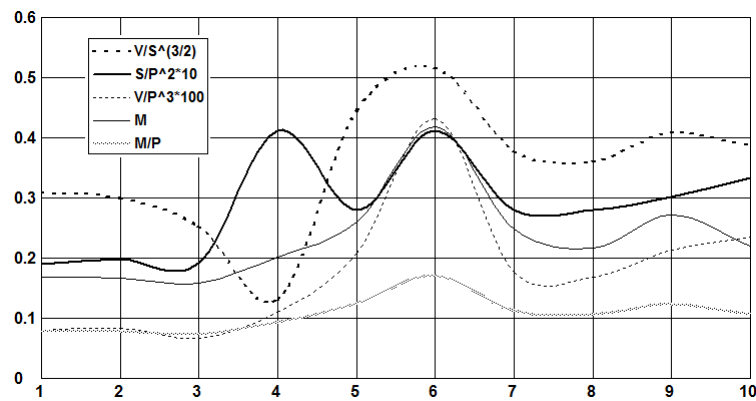


Рис.2 Безрозмірні геометричні параметри тіл 1-10

3 Математична постановка задачі обтікання

Розглядається стаціонарна течія в'язкої нестисливої рідини навколо твердої поверхні. У випадку повільного руху ($Re < 1200$) течія моделювалась рівняннями Нав'є-Стокса

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

де \vec{v} і p - швидкість і гідростатичний тиск в рідині, ρ і ν - густина і кінематична в'язкість рідини.

У випадку швидкого руху ($Re \sim 10^6 - 10^8$) використовувалася $k - \omega$ SST модель турбулентної течії

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u}, \nabla) \vec{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \Delta \vec{u} - \overline{u' u'}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + (\vec{u}, \nabla) k = P_k - \beta^* k \omega + \operatorname{div}[(\nu + \sigma_k \nu_t) \nabla k], \quad (3)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + (\vec{u}, \nabla) \omega = \gamma S^2 - \beta \omega^2 + \operatorname{div}[(\nu + \sigma_\omega \nu_t) \nabla \omega] + 2(1 - F_1) \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \nabla k \cdot \nabla \omega, \quad (4)$$

де k і ω - кінетична енергія і швидкість дисипації турбулентної течії, u' і \bar{u} - флуктуації швидкості і їх осереднені за часом значення, $\nu_t = \frac{ak}{\max(a\omega, SF_2)}$ - турбулентна в'язкість, $S^2 = 2S_{ik}S_{ik}$

$$S_{ik} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_k} + \frac{\partial u_k}{\partial x_i} \right), \quad P_k = \min \left(\tau_{ik} \frac{\partial u_i}{\partial x_k}, 10\beta^* k \omega \right), \quad F_2 = th \left[\left[\max \left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta^* \omega z}, \frac{500\nu}{\omega z^2} \right) \right]^2 \right],$$

$$F_1 = th \left(\min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega z}, \frac{500\nu}{\omega z^2} \right), \frac{4k\sigma_{\omega 2}}{z^2 CD_{k\omega}} \right] \right)^4, \quad CD_{k\omega} = \max \left(2\rho\sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \nabla k \cdot \nabla \omega, 10^{-10} \right), \quad a=0.44, \quad \gamma=5/9, \quad \beta^* = 0.09, \quad \sigma_k=0.85, \quad \sigma_\omega=0.5, \quad \sigma_{\omega 2}=0.856.$$

В якості граничних умов приймалися (1) умови прилипання рідини на поверхні тіла, (2) постійна швидкість потоку, що набігає $\vec{v}_{in}=5-25$ м/с і (3) тиск в потоці $p_{out}=0$.

Чисельні розрахунки проводилися з використанням програмної реалізації методу скінченних елементів в пакеті AnSys Fluent 2021R2, який є безкоштовним для навчальних і дослідницьких цілей. Розрахункова сітка подрібнювалася до поверхні тіла з використанням bias-технології (Рис.3а). Модель розрахункової області складалася з поєднання паралелепіпеда і півкулі (Рис.3б). Для скорочення часу обчислень розглядалася тільки половина тіла з поверхнею симетрії вздовж її поздовжнього перетину. Для рівнянь (1) і (4)-(5) використовувалися чисельні схеми 2-го порядку точності. Якість сітки перевірялася за допомогою опції Y^+ пакету Fluent. Сітка подрібнювалася до досягнення відповідності послідовних обчислень з точністю $\varepsilon = 10^{-3}$.

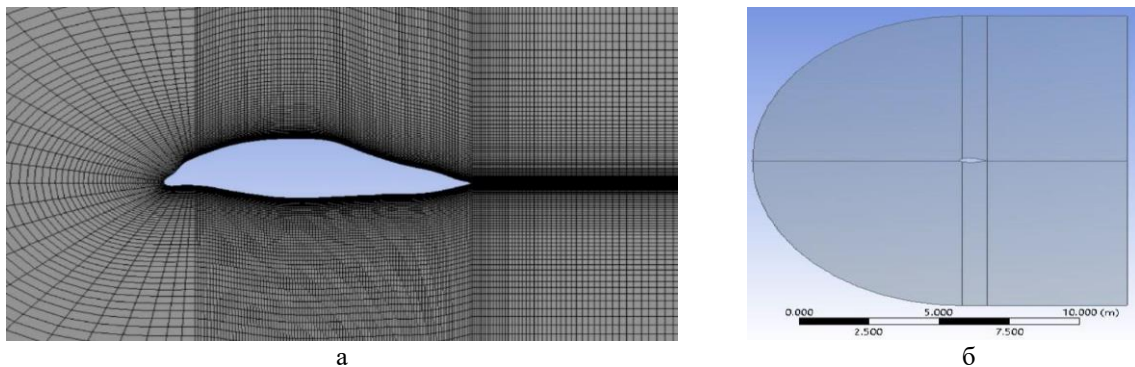
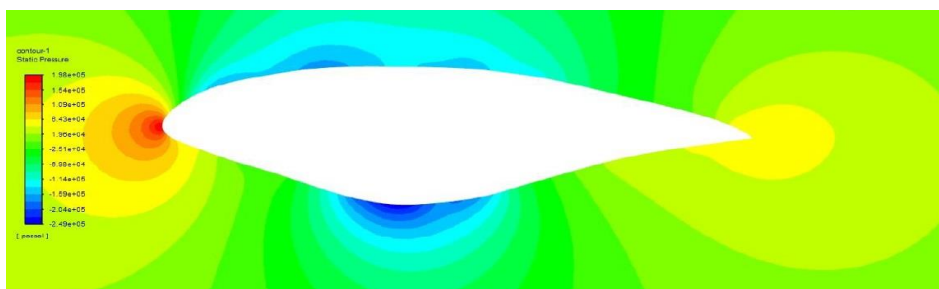


Рис.3. Структурована сітка навколо поверхні тіла (а) і розрахункова область (б).

4 Результати чисельних розрахунків і їх обговорення

В якості рідини з бази даних матеріалів Fluent була обрана модель water-liquid зі стандартними механічними параметрами при кімнатній температурі. Для повільного руху $\vec{v}_{in}=5-10$ м/с розв'язувались рівняння (1), а для швидкостей руху $\vec{v}_{in}=20-25$ м/с – рівняння (2)-(4). Результати розрахунків розподілень гідростатичного тиску, швидкостей, кінематичної енергії турбулентного руху і лінії течії рідини наведені для форм 6 і 7 на Рис.4 і Рис 5.

Для більшості форм отримано плавне ламінарне обтікання з утворенням вихору лише поблизу хвоста, про що говорить і розподілення величини k навколо тіла. Практично на всі форми при русі з нульовим кутом нахилу α діє ненульова підйомна сила за рахунок більших тисків, що діють на нижню поверхню тіла у порівнянні з верхньою поверхнею. Результати розрахунків відповідають даним [2] для $Re \sim 10^6-10^8$. При ненульових кутах нахилу тіла (пірнання або спливання) картина суттєво змінюється, а саме у випадку ламінарної течії спостерігається сепарація ліній току і утворення областей вторинної циркуляції, а при турбулентній – розвинення турбулентного пристінного шару і вихрового ланцюга, який відходить від поверхні тіла біля хвоста (Рис.6). В результаті напруження тертя вздовж тіла у порівнянні з його величиною при $\alpha = 0$ суттєво зростає (Рис.7).



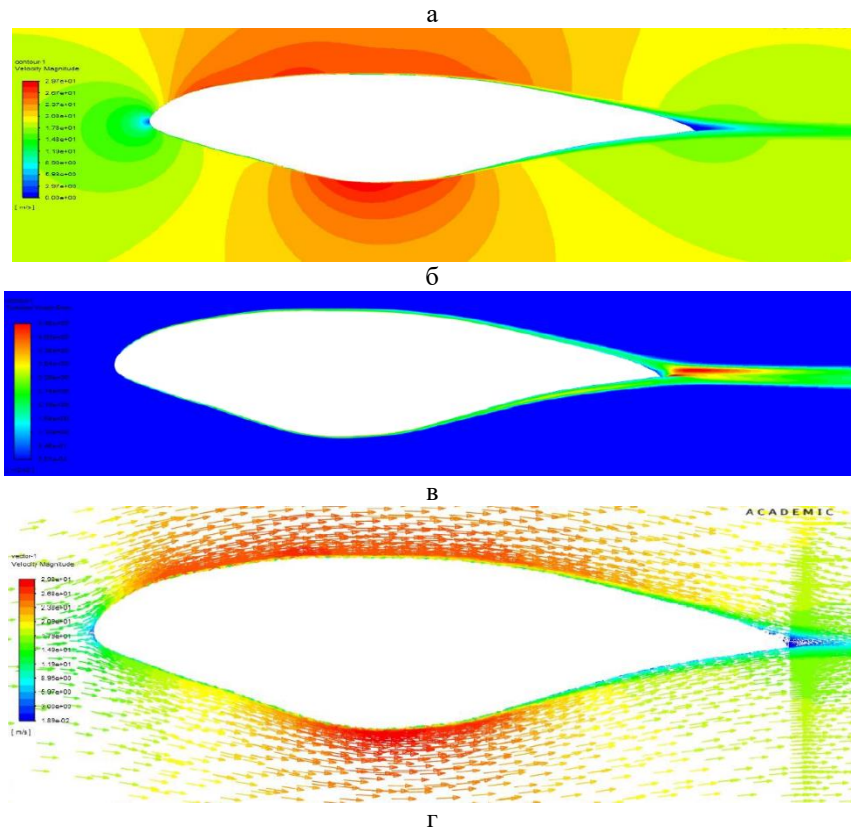


Рис.4. Контурні графіки гідростатичного тиску (а), величини швидкості (б), вектору швидкості (в) і ліній току рідини (г) для тіла б.

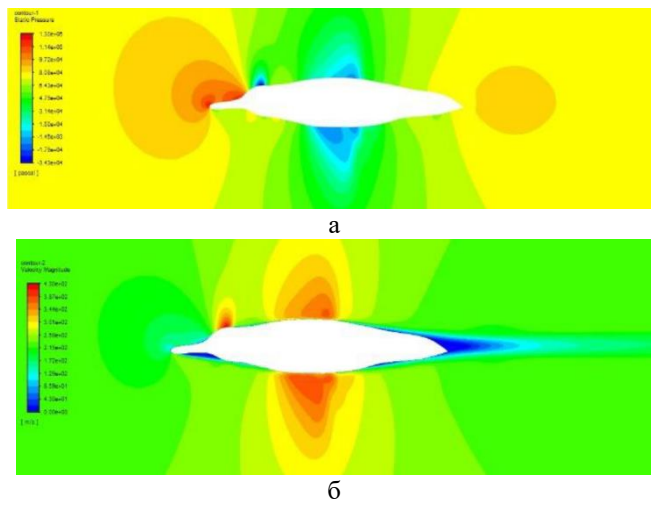
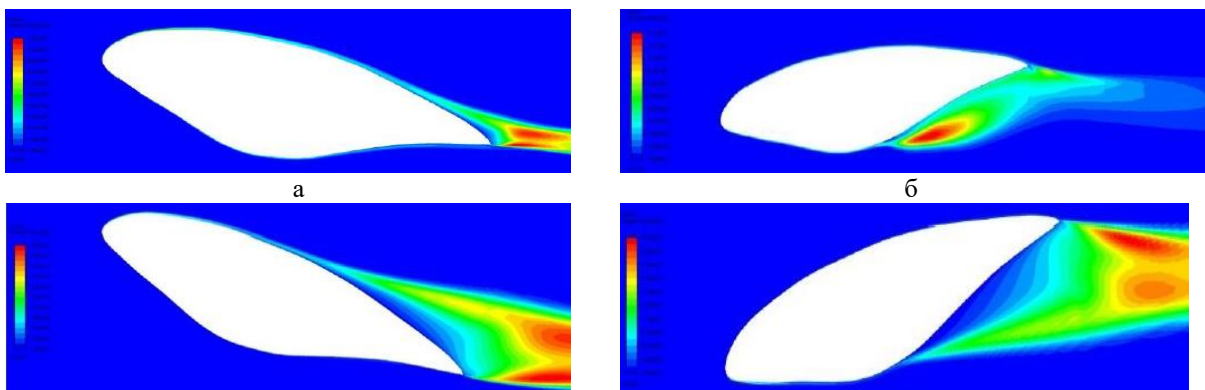


Рис.5. Контурні графіки гідростатичного тиску (а) і величини швидкості (б) для тіла 7.



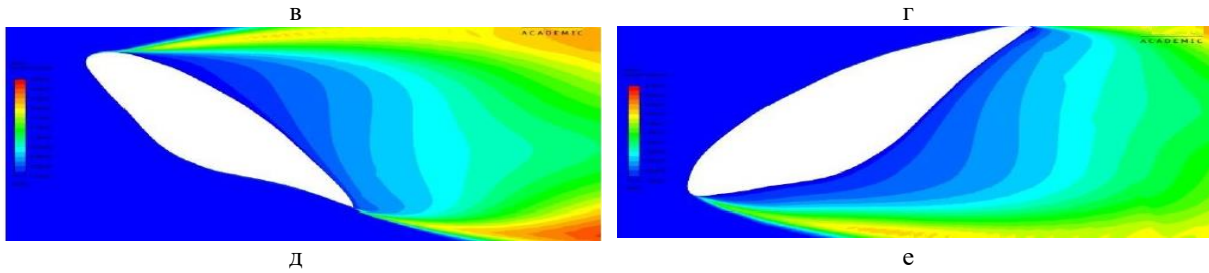


Рис.6. Контурні графіки кінетичної енергії турбулентної течії рідини при кутах нахилу $+10^\circ$ (а), -10° (б), $+20^\circ$ (в), -20° (г), $+30^\circ$ (д), -30° (е) тіла 6.

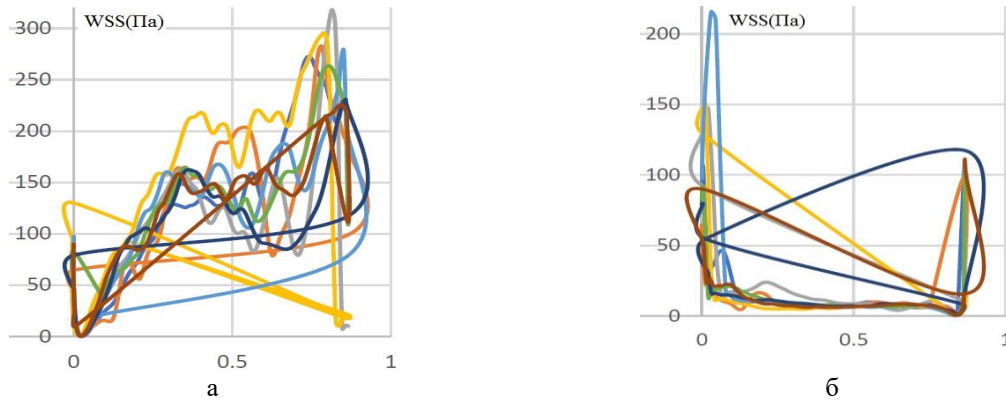


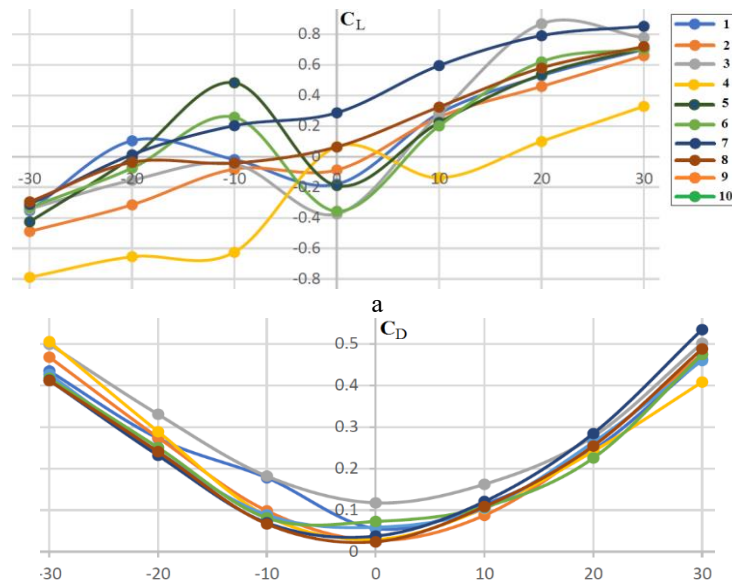
Рис.7. Розподілення поверхневих напружень тертя (WSS, wall shear stress) вздовж верхньої (а) і нижньої (б) поверхонь тіла 4 при $\alpha = 20^\circ$.

Інтегральні аеродинамічні параметри коефіцієнти підйомної сили і тертя розраховувалися за стандартними формулами

$$C_L = \frac{F_L}{\rho v^2 A_M / 2}, \quad C_D = \frac{F_D}{\rho v^2 A_M / 2}, \quad (5)$$

де F_L - підйомна сила, F_D - сила тертя, A_M - площа міделева перетину.

Результати розрахунків показали, що висновки [2] є передчасними. Коефіцієнти тертя і підйомної сили мають значні розбіжності між тілами 1-10 при позитивних або негативних кутах нахилу. Залежності $C_L(\alpha)$, $C_D(\alpha)$, $C_L(C_D)$, а також аеродинамічна якість $C_L^3 / C_D^2(\alpha)$ відрізняються для тіл з різним еволюційним віком. Монотонна залежність, спрямована на поліпшені аеродинамічні характеристики еволюційно нових форм не виявлена, однак окремі геометричні форми мають переваги при спливанні або зануренні з великими кутами атаки.



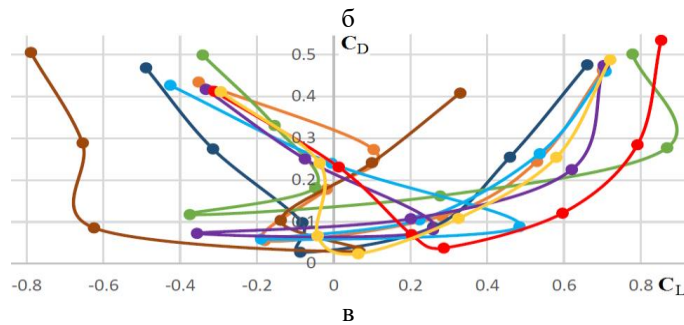


Рис.8. Залежності $C_L(\alpha)$ (а), $C_D(\alpha)$ (б) і C_L/C_D (в) для тіла 7.

5 Висновки

Порівняльний аналіз аеродинамічних властивостей форм тіл іхтіозаврів різного еволюційного віку показав, що протягом еволюції відбувалися зміни геометрії від коротких витягнутих форм з малими значеннями безрозмірних відношень поверхні міделевого перетину до площини тіла, периметру, площини та об'єму тіла до крупних форм з більш складною геометрією і відносно високими значеннями безрозмірних параметрів (Табл.1, Рис.2). Аеродинамічні властивості геометричних форм, які були нормалізовані до стандартної в аеродинаміці крила довжини $L=1\text{м}$, незначно відрізняються при кутах нахилу $\alpha=0$, але мають суттєві відмінності для позитивних $\alpha=10-30$ і негативних $\alpha=-10-30$ кутів, які відповідають зануренню або спливанню. Таким чином, еволюційні зміни форм тіла, які були раніше підтвержені морфологічним аналізом, є неоднозначними. Деякі з них могли бути спрямовані на зменшення напружень тертя на поверхні тіла під час швидких рухів іхтіозаврів в переслідуванні мілкої риби, або в уникненні від хижаків. Крім того, проведені дослідження виявили неоднозначність нормалізації профілів до стандартної довжини, що також було виявлено в попередніх CFD дослідженнях [2]. Отримані результати можуть бути використані для додаткової оцінки ефективності різних еволюційних форм вимерених тварин.

ЛІТЕРАТУРА

1. Moon B.C., Stubbs Th.L. Early high rates and disparity in the evolution of ichthyosaurs. *Communications Biology*. 2020. Vol. 3. P.68-79. <https://doi.org/10.1038/s42003-020-0779-6>
2. Gutarra S., Moon B.C., Rahman I.A., Palmer C., Lautenschlager S., Brimacombe A.J., Benton M.J. Effects of body plan evolution on the hydrodynamic drag and energy requirements of swimming in ichthyosaurs. *Proceedings of the Royal Society London, Ser. B*. 2019. Vol. 286: 20182786. <http://dx.doi.org/10.1098/rspb.2018.2786>
3. Bejan A., Marden J. H. Constructing Animal Locomotion from New Thermodynamics Theory: Although running, flying and swimming appear to be distinctly different types of movement, they may have underlying physics in common. *New Scientist*. 2006. Vol. 94. P. 342-349, doi: jstor.org/stable/27858803

REFERENCES

1. B.C. Moon, Th.L. Stubbs, "Early high rates and disparity in the evolution of ichthyosaurs", *Communications Biology*, 2020, v. 3, P.68-79. <https://doi.org/10.1038/s42003-020-0779-6>
2. S. Gutarra, B.C. Moon, I.A. Rahman, C. Palmer, S. Lautenschlager, A.J. Brimacombe, M.J. Benton "Effects of body plan evolution on the hydrodynamic drag and energy requirements of swimming in ichthyosaurs", *Proceedings of the Royal Society London, Ser. B*, 2019, v. 286, 20182786. <http://dx.doi.org/10.1098/rspb.2018.2786>
3. A. Bejan, J. H. Marden "Constructing Animal Locomotion from New Thermodynamics Theory: Although running, flying and swimming appear to be distinctly different types of movement, they may have underlying physics in common", *New Scientist*, 2006, v. 94, P. 342-349. doi: jstor.org/stable/27858803