

К ВОПРОСУ ПЕРСПЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПРИРОДОПОДОБНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЛОПАСТНЫХ ГИДРОМАШИН

Г. А. Кромм, А. В. Волков, А. В. Рыженков, В. Ю. Ляпин, Е. С. Трушин

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Россия, 111250, г. Москва, Красноказарменная ул., д. 14, стр. 1

В работе приведен обзор публикаций, посвященных исследованию гидродинамического эффекта «кожи акулы» и его возможным применениям в технических системах, в частности в лопастных насосах. Гидродинамический эффект от «акульей кожи» возникает за счет шероховатостей (риблетов), ориентированных вдоль по потоку, и позволяет снизить величину гидравлического сопротивления в пристеночной области. Проведен анализ исследований по морфологии и репликации акульей кожи, а также некоторые варианты применения данного эффекта в технических системах. Приведены примеры ряда наиболее интересных, по мнению авторов, работ, находящихся в общем доступе. Отмечены некоторые особенности представленных исследований. Сделан вывод о сегодняшнем состоянии биомиметических технологий в гидромашиностроении и о тенденциях развития данной области.

Ключевые слова: гидромашиностроение, лопастные гидромашин, биомиметика, гидродинамика, эффект кожи акулы, природоподобные технологии.

Введение

Одними из самых распространенных технических систем на сегодня являются лопастные гидромашин. Например, доля выработки электроэнергии на ГЭС составляет почти 20 % по России, а на привод динамических машин затрачивается до 30 % от всей вырабатываемой энергии в мире. Поэтому возникает немаловажная проблема снижения потерь в гидромашин и повышения их общей эффективности в ходе эксплуатации.

КПА лопастной гидромашин представляет собой среднеинтегральную оценку механических, объёмных и гидравлических потерь. Механические потери обусловлены наличием трения в подшипниковых и уплотнительных узлах гидроагрегата и трением, возникающим между жидкостью и внешними поверхностями дисков рабочих колёс. Объёмные потери характеризуют величину внешних и внутренних утечек рабочей жидкости через уплотнительные узлы. Гидравлические потери определяют величину энергии, которая в общем случае затрачивается на вихреобразование, локальное изменение направления и скорости потока, а также гидравлическое трение. Наибольшую долю от всех потерь в лопастной машин составляют именно гидравлические потери, поэтому при разработке новых гидроагрегатов или модернизации существующих в первую очередь возникает необходимость решения проблем, связанных со снижением именно этого вида потерь.

Также стоит отметить, что большинство установленных гидроагрегатов часто работают в неоптимальных режимах, где их эффективность значительно снижается. Это объясняется рядом причин, начиная от принятия не самых оптимальных решений при подборе гидромашин под требования сети, заканчивая регулированием режимов работы

и изменением параметров гидравлической сети, связанным с износом её элементов. На основе этих причин при проектировании гидромашин возникает глобальная задача, связанная с расширением возможной рабочей зоны как насосов, так и гидравлических турбин.

В настоящее время разрабатывается большое количество методов по повышению эффективности лопастных гидромашин, начиная от оптимизации режимов эксплуатации гидроагрегатов, заканчивая использованием при проектировании современных систем автоматизированного проектирования совместно с нейросетями. Помимо этого, часть инженерных решений может сформироваться на основе каких-либо явлений, изучаемых другими науками. Таким образом, перспективным направлением развития гидромашиностроения является применение принципов биомиметики.

Биомиметика, или биомимикрия, — это наука, которая изучает свойства, явления и принципы организации живой природы с целью создания природоподобных технологий и их применения в технических системах. В настоящий момент интенсивно исследуются следующие перспективные для гидромашиностроения эффекты: эффект «плавника горбатого кита», эффект «лотоса», гидродинамический эффект «кожи акулы», эффект концевое оперения некоторых птиц и т.п.

Как один из наиболее перспективных вариантов природоподобной технологии для применения в лопастных гидромашин, автором был выбран гидродинамический эффект «акульей кожи». Поэтому с целью оценки состояния исследований в биомиметике, в частности по выбранному природному эффекту, в разрезе выше упомянутых проблем и задач, автором был проведен обзор и систематизация публикаций на соответствующую тему с рассмотрением смежных областей.

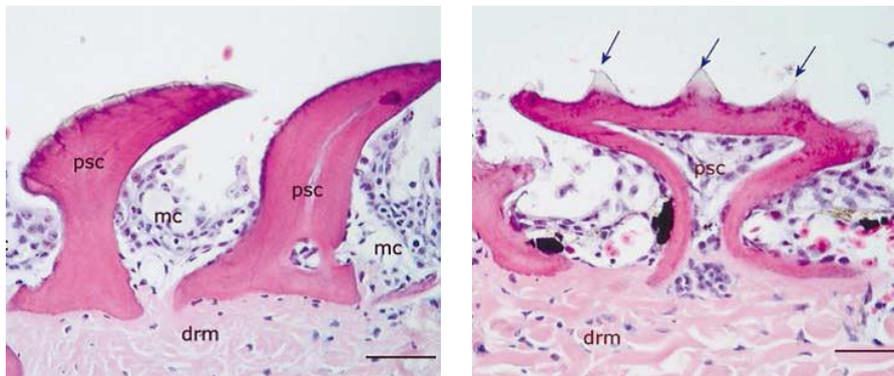


Рис. 1. Микроскопия кожи возле жабр акулы-лопаты (*Sphyrna tiburo*):
psc — чешуя, *mc* — слизистые клетки, *drm* — кожа (масштаб — 50 мкм)
 Fig. 1. Microscopy of the skin near the gills of bonnethead shark (*Sphyrna tiburo*):
psc — scale, *mc* — mucus-producing cells, *drm* — skin (scale — 50 μ m)
 Source: Daehne B., Watermann B. Shark skin morphology and hydrodynamic properties. 2012

1. Морфология и механизмы кожи акулы

Кожа акулы издавна привлекала внимание человека благодаря своей шершавой структуре. Сегодня ей все больше уделяют внимания инженеры, работающие в области биомиметики, поскольку кожа акулы обладает рядом свойств по снижению гидравлического сопротивления и защиты от обрастания. Однако в настоящее время в научном сообществе продолжают споры об основных механизмах, оказывающих влияние на снижение сопротивления при движении в воде.

На сегодня представлено довольно большое число работ, посвященных исследованию морфологии акулей кожи [1–14]. В этих публикациях рассматривается непосредственное строение каждой чешуйки, их взаимное расположение и влияние друг на друга во время движения акулы.

Наиболее ёмкой работой, представляющей собой обзор в направлении исследований морфологических особенностей акулей кожи и механизмов появления эффекта по снижению гидравлического сопротивления, является [3]. Помимо этого, в статье авторы осуществили оценку текущего состояния исследований кожи акулы, а также описали проблемы, возникающие при создании подобной биомиметической поверхности.

Отмечается, что несколько зарубежных компаний и научно-исследовательских институтов разработали искусственные поверхности, которые повторяют структуру кожи акулы.

Отличительной особенностью акулы от других рыб является то, что их кожа не покрыта слизью, как у других видов рыб, например, парусника или тунца. Акулей кожа, однако, все равно содержит слизистые клетки, но в меньшем количестве. Тем не менее тонкий слизистый слой между чешуйками, по-видимому, способствует образованию вихрей на чешуе акулы (рис. 1) и вызывает эффект «жидкого роликового подшипника» [3, 6, 15].

Чешуя быстро плавающих акул имеет плоские элементы, которые в разной степени перекрывают друг друга и покрыты острыми V-образными гребнями и округлыми U-образными впадинами между ними. Ориентация гребней обычно совпадает с осью тела. В зависимости от размера каждая чешуя имеет от трех до семи гребней с интервалом от 30 до 100 мкм. У большинства из 30 исследованных к настоящему времени видов расстояние со-

ставляет менее 100 мкм. Быстро плавающие акулы могут развивать скорость до 10–20 м/сек. Было высказано предположение, что кожа акулы взаимодействует с вязким подслоем турбулентного пограничного слоя путем образования продольного разделения потока.

В дополнение к структуре поверхности чешуек с гребнями в продольном направлении стало очевидным, что быстро плавающие акулы могут изменять угол своей чешуи в зависимости от их скорости плавания. У некоторых видов угол атаки чешуи изменяется вплоть до 40° и выше из-за повышенного натяжения кожи на высокой скорости [3, 13]. Возможность изменять угол наклона чешуи позволяет акулам создавать повышенную турбулентность при более высоких скоростях плавания, предотвращая разделение потоков и адаптируя структуру поверхности кожи к скорости. Лабораторные эксперименты с гребнями, расположенными перпендикулярно направлению потока, имитирующими щетинистую чешуйку, выявили возникновение вихрей и уменьшение сопротивления коже. Таким образом, эти встроенные вихри, аналогичные ямкам на мяче для гольфа, могут работать как механизм управления пограничным слоем, задерживая или даже предотвращая отрыв потока.

С целью репликации акулей кожи некоторые исследователи использовали кожу мертвых акул с прижатой чешуей в качестве шаблона для создания твердых образцов из органического стекла и мягких образцов из полидиметилсилоксана [1]. И даже эта упрощенная кожа акулы показала эффект снижения сопротивления на 8,25% в экспериментах с водными туннелями. Трудно совместить все условия, в которых живые акулы могут формировать свою кожу в соответствии со скоростью. Кроме того, пограничный слой плавающей рыбы сложен из-за постоянной волнистости и определенно отличается от слоя на жесткой пластине, например, модель с жесткой обшивкой или структурированная поверхность корпуса.

В других публикациях, включенных в настоящий обзор, также приводятся сведения о морфологии акулей кожи и механизмах, отвечающих за снижение гидравлического сопротивления. Во многих работах описываются эксперименты с акулей чешуей, расположенной на фольге и гибкой мембране, которые показывают значительное снижение сопротивления набегающему потоку.

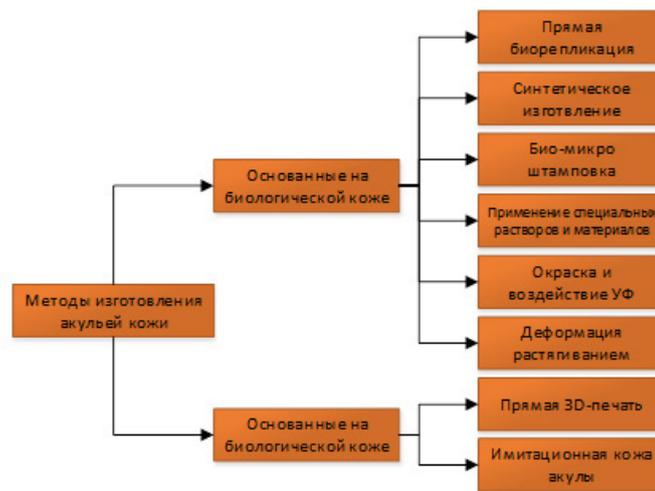


Рис. 2. Методы репликации биомиметической поверхности на основе акульей кожи

Fig. 2. Shark skin-based biomimetic surface replication methods

Схожим механизмом по снижению сопротивления движению в жидкой среде, как у акул, обладают и некоторые виды птиц, например, водорезы. Это явление подробно описано в статье [7].

2. Репликация кожи акулы и оптимизация её моделей

Так как к исследованию кожи акулы инженеры проявляют достаточно большой интерес из-за ее свойств по снижению гидравлического сопротивления, то и немаловажными являются вопросы по созданию и исследованию моделей «акульей кожи» для использования в технических системах.

В исследовании [1] была изготовлена биомиметическая кожа акулы с применением методов штамповки эластомера с добавлением полидиметилсилоксана. Микроструктура поверхности акульей кожи изучалась с помощью сканирующей электронной микроскопии.

Для анализа гидрофобного механизма поверхности акульей кожи определяли влияние биомиметической микроструктуры на смачиваемость поверхности путём замера угла контакта с водой.

Помимо этого, в исследовании был проведен ряд экспериментов по оценке гидравлического сопротивления. Исходя из результатов, был сделан вывод, что биомиметическая поверхность акульей кожи сыграла значительную роль в снижении сопротивления. Максимальная величина снижения сопротивления составляет 12,5 % в сравнении с гладкой поверхностью.

В статье [2] описывается биомиметическая поверхность из акульей кожи, снижающая гидравлическое сопротивление. Также иллюстрируются различные методы изготовления поверхностей с морфологией акульей кожи (рис. 2) и возможные варианты применения в области гидромашиностроения и гидравлики. В работе [5] представлено исследование геометрии, методов изготовления и гидродинамических испытаний синтетической гибкой мембраны из кожи акулы. Трёхмерная модель зубцов кожи акулы была построена на основе кожи короткопёрого мако (*Isurus paucus*). С помощью 3D-печати тысячи жестких синтетических зубцов акулы были размещены на гибких мембранах. Затем эта искусственная модель кожи акулы была протестирована в

воде с использованием роботизированного колебательного устройства, которое позволяло либо удерживать модели в стационарном положении, либо с определенными амплитудой и частотой колебаний. По сравнению с гладким образцом, имитирующая кожу мембрана показала лучшие результаты движения. Например, при частоте колебаний 1,5 Гц и амплитуде ± 1 см скорость плавания увеличилась на 6,6 %, а энергозатраты на движение уменьшились на 5,9 %.

В работе [16] исследуется высокоточная биорепликация кожи акулы, которая представляет собой нанонити, прикрепленные к микроканавкам, имитирующим кожу акулы. Предварительно обработанную кожу акулы использовали в качестве литейного шаблона для изготовления гибкой матрицы из силиконового каучука методом мягкого формования. Затем была использована эпоксидная смола на водной основе для прививки длинных цепей, снижающих сопротивление, и изготовления синтетической кожи акулы с реалистичными микроканавками.

Эксперименты по уменьшению гидравлического сопротивления показывают, что материал обладает превосходным синтетическим эффектом снижения лобового сопротивления с максимальным коэффициентом снижения лобового сопротивления до 24,6 % при испытанных скоростях.

В публикациях [15, 17–28] приводятся результаты по исследованию влияния различных геометрических параметров биомиметической кожи акулы на сопротивление движению в жидкости различных объектов. Оценивалась степень влияния на поток рисунка чешуек, расстояния между ними и размер элементов. А также были представлены различные варианты изготовления биомиметической поверхности, имитирующей кожу акулы.

В [29] представлено довольно значимое для гидромашиностроения исследование по уменьшению лобового сопротивления на кораблях, основанное на упрощенной имитации акульей кожи. Модели создавались с использованием программного обеспечения для автоматизированного проектирования, а затем выполнялось вычислительное гидродинамическое моделирование, чтобы оценить эффективность гидродинамического воздействия биомиметических поверхностей на основе акульей кожи акул. Интересно, что полученные численные

расчетные результаты показывают, что наличие биомиметической кожи акулы, нанесенной на корпус судов, дает снижение коэффициента сопротивления примерно на 3,75 %, а также снижение до 3,89 % силы сопротивления, испытываемой судами. Теоретически, поскольку силовое сопротивление может быть уменьшено, это может привести к созданию более эффективного судна с лучшей крейсерской скоростью. Это может оказать большее влияние на судоходство или морскую промышленность по всему миру.

Довольно интересное применение гидродинамического эффекта акульей кожи было представлено в работе [30]. Целью этого исследования, основанного на применении эффекта акульей кожи, состоит в том, чтобы разместить бионические негладкие структуры на дне продольных канавок протектора покрышки, чтобы улучшить характеристики аквапланирования, не влияя на другие характеристики шины. Была использована модель шины 185/60R15, испытанная под нагрузкой на электронном испытательном приборе CSS-88100. Помимо этого, была смоделирована область течения в продольных канавках протектора и проанализирована методом вычислительной гидродинамики. Смоделированная критическая скорость аквапланирования соответствовала скорости, полученной по эмпирической формуле НАСА. Вдохновленные ребрами акульей кожи, были использованы три вида негладких поверхностей. Кроме того, для различных канавок сравнивались величина снижения сопротивления, напряжение сдвига и распределение скорости потока. Затем на дне продольных канавок бионической шины располагалась оптимизированная негладкая структура с лучшим эффектом снижения лобового сопротивления среди трех негладких поверхностей. Результаты моделирования показали, что бионическая шина явно снижает гидродинамическую подъемную силу и увеличивает скорость потока. Благодаря этим усовершенствованиям бионическая шина значительно улучшила критическую скорость аквапланирования. Результаты этих исследований могут быть применены для улучшения характеристик аквапланирования без ухудшения других характеристик шин.

Выводы

Проведён обзор литературы по тематике, связанной с гидродинамическим эффектом «акульей кожи» в технических системах показал, что в большинстве своем наблюдаются тенденции к увеличению КПД. Повышение КПД возможно за счёт особого строения акульей кожи, которая воздействует на поток в пристеночной области, тем самым снижая сопротивление потоку. В основной массе биомиметические поверхности, имитирующие кожу акулы, предлагают использовать в автомобилестроении, авиастроении и кораблестроении.

При этом следует отметить:

1. Большинство работ посвящено изучению морфологии акульей кожи и механизмам, участвующим в снижении гидравлического сопротивления.
2. На данный момент нет единого мнения по вопросу механизмов воздействия микроструктуры акульей кожи на поток в пристеночной области, что приводит к снижению гидравлического сопротивления.
3. Исследования морфологии акульей кожи показали, что у быстро плавающих акул наблюдается зависимость угла атаки чешуйки относительно кож-

ного покрова в зависимости от скорости движения. Чем больше скорость движения, тем самым сильнее оттопыривается чешуя акулы.

4. Основная масса репликаций биомиметических поверхностей, имитирующих кожу акулы, выполнены на основе полимерных материалов методами литья, 3d-печати, тиснения.

5. Исследования по снижению гидравлического сопротивления показали, что гидродинамический эффект акульей кожи позволяет снизить сопротивление тела в жидкой среде от 5 до 25 % в зависимости от формы и характера движения тела, а также от метода имитации кожи акулы.

6. Несмотря на перспективность использования акульей кожи в технических системах, не было зафиксировано ни одного варианта её применения в лопатных насосах или гидравлических турбинах.

Гидродинамический эффект акульей кожи имеет сравнительно высокий потенциал для применения в лопатных насосах и гидравлических турбинах с целью снижения гидравлического сопротивления, а также повышения виброакустических и кавитационных качеств. Однако адаптация акульей кожи для применения в гидромашинах сопряжена с рядом трудностей, начиная с того, что, в отличие от акулы, лопатная система не может изменять свою форму с течением времени, заканчивая разработкой технологий производства биомиметических рабочих колёс. Поэтому для продолжения дальнейшего исследования данного направления в первую очередь ставится задача по формированию упрощенной имитационной модели кожи акулы и изучения её влияния на обтекание канонических объектов типа пластина или крыловой профиль.

Благодарности

Результаты получены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках выполнения Государственного задания №ФСВФ-2022-0008, вступившего в силу в соответствии с Соглашением № 075-03-2022-138/5 от 02.11.2022.

Список источников

1. Pu X., Li G., Huang H. Preparation, anti-biofouling and drag-reduction properties of a biomimetic shark skin surface // *Biology Open*. 2016. Vol. 5. P. 389–396. DOI: 10.1242/bio.016899.
2. Chen D., Liu Y., Chen H. [et al.]. Bio-inspired drag reduction surface from sharkskin // *Biosurface and Biotribology*. 2018. Vol. 4 (2). DOI: 10.1049/bsbt.2018.0006 www.ietdl.org.
3. Daehne B., Watermann B. Shark skin morphology and hydrodynamic properties // *Ship & Offshore. GreenTech*. 2012.
4. Lauder G. V., Wainwright D. K., Domel A. G. [et al.]. Structure, biomimetics, and fluid dynamics of fish skin surfaces // *Physical Review Fluids*. 2016. Vol. 1 (6). DOI: 10.1103/PhysRevFluids.1.060502.
5. 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.
6. Bhushan B. Bioinspired structured surfaces // *Langmuir*. 2012. Vol. 28 (3). P. 1698–1714. DOI: 10.1021/la2043729.
7. Martin S., Bhushan B. Discovery of riblets in a bird beak (Rynchops) for low fluid drag // *Philosophical Transactions of The Royal Society A Mathematical Physical and Engineering Sciences*. 2016. Vol. 374 (2073). 20160134. DOI: 10.1098/rsta.2016.0134.
8. Zhang C., Gao M., Liu G. [et al.]. Relationship Between Skin Scales and the Main Flow Field Around the Shortfin Mako

Shark *Isurus oxyrinchus* // *Front Bioeng Biotechnol.* 2022. Vol. 10. 742437. DOI: 10.3389/fbioe.2022.742437.

9. Dhez G., Soto M., Blanco J. M. Biological characterization of the skin of shortfin mako shark *Isurus oxyrinchus* and preliminary study of the hydrodynamic behaviour through computational fluid dynamics // *Journal of Fish Biology.* 2015. Vol. 87 (1). P. 123–37. DOI: 10.1111/jfb.12705.

10. 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.

11. Ankhelyi M. V., Wainwright D. K., Lauder G. V. Diversity of dermal denticle structure in sharks: Skin surface roughness and three-dimensional morphology // *Journal of Morphology.* 2018. Vol. 279 (8). P. 1132–1154. DOI: 10.1002/jmor.20836.

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

13. Afroz F., Lang A., Habegger M. L. [et al.]. Experimental study of laminar and turbulent boundary layer separation control of shark skin // *Bioinspiration & Biomimetics.* 2016. Vol. 12 (1). 016009. DOI: 10.1088/1748-3190/12/1/016009.

14. Lang A. W., Bradshaw M. T., Smith J. A. [et al.]. Movable shark scales act as a passive dynamic micro-roughness to control flow separation // *Bioinspiration & Biomimetics.* 2014. Vol. 9 (3). 036017. DOI: 10.1088/1748-3182/9/3/036017.

15. Dean B., Bhushan B. Shark-skin surfaces for fluid-drag reduction in turbulent flow: a review // *Philosophical Transactions of The Royal Society A Mathematical Physical and Engineering Science.* 2010. Vol. 368. P. 4775–4806. DOI: 10.1098/rsta.2010.0201.

16. Zhang D. Y., Li Y. Y., Han X. [et al.]. High-precision bio-replication of synthetic drag reduction shark skin // *Bionic Engineering.* 2011. Vol. 56, no. 9. P. 938–944. DOI: 10.1007/s11434-010-4163-7.

17. Wen L., Weaver J. C., Thornycroft P. J. M. [et al.]. Hydrodynamic function of biomimetic shark skin: effect of denticle pattern and spacing // *Bioinspiration & Biomimetics.* 2015. Vol. 10 (6). 066010. DOI: 10.1088/1748-3190/10/6/066010.

18. Domel A. G., Domel G., Weaver J. C. [et al.]. Hydrodynamic properties of biomimetic shark skin: effect of denticle size and swimming speed // *Bioinspiration & Biomimetics.* 2018. Vol. 13 (5). 056014. DOI: 10.1088/1748-3190/aad418.

19. Oeffner J., Lauder G. V. The hydrodynamic function of shark skin and two biomimetic applications // *Journal of Experimental Biology.* 2012. Vol. 215 (Pt. 5). P. 785–795. DOI: 10.1242/jeb.063040.

20. Martin S., Bhushan B. Modeling and optimization of shark-inspired riblet geometries for low drag applications // *Journal of Colloid and Interface Science.* 2016. Vol. 474. P. 206–215. DOI: 10.1016/j.jcis.2016.04.019.

21. Bixler G. D., Bhushan B. Shark skin inspired low-drag microstructured surfaces in closed channel flow // *Journal of Colloid and Interface Science.* 2013. Vol. 393. P. 384–396. DOI: 10.1016/j.jcis.2012.10.061.

22. Domel A. G., Saadat M., Weaver J. C. [et al.]. Shark skin-inspired designs that improve aerodynamic performance // *Journal of The Royal Society Interface.* 2018. Vol. 15 (139). 20170828. DOI: 10.1098/rsif.2017.0828.

23. Ott J., Lalalde M., Gu G. X. Algorithmic-driven design of shark denticle bioinspired structures for superior aerodynamic properties // *Bioinspiration & Biomimetics.* 2020 Vol. 15 (2). 026001. DOI: 10.1088/1748-3190/ab5c85.

24. 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.

25. Qin L., Hafezi M., Yang H. [et al.]. Constructing a Dual-Function Surface by Microcasting and Nanospraying for Efficient Drag Reduction and Potential Antifouling Capabilities //

Micromachines (Basel). 2019. Vol. 10 (7). DOI: 10.3390/mi10070490.

26. 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.

27. Kim T. W. Assessment of hydro/oleophobicity for shark skin replica with riblets // *Journal of Nanoscience and Nanotechnology.* Vol. 14 (10). P. 7562–7568. DOI: 10.1166/jnn.2014.9570.

28. Guo P., Zhang K., Yasuda Y. [et al.]. On the influence of biomimetic shark skin in dynamic flow separation // *Bioinspiration & Biomimetics.* 2021 Vol. 16 (3). DOI: 10.1088/1748-3190/abdf31.

29. Ibrahim M. D., Amran S. N. A., Yunus 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.

30. Liu C., Meng H., Lu S. [et al.]. Design of Nonsmooth Groove Tire Bioinspired by Shark-Skin Riblet Structure // *Applied Bionics and Biomechanics.* 2022. 6025943. DOI: 10.1155/2022/6025943.

КРОММ Герман Александрович, аспирант кафедры гидромеханики и гидравлических машин Национального исследовательского университета (НИУ «МЭИ»), г. Москва.

Адрес для переписки: krommga@mpei.ru

ВОЛКОВ Александр Викторович, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой гидромеханики и гидравлических машин Института гидроэнергетики и возобновляемых источников энергии НИУ «МЭИ», г. Москва.

SPIN-код: 3022-2171

AuthorID (РИНЦ): 726099

ResearcherID: A-6919-2014

Адрес для переписки: volkovav@mpei.ru

РЫЖЕНКОВ Артём Вячеславович, доктор технических наук, доцент (Россия), директор Научного центра повышения износостойкости энергетического оборудования электрических станций Института энергоэффективности и водородных технологий НИУ «МЭИ», г. Москва.

SPIN-код: 8911-2233

AuthorID (РИНЦ): 502212

Адрес для переписки: ryzhenkovav@mpei.ru

ЛЯПИН Валерий Юрьевич, доктор технических наук, профессор кафедры гидромеханики и гидравлических машин Института гидроэнергетики и возобновляемых источников энергии НИУ «МЭИ», г. Москва.

SPIN-код: 1675-0187

AuthorID (РИНЦ): 372692

Адрес для переписки: liarinvy@mpei.ru

ТРУШИН Евгений Сергеевич, аспирант кафедры гидромеханики и гидравлических машин Национального исследовательского университета (НИУ «МЭИ»), г. Москва.

Адрес для переписки: trushinys@mpei.ru

Для цитирования

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.

Статья поступила в редакцию 26.12.2022 г.

© Г. А. Кромм, А. В. Волков, А. В. Рыженков, В. Ю. Ляпин, Е. С. Трушин

ON THE POTENTIAL OF USING NATURE-BASED TECHNOLOGIES TO IMPROVE THE EFFICIENCY OF BLADE HYDRO-MACHINES

G. A. Kromm, A. V. Volkov, A. V. Ryzhenkov, V. Yu. Lyapin, E. S. Trushin

National Research University «Moscow Power Engineering Institute»,
Russia, Moscow, Krasnokazarmennaya str., 14, bld. 1, 111250

The paper provides a review of publications devoted to the study of the hydrodynamic effect of «shark skin» and its possible applications in technical systems, in particular in vane pumps. The hydrodynamic effect of «sharkskin» occurs due to roughness (riblets) oriented along the flow and allows to reduce the amount of hydraulic resistance in the near-wall region. An analysis of studies on the morphology and replication of shark skin, as well as some options for applying this effect in technical systems, is carried out. Examples of a number of the most interesting, according to the authors, works that are in the public domain are given. Some features of the presented studies are noted. A conclusion is made about the current state of biomimetic technologies in hydraulic engineering and about the development trends in this area.

Keywords: hydraulic engineering, bladed hydraulic machines, biomimetics, hydrodynamics, shark skin effect, nature-like technologies.

Acknowledgements

The results are obtained with the financial support of the Russian Ministry of Science and Higher Education under the State Assignment No. FSWF-2022-0008, entered into force in accordance with Agreement No. 075-03-2022-138/5 of 02.11.2022.

References

1. Pu X., Li G., Huang H. Preparation, anti-biofouling and drag-reduction properties of a biomimetic shark skin surface // *Biology Open*. 2016. Vol. 5. P. 389–396. DOI: 10.1242/bio.016899. (In Engl.).
2. Chen D., Liu Y., Chen H. [et al.]. Bio-inspired drag reduction surface from sharkskin // *Biosurface and Biotribology*. 2018. Vol. 4 (2). DOI: 10.1049/bsbt.2018.0006 www.ietdl.org. (In Engl.).
3. Daehne B., Watermann B. Shark skin morphology and hydrodynamic properties // *Ship & Offshore. GreenTech*. 2012. (In Engl.).
4. Lauder G. V., Wainwright D. K., Domel A. G. [et al.]. Structure, biomimetics, and fluid dynamics of fish skin surfaces // *Physical Review Fluids*. 2016. Vol. 1 (6). DOI: 10.1103/PhysRevFluids.1.060502. (In Engl.).
5. 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. (In Engl.).
6. Bhushan B. Bioinspired structured surfaces // *Langmuir*. 2012. Vol. 28 (3). P. 1698–1714. DOI: 10.1021/la2043729. (In Engl.).
7. Martin S., Bhushan B. Discovery of riblets in a bird beak (Rynchops) for low fluid drag // *Philosophical Transactions of The Royal Society A Mathematical Physical and Engineering Sciences*. 2016. Vol. 374 (2073). 20160134. DOI: 10.1098/rsta.2016.0134. (In Engl.).
8. Zhang C., Gao M., Liu G. [et al.]. Relationship Between Skin Scales and the Main Flow Field Around the Shortfin Mako Shark *Isurus oxyrinchus* // *Front Bioeng Biotechnol*. 2022. Vol. 10. 742437. DOI: 10.3389/fbioe.2022.742437. (In Engl.).

9. Diez G., Soto M., Blanco J. M. Biological characterization of the skin of shortfin mako shark *Isurus oxyrinchus* and preliminary study of the hydrodynamic behaviour through computational fluid dynamics // *Journal of Fish Biology*. 2015. Vol. 87 (1). P. 123–37. DOI: 10.1111/jfb.12705. (In Engl.).
10. 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. (In Engl.).
11. Ankhelyi M. V., Wainwright D. K., Lauder G. V. Diversity of dermal denticle structure in sharks: Skin surface roughness and three-dimensional morphology // *Journal of Morphology*. 2018. Vol. 279 (8). P. 1132–1154. DOI: 10.1002/jmor.20836. (In Engl.).
12. Lang A. W., Motta P., Hidalgo P. Bristled shark skin: a microgeometry for boundary layer control? // *Bioinspiration & Biomimetics*. 2008. Vol. 3 (4). 046005. DOI: 10.1088/1748-3182/3/4/046005. (In Engl.).
13. Afroz F., Lang A., Habegger M. L. [et al.]. Experimental study of laminar and turbulent boundary layer separation control of shark skin // *Bioinspiration & Biomimetics*. 2016. Vol. 12 (1). 016009. DOI: 10.1088/1748-3190/12/1/016009. (In Engl.).
14. Lang A. W., Bradshaw M. T., Smith J. A. [et al.]. Movable shark scales act as a passive dynamic micro-roughness to control flow separation // *Bioinspiration & Biomimetics*. 2014. Vol. 9 (3). 036017. DOI: 10.1088/1748-3182/9/3/036017. (In Engl.).
15. Dean B., Bhushan B. Shark-skin surfaces for fluid-drag reduction in turbulent flow: a review // *Philosophical Transactions of The Royal Society A Mathematical Physical and Engineering Science*. 2010. Vol. 368. P. 4775–4806. DOI: 10.1098/rsta.2010.0201. (In Engl.).
16. Zhang D. Y., Li Y. Y., Han X. [et al.]. High-precision bio-replication of synthetic drag reduction shark skin // *Bionic Engineering*. 2011. Vol. 56, no. 9. P. 938–944. DOI: 10.1007/s11434-010-4163-7. (In Engl.).
17. Wen L., Weaver J. C., Thornycroft P. J. M. [et al.]. Hydrodynamic function of biomimetic shark skin: effect of denticle pattern and spacing // *Bioinspiration & Biomimetics*. 2015. Vol. 10 (6). 066010. DOI: 10.1088/1748-3190/10/6/066010. (In Engl.).
18. Domel A. G., Domel G., Weaver J. C. [et al.]. Hydrodynamic properties of biomimetic shark skin: effect of denticle size and

swimming speed // *Bioinspiration & Biomimetics*. 2018. Vol. 13 (5). 056014. DOI: 10.1088/1748-3190/aad418. (In Engl.).

19. Oeffner J., Lauder G. V. The hydrodynamic function of shark skin and two biomimetic applications // *Journal of Experimental Biology*. 2012. Vol. 215 (Pt. 5). P. 785–795. DOI: 10.1242/jeb.063040. (In Engl.).

20. Martin S., Bhushan B. Modeling and optimization of shark-inspired riblet geometries for low drag applications // *Journal of Colloid and Interface Science*. 2016. Vol. 474. P. 206–215. DOI: 10.1016/j.jcis.2016.04.019. (In Engl.).

21. Bixler G. D., Bhushan B. Shark skin inspired low-drag microstructured surfaces in closed channel flow // *Journal of Colloid and Interface Science*. 2013. Vol. 393. P. 384–396. DOI: 10.1016/j.jcis.2012.10.061. (In Engl.).

22. Domel A. G., Saadat M., Weaver J. C. [et al.]. Shark skin-inspired designs that improve aerodynamic performance // *Journal of The Royal Society Interface*. 2018. Vol. 15 (139). 20170828. DOI: 10.1098/rsif.2017.0828. (In Engl.).

23. Ott J., Lazalde M., Gu G. X. Algorithmic-driven design of shark denticle bioinspired structures for superior aerodynamic properties // *Bioinspiration & Biomimetics*. 2020. Vol. 15 (2). 026001. DOI: 10.1088/1748-3190/ab5c85. (In Engl.).

24. 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. (In Engl.).

25. Qin L., Hafezi M., Yang H. [et al.]. Constructing a Dual-Function Surface by Microcasting and Nanospraying for Efficient Drag Reduction and Potential Antifouling Capabilities // *Micromachines (Basel)*. 2019. Vol. 10 (7). DOI: 10.3390/mi10070490. (In Engl.).

26. 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. (In Engl.).

27. Kim T. W. Assessment of hydro/oleophobicity for shark skin replica with riblets // *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*. Vol. 14 (10). P. 7562–7568. DOI: 10.1166/jnn.2014.9570. (In Engl.).

28. Guo P., Zhang K., Yasuda Y. [et al.]. On the influence of biomimetic shark skin in dynamic flow separation // *Bioinspiration & Biomimetics*. 2021. Vol. 16 (3). DOI: 10.1088/1748-3190/abdf31. (In Engl.).

29. 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. (In Engl.).

30. Liu C., Meng H., Lu S. [et al.]. Design of Nonsmooth Groove Tire Bioinspired by Shark-Skin Riblet Structure // *Applied Bionics*

and *Biomechanics*. 2022. 6025943. DOI: 10.1155/2022/6025943. (In Engl.).

KROMM German Aleksandrovich, Graduate Student of Hydromechanics and Hydraulic Machines Department, National Research University «Moscow Power Engineering Institute» (MPEI), Moscow.

Correspondence address: krommga@mpei.ru

VOLKOV Aleksandr Viktorovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Hydromechanics and Hydraulic Machines Department, Institute of Hydropower and Renewable Energy, MPEI, Moscow. SPIN-code: 3022-2171

AuthorID (RSCI): 726099

ResearcherID: A-6919-2014

Correspondence address: volkovav@mpei.ru

RYZHENKOV Artem Vyacheslavovich, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Director of Scientific Centre for Improving the Durability of Power Plant Equipment, Institute of Energy Efficiency and Hydrogen Technologies, MPEI, Moscow. SPIN-code: 8911-2233

AuthorID (RSCI): 502212

Correspondence address: ryzhenkovav@mpei.ru

LYAPIN Valeriy Yuryevich, Doctor of Technical Sciences, Professor of Hydromechanics and Hydraulic Machines Department, Institute of Hydropower and Renewable Energy, MPEI, Moscow. SPIN-code: 1675-0187

AuthorID (RSCI): 372692

Correspondence address: liapinvy@mpei.ru

TRUSHIN Evgeniy Sergeevich, Graduate Student of Hydromechanics and Hydraulic Machines Department, MPEI, Moscow.

Correspondence address: trushinys@mpei.ru

For citations

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.

Received December 26, 2022.

© G. A. Kromm, A. V. Volkov, A. V. Ryzhenkov, V. Yu. Lyapin, E. S. Trushin