

## ЛОТОС-ЭФФЕКТ И РЕГУЛИРОВАНИЕ АДГЕЗИОННОЙ ПРОЧНОСТИ. ОБЗОР

Ю.М. Евдокимов<sup>✉</sup>, А.В. Мещеряков, В.Ю. Прохоров, М.А. Гудков

ФГБОУ ВО «Академия Государственной противопожарной службы МЧС России» (Академия ГПС МЧС России), Россия, 129366, Москва, ул. Бориса Галушкина, д. 4

evdokur@mail.ru

Рассмотрен так называемый лотос-эффект, обнаруженный на природных объектах. Приведены многочисленные примеры по изменению адгезионной прочности в желаемую сторону с учетом названного эффекта. Показана возможность получения природоподобных искусственных поверхностей твердых тел в целях предотвращения нежелательных процессов обледенения и биообрастания — самолетов, морских судов, зданий и сооружений, электрических проводов, морских нефтевышек для добычи нефти и даже растений, в частности, от ледяных дождей.

**Ключевые слова:** лотос-эффект, адгезия, адгезионная прочность, смачивание, гидрофильность, гидрофобность, супергидрофобность

**Ссылка для цитирования:** Евдокимов Ю.М., Мещеряков А.В., Прохоров В.Ю., Гудков М.А. Лотос-эффект и регулирование адгезионной прочности. Обзор // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2025. Т. 29. № 3. С. 169–180. DOI: 10.18698/2542-1468-2025-3-169-180

Работ, посвященных исследованию адгезионных явлений [1–15], в том числе с учетом лотос-эффекта, имеющего место в природе, опубликовано немало [16–49]. Впервые особенности лотос-эффекта, связанного с крайне низкой смачиваемостью поверхности описали немецкие ботаники [24], хотя о подобных свойствах листьев лотоса (и не только) было известно давно. Они показали, что поверхность листа лотоса покрыта микроскопическими выступами-бугорками (рис. 1, а) с огромным количеством нановолосков, ориентированных случайным образом. Эти нановолоски полые внутри («наномакароны») имеют внешний диаметр около 100 нм и внутренний около 50 нм. Кроме того, листья покрыты восковым слоем кутины (кутикулы), вырабатываемым железами растения, что создает уникальную иерархическую наноструктуру поверхности листа.

Авторы работы [24] объяснили водоотталкивающие и самоочищающиеся свойства подобных поверхностей, приписав супергидрофобность нано- и микрометрическим восковым текстурам на поверхности. Впоследствии материаловеды разработали бесчисленное количество синтетических супергидрофобных поверхностей, что привело к лучшему пониманию механизма смачивания, адгезии и трения.

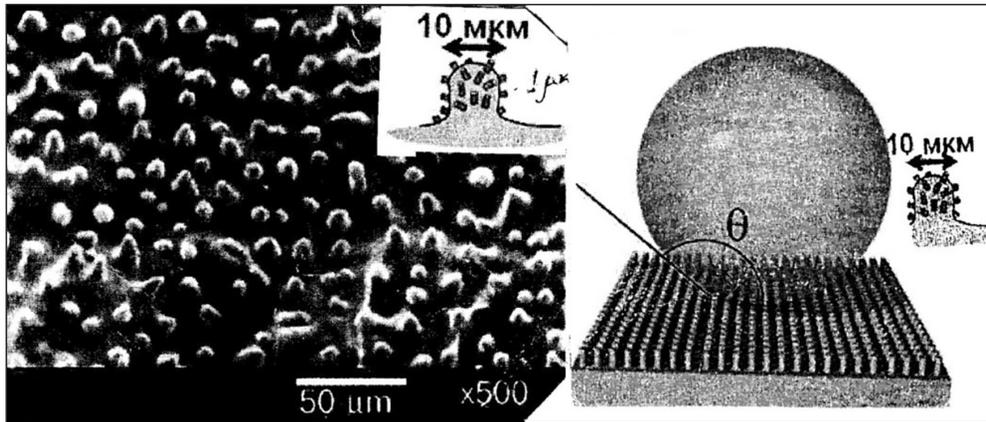
### Цель работы

Цель работы — подробное рассмотрение и анализ причин проявления лотос-эффекта на самых различных объектах; разработка рекомендаций по практическому приложению результатов работы в различных технических устройствах и технологиях.

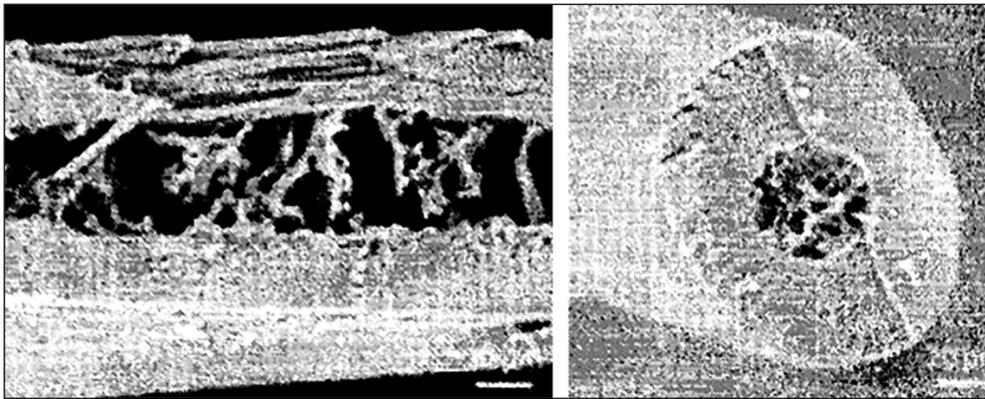
### Результаты и обсуждение

Количество растений и иных объектов, которым присущ лотос-эффект, стремительно расширялось. В частности, настурция, листья сальвинии, капусты, эвкалипта, араукарии, тростник обыкновенный имеют особенности структуры, позволяющей управлять жидкостным рулевым направленным движением. Подобные водоотталкивающие свойства присущи перьям водоплавающих птиц — гусей, уток, бакланов, папуасских пингвинов, а также полному волосу белого медведя, некоторым насекомым, например, стрекозам, цикадам, бабочкам, водомеркам (лапки) с огромным количеством волосков с минимальной площадью контакта, пористой поверхности «кувшина» непентеса, жукам из пустыни Намиб, водяным жукам и другим живым организмам (рис. 2–5) [4, 10, 15, 23–28, 31–34, 37, 39, 42–45].

С учетом лотос-эффекта предложены рекомендации и получены водоотталкивающие супер- и омнифобные материалы на основе



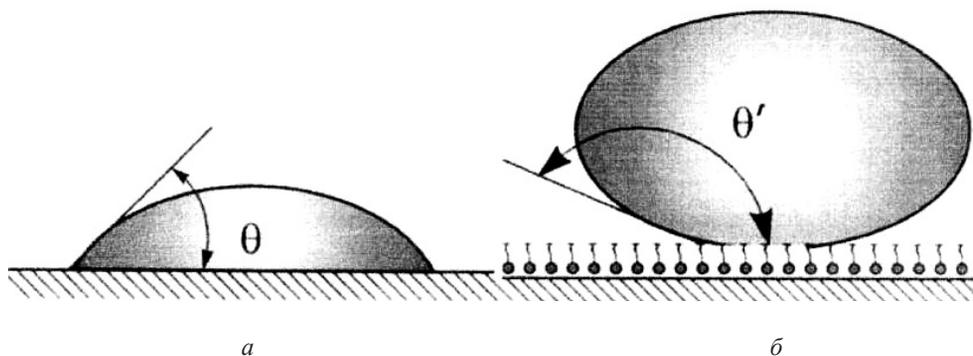
a



б

**Рис. 1.** Поверхность листа лотоса под электронным микроскопом (а) и структура полого волоса белого медведя: слева — продольный разрез, справа — торцевой

**Fig. 1.** Lotus leaf surface under electron microscope (a) and structure of polar bear hollow hair (б): left — longitudinal section, right — end section



a

б

**Рис. 2.** Капля воды на поверхности твердого тела: на гладкой поверхности (а) наблюдается хорошее смачивание и растекание капли по поверхности; при наличии большого количества часто расположенных выступов — столбиков (б) на поверхности, капля воды не смачивает поверхность, что видно по величине угла смачивания (при малых углах смачивание лучше)

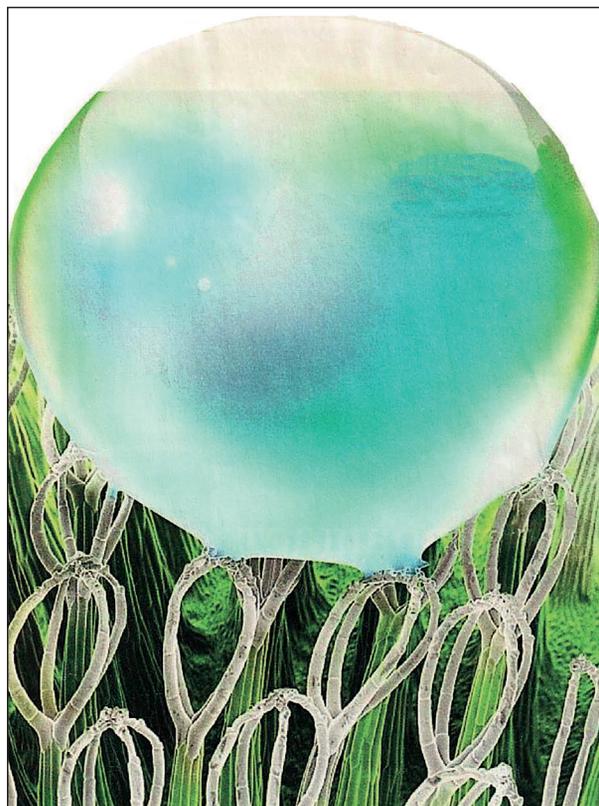
**Fig. 2.** A drop of water on the surface of a solid body: on a smooth surface (a) there is good wetting and spreading of the drop on the surface; in the presence of a large number of frequently located protrusions — columns (б) on the surface, the drop of water does not wet the surface, which can be seen from the size of the wetting angle (at small angles wetting is better)

тефлона и других полимерных материалов, покрытия на их основе, наноструктурированные покрытия, устойчивые к обледенению, самоочищающиеся поверхности (стекло, к примеру), а также новые технологии для защиты корпусов самолетов, судов от обледенения и биообрастания различными микроорганизмами. Многие материалы с необычной структурой (омнифобные) получены заимствованием (*inspired*) у природы, в частности у строения листьев сальвинии (*Salvinia*), некоторых видов водяных папоротников с высокой воздухоудерживающей способностью, что вдохновило ученых на разработку природоподобных (бионических) материалов и технологий, нашедших использование при разделении масел (керосин, газойль, моторное масло) и нефти от воды, борьбе с запотеванием, загрязнениями в трубах, обеспечивают полезную стойкость к коррозии, снижение адгезии уже образовавшихся ледяных отложений на поверхности конструкционных элементов и аппаратуры.

Суть понижения адгезионной прочности лежит в замене сильных взаимодействий в системе адгезив — подложка (субстрат) на более слабые. Однако это не всегда удается ввиду широкого спектра взаимодействий, которые могут иметь место на границе раздела адгезив — подложка (ковалентные, ионные, донорно-акцепторные, межмолекулярные, водородные связи, силы Казимира и др. [1–4, 7–12, 16, 20, 27–30, 33, 37–39], избавиться от которых непросто. Как следует из рис. 3, на некоторых участках все же проявляется сцепление (адгезия), впоследствии подобные участки получили название «поцелуйчики» (*to kiss, kisses*).

Теоретическая адгезионная прочность, обусловленная только слабыми дисперсионными силами (например, при адгезии полиэтилена к стали), может достигать 370 МПа при равновесном расстоянии принятом за 0,4 нм [48]. Последние данные [29] с привлечением кривой Ленарда — Джонса подтверждают подобный порядок сил. Из школьного курса известно, к примеру, что работа адгезии  $W_a$  ртути к стеклу при температуре 293 К при краевом угле смачивания  $130^\circ$  и поверхностном натяжении ртути  $475 \text{ мДж/м}^2$  по уравнению Дюпре Юнга составит:  $475 (1 + \cos 130) = 475 (1 - 0,64) = 171 \text{ мДж/м}^2$ , что является очень малой величиной. Легко показать, что растекания ртути (при  $f < 0$ ) нет, так как коэффициент растекания  $f = W_a - W_k = 171 - (2 \cdot 475) = -779 \text{ мДж/м}^2$ , где  $W_k$  — работа когезии.

В то же время любая капля жидкости в невесомости будет сферической с углом смачивания около  $\theta = 180^\circ$ . Это происходит и с каплей

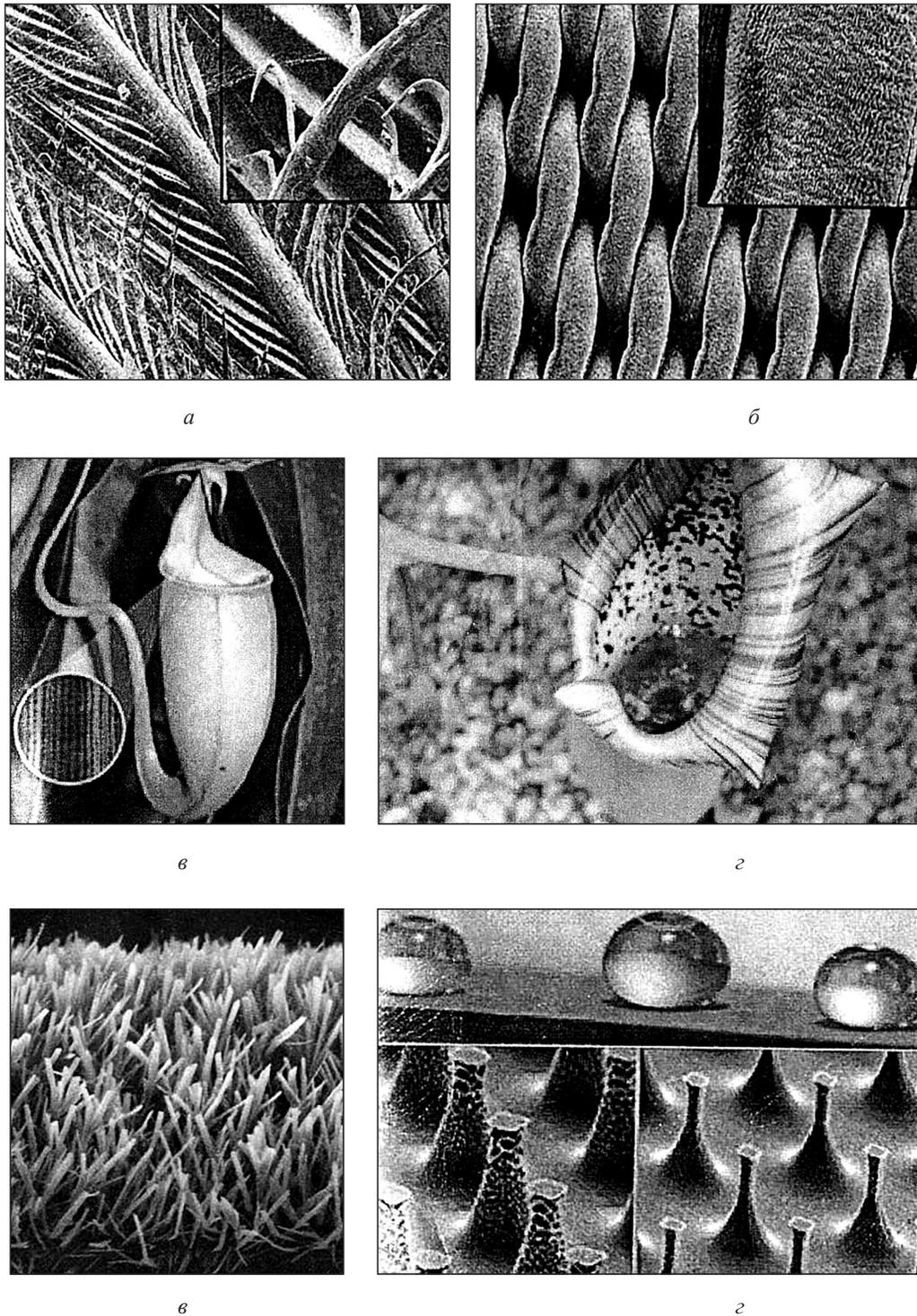


**Рис. 3.** Супергидрофобия водного папоротника *Molesta Salvinia* с венчиковидной поверхностной структурой, покрытой восковыми кристаллами, что позволяет им удерживать воздух и оставаться сухими под водой [39]

**Fig. 3.** Superhydrophobia of the aquatic fern *Molesta salvinia* with a corolla-shaped surface structure covered with wax crystals, which allows them to retain air and remain dry under water [39]

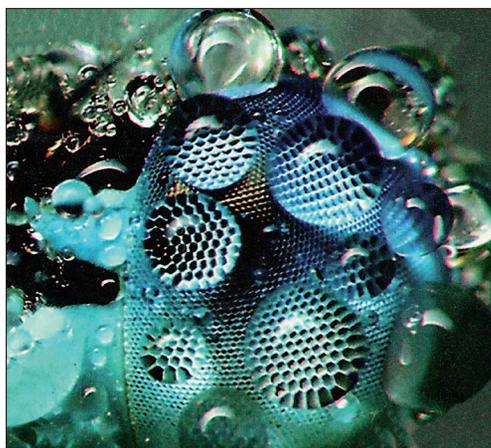
воды на поверхности листа лотоса, хотя строго говоря, краевой угол смачивания будет меньше указанной величины за счет сминания капли под действием собственной массы.

В работах О. Виноградовой и соавт. [33, 36] представлены уникальные характеристики супергидрофобных поверхностей, благодаря которым можно управлять движением жидкостей в микроканалах и получать очень скользкие поверхности, что описано также в работе [28]. Смачивающие и гидродинамические свойства супергидрофобных поверхностей связаны с наличием газа в полости текстуры, поэтому состояние Касси предпочтительнее по сравнению с состоянием Венцеля в большинстве случаев. Переход из состояния Касси в состояние Венцеля (ПКВ) подробно изучен [33, 36] (рис. 6) с самых различных позиций как и исследования по измерению прочности адгезии льда к супергидрофобным покрытиям [1, 7, 18–23, 25–28, 30–32, 34–35, 37–41].

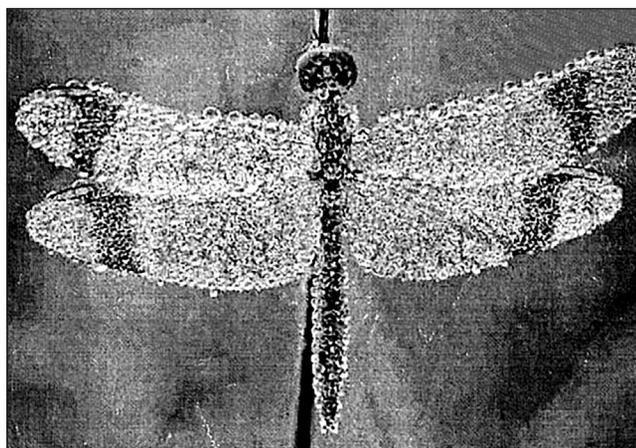


**Рис. 4.** Микроструктура пера пингвина (а) и имитирующая ее проволочная ткань, покрытая мельчайшими канавками (б); цветок непентеса кувшинчатого (the *Nepenthes*) (с), нанорельеф поверхности которого (д) обеспечивает идеальное соскальзывание севших на него насекомых; искусственный «лес пептидов», полученный учеными Израиля, поверхность которого (д) остается чистой в течение нескольких лет и искусственная несмачиваемая поверхность (е), полученная способом литографии (разработки Adler-Abramovich et al. в Тель-Авивском Университете [27])

**Fig. 4.** Microstructure of a penguin feather (a) and its imitating wire cloth covered with tiny grooves (b); the *Nepenthes* lily flower (c), whose nano-relief surface (d) ensures perfect slipping of insects that land on it; an artificial «forest of peptides» obtained by scientists in Israel, the surface of which (d) remains clean for several years and an artificial non-wetting surface (e) obtained by lithography (developed by Adler-Abramovich et al. at Tel Aviv University [27])



а



б

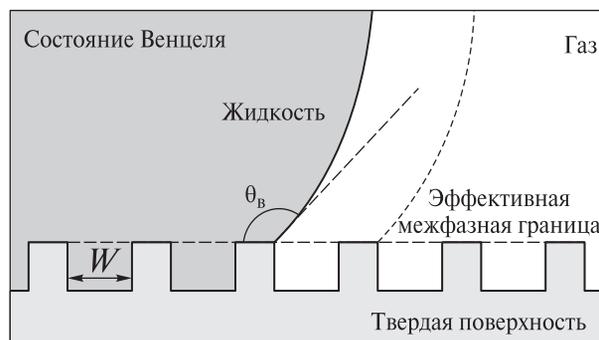
**Рис. 5.** Фасеточные глаза стрекозы (а), как и сама стрекоза (б) не смачиваются водой (росой). Снимок польского фотографа Мирослава Свитека (Miroslaw Swietek) [4, 25]. Сквозь капли воды хорошо видны увеличенные фасеты

**Fig. 5.** The facet eyes of a dragonfly (а) as well as the dragonfly itself (б) are not wetted by water (dew). Image by Polish photographer Miroslaw Swietek [4, 25]. The enlarged facets are clearly visible through the water droplets

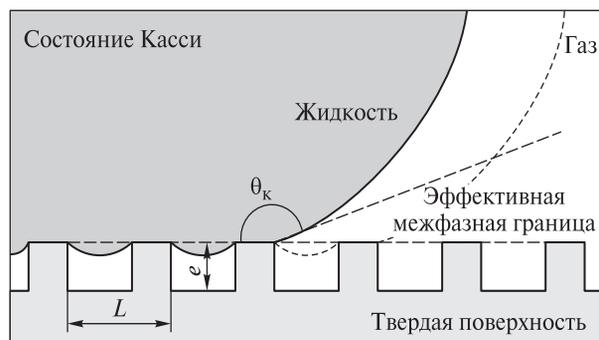
Стало известно о синтетических наноструктурированных поверхностях, сочетающих бактерицидные и бактериовыделяющие свойства, благодаря изучению крыльев однолетней цикады *Neotibicen pruinosus*, которые отталкивают воду и предотвращают распространение бактерий на поверхности. Исследования [42] получили структуры «наностолбов» литографией наноприптинга при комнатной температуре (293 К) на воздухе. Вертикально ориентированные наностержни (PS nanopillars на основе кремния — PDMS) могут уничтожить до 95 % бактерий в течение 3 ч (рис. 7).

Для лучшего понимания сцепления льда с различными подложками полезно лишний раз обратиться к природным секретам, связанным с адгезионными процессами, желательными на объектах, которые имеют место в конкретных условиях. Однако сотни работ различных авторов полностью не решили проблемы обледенения (и биообрастания), которые не утратили актуальность и в настоящее время. Причин достаточно. Многие составы для защиты от обледенения или биообрастания имеют высокую цену, токсичны для людей, обитателей морей и океанов, характеризуются трудоемкостью производства, требуют постоянного обновления и т. п.

Каковы же основные причины обледенения и биообрастания? Это — высокая адгезионная способность в системе адгезив — подложка, которая достигается при хорошей смачиваемости поверхностей твердых тел водой или иными



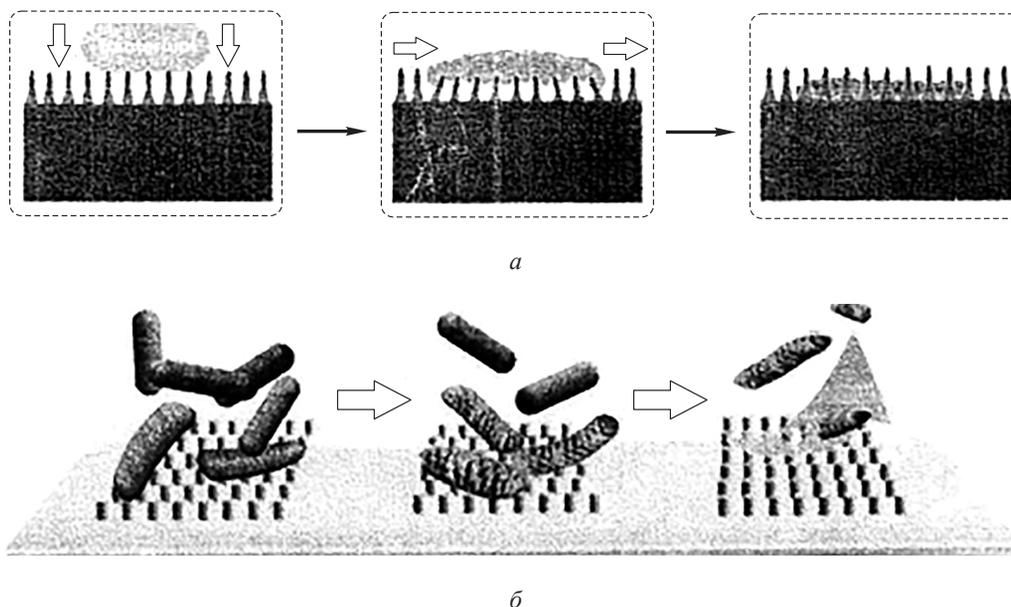
а



б

**Рис. 6.** Пример действия состояния Венцеля (а) и Касси — Бакстера (б):  $W$  — расстояние между канавками (столбиками);  $L$  — среднее расстояние между соседними стенками канавок

**Fig. 6.** Example of the action of the Wenzel (а) and Cassie — Baxter (б) condition:  $W$  — distance between grooves (columns);  $L$  — average distance between neighbouring walls of grooves



**Рис. 7.** Изображение наностолбиков (схематично), расположенных на крыльях цикады (а) и механизм (схематично) действия по уничтожению бактерий (б): показано поэтапное достижение контакта бактерий с поверхностью крыльев цикады (слева — направо). Хорошо видно прокалывание бактерий столбиками (иглочками), что приводит к гибели бактерий [42]

**Fig. 7.** Image of nanocolumns (schematically) located on cicada wings (a) and the mechanism (schematically) of action to kill bacteria (b): the step-by-step achievement of bacteria contact with the surface of cicada wings is shown (from left to right). The piercing of bacteria by the columns (needles), which leads to the death of bacteria, is clearly visible [42]

жидкостями, высоким поверхностным натяжением, оптимальном рельефе поверхности (шероховатость и иные показатели). Вследствие сложной иерархии структуры поверхности может возникнуть ситуация с наличием гидрофильных областей на гидрофобной в целом поверхности твердого тела. Поскольку лед сам является адгезивом, сцепляющим твердые тела при низких температурах, то иногда возможно некоторое понижение адгезионной прочности по торцам за счет процессов сублимации ледяной прослойки, что следует иметь в виду.

Соответственно, для устранения обледенения и биообрастания важно учитывать рельеф поверхности, использовать защитные покрытия с высокими значениями краевых углов смачивания (более  $160...170^\circ$ ) при учете ряда других характеристик, к примеру, иерархической структуры поверхности твердых тел (в частности, грибовидной, типа «нанолеса» или «нанотравы» из углеродных нанотрубок, иных волоконцев, знания о которых позволяют создавать материалы с искусственной гидрофобностью).

Что касается поверхности твердых тел, то можно отметить крайние случаи — абсолютно гладкая поверхность (подобно ювенильной свежерасщепленной поверхности слюды)

и поверхность с «грубой» шероховатостью, в неровностях которой находятся пузырьки воздуха, которые трудно удалить. Они приводят к снижению адгезионной прочности и работы адгезии. Если бы поверхность листа лотоса была гладкой, то любые загрязнения удерживались бы на ней достаточно долго вследствие высокой площади контакта. В связи с этим необходимо выбирать оптимальные варианты структуры поверхности (на основе проведенных экспериментов, анализа всевозможных моделей, литературных данных).

Некоторые факторы, способствующие снижению адгезионной прочности льда с поверхностью при приложении сдвиговой нагрузки, рассмотрены в работах [29, 33–36]. В частности, показано, что разрушение контакта между льдом и супергидрофобным покрытием происходит по смешанному вязкоупругому механизму. При этом качественно оценено и влияние квазижидкого слоя, и эффекта Ребиндера на понижение сдвиговой адгезионной прочности. Результаты экспериментов указывают на потенциальное ускорение сбрасывания льда при увеличении скорости изменения сдвиговых напряжений. Кроме прочего, гидрофобные покрытия защищают металлы от коррозии. Так, сотрудники Института физической химии и электрохимии

имени А.Н. Фрумкина (ИФХЭ) РАН [33–36] смоделировали коррозию сплава алюминия и магния и проверили свои выкладки экспериментально, предварительно обработав сплав лазером для создания микрошероховатой поверхности, на которую впоследствии нанесли фторированные покрытия, придавшие сплаву химическую гидрофобность (угол смачивания водой составлял  $171...174^\circ$ ). На такой поверхности маленькие капельки воды собирались в форме шариков, которые легко скатывались, если поверхность наклонить на  $2...3$  градуса. Описано и действие антикоррозионного эффекта [33, 35, 36].

Сотрудники Зоологического института Университета Христиана Альбрехта [25] в Киле (Германия) изучали процессы обледенения непосредственно на поверхности растений, произрастающих в Антарктиде с использованием Cryo-SEM-криомикроскопа, позволяющего получать изображения при температуре до минус  $140^\circ\text{C}$ ), предположив, что у некоторых дикорастущих растений в ходе эволюции выработалась естественная защита от обледенения. Авторы показали, что структура поверхности листьев также выполняет важную защитную функцию при низких значениях температуры наряду с химическими процессами в клетке или содержанием антифриза. Тонкие волоски (трихомы) и восковой слой на листьях являются эффективными приспособлениями для предотвращения или контроля обледенения непосредственно на поверхности листа. Если слой льда образуется непосредственно на кутикуле, клетки растения, вероятнее всего, замерзнут. Ученые обнаружили антиобледенительную восковую стратегию растений, произрастающих за Южным полярным кругом. *Deschampsia antarctica*, одно из двух растений, растущих в Антарктиде имеет даже двойную защиту с заметным эпикутикулярным восковым покрытием, состоящим из двух наложенных слоев с обеих сторон листа, что надежнее защищает от обледенения, вредных УФ-излучений и обезвоживания. Показано, что кристаллы льда образуются только на тонких трихомах листьев маргаритки многолетней (*Bellis perennis*), к примеру, при необледеневшей самой поверхности листа. Авторы считают, что изучение взаимодействия с водой на поверхности самих листьев поможет при разработке «антиобледенительных» поверхностей.

Другими объектами, достойными изучения, могут быть перья папуасских пингвинов и мех белого медведя с необычной водоотталкивающей структурой (см. рис. 1, в, рис. 4, а), которые также обладают свойствами лотос-эффекта (или эффекта лепестка, иногда так называют).

Первую структуру (поверхность) воспроизвели с помощью тканой проволочной сетки, обработанной лазером. Мех белого медведя с полыми волосинками-волокнами изучен подробнее. Волосинки остаются «сухими» (свободными ото льда), так как из-за наличия воздуха в них проникновение воды затруднено. Эти полые волокна можно уподобить микрокапиллярам, закрытым с одного конца — для таких объектов законы Пуазейля и Дзюрина не работают [4]. Поэтому мех белого медведя, как и перья водоплавающих птиц не испаряют воду, а буквально «стряхивают» ее благодаря резкому перепаду давления при выныривании или выходе из воды. На основе подобного так называемого «спонтанного выпотевания» разработаны некоторые ткани для рубашек с водоотталкивающим эффектом нового типа, которые можно мгновенно высушить при встряхивании после стирки.

Ученые из Национального Университета Тайваня [49] выяснили, что кристаллы льда медленно растут и быстро тают вдоль прямых линий на микроканавчатых поверхностях. Они проконтролировали динамику образования и роста кристаллов льда, манипулируя шероховатостью поверхности, и выяснили, что V-образная поверхность обладает лучшими противообледенительными свойствами среди других изученных поверхностей. Эти исследования открыли двери другим исследователям, разрабатывающим новые искусственные поверхности для защиты от обледенения.

Проведен анализ [40] гидрофобно-гидрофильных свойств антиобледенительных органосиликатных покрытий прецезионными методами атомно-силовой микроскопии с оценкой адгезионных свойств покрытий на основе кремнийорганических соединений. Показана неоднородность распределения по поверхности образца участков с различными адгезионными свойствами. Как правило, адгезионная прочность льда к различным подложкам зависит от температуры и шероховатости: чем ниже температура и грубее шероховатость, тем выше адгезионная прочность, хотя нельзя это утверждать однозначно [22].

С другой стороны, лотос-эффект присущ и лапкам геккона, покрытым миллионами волоконцев (щетинок), которые могут самоочищаться от загрязнений [4, 44, 45] за счет существенной несмачиваемости материала щетинок (кератина). Этот факт также препятствует слипанию самих щетинок за счет капиллярного взаимодействия между ними. Для оценки угла смачивания поверхности используются уравнения Венцеля — Дерягина, связывающие

углы смачивания на шероховатых и гладких поверхностях через коэффициент шероховатости [1], из чего следует, что шероховатость лиофильных поверхностей улучшает их смачивание (косинус угла смачивания повышается), а смачиваемость лиофобных поверхностей при наличии шероховатости ухудшается. В модели Касси принимается во внимание воздух, задерживаемый под каплей, что лучше учитывает особенности смачивания поверхности ворсистых материалов. Из этой модели следует, что ворсинки делают гидрофобные поверхности более гидрофобными, а гидрофильные — более гидрофильными. В связи с этим для повышения водоотталкивающих свойств ворсистой поверхности нужно выбирать гидрофобный материал. Пример с лапками геккона показывает [44], что они работают и как адгезивы (сила сцепления лапок с твердой поверхностью стекла достигает  $10 \text{ Н/см}^2$  и более) и в то же время обладают эффектом самоочистки от загрязнений, связанного с нарушением адгезионной прочности в системе лапка геккона — загрязняющие материалы, т. е. на основе лотос-эффекта можно объяснить и регулирование адгезионной прочности в желаемую сторону.

Перспективными направлениями можно считать создание адгезивов функционального назначения, гибридных с использованием разветвленных функциональных металло-силоксановых олигомеров с формированием материалов типа взаимопроникающих сеток, многослойных липких лент на различных основах, которые можно по форме вырезать непосредственно под тот узел, который требуется (работы в этом направлении ведутся во Всероссийском институте авиационных материалов (ВИАМ) и ФГБУН «Институт элементоорганических соединений имени А.Н. Несмеянова Российской академии наук»).

В настоящее время созданы геккон-подобные материалы (работы ФГБУН «Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов Российской академии наук», г. Черноголовка, МО) на основе полиамида с помощью электронно-лучевой литографии и сухого травления в кислороде. Таким образом, на пленке полиамида получены волоски длиной  $2 \text{ мкм}$ , диаметром  $0,5 \text{ мкм}$  и расстоянием между волосками  $1,6 \text{ мкм}$  с силой притяжения, приходящейся на один волосок, около  $70 \text{ нН}$ . Один квадратный сантиметр такой поверхности притягивается с силой  $3 \text{ Н}$ , что сравнимо с аналогичными показателями для геккона [44]. При использовании гибкого основания волосков эффективность прикрепления материала повышается на три порядка по сравнению со

случаем, когда основание твердое. Множество подобных искусственных «адгезивов» получено и зарубежными исследователями, что подробно анализируется в работе [4].

Силу адгезионного притяжения загрязнений (шаровидная частичка) к плоской поверхности можно оценить как  $f = AR/6D^2$ , где  $R$  — радиус шара,  $D$  — расстояние от шара до поверхности,  $A$  — константа Гамакера, зависящая только от типа материалов шара и поверхности, для большинства материалов имеет значение порядка  $10^{-19} \text{ Дж}$  [44] (есть некоторые различия при оценке этой силы в модели ДМТ (Дерягин — Муллер — Топоров) адгезии и модели ДКР (Джонсон — Кендалл — Робертс) [1]).

Приведенные подходы могут оказаться полезными при освоении Арктической зоны Российской Федерации, разработке способов борьбы с тромбообразованием, обледенением самолетов, крыш домов, линий электропередач и даже деревьев и кустарников (вспомним о ледяных дождях), биообрастанием судов, морских нефтевышек, разливами нефти при аварии нефтяных танкеров, управлении смачиваемостью, очистке воды от различных загрязнений (масел, бензина, сырой нефти).

## Выводы

Результатом анализа проявления лотос-эффекта на различных объектах стал ряд рекомендаций по созданию искусственных поверхностей, стойких к обледенению и обрастанию микроорганизмами, что позволяет уменьшить нанесение вреда сельскохозяйственным культурам, повысить эффективность работы панелей солнечных батарей, улучшить очистку воды при разливе нефти из-за аварий нефтетанкеров за счет управления смачиваемостью, грамотно бороться с проблемами обледенения и биообрастания.

## Список литературы

- [1] Дерягин Б.В., Кротова Н.А., Смилга В.П. Адгезия твердых тел. М.: Наука, 1973. 280 с.
- [2] Bikerman I.I. The science of adhesion. N.Y.; London: Academic Press, 1968, 349 p.
- [3] Evdokimov Yu.M., Fedorov M.S. Methods of Adhesiometry of Adhesive Bonds // Polymer Science, Series D, 2012, v. 5, no. 1, pp. 20–26.
- [4] Евдокимов Ю.М. Адгезия. От макро- и микроуровня к наносистемам. М.: МГУЛ, 2011. 208 с.
- [5] Берлин А.А., Басин В.Е. Основы адгезии полимеров. М.: Химия, 1974. 392 с.
- [6] Де Жен П., Бадос Ж. Хрупкие объекты. М.: Мир, 2000. 188 с.
- [7] Вакула В.Л., Притыкин Л.М. Физическая химия адгезии полимеров. М.: Химия, 1984. 222 с.

- [8] Москвитин Н.И. Физико-химические основы процессов склеивания и прилипания. М.: Лесная промышленность, 1974. 101 с.
- [9] Вильнав Ж.-Ж. Клеевые соединения. М.: Техносфера, 2007. 384 с.
- [10] Зимон А.Д. Адгезия пыли и порошков. М.: Химия, 1978. 431 с.
- [11] Кинлок Э. Адгезия и адгезивы. Наука и технология. М.: Мир, 2001. 484 с.
- [12] Аронович Д.А. Анаэробные адгезивы: состав, свойства, применение. Н. Новгород: ИП Гладкова Оксана Викторовна, 2024. 444 с.
- [13] Kendal K. Thin — film peeling — the elastic term // *J. Phys.*, D 8, 1975, pp. 1449–1453.
- [14] Biscof C., Possart W. Adhesion — Theoretische und experimentelle Grundlagen. Berlin: Akademie Verlag, 1983, 609 p.
- [15] Бионика 2022: сб. статей II Междунар. науч.-практ. конф., 23–24 декабря 2022, г. Москва. М.: Ассоциация технических университетов, 2023. 285 с.
- [16] Israelachvili J. Intermolecular and Surface Forces. London: Academic Press, 1992, 296 p.
- [17] Маэно Н. Наука о льде. М.: Мир, 1988. 231 с.
- [18] Адамсон А.У. Физическая химия поверхностей. М.: Мир, 1979. 568 с.
- [19] Абрамзон А.А. Возьмем за образец лист лотоса // *Химия и жизнь*, 1982. № 11. С. 38–40.
- [20] Кондрашов С.В. Исследование адгезии льда к наномодифицированным полиуретановым покрытиям // *Материалы Всерос. науч.-техн. конф. «Термопластичные материалы и функциональные покрытия»*, 23 апреля 2019 г. М.: Изд-во Всероссийского научно-исследовательского института авиационных материалов Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», 2019. С. 118–126.
- [21] Лебедев Г.А., Трипольников В.П. Разработка способов и технологических приемов разрушения атмосферных наледей взрывами // *Проблемы Арктики и Антарктики*, 2009. № 1(81). С. 80–85.
- [22] Бузик В.М., Каблов Б.Н. Арктическое материаловедение. Вып. 3. Томск: Издательский Дом Томского государственного университета, 2018. 44 с.
- [23] Гегузин Я.Е. Капля. М.: Наука. 1977. 176 с.
- [24] Barthlott W., Neinhuis C. Purity of the sacred lotus, or escape from condensation in biological Surface // *Planta*, 1997, v. 202, pp. 1–8.
- [25] Gorb S.N., Gorb E.V. Anti-icing strategies of plant surfaces: the ice formation on leaves visualized by Cryo-SEM experiment // *The Science of Nature*, 2022, v. 109, article 24.
- [26] McGorty R., Fung J., Kaz D., Manoharan V.N. Colloidal self-assembly at an interface // *Materials Today*, 2010, v. 13, no. 6, pp. 34–38.
- [27] Agbenyega J. A window that washes itself: Nanotechnology. DOI:10.1016/S1369-7021(10)70025-0
- [28] Малкин А.Я., Патлажан С.А., Куличихин В.Г. Физико-химические явления, приводящие к скольжению жидкости по твердой поверхности // *Успехи химии*, 2019. № 88(3). С. 319–349.
- [29] Muller M., Hrabe P., Chotoborsky R., Herak D. Evaluation of factors influencing adhesive bond strength // *Res. Agr. Eng.*, 2006, v. 52, pp. 30–37.
- [30] Hong X., Gao X., Jiang L. Application of superhydrophobic Surface with High Adhesive Force in No Lost Transport of Superparamagnetic Microdroplet // *J. Am. Chem. Soc.*, 2007, v. 129 (6), pp. 1478–1479.
- [31] Li X., Bista P., Stetten A.Z., Bonart H. Spontaneous charging affects the motion of sliding drops // *Nature Physics*, v. 18(6), pp. 1–7. DOI:10.1038/s41567-022-01563-6
- [32] Шилова О.А., Халаман В.В., Нгуен В.Чи., Кондратенко Ю.А., Глебова И.Б., Соколов Г.С., Вошников В.И., Полетаев К.А., Кочина Т.А. Влияние состава и состояния поверхности противообрастающих покрытий на степень биообрастания по результатам климатических морских испытаний в тропиках и около полярного круга // *Химия для биологии, медицины, экологии и сельского хозяйства: сб. тезисов докладов 3 Междунар. симпозиума ISCHEM-2024, 5–7 июня 2024 г. Санкт-Петербург: Лема, 2024. С. 34–35.*
- [33] Vinogradova O.I., Dubov A.L. Superhydrophobic textures of microfluidics // *Mendelev Commun*, 2012, v. 19, pp. 229–237.
- [34] Bing W., Wang H., Tian L., Zhao J., Jin H., Du W., Ren L. Small Structure, Large effect: Functional Surfaces inspired by Salvinia Leaves, 2021, v. 2, iss. 9, p. 2100079. <https://doi.org/10.1002/ssr.202100079>
- [35] Boinovich L.B., Emelyanenko A.M. Recent progress in understanding the anti-icing behavior of materials // *Adv. Colloid Interface Sci.*, 2024, v. 323, p. 103057. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2023.103057>
- [36] Belyaev A.V., Vinogradova O.I. Electro-osmosis on Anisotropic Superhydrophobic Surface // *Phys.Rev. Letters*, 2011, v. 107, p. 098301 (1–4).
- [37] Gu Z., Li S., Zhang F., Wang Sh. Understanding Surface Adhesion in Nature: A Peeling Model // *Adv. Sci.* 2016, v. 3, p. 1500327. DOI: 10.1002/adv.201500327
- [38] Kestelman V.N., Jevdokimov J.M. Einige neue Gesichtspunkte zu Adhäsionsbeziehungen // *Plaste und Kautschuk*, 1992, v. 39, no. 10, pp. 345–346.
- [39] Barthwal S., Uniyal S., Barthwal S. Nature-Inspired Superhydrophobic Coating Materials: Drawing Inspiration from Nature for Enhanced Functionality // *Micromachines*, 2024, v. 15(3), p. 391. DOI: 10.3390/mi15030391
- [40] Новиков И.А. Исследование особенностей гидрофобно-гидрофильных свойств антиобледенительных покрытий методами АСМ // *Наука настоящего и будущего: сб. материалов конф. X науч.-практ. конф. с междунар. участием для студентов, аспирантов, молодых ученых, т. 1, Санкт-Петербург, 19–20 мая 2022 г.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2022. С. 108–111.*
- [41] Huang G., Yengannagari A.R., Matsumori K., Patel P., Datla A., Trindade K., Amarsanaa E., Zhao T., Köhler U., Busko D., Richards B.S. Radioactive cooling and in door light management and self-cleaning polymer based metamaterial // *Nature Communications*, 2024, v. 15 (1), article number 3798. DOI: 10.1038/s41467-024-48150-2
- [42] Salatto D., Huang Z., Benziger P.T., Carrillo J.-M. Structure-based Design of Dual Bactericidal and Bacteria-Releasing Nanosurfaces // *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2023, v. 15, iss. 2, pp. 3420–3432. <https://doi.org/10.1021/acsmi.2cx18121>
- [43] Кричевский Г.Е. Учимся мудрости у природы. М.: Сам полиграфист, 2015. 151 с.
- [44] Чашухин В.Г. Движение миниатюрного робота в ограниченном пространстве: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Учреждение Российской академии наук Ин-

- ститута проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН. М., 2008.
- [45] Нажипкызы М., Мансуров З.А. Супергидрофобные материалы и покрытия: обзор // Горение и плазмохимия, 2020. № 18. С. 163–189.
- [46] Евдокимов Ю.М., Мещеряков А.В., Русских Д.В. Проблемы Арктического материаловедения (адгезия) // Клеи. Герметики. Технологии, 2022. № 11. С. 39–42. DOI: 10.31044/1813-7008-2022-0-4-39-42
- [47] Евдокимов Ю.М., Прохоров В.Ю., Гудков М.А., Бамба Э.Ж. Адгезия на ювенильных и подобных контактах // Современные достижения в области клеев и герметиков: материалы, сырье, технологии: сб. трудов Тезисы докладов IV Междунар. науч.-техн. конф., 26–28 сентября 2023 года, Дзержинск. Нижний Новгород: ИП Гладкова Оксана Викторовна, 2023, с. 265–267.
- [48] Kraus D., Manson J. Adhesion of polyethylene and poly-styrene to steel // Polymer JU. Sci., 1951, v. 6, p. 625.
- [49] Lo C-W, Sahoo V., Lu M-C. Control of Ice Formation // ACS Nano, February 28, 2017, v. 11, iss. 3, pp. 2665–2674. DOI:10.1021/acsnano.6b07348

## Сведения об авторах

**Евдокимов Юрий Михайлович**  — канд. хим. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Академия Государственной противопожарной службы МЧС России» (Академия ГПС МЧС России), evdokur@mail.ru

**Мещеряков Алексей Викторович** — начальник Учебно-научного комплекса, ФГБОУ ВО «Академия Государственной противопожарной службы МЧС России» (Академия ГПС МЧС России), malviktrp@gmail.ru

**Прохоров Виктор Юрьевич** — канд. техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Академия Государственной противопожарной службы МЧС России» (Академия ГПС МЧС России), prohorovv@yandex.ru

**Гудков Максим Андреевич** — канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Академия Государственной противопожарной службы МЧС России» (Академия ГПС МЧС России), gudokmaksim@yandex.ru

Поступила в редакцию 29.08.2024.

Одобрено после рецензирования 21.01.2025.

Принята к публикации 10.04.2025.

## LOTUS EFFECT AND ADHESION STRENGTH ADJUSTMENT. OVERVIEW

**Yu.M. Evdokimov** , **A.V. Meshcheryakov**, **V.Yu. Prohorov**, **M.A. Gudkov**

State Fire Academy of EMERCOM of Russia, 4, Boris Galushkina st., 129366, Moscow, Russia

evdokur@mail.ru

The so-called lotus effect found on natural objects is considered. Numerous examples are given to change the adhesion strength in the desired direction, considering the effect mentioned. The possibility of obtaining nature-like artificial surfaces of solid bodies in order to prevent undesirable processes of icing and biofouling — aircraft, marine vessels, buildings and structures, electrical wires, offshore oil rigs for oil extraction and even plants from icy rains is shown.

**Keywords:** lotus-effect, adhesion, adhesion strength, wetting, hydrophilicity, hydrophobicity, superhydrophobicity

**Suggested citation:** Evdokimov Yu.M., Meshcheryakov A.V., Prokhorov V.Yu., Gudkov M.A. *Lotos-effekt i regulirovanie adgezionnoy prochnosti. Obzor* [Lotus effect and adhesion strength adjustment. Overview]. Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin, 2025, vol. 29, no. 3, pp. 169–180. DOI: 10.18698/2542-1468-2025-3-169-180

## References

- [1] Deryagin B.V., Krotova N.A., Smilga V.P. *Adgeziya tverdykh tel* [Adhesion of solids]. Moscow: Nauka, 1973, 280 p.
- [2] Bikerman I.I. The science of adhesion Joints. N.Y.; London: Academic Press, 1968, 349 p.
- [3] Evdokimov Yu.M., Fedorov M.S. Methods of Adhesiometry of Adhesive Bonds. Polymer Science, Series D, 2012, v. 5, no. 1, pp. 20–26.
- [4] Evdokimov Yu.M. *Adgeziya. Ot makro- i mikrourovniya k nanosistemam* [Adhesion. From macro- and microlevels to nanosystems]. Moscow: MSFU, 2011, 208 p.

- [5] Berlin A.A., Basin V.E. *Osnovy adgezii polimerov* [Basics of polymer adhesion]. Moscow: Khimiya [Chemistry], 1974, 392 p.
- [6] De Gennes P., Bados J. *Khrupkie ob'ekty* [Fragile objects]. Moscow: Mir, 2000, 188 p.
- [7] Vakula V.L., Pritykin L.M. *Fizicheskaya khimiya adgezii polimerov* [Physical chemistry of polymer adhesion]. Moscow: Khimiya [Chemistry], 1984, 222 p.
- [8] Moskvitin N.I. *Fiziko-khimicheskie osnovy protsessov sklevaniya i prilipaniya* [Physicochemical foundations of gluing and adhesion processes]. Moscow: Lesnaya prom-st' [Forest Industry], 1974, 101 p.
- [9] Vilnave J.-J. *Kleevye soedineniya* [Adhesive connections]. Moscow: Tekhnosfera, 2007, 384 p.
- [10] Zimon A.D. *Adgeziya pyli i poroshkov* [Adhesion of dust and powders]. Moscow: Khimiya [Chemistry], 1978, 431 p.
- [11] Kinlok E. *Adgeziya i adgezivy. Nauka i tekhnologiya* [Adhesion and adhesives. Science and technology]. Moscow: Mir, 2001, 484 p.
- [12] Aronovich D.A. *Anaerobnye adgezivy: sostav, svoystva, primeneniye* [Anaerobic adhesives: composition, properties, application]. N. Novgorod: Gladkova O.V., 2024, 444 p.
- [13] Kendal K. Thin — film peeling — the elastic term // *J. Phys.*, D 8, 1975, pp. 1449–1453.
- [14] Biscoff C., Possart W. *Adhesion — Theoretische und experimentelle Grundlagen*. Berlin: Akademie Verlag, 1983, 609 p.
- [15] *Bionika 2022: sb. statey II Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Bionika 2022: collection of scientific papers. articles of the II International Scientific and Practical Conference], December 23–24, 2022. Moscow: Association of Technical Universities, 2023, 285 p.
- [16] Israelachvili J. *Intermolecular and Surface Forces*. London: Academic Press, 1992, 296 p.
- [17] Maeno N. *Nauka o l'de* [Science of Ice]. Moscow: Mir, 1988, 231 p.
- [18] Adamson A.U. *Fizicheskaya khimiya poverkhnostey* [Physical Chemistry of Surfaces]. Moscow: Mir, 1979, 568 p.
- [19] Abramzon A.A. *Voz'mem za obrazets list lotosa* [Let's Take a Lotus Leaf as a Sample]. *Khimiya i zhizn'* [Chemistry and Life], 1982, no. 11, pp. 38–40.
- [20] Kondrashov S.V. *Issledovanie adgezii l'da k nanomodifitsirovannym poliuretanovym pokrytiyam* [Study of Ice Adhesion to Nanomodified Polyurethane Coatings]. Mater. Vserossiyskoy NG konferentsii «Termoplastichnye materialy i funktsional'nye pokrytiya» [Proc. All-Russian NG Conference «Thermoplastic Materials and Functional Coatings»], April 23, 2019. Moscow: All-Russian Research Institute of Aviation Materials, National Research Center «Kurchatov Institute», 2019, pp. 118–126.
- [21] Lebedev G.A., Tripol'nikov V.P. *Razrabotka sposobov i tekhnologicheskikh priemov razrusheniya atmosferykh naleyey vzryvami* [Development of methods and technological techniques for the destruction of atmospheric ice by explosions]. *Problemy Arktiki i Antarktiki* [Problems of the Arctic and Antarctic], 2009, no. 1 (81), pp. 80–85.
- [22] Buzik V.M., Kablov B.N. *Arkticheskoe materialovedenie. Vyp. 3. Tomsk: Izdatel'skiy Dom Tomskogo gosudarstvennogo universiteta* [Arctic Materials Science]. Iss. 3. Tomsk: Publishing House of Tomsk State University, 2018, 44 p.
- [23] Geguzin Ya.E. *Kaplya* [Kaplya]. Moscow: Science, 1977, 176 p.
- [24] Barthlott W., Neinhuis C. Purity of the sacred lotus, or escape from condensation in biological surface. *Planta*, 1997, v. 202, pp. 1–8.
- [25] Gorb S.N., Gorb E.V. Anti-icing strategies of plant surfaces: the ice formation on leaves visualized by Cruo-SEM experiment. *The Science of Nature*, 2022, v. 109, article 24.
- [26] McGorty R., Fung J., Kaz D., Manoharan V.N. Colloidal self-assembly at an interface. *Materials Today*, 2010, v. 13, no. 6, pp. 34–38.
- [27] Agbenyega J. A window that washes itself: Nanotechnology. DOI:10.1016/S1369-7021(10)70025-0
- [28] Malkin A.Ya., Patlazhan S.A., Kulichikhin V.G. *Fiziko-khimicheskie yavleniya, privodyashchie k skol'zheniyu zhidkosti po tverdogy poverkhnosti* [Physicochemical phenomena leading to liquid sliding on a solid surface]. *Uspekhi khimii* [Uspekhi Khimii], 2019, no. 88(3), pp. 319–349.
- [29] Muller M., Hrabe P., Choteborsky R., Herak D. Evaluation of factors influencing adhesive bond strength. *RES. AGR. ENG.*, 2006(1), v. 52, pp. 30–37.
- [30] Hong X., Gao X., Jiang L. Application of superhydrophobic Surface with High Adhesive Force in No Lost Transport of Superparamagnetic Microdroplet. *J. Am. Chem. Soc.*, 2007, v. 129 (6), pp. 1478–1479.
- [31] Li X., Bista P., Stetten A.Z., Bonart H. Spontaneous charging affects the motion of sliding drops. *Nature Physics*, v. 18(6), pp. 1–7. DOI:10.1038/s41567-022-01563-6
- [32] Shilova O.A., Khalaman V.V., Nguen V.Chi., Kondratenko Yu.A., Glebova I.B., Sokolov G.S., Voshchikov V.I., Poletaev K.A., Kochina T.A. *Vliyanie sostava i sostoyaniya poverkhnosti protivobrastayushchikh pokrytiy na stepen' bioobrastaniya po rezul'tatam klimaticheskikh morskikh ispytaniya v tropikakh i okolo polyarnogo kruga* [Influence of the composition and surface condition of antifouling coatings on the degree of biofouling based on the results of climatic sea tests in the tropics and near the Arctic Circle]. *Khimiya dlya biologii, meditsiny, ekologii i sel'skogo khozyaystva: sb. tezisov dokladov 3 Mezhdunarodnogo simpoziuma ISCHEM-2024* [Chemistry for biology, medicine, ecology and agriculture: collection of scientific papers]. Abstracts of the 3rd International Symposium ISCHEM-2024, June 5–7, 2024. St. Petersburg: Lema, 2024, pp. 34–35.
- [33] Vinogradova O.I., Dubov A.L. Superhydrophobic textures for microfluidics. *Mendeleev Commun*, 2012, v. 19, pp. 229–237.
- [34] Bing W., Wang H., Tian L., Zhao J., Jin H., Du W., Ren L. Small Structure, Large effect: Functional Surfaces inspired by Salvinia Leaves, 2021, v. 2, iss. 9, p. 2100079. <https://doi.org/10.1002/ssr.202100079>
- [35] Boinovich L.B., Emelyanenko A.M. Recent progress in understanding the anti-icing behavior of materials. *Adv. Colloid Interface Sci.*, 2024, v. 323, p. 103057. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2023.103057>

- [36] Belyaev A.V., Vinogradova O.I. Electro-osmosis on Anisotropic Superhydrophobic Surface. *Phys.Rev. Letters*, 2011, v. 107, p. 098301 (1–4).
- [37] Gu Z., Li S., Zhang F., Wang Sh. Understanding Surface Adhesion in Nature: A Peeling Model. *Adv. Sci.* 2016, v. 3, p. 1500327. DOI: 10.1002/advs.201500327
- [38] Kestelman V.N., Jevdokimov J.M. Einige neue gtsichtspunkte zu adhesionsbeziehungen. *Plaste und kautschuk*, 1992, v. 39, no. 10, pp. 345–346.
- [39] Barthwal S., Uniyal S., Barthwal S. Nature-Inspired Superhydrophobic Coating Materials: Drawing Inspiration from Nature for Enhanced Functionality. *Micromachines*, 2024, v. 15(3), p. 391. DOI: 10.3390/mi15030391
- [40] Novikov I.A. *Issledovanie osobennostey gidrofobno-gidrofil'nykh svoystv antiobledenitel'nykh pokrytiy metodami ASM* [Study of the Features of Hydrophobic-Hydrophilic Properties of Anti-Icing Coatings by AFM Methods]. *Nauka nastoyashchego i budushchego: sb. materialov konferentsii Kh nauchno-prakticheskaya konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiem dlya studentov, aspirantov, molodykh uchenykh* [Science of the Present and the Future: Conference Proceedings, X Scientific and Practical Conference with International Participation for Students, Postgraduates, and Young Scientists], v. 1, NSB X, St. Petersburg, May 19–20 (21), 2022. St. Petersburg: ETU «LETI», 2022, pp. 108–111.
- [43] Krichevskiy G.E. *Uchimsya mudrosti u prirody* [Learning Wisdom from Nature]. Moscow: Sam Polygraphist, 2015, 151 p.
- [44] Chashchukhin V.G. *Dvizhenie miniatyurnogo robota v ogranichenom prostranstve* [Movement of a miniature robot in a limited space]. Dis. Cand. Sci. (Phys. and Mathematics). Institution of the Russian Academy of Sciences, Institute for Problems in Mechanics named after A.Yu. Ishlinsky, Russian Academy of Sciences, Moscow, 2008.
- [45] Nazhipkyzy M., Mansurov Z.A. *Supergidrofobnye materialy i pokrytiya: obzor* [Superhydrophobic materials and coatings: a review]. *Gorenie i plazmokhimiya* [Combustion and Plasma Chemistry], 2020, no. 18, pp. 163–189.
- [46] Evdokimov Yu.M., Meshcheryakov A.V., Russkikh D.V. *Problemy Arkticheskogo materialovedeniya (adgeziya)* [Problems of Arctic Materials Science (adhesion)]. *Klei. Germetiki. Tekhnologii* [Adhesives. Sealants. Technologies], 2022, no. 11, pp. 39–42. DOI: 10.31044/1813-7008-2022-0-4-39-42
- [47] Evdokimov Yu.M., Prokhorov V.Yu., Gudkov M.A., Bamba E.Zh. *Adgeziya na yuvenil'nykh i podobnykh kontaktakh* [Adhesion on juvenile and similar contacts]. *Sovremennye dostizheniya v oblasti kleev i germetikov: materialy, syr'e, tekhnologii: sb. trudov Tezisy dokladov IV Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Modern achievements in the field of adhesives and sealants: materials, raw materials, technologies: collection of works Abstracts of the IV International Scientific and Technical Conference], September 26–28, 2023, Dzerzhinsk. Nizhny Novgorod: Gladkova O.V., 2023, pp. 265–267.
- [48] Kraus D., Manson J. Adhesion of polyethylene and poly-styrene to steel. *Polymer JU. Sci.*, 1951, v. 6, p. 625.
- [49] Lo C-W, Sahoo V., Lu M-C. Control of Ice Formation // *ACS Nano*, February 28, 2017, v. 11, iss. 3, pp. 2665–2674. DOI:10.1021/acsnano.6b07348

## Authors' information

**Evdokimov Yuriy Mikhaylovich**  — Cand. Sci. (Chem.), Professor of the State Fire Academy of EMERCOM, evdokur@mail.ru

**Meshecheryakov Aleksey Viktorovich** — Head of Department of Process of Fire, State Fire Academy of EMERCOM, malviktp@gmail.ru

**Prokhorov Viktor Yur'evich** — Cand. Sci. (Tech.), Professor of the State Fire Academy of EMERCOM, prohorovv@yandex.ru

**Gudkov Maksim Andreevich** — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the State Fire Academy of EMERCOM, Moscow, gudokmaksim@yandex.ru

Received 29.08.2024.

Approved after review 21.01.2025.

Accepted for publication 10.04.2025.

Вклад авторов: все авторы в равной доле участвовали в написании статьи  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов  
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article  
The authors declare that there is no conflict of interest