

К. Шварц¹, А. Даулетбекова², М. Сорокин³

¹ Центр по изучению тяжёлых ионов им. Гельмгольца, Дармштадт, Германия

² Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Нур-Султан, Казахстан

³ Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

Эффект лотоса и биороботы

Эффект лотоса – это низкая смачиваемость поверхности, наблюдаемая у листьев этого растения (*Nelumbo*). Вода скатывается каплями или соскальзывает с листьев, унося с собой все частицы грязи с поверхности. За это отвечает сложная структура растения (рис.1). Другие растения, например, тростник (*Phragmites australis*), а также крылья многих насекомых обладают этим эффектом, появившимся в природе около 500 миллионов лет назад.

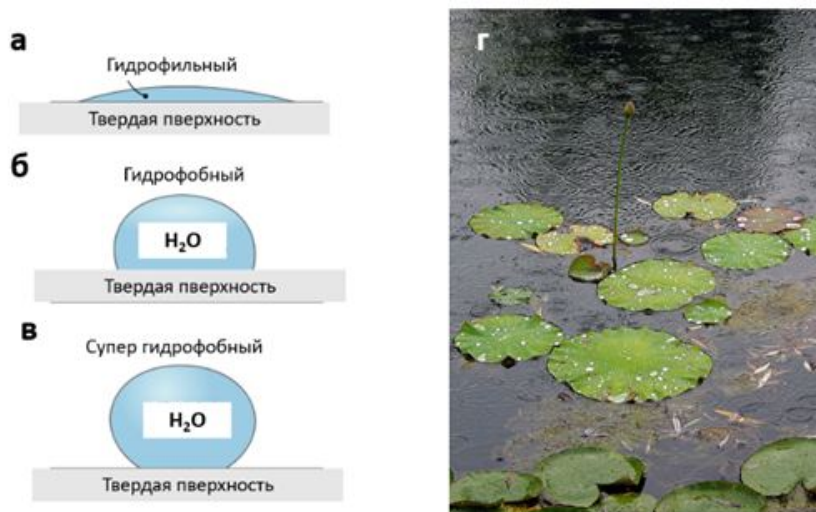


Рисунок 1 – Взаимодействие жидкостей с поверхностью: а - жидкость на гидрофильной, смачивающей поверхности (адгезия сильнее, чем когезия в жидкости); б - жидкость на гидрофобной, отталкивающей поверхности (когезия в жидкости сильнее, чем адгезия); в - жидкость на супергидрофобной, водоотталкивающей поверхности (когезия в жидкости намного сильнее адгезии) с образованием отдельных капель; г - супергидрофобность воды была обнаружена профессором Вильгельмом Бартлоттом (1946) в растении лотоса (*Nelumbo*): отдельные капли воды на листьях лотоса.

Способность водоотталкивающей структуры поверхности к самоочищению была обнаружена в 1970-х годах всемирно известным профессором Боннского университета Вильгельмом Бартлоттом (*Wilhelm Barthlott*, 1946), одним из пионеров по применению биологических и биотехнических эффектов в мире, который в 1992 году и дал ей название «эффект лотоса». С середины 1990-х годов эффект лотоса используется во многих технических приложениях [1].

В начале 21 века Бартлотт и его коллеги обнаружили на водном растении плавающий папоротник обыкновенный (*Salvinianatans*, рис.2) новый эффект: образование стабильного слоя воздуха под водой, который назвали «эффект салвинии» (*Salvinia effect*). Тонкие длинные (~10 см) волоски растений *Salvinianatans* ответственны за эффект образования воздушного слоя между листом и каплями воды (рис. 2, б). Эти волоски обладают двумя различными свойствами. Большие площади покрыты мелкими кристаллами воска и, следовательно, являются химически гидрофобными, то есть водоотталкивающими. С другой стороны, самые внешние кончики волос гидрофильны, то есть пузырьки воздуха, которые прилипают к водоотталкивающим частям волос, больше не могут уйти. Благодаря особому

сочетанию водоотталкивающих и водопротягивающих сегментов воздух буквально заключен под слоем воды и образует защитный покров вокруг растения.



Рисунок 2 – В начале двадцать первого века профессор Вильгельм Бартлотт обнаружил образование воздушного слоя под водой между листом и длинными волосками у растения плавучий папоротник обыкновенный (*Salvinia natans*), названное им «эффектом сальвинии»: а – плавающие листья *Salvinianatans*; б – образование стабильного слоя воздуха под водой между листом и длинными волосками

Бартлотт пытается использовать устойчивый слой воздуха на поверхности для покрытия корпусов кораблей воздушной оболочкой, уменьшающей трение. Для этого листья *Salvinia natans* приклеивают специальным способом к полимеру, а полимер приклеивают к корпусу корабля. Это означает, что в конечном итоге корабли будут плавать не в воде, а в воздушном пузыре без зазоров. Этот слой воздуха снижает трение и уменьшает расход горючего. В первых испытаниях было достигнуто снижение на 30 %. Судостроение является важным источником выбросов углерода (CO_2) во всем мире (более миллиарда тонн в год!). Применение эффекта сальвинии может стать важным фактором защиты окружающей среды.

2. Эффект лотоса и гидроботы

Профессор Ху (*Jinlian Hu*), директор лаборатории в университете Гонконга (*City University of Hong Kong*) и всемирно известный ученый в области бионики и биоматериалов, использует эффект лотоса для создания устройств транспортировки жидкостей, которые она назвала гидророботами или гидроботами (англ. *Hydrorobot*) [2]. Сотрудники профессора Ху совместно с лабораторией биоматериалов Китайской академии наук в Пекине занимаются процессами транспортировки жидкости для применений в медицине и биохимии [2].

Контролируемые манипуляции с жидкостью на твердых поверхностях применяются во многих областях, включая химический синтез, биоанализ и биоэнергетику. В последнее время используются способы манипулирования жидкости, основанные на внешней стимуляции и компьютерном управлении. При этом необходимо решить несколько технических проблем [3]. Во-первых, сложно точно управлять движением жидкости на большой скорости (несколько метров в секунду). Задача состоит в том, чтобы иметь возможность быстро остановить движение жидкости (капель). Во-вторых, манипуляции с жидкостью должны происходить в трех измерениях. Для их решения профессор Ху разработала метод магнитного манипулирования жидкостью [2].

Идея переноса жидкости возникла из наблюдений эффекта лотоса (рис. 3А). Китайские ученые наблюдали за рыбками на супергидрофобных листьях. Случайно запрыгнувшая на лист рыбка может «сбежать» и уплыть обратно в пруд. При этом часть окружающей её воды также уносится (рис. 3А) за счет высокого уровня сцепления супергидрофильной чешуи рыбы с водой. Ученые использовали комбинацию супергидрофобных (водоотталкивающих) поверхностей для манипулирования жидкостью в разных направлениях с помощью гидрофильного железного шара с внешним магнитным полем (рис.3, В и С).

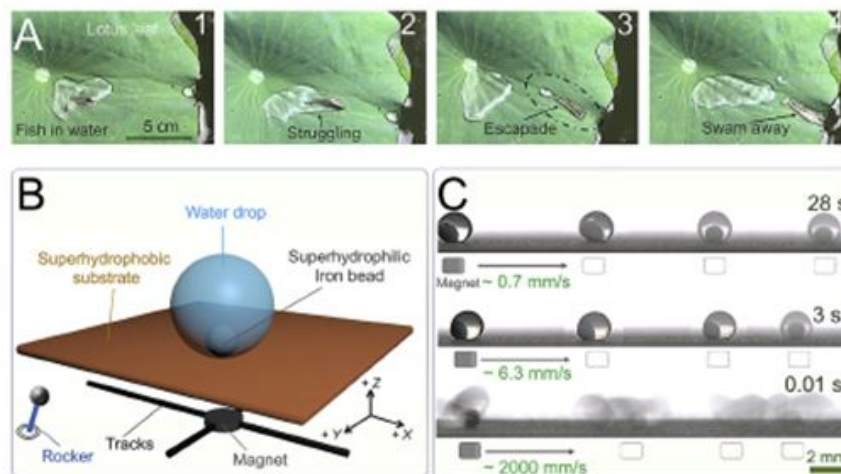


Рисунок 3 – Магнитные манипуляции с жидкостью на супергидрофобной подложке. А - Рыбка, пойманная в лужицу на листе лотоса, может отплыть и унести с собой часть воды. В - Устройство манипулятора: (1) капля воды диаметром 4 мм, (2) супергидрофобная (водоотталкивающая) поверхность, (3) гидрофильный железный шарик диаметром 1 мм (*Superhydrophilic Iron Bead, SIB*), (4) направляющие стержни для движения магнита в плоскости $x - y$, (5) постоянный магнит $Nd_2 Fe_{14} B$. С- манипуляция капли с магнитным шариком *SIB* с разными скоростями (0.7 мм/с; 6.3 мм/с; 2000 мм/с = 2 м/с) [2]

Процесс был разработан на модели с небольшой массой жидкости: каплями воды диаметром ~ 4 мм и маленьким гидрофильным магнитным шариком (*Superhydrophilic Iron Bead, SIB*) диаметром 1 мм (плотность $\rho = 7.9$ г / см³). Гидрофильные свойства *SIB* для различных жидкостей достигаются за счет тонких покрытий на поверхности железного шарика. Движение капельки воды вместе с шариком *SIB* вызывается внешними движущимися постоянными магнитами. Высокая сила сцепления между *SIB* и водой может обеспечить достаточную силу для перемещения капель воды с высокой скоростью (Рисунки 3В и 3 С). Достигнуты движения со скоростью от 0.7 до 2000 мм/с (2 м/с, рис. 3 С). Для этого ученые использовали постоянные магниты $Nd_2 Fe_{14} B$ (рис. 4), которые имеют магнитное поле ~ 1.4 Тесла (более чем в 40 тысяч раз больше среднего магнитного поля Земли величиной 30 мкТл). Маршрут движения магнита запрограммирован и управляется компьютером. Капля следует за магнитом и достигает выбранной скорости. На максимальной скорости $v = 2000$ мм/с усилие составляет всего 1.7 мН (1 мН = 0.001 Н). При этом ускорение достигает 400 м/с² или 40 g, где g - ускорение свободного падения ($g = 9.8$ м/с²). В закрытом сосуде жидкость также может двигаться вдоль стенки в направлении против силы тяжести.

Стратегия манипуляции основана на силе адгезии твердое тело-жидкость. Величина силы сцепления между твердым телом и жидкостью пропорциональна площади поперечного сечения *SIB*. Площадь поперечного сечения *SIB* имеет решающее влияние на манипуляции с жидкостью. Если скорость *SIB* слишком велика, силы сцепления между твердым телом и жидкостью недостаточно для поддержания целостности, и капля отделяется от *SIB*, как видно

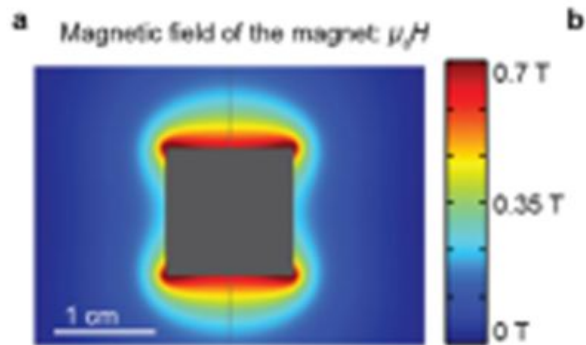


Рисунок 4 – Постоянный магнит $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ для движения магнитного шарика *SIB*

на рис. 5. Таким образом, ускорение дает возможность разделить железный шарик и каплю (жидкость).

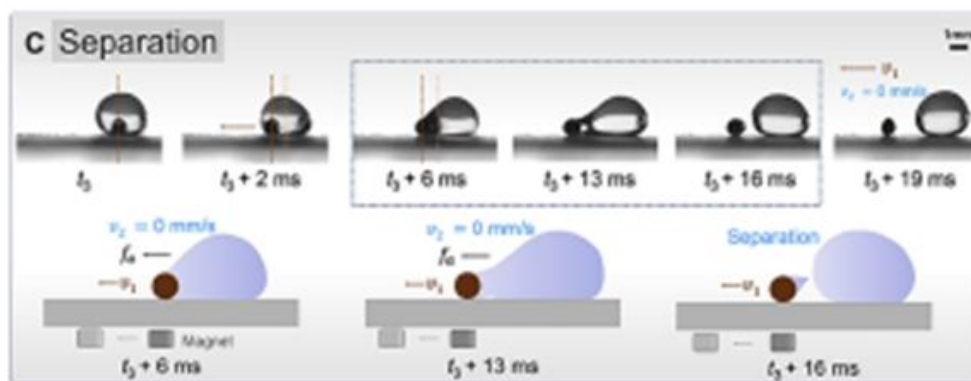


Рисунок 5 – При малой скорости магнитного шара (*SIB*) v_2 (движение влево) и жидкость (капля воды) движется вместе (t_2); при более высокой скорости жидкость отделяется и при критической скорости v_2 жидкость (капля) отрывается и останавливается (скорость капли $v_1 = 0$). Разделение происходит, когда сила сцепления жидкости (f_a) меньше силы движения [3]

Разработанный профессором Ху магнитный способ транспортировки жидкости (гидробот) имеет ряд преимуществ перед другими способами. Самым важным является точный контроль скорости, который позволяет перемещать жидкость, а при критических скоростях также разделить жидкость и магнитный шарик (*SIB*). Гидравлический робот может использоваться в качестве робота-уборщика для удаления пыли с супергидрофобных (отталкивающих воду) поверхностей. Можно проводить чистку небольших узких отверстий, что невозможно при использовании других методов. Для больших количеств жидкости можно использовать параллельные транспортные системы с несколькими магнитами. Еще одно преимущество гидробота- возможность реализации трехмерного транспорта в закрытых емкостях. Профессор Ху подчеркивает, что идея процесса была взята из природы: эффекта лотоса - отталкивание воды и очистка листа (рис.1), и эффекта сальвинии (рис.2).

Список литературы

- 1 Jeevahan J. et al. Superhydrophobic surfaces: a review on fundamentals, applications, and challenges, J. Coat. Res. 2(15), 231–250 (2018).

-
- 2 Yifan Si, Jinlian Hu, Zhichao Dong, Bioinspired magnetically driven liquid manipulation as microrobot, Cell Reports Physical Science, 2021. [Электронный ресурс] - URL: <https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2021.100439> (дата обращения: 15.08.2021)
- 3 Da H.et al. Directional liquid dynamics of interfaces with superwettability, Sci. Adv., 6, eabb 5528, 2020.

Сведения об авторах:

Шварц К. - академик Латвийской академии наук, доктор физико-математических наук, профессор GSI (Центр по изучению тяжёлых ионов имени Гельмгольца), Дармштат, Германия.

Даулетбекова А.К. - кандидат физико-математических наук, профессор кафедры технической физики, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, ул. Кажымукана, 13, Нур-Султан, Казахстан.

Сорокин М. - кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия.

Schwartz K. - Academician of the Latvian Academy of Sciences, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of GSI (Helmholtz Centre for Heavy Ion Research), Darmstadt, Germany.

Dauletbekova A. - Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Department Technical Physics, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Kazhymukhan str., 13, Nur-Sultan, Kazakhstan.

Sorokin M. - Candidate of Physical and Mathematical Sciences. Senior Researcher at the National Research Centre "Kurchatov Institute", Moscow.