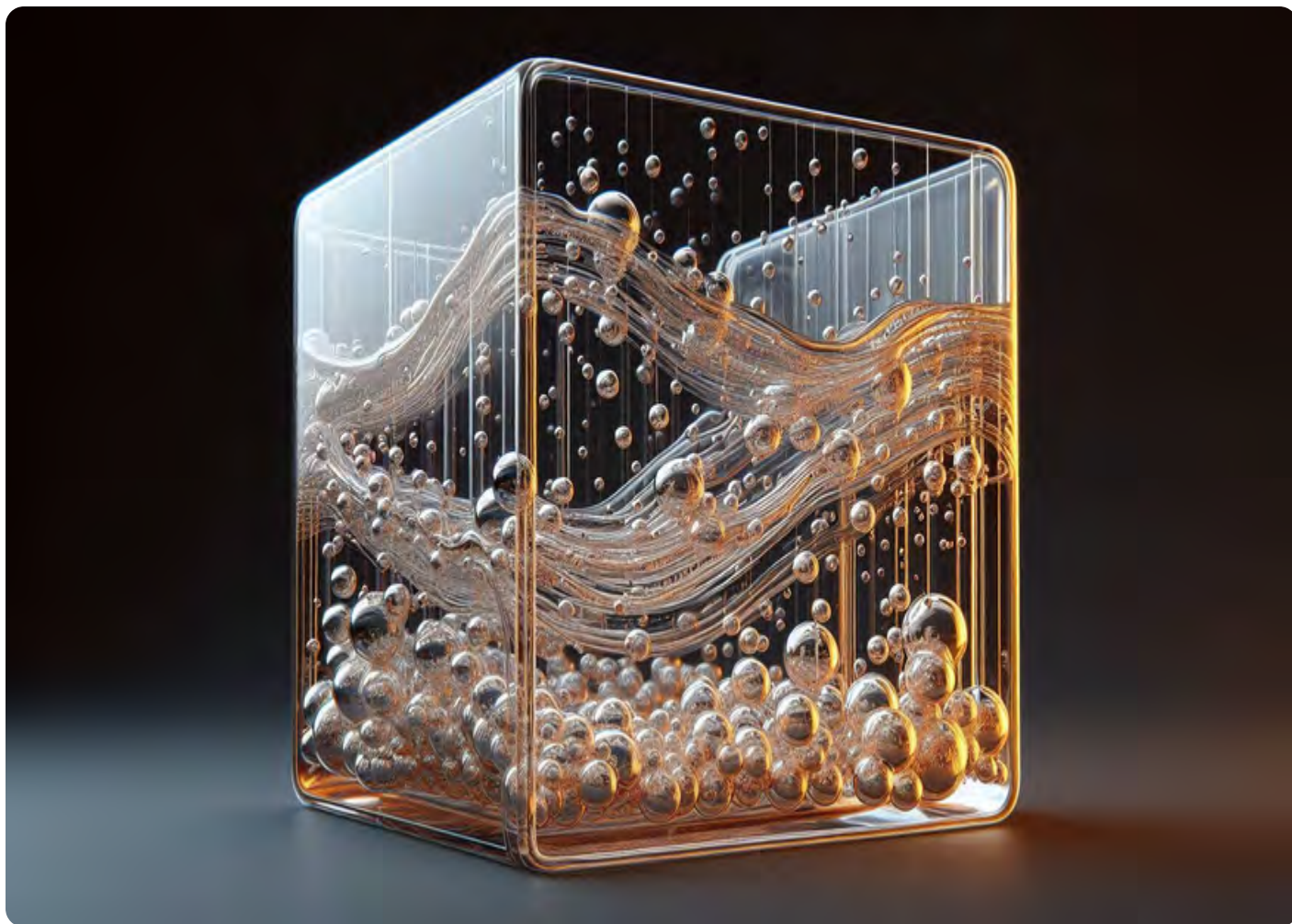


Загадка да Винчи разгадана? Ученые наконец-то научились управлять «нелогичным» поведением пузырьков в жидкой среде

26 февраля 2025, 12:00 | Рассуждения | [НАУКА И КОСМОС](#)

Физика полна парадоксов. Но кто бы мог подумать, что привычный всем воздушный пузырек, запертый в жидкости, способен преподнести такой сюрприз? Команда ученых под руководством профессора Педро Саэнса из Университета Северной Каролины в Чапел-Хилл (UNC-Chapel Hill) обнаружила явление, которое заставляет по-новому взглянуть на, казалось бы, давно изученные законы гидродинамики.

Представьте себе ёмкость с жидкостью, внутри которой плавают крошечные пузырьки воздуха. Обычно, если такую ёмкость встряхивать вверх-вниз, пузырьки будут послушно колебаться в том же направлении. Верно? Оказывается, не совсем.



Иллюстрация

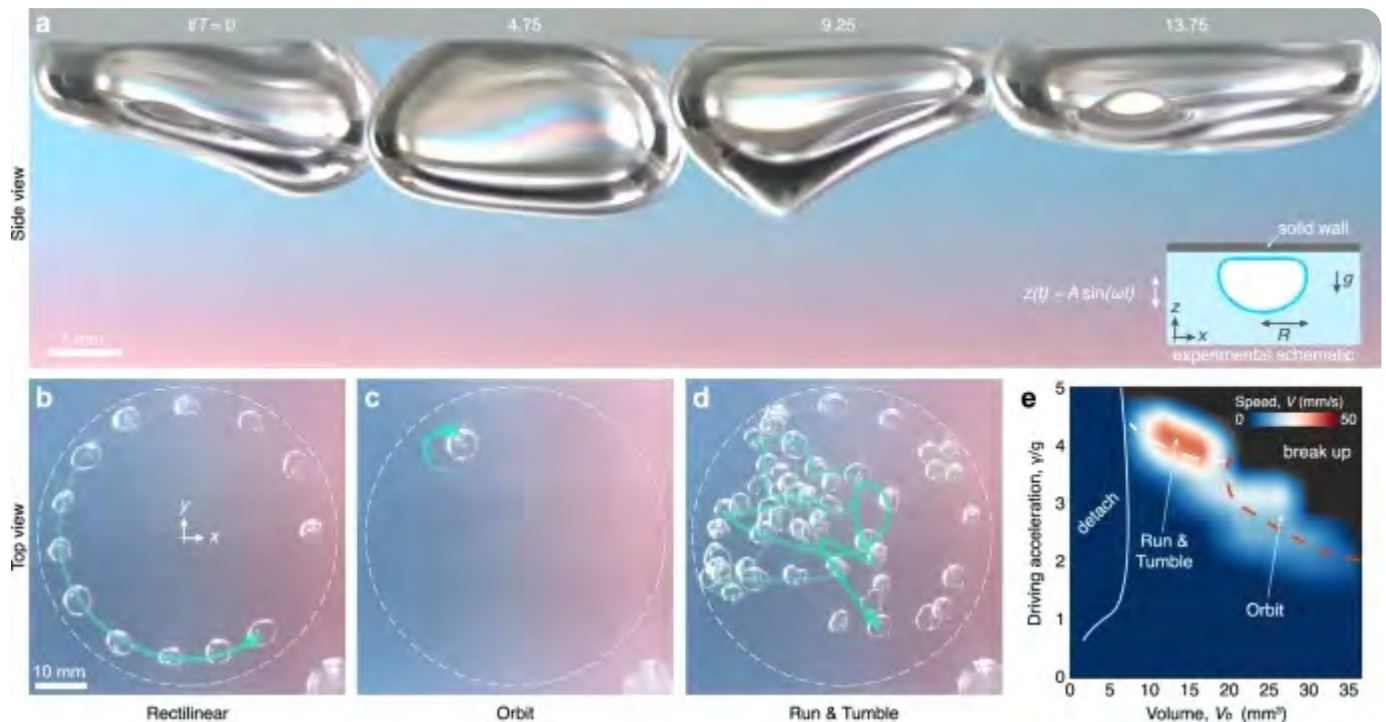
Автор: ИИ Copilot Designer//DALL·E 3 Источник: www.bing.com

Физика, бросающая вызов интуиции

Исследователи обнаружили, что при определенных условиях эти пузырьки начинают вести себя совершенно непредсказуемо. Вместо вертикальных колебаний они пускаются в... горизонтальный «галоп»! Двигутся перпендикулярно приложенной силе, словно маленькие бунтари, игнорирующие очевидные законы физики. [Это открытие, подробно описанное в престижном журнале Nature](#), уже успело наделать шума в научном сообществе. И не зря — видео, демонстрирующее «танец» пузырьков, получило премию на выставке Gallery of Fluid Motion, проводимой Американским физическим обществом.

В чем же секрет? Ученые, работавшие совместно со специалистами из Принстонского университета, изначально задались простым вопросом: можно ли заставить пузырьки двигаться в определенном направлении, просто встряхивая их вверх-вниз? Ответ превзошел все ожидания.

Оказалось, что, манипулируя частотой и амплитудой вибраций, можно не просто заставить пузырьки двигаться горизонтально, но и управлять их траекторией. Хотите — заставьте их двигаться по прямой, хотите — закружите по кругу, а хотите — отправите в хаотичное зигзагообразное путешествие, напоминающее поведение бактерий в поисках пищи.



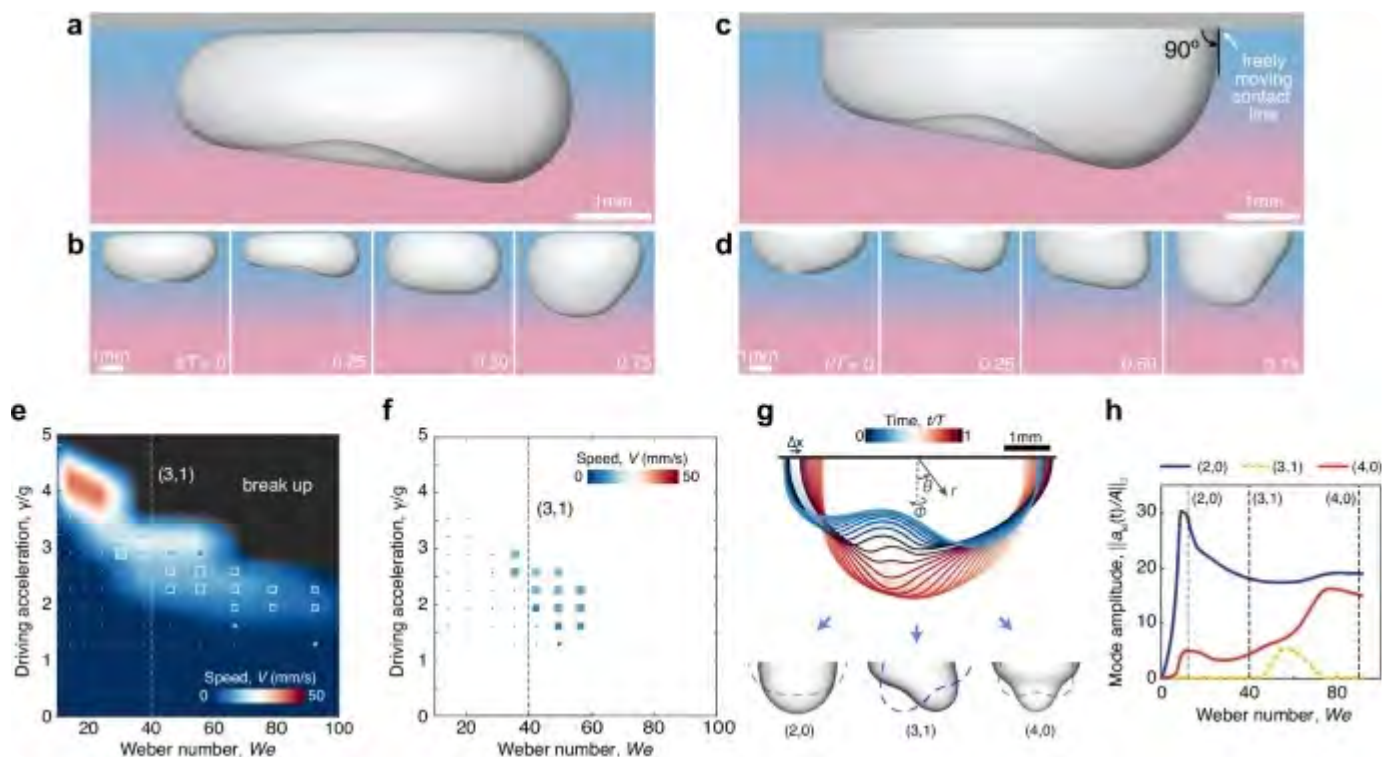
а Временная последовательность, иллюстрирующая самодвижущийся пузырек под верхней границей вертикально вибрирующей камеры с жидкостью (Дополнительный фильм 1 здесь и далее см. orig исследование), демонстрирующий колебания формы, напоминающие галопирующее движение. На вставке показана схема установки, а $T = 2\pi/\omega$ - период колебаний. Пузырьки подсвечивались через градиентный фильтр для повышения их эстетической привлекательности. Разные размеры пузырьков и колебательные воздействия приводят к различным режимам исследования доменов, наблюдаемым с вида сверху (b-d), Supplementary Movie 2). Пузырек может галопировать (b) в устойчивом прямолинейном движении в бесконечной ванне, но в данном случае его траектория становится круговой из-за границы камеры (пунктирная линия, см. раздел «Методы, эксперименты»). Прогрессия во времени указана зеленой стрелкой, увеличивающаяся непрозрачность указывает на более позднее время, а интервалы между изображениями составляют $20 T$. В зависимости от объема пузырька увеличение амплитуды форсирования A может привести к искривлению

траектории пузырька, что приведет к орбитальным состояниям (с), которые могут развиваться в любом месте камеры, или стать неровными со случайными резкими поворотами (d), напоминающими движение «бег и падение» [36,37]. е Фазовая карта при $f = 40$ Гц иллюстрирует зависимость динамики пузырька от движущего ускорения и объема пузырька, которая также включает отрыв от стенки для маленьких пузырьков и разрушение для больших амплитуд. Автор: Guan, J.H., Tamim, S.I., Magoon, C.W. et al. Источник: www.nature.com

От лабораторного курьеза — к технологическому прорыву

«Обычно поведение пузырьков крайне сложно предсказать,» — объясняет Коннор Магун, один из авторов исследования. — «Но нам удалось превратить эту непредсказуемость в управляемый процесс. И это открывает совершенно новые горизонты.»

Действительно, потенциал этого открытия огромен. Ведь пузырьки — это не просто забавная деталь газировки. Они играют важнейшую роль во множестве процессов, от формирования климата до работы промышленных систем охлаждения.



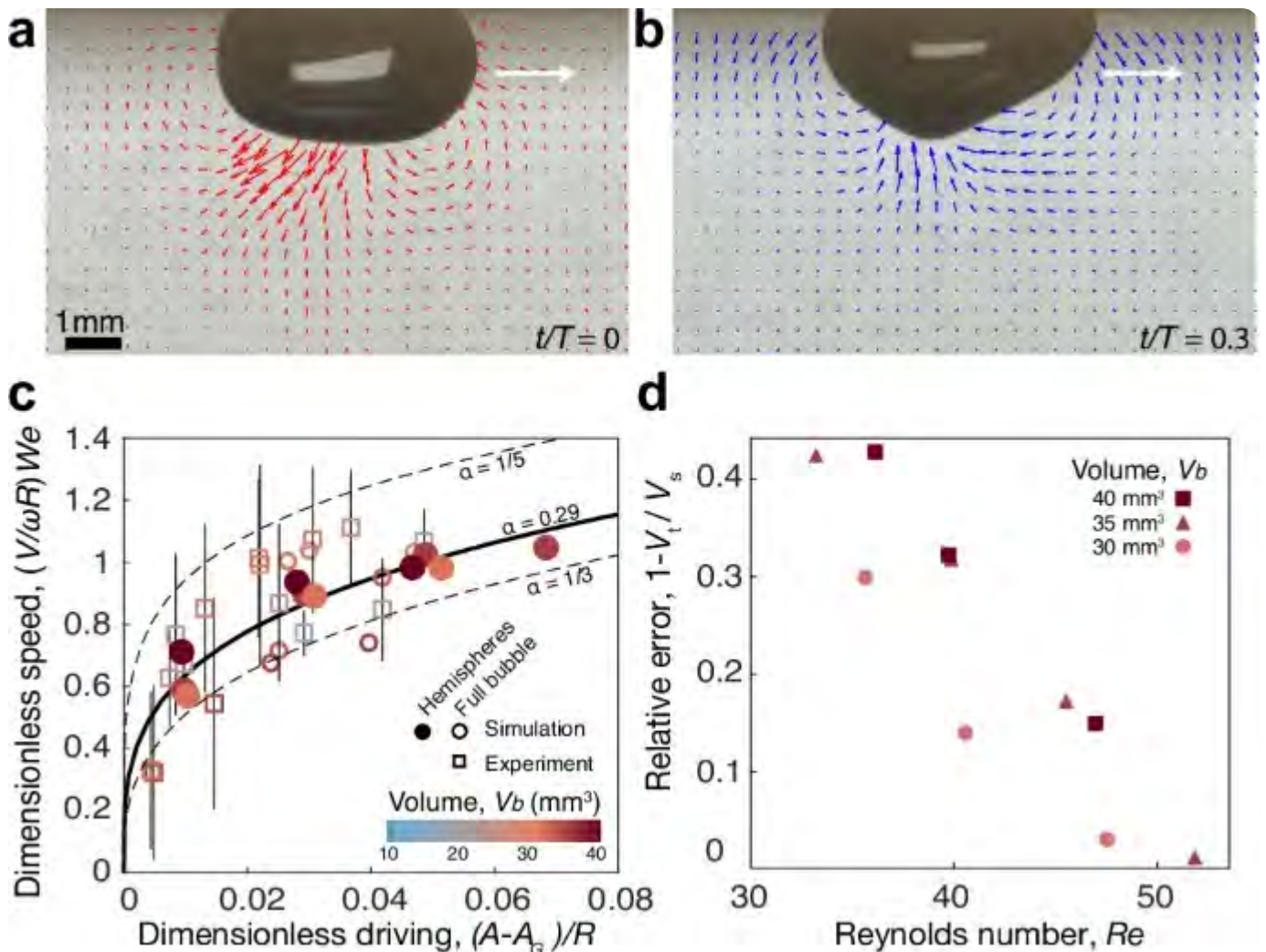
а, б Прямое численное моделирование отражает динамику галопирования (Дополнительный фильм 3). Как и в экспериментах, где тонкий слой жидкости отделяет пузырек от границы, в нашей модели

линия контакта на верхней стенке не образуется. с, d Моделирование показывает, что такая же неустойчивость галопирования возникает для сидячих пузырьков со свободно перемещающейся линией контакта и углом контакта 90° . e Количественное сравнение скорости пузырьков в экспериментах (фон) и моделировании полных пузырьков (цвета и размеры маркеров отражают скорость галопирования) в диапазоне нормированного ускорения движения, g , и безразмерной частоты, определяемой числом Вебера, We . Галопирующее движение наблюдается вблизи $We = 40$, что соответствует собственной частоте моды колебаний $(3, 1)$ (обозначена вертикальной пунктирной линией). f Полусферические пузырьки демонстрируют галопирующую динамику в той же области фазовой карты, и (g) их колебания формы, которые приводят к чистому смещению Δx за период, состоят в основном из $(k, l) = (2, 0)$, $(3, 1)$ и $(4, 0)$ сферических гармоник, $Y_{kl}(\theta, \phi)$. h Доминирование режима против числа We для фиксированного движения $A/R = 0.08$ характеризуется через $L2$ норму мгновенной амплитуды $\|akl(t)/A\|_2$. Появление гармоники $(3, 1)$ совпадает с началом галопирования.

Автор: Guan, J.H., Tamim, S.I., Magoon, C.W. et al. Источник: www.nature.com

Космические пузырьки и умная уборка

Взгляните, например, на проблему охлаждения микрочипов. На Земле с этим справляется обычная плавучесть: пузырьки, образующиеся на горячей поверхности, всплывают, унося с собой избыточное тепло. Но в космосе, в условиях невесомости, этот механизм не работает. И здесь на помощь может прийти открытие «галопирующих пузырьков». Оно позволяет активно удалять пузырьки с нагретых поверхностей, не полагаясь на гравитацию, что критически важно для работы спутников и другой космической техники.

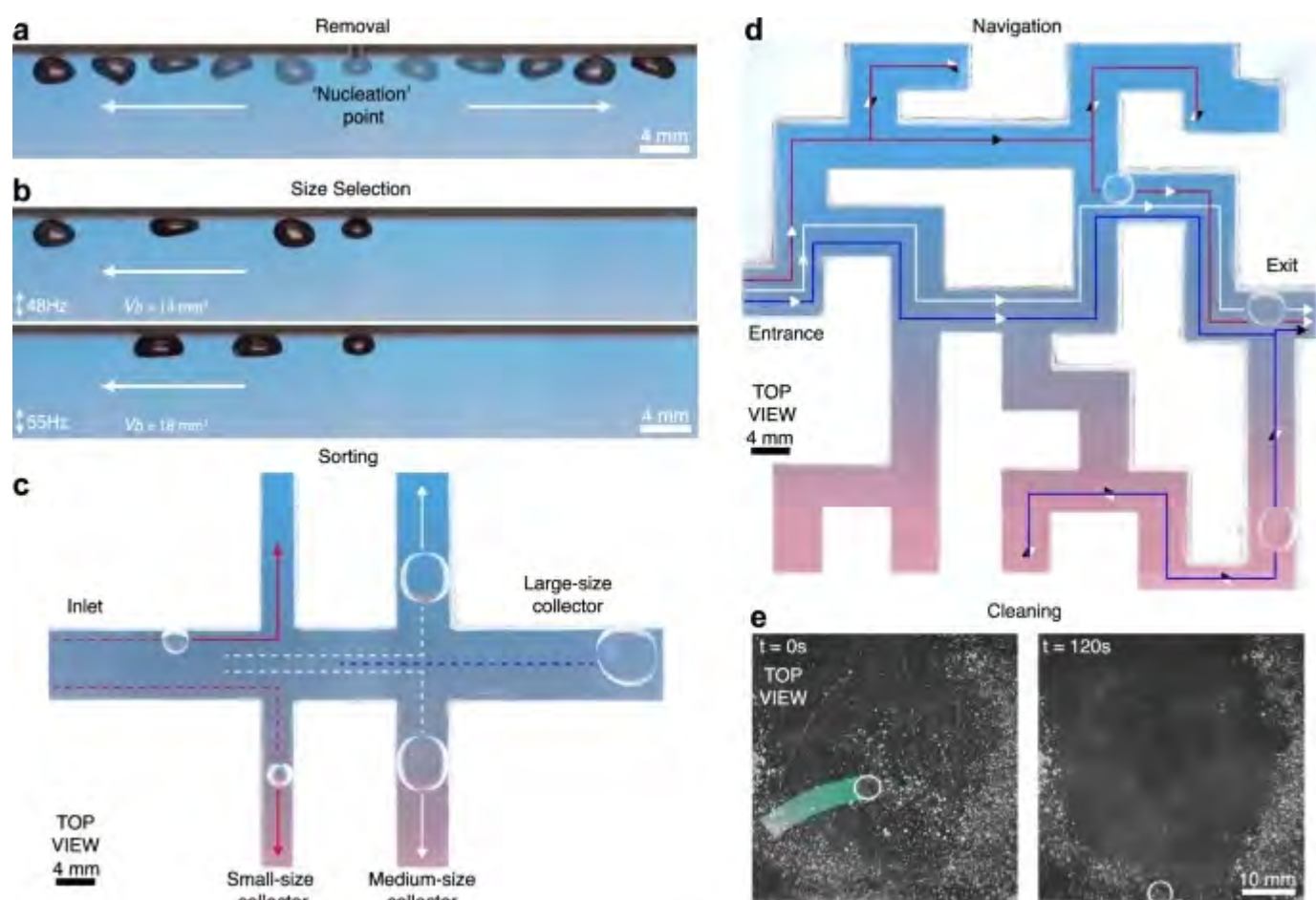


а, б Экспериментальная визуализация полей течения вокруг галопирующего пузыря показывает, что граница раздела (а) толкает окружающую жидкость к спине пузыря при движении вниз и (б) оттягивает жидкость от его передней части при движении вверх (Дополнительный фильм 4). с Прямолинейные галопирующие пузыри подчиняются закону масштабирования мощности для безразмерной скорости галопирования $V/\omega R$ в терминах безразмерной движущей силы $(A-A_G)/R$ и числа Вебера We , которое разрушает смоделированные полусферические пузыри с мощностью $\alpha = 0,29$. d Относительное отклонение между скоростью галопирования в смоделированных полусферических пузырьках, V_s , и скоростью, ожидаемой по инвискидной теории, V_t , уменьшается с увеличением числа Рейнольдса, что указывает на то, что галопирующие пузырьки используют инерционные силы для придания им движения.

Автор: Guan, J.H., Tamim, S.I., Magoon, C.W. et al. Источник: www.nature.com

А как насчет... уборки? Звучит неожиданно, но эксперименты показывают, что «галопирующие пузырьки» способны эффективно очищать поверхности от пыли. Двигаясь по заданной траектории, они, по сути, работают как миниатюрные роботы-пылесосы. Это открывает перспективы для создания новых технологий промышленной очистки и даже адресной доставки лекарств внутри организма.

«Механизм самодвижения, который мы обнаружили, дает пузырькам возможность перемещаться на значительные расстояния и ориентироваться в сложных системах каналов,» — отмечает Саифул Тамим, еще один участник исследовательской группы.



а Эвакуация пузырьков: нестабильность галопирования позволяет удалять пузырьки из точки зарождения, которые препятствуют теплообмену при кипении. б Выбор размера: при неизменном расходе впрыска генерация пузырьков с настраиваемым размером становится возможной благодаря частоте вращения, которая определяет, когда пузырьки начинают галопировать от сопла. в Сортировка в зависимости от размера: благодаря своей склонности к движению вдоль боковых границ, пузырьки разного объема автономно направляются в

коллекторы уменьшающегося размера, что облегчает их сортировку. d

Навигация по сложным сетям: галолирующие пузырьки способны перемещаться по сложным сетям потоков и решать лабиринты.

Цветные линии и стрелки показывают пути, пройденные различными пузырьками от входа до выхода (красный: $f = 50$ Гц при $A = 0,39$ мм, белый: 45 Гц при 0,37 мм и синий: 40 Гц при 0,54 мм). e Очистка поверхности: частицы, покрывающие поверхность, могут быть удалены потоками, генерируемыми пузырьками, беспорядочно исследующими домен (см. Дополнительный фильм 5).

Автор: Guan, J.H., Tamim, S.I., Magoon, C.W. et al. Источник: www.nature.com

Взгляд в будущее: эра управляемого хаоса?

Леонардо да Винчи еще в XVI веке обратил внимание на странное, непредсказуемое поведение пузырьков. С тех пор ученые пытались разгадать эту загадку, но до недавнего времени возможности управления движением пузырьков были крайне ограничены.

Открытие, сделанное командой профессора Саэнса, переворачивает ситуацию с ног на голову. Оно демонстрирует, что даже такая, казалось бы, простая система, как пузырек воздуха в жидкости, может демонстрировать удивительную сложность и управляемость. И кто знает, какие еще сюрпризы преподнесет нам этот, на первый взгляд, хаотичный мир? Возможно, в будущем мы научимся использовать подобные «непредсказуемые» явления для создания принципиально новых технологий, о которых сегодня можем только мечтать.

Открытия и исследования

Скорее очевидное - чем невероятное, обычный НПР - см. работы академика В.Н. Челомея (шар в вибрирующей жидкости) ещё за прошлый век 1956 г. стр. 10... <https://ikar.udm.ru/files/pdf/sb22.pdf>