

общей величины приливной энергии выделилось в катархее (гадее) 4,6—4,0 млрд лет назад, и в это время только за счёт этой энергии Земля дополнительно могла прогреться на $\sim 500^\circ\text{C}$. Начиная с позднего архея лунные приливы вносили лишь ничтожно малое влияние в развитие энергоёмких эндогенных процессов [1].

Аккреционное тепло — это тепло, сохранённое Землёй с момента её формирования. В процессе аккреции, которая продолжалась в течение нескольких десятков миллионов лет, благодаря соударению Земля испытала существенный разогрев. При этом по поводу величины этого разогрева нет единого мнения. В настоящее время исследователи склоняются к тому, что в процессе аккреции Земля испытала если не полное, то значительное частичное плавление, что привело к начальной дифференциации.

Ещё до 1990-х годов практически общепризнанной считалась модель относительно холодной первичной Земли, которая постепенно разогревалась за счёт процессов, сопровождавшихся выделением значительного количества тепловой энергии.

Радиогенное тепло обусловлено распадом нестабильных изотопов. Более энергоёмкими, с периодом полураспада, равным возрасту Земли, являются изотопы ^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th , ^{40}K . Основной их объём сосредоточен в континентальной коре [3]. Современный уровень генерации радиогенного тепла:

– по американскому геофизику В. Вакье — $1,14 \cdot 10^{20} \frac{\text{Эрг}}{\text{с}}$ ($1,14 \cdot 10^{13}$ Вт) [1];

– по российским геофизикам О. Г. Сорохтину и С. А. Ушакову — $1,26 \cdot 10^{20} \frac{\text{Эрг}}{\text{с}}$ ($1,26 \cdot 10^{13}$ Вт) [3]. От величины современного теплового потока это составляет $\sim 2730\%$.

Из общей величины тепла радиоактивного распада $1,14 \cdot 10^{20} \frac{\text{Эрг}}{\text{с}}$ ($1,14 \cdot 10^{13}$ Вт) в земной коре выделяется $0,91 \cdot 10^{20} \frac{\text{Эрг}}{\text{с}}$, а в мантии — $0,35 \cdot 10^{20}$. Следовательно, доля мантийного радиогенного тепла не превышает 10% от суммарных современных теплотерь Земли и не может являться основным источником энергии активных тектономагматических процессов, глубина зарождения которых может достигать 2900 км; а радиогенное тепло, выделяющееся в коре, относительно быстро теряется через земную поверхность и практически не участвует в разогреве глубинных недр планеты. В прошлые геологические эпохи величина радиогенного тепла, выделяемого в мантии, должна была быть более высокой. Её оценки на момент образования Земли (4,6 млрд лет назад) дают $6,95 \cdot 10^{20} \frac{\text{Эрг}}{\text{с}}$. С этого времени происходит неуклонное снижение скорости выделения радиогенной энергии.

Заключение. Величина приливной энергии прямо связана с расстоянием между космическими объектами. И если для расстояния между Землёй и Солнцем не предполагается каких-либо существенных изменений в геологическом масштабе времени, то в системе Земля—Луна этот параметр является переменной величиной. Однако изучение теплового режима весьма важно, поскольку потеря тепловой энергии Земли может быть прямо или косвенно причиной большей части тектонических и магматических процессов. Земля постепенно теряет тепло, отдавая его в мировое пространство. За один только век она расходует столько тепла, сколько его могут дать, если их сжечь, все мировые запасы нефти, угля, леса и других видов топлива. Следует заметить, что горячие воды и пары во многих случаях содержат ценные вещества. Поэтому крайне желательно использовать новый источник энергии не только для электрификации и теплофикации, но и для извлечения химического сырья.

Проблема использования тепловой энергии Земли имеет большое значение для нашего государства. Научиться применять ее в интересах развития экономики и культуры — задача большая и благородная. В первую очередь эта задача должна быть решена применительно к наиболее благоприятным условиям [2].

Список цитируемых источников

1. *Магницкий, В. А.* Общая геофизика : учеб. пособие / В. А. Магницкий. — М. : МГУ, 1995.
2. Источники энергии [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://zilant.kpfu.ru/kek/geotektonika/3_1.php. — Дата доступа: 12.03.2017.
3. Справочник по геохимии / Г. В. Войткевич [и др.]. — М. : Недра, 1990. — 480 с.

УДК 532.6

А. Л. Полюх, Г. В. Качкар

Учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи

УПРАВЛЯЕМОЕ ДВИЖЕНИЕ КАПЛИ ЖИДКОСТИ НА ТВЁРДОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Введение. В последние годы активно изучаются разнообразные способы воздействия на вещество на микро- и наноуровне, в том числе для управляемого перемещения микрообъектов. Одним из вариантов такого воздействия может быть изменение межмолекулярных сил взаимодействия микрочастиц между собой, с жидкостью или поверхностью, на которой они находятся.

Существуют и другие физические эффекты, которые можно применить для перемещения, например, связанные с плёночным кипением при контакте капли с горячей поверхностью жидкости или твёрдого тела (эффект Лейденфроста [1]) или взаимодействием с акустическими колебаниями поверхности [2]; но мы будем рассматривать только явления, вызываемые действием поверхностных (капиллярных) сил. Многие из них проявляются в макроскопических масштабах и легко наблюдаемы.

Основная часть. Наиболее простым для наблюдения является известный с середины XIX века эффект Марангони, который состоит в том, что капли, находящиеся на поверхности жидкости с неоднородным распределением коэффициента поверхностного натяжения, начинают смещаться в область, где значение этой величины максимально. Другая группа сходных явлений связана с изменением поверхностного натяжения самой капли и взаимодействием с окружающей жидкостью. Например, известно, что капля ртути в слабом растворе соляной кислоты начинает «набрасываться» на кристаллик дихромата калия и активно «преследовать» его [3], причём способна длительное время толкать кристаллик перед собой до тех пор, пока он полностью не растворится.

Ещё одним возможным вариантом микродвигателя может быть локальное изменение свойств твёрдой поверхности, что может приводить к возникновению несимметричных сил, способных перемещать каплю жидкости и другие небольшие объекты. Для этого достаточно создать некоторое различие коэффициентов смачиваемости соседних участков поверхности, непосредственно контактирующих с каплей.

Дальше мы подробнее рассмотрим эту возможность.

Главное отличие данного явления от эффекта Марангони связано с тем, что по твёрдой поверхности капле скользить труднее, чем по поверхности жидкости, из-за наличия диссипативных сил трения, поэтому для проявления данного эффекта потребуется достаточно большое различие между коэффициентами смачиваемости. В силу этого на твёрдых поверхностях эффект будет проявляться на меньших расстояниях, чем при перемещении капли по поверхности жидкости. С другой стороны, наличие диссипативных сил сцепления с поверхностью позволяет более точно фиксировать положение капли.

Если капля жидкости контактирует с твёрдой поверхностью, то всегда возникают некоторые силы межмолекулярного взаимодействия между жидкостью и веществом поверхности (поверхностные, или капиллярные) (рисунок 1). Соотношение между силами натяжения свободной поверхности жидкости и силами взаимодействия с поверхностью другой фазы определяет *смачиваемость* этой поверхности, которую обычно характеризуют углом смачиваемости: чем больше смачиваемость поверхности, тем более капля жидкости склонна растекаться по ней; и наоборот, при очень малой смачиваемости капля стремится принять форму, близкую к сферической, как в свободном пространстве (рисунок 2).

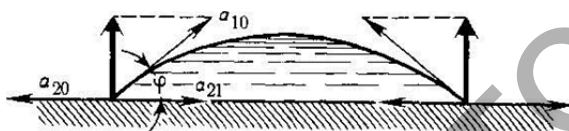


Рисунок 1 — Силловые факторы, действующие на каплю

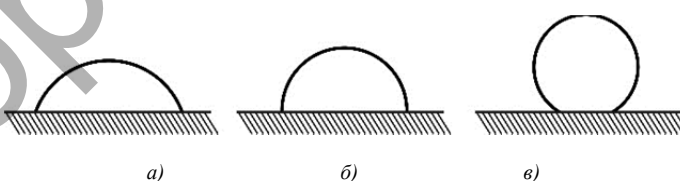


Рисунок 2 — Капля на поверхностях с различной смачиваемостью

Эти силы определяются не только физической природой жидкости и материала поверхности, но также её состоянием, действительной площадью контакта, наличием примесей, особенно на поверхности контакта, температурой и другими факторами. Влияя на эти факторы, можно изменять силы взаимодействия. В частности, можно сильно уменьшить смачиваемость поверхности из гидрофобного материала, если уменьшить действительную площадь контакта с жидкостью за счёт специального фракталоподобного микрорельефа (так называемый «лотос-эффект»). И наоборот, смачиваемость поверхности можно увеличить, если нанести на неё тонкий слой вещества, хорошо смачиваемого данной жидкостью либо растворимого в ней. Есть и другие способы воздействия, но нанесение покрытий с определёнными свойствами является наиболее простым способом изменения свойств поверхности и не требует сложного оборудования.

Если поместить каплю жидкости на плохо смачиваемую (гидрофобную) поверхность, то она будет относительно слабо взаимодействовать с ней и легко мигрировать по поверхности («перекатываться», сохраняя почти сферическую форму). Если затем капля окажется на границе участка поверхности, который смачивается данной жидкостью лучше, чем соседние, то возникнут несимметричные поверхностные силы, которые будут стремиться втянуть каплю на более смачиваемую поверхность (рисунок 3, а, б). Переместившись через границу участков (довольно быстро, со скоростью до нескольких см / с), капля снова окажется в равновесии, но при этом изменит форму в соответствии с изменением угла смачиваемости. После этого капля окажется «запертой» внутри участка с высокой смачиваемостью из-за наличия потенциального барьера на его границе. Это явление уже само по себе может быть полезным, например, для очистки стёкол от конденсата, разделения твёрдых частиц при обогащении руды и т. п. Но возникает идея использовать этот эффект как-то ещё.

Вот если бы можно было передвигать участок высокой смачиваемости по поверхности... Тогда он увлек бы за собой «привязанную» к нему каплю, и мы получили бы виртуальный манипулятор для перемещения капель жидкости. Возможные применения такого устройства уже намного разнообразнее. Правда, недостатком его была бы относительно невысокая скорость перемещения, которая связана с размером капли. Также ограничением будет разрешающая способность устройства управления движением, которая определяется способом изменения свойств поверхности.

Можно сильно упростить исходную задачу, если не требовать перемещения всего участка высокой смачиваемости как целого, а перемещать лишь его границу, т. е. изменять его форму. Предположим, капля находилась на границе участка поверхности с высокой смачиваемостью (см. рисунок 3, а). После того, как капля была втянута внутрь участка (см. рисунок 3, б), немного отодвинем границу участка так, чтобы капля снова оказалась на ней (см. рисунок 3, в). Капля снова переместится. Если перемещать границу гидрофильного участка с небольшой скоростью, то капля будет увлекаться ею до тех пор, пока не пройдёт весь гидрофильный участок.

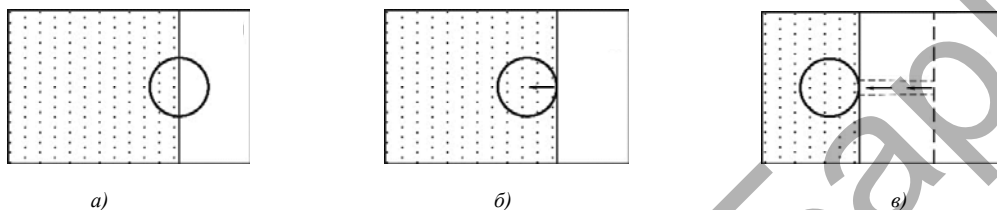


Рисунок 3 — Движение капли на границе областей с разной смачиваемостью

Реализовать такую систему будет ещё проще, если не требовать возможности многократного повторения перемещения капель по одному и тому же участку, т. е. сделать систему перемещения одноразовой. В таком случае не понадобятся какие-либо устройства для внешнего воздействия и управления движением, достаточно будет один раз осуществить химическую обработку поверхности.

Мы приняли ряд дополнительных условий, облегчающих создание требуемой системы, но в то же время это накладывает достаточно сильные ограничения на её функциональность. Здесь мы опишем самый простой способ обработки поверхности, который, в принципе, позволяет осуществить направленное перемещение каплей жидкости, но только однократно для каждого участка. На самом деле всё достаточно просто:

1) поскольку смачиваемость участков поверхности должна сильно отличаться, то возьмём гидрофобную исходную поверхность (например, полиэтиленовую плёнку) и покроем часть поверхности тонким слоем вещества, хорошо смачиваемого либо растворимого водой (например, желатина или сахарного сиропа);

2) поскольку мы хотим обойтись без каких-либо внешних управляющих устройств, то капля жидкости должна сама управлять своим движением, т. е. при продвижении капли через границу смачиваемого участка граница сама должна отодвигаться дальше. Проще всего этого добиться, если тонкий слой хорошо смачиваемого вещества будет полностью растворяться самой каплей;

3) поскольку мы хотим добиться не хаотичного движения капель, а перемещения в определённом направлении, то участки хорошей смачиваемости должны быть первоначально оформлены в виде дорожек определённой ширины, разделённых гидрофобными промежутками;

4) для надёжного удержания на поверхности вещество гидрофильного покрытия должно быть твёрдым либо очень вязким. С другой стороны, растворение вещества покрытия будет постепенно изменять вязкость капли, поэтому покрытие должно быть как можно более тонким, так как от его толщины будет зависеть масса растворимого вещества и максимальная длина пробега капли.

Выполнения перечисленных условий, по-видимому, достаточно для получения нужного эффекта.

Заключение. Непосредственно в таком виде этот эффект годится скорее для демонстрационных целей, но он может быть реализован на основе других физических явлений, в том числе в микро- и наномасштабах, что открывает возможности для более серьёзных применений.

Список цитируемых источников

1. Linke, H. Self-Propelled Leidenfrost Droplets / H. Linke // Phys. Rev. Lett. — 2006. — № 96. — P. 154—502.
2. Зырянова, А. В. Условия поступательного виброперемещения микрообъектов под воздействием волновых импульсов различной формы / А. В. Зырянова, В. Г. Можжев // Тр. IX Всерос. шк.-семинара «Волновые явления в неоднородных средах». — Звенигород, 2004. — С. 31—32.
3. Гегузин, Я. Е. Капля / Я. Е. Гегузин. — 2-е изд., доп. — М.: Наука, 1977. — 176 с.: ил.