

Некомпенсированная сила (14 баллов)

Е.А. Макеева, Т.И. Бидыло

1. Какой физический эксперимент изображен на заглавном рисунке? Оцените силу, возникающую в таком опыте между полусферами радиусом $r = 1$ мкм в атмосфере Марса ($p = 1$ кПа, почти в 100 раз меньше земного). (1 балл)

На рисунке изображен [Магдебургский эксперимент](#), проведенный немецким физиком Отто фон Герике для наглядной демонстрации концепции атмосферного давления.

Сила, которую необходимо приложить, чтобы разъединить полусферы, составляет (S – площадь сечения полусферы, ΔP – разность давлений, считаем $\Delta P = P$)

$$F_M = S \Delta P = \pi r^2 \Delta P = 1000 \cdot 3,14 \cdot (1 \cdot 10^{-6})^2 = 3,14 \cdot 10^{-9} \text{ Н.}$$

Многие участники допускали ошибку, полагая площадью суммарную площадь полусфер, в то время как «не компенсируется» только сила давления, приходящаяся на площадь сечения полусферы.

Рассмотрим два покоящихся монолитных полушария радиусом $r = 1$ мкм, которые погружены в растворитель и находятся на некотором переменном расстоянии x (порядка 3 - 50 нм) друг от друга (рис. 2).

Если в раствор добавить наночастицы радиусом 3 нм, то между полушариями может дополнительно возникнуть некоторая сила.

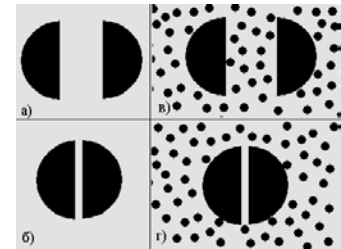


Рис. 2.

2. При каких расстояниях между полушариями она возникает? Будут ли полушария при этом притягиваться или отталкиваться? Почему эта сила тоже относится к некомпенсированным? Ответы поясните с точки зрения молекулярно-кинетической теории. (2,5 балла)

Рис. 2 призван показать (по аналогии с Магдебургским экспериментом) как между большими частицами в присутствии маленьких может возникать особая физическая сила притяжения, называемая **силой обеднения**, которая чрезвычайно важна для понимания многих процессов в биологии и физике микросистем.

На рис. 2в усредненный по времени импульс, передаваемый каждому полушарию наночастицами, находящимися в тепловом движении, будет равен нулю. На рисунке 2г наночастицы уже не могут проникать в зазор между полушариями (соответственно,

сталкиваться с плоскими поверхностями полушарий и сообщать им импульс), следовательно, аналогично Магдебургскому эксперименту, возникает (*дополнительная* по сравнению с рис. 2б) некомпенсированная сила, «притягивающая» полушария друг к другу.

При расстояниях больше 6 нм (наночастицы начинают проникать в зазор) эта сила быстро уменьшается до нуля. При расстояниях меньше 6 нм (диаметр наночастиц), сила обеднения будет действовать аналогично силе давления газа в п.1.

Сила обеднения также может рассматриваться как сила осмотического давления раствора наночастиц (между полушариями находится чистый растворитель).

3. Оцените величину этой силы, если концентрация добавленных наночастиц составляет $4 \cdot 10^{-4}$ моль/л. (2.5 балла) Опишите несколько способов, как такую некомпенсированную силу можно измерить напрямую. (1 балл)

Для расчета можно воспользоваться уравнением состояния идеального газа (или формулой осмотического давления). Помня, что в системе СИ концентрацию необходимо перевести в моль/м³, находим:

$P = cRT = (4 \cdot 10^{-4} \cdot 10^3) \cdot 8,314 \cdot 298 = 991 \text{ Па}$ – почти как давление на Марсе (в 100 раз меньше атмосферного давления).

и аналогично п.1: $F = P \cdot S = 991 \cdot 3,14 \cdot (1 \cdot 10^{-6})^2 \approx 3,1 \cdot 10^{-9} \text{ Н}$

Важный вывод, который можно сделать на основе проведенного расчета: **при контактах между телами, при наличии в системе наночастиц, могут возникать довольно значительные силы.**

Чтобы их измерить, можно воспользоваться любыми способами измерения малых сил для микро- и нанообъектов (например, с помощью оптического пинцета или атомно-силового микроскопа).

4. Частицу полистирола радиусом $r_{ps1} = 250 \text{ нм}$ помещают в каплю жидкости ($\rho_l = \rho_{ps}$), имеющую вид полусферы с $d_l = 5 \text{ мкм}$ (рис. 3.). Затем в эту же каплю добавляют наночастицы полистирола $d_{ps2} = 50 \text{ нм}$. Опишите, что будет наблюдаться в микроскоп до добавления второго типа полистирольных частиц и после этого. (2 балла)

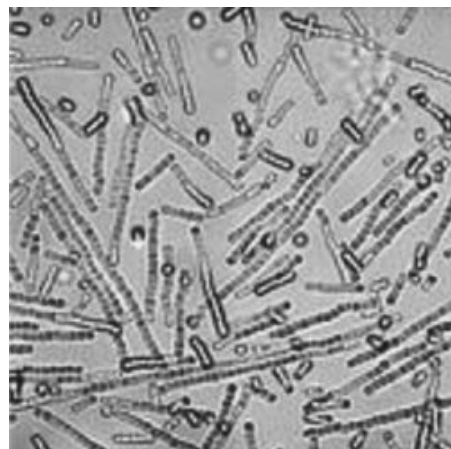


До добавления наночастиц будет происходить броуновское движение большой полистирольной микросферы по всей капле. После – при контактах микросферы с границей капли будет возникать сила обеднения, «удерживающая» микросферу на границе. Продолжая броуновское движение вдоль

границы, рано или поздно она коснется второй границы, где силы обеднения станут «удерживать» микросферу в контакте сразу с двумя поверхностями. То есть, станет наблюдаться беспорядочное движение большой частицы в пределах кольца – наночастицы «выгонят» ее на периферию капли.

5. Опишите изменения, которые будут происходить в суспензии наноструктурированных микрочастиц (рис. 4), если к ним добавить полимер с размером частиц около 3 нм. (1.5 балла) Поясните, зачем понадобилось делать гладкие торцы частиц и наноструктурированную боковую поверхность? (1.5 балла)

При броуновском движении частицы могут сталкиваться друг с другом всевозможными способами. Однако только при контактах гладких торцов будет возникать максимальная сила (она, как мы помним, пропорциональна площади контакта), удерживающая частицы вместе. Таким образом, частицы будут собираться в «палочки» – происходит самоорганизация. Бока сделаны шершавыми, чтобы площадь их контактов (и, соответственно, сила обеднения) была минимальной – т.е. чтобы при таких контактах частицы не слипались.



6. Вкратце напишите, где еще мы можем найти подобные явления и как их можно использовать. (2 балла)

Сила обеднения часто проявляет себя в коллоидных системах, содержащих частицы разных размеров. Она играет важнейшую роль в работе живых систем: управляет многими процессами внутри живых клеток (агрегация органелл), «слипанием» в столбики эритроцитов в крови (см. [задачу по биологии «СОЭ»](#)). Находит практическое применение, например, при осаждении фотонных кристаллов или для получения из раствора кристаллов (кристаллизации) крупных белков.