

Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
Физтех-школа электроники, фотоники и молекулярной физики

Эффект Марангони-Гиббса.

Выполнил:
студент 1 курса группы Б04-203
Касерес Гутьересс Леонард Рамирович

1 Введение

Цель работы:

1. Понять причины и условия возникновения эффекта Марангони-Гибсса
2. Оценить скорость потоков Марангони
3. Найти ему применение

В работе используются: пластиковая тарелка, перец(молотый), мыло.

2 Теория

Эффект Марангони – это течение, возникающее в жидкости под действием перепада поверхностного натяжения. Аналогом этого эффекта является дуновения ветра, возникающее из-за перепада давлений, единственное принципиальное различие: течения Марангони происходят из области низкого поверхностного натяжения в область высокого. Рассмотрим на примере воды и капли мыла. Изначально у нас имеется поверхность воды:

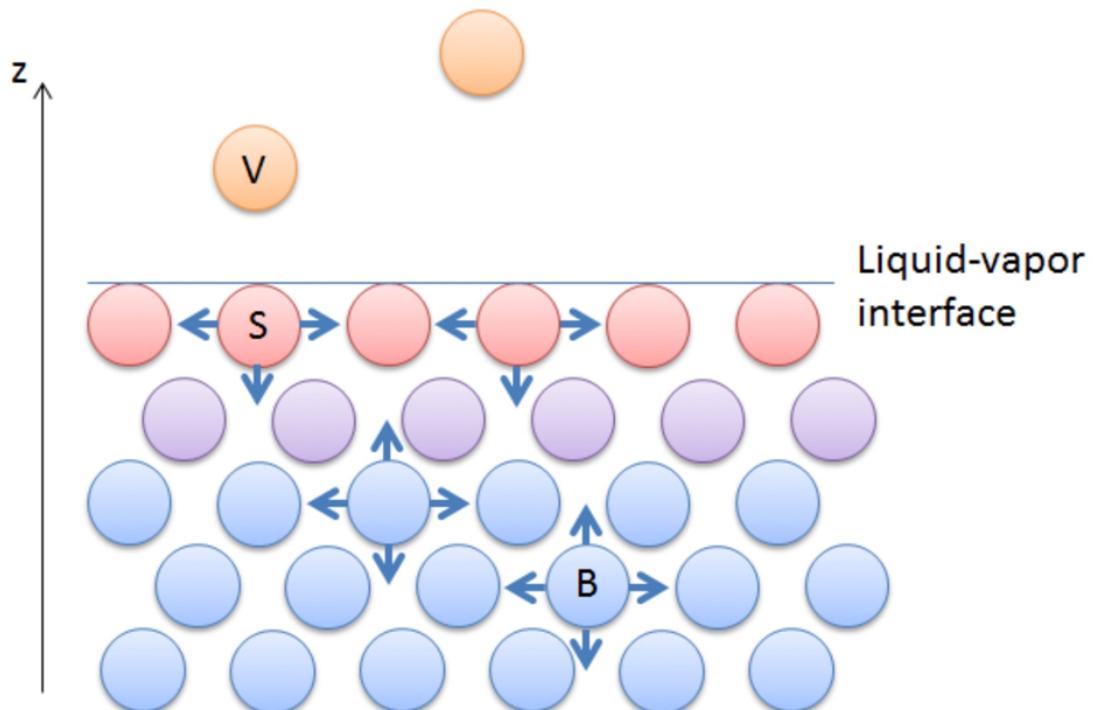


Рис. 1: Схема, поясняющая возникновение поверхностного натяжения в жидкости, взаимодействующей со своим паром

Синие молекулы, находящиеся в глубине, взаимодействуют с остальными молекулами во все стороны одинаково, поэтому действующая на них сила скомпенсирована, при этом поверхностные молекулы(красные) взаимодействуют только с молекулами своего ряда и с молекулами внутри жидкости, так что действующая на них сила не скомпенсирована, в

следствии чего им нужно сильнее взаимодействовать с молекулами внутри ряда, в следствии чего образуется пленка, то есть чтобы увеличить площадь поверхности жидкости, нужно затратить энергию. Добавим в воду что-нибудь гидрофильное (например, перец), после чего капнем в смесь каплю моющего средства, получим следующую картину:



Рис. 2: эффект Марангони-Гиббса в действии

на данных фотографиях можно наблюдать 3 стадии

1. Ничего не происходит и вот-вот добавим каплю мыльного раствора.
2. Добавили каплю и перец в жидкости мгновенно начал движение в сторону краев тарелки.
3. Движение прекратилось.

Что там происходит на молекулярном уровне(см.рис 3):

Мыло обладает меньшим коэффициентом поверхностного натяжения, то есть молекулы взаимодействуют слабее между собой, они начинают растекаться по поверхности жидкости, при этом гидрофильные частицы «хотят» продолжать взаимодействовать с водой, поэтому они начинают удаляться от мыла.

Также проиллюстрировать эффект Марангони(см.рис.4) нам поможет бокал вина (или более крепкого напитка), вино можно представить как смесь воды, спирта и еще чего-то. На границе раздела трех фаз (стеклянного бокала, вина и воздуха) образуется мениск, здесь жидкость свободно прилипает к бокалу, так как он имеет гидрофильную поверхность При этом спирт испаряется быстрее, чем вода (так как силы межмолекулярного взаимодействия у этанола меньше), а в области мениска эта скорость выше, чем в середине бокала (из-за большего отношения единицы поверхности к единице объема), поэтому там жидкость будет быстрее терять спирт, а значит ее поверхностное натяжение будет расти, вследствие чего жидкость будет подниматься. Также из-за разных поверхностных натяжений в области мениска и в остальной части стакана, будут возникать очень тонкие поверхностные потоки, которые будут также «подталкивать» вверх вино, пока сила тяжести не превзойдет силу поверхностного натяжения и силу «подталкивания», после чего

капли начнут стекать вниз и возникнут так называемые «виные слезы». Потом процесс будет повторяться, так как испарение вряд ли кто сможет остановить.

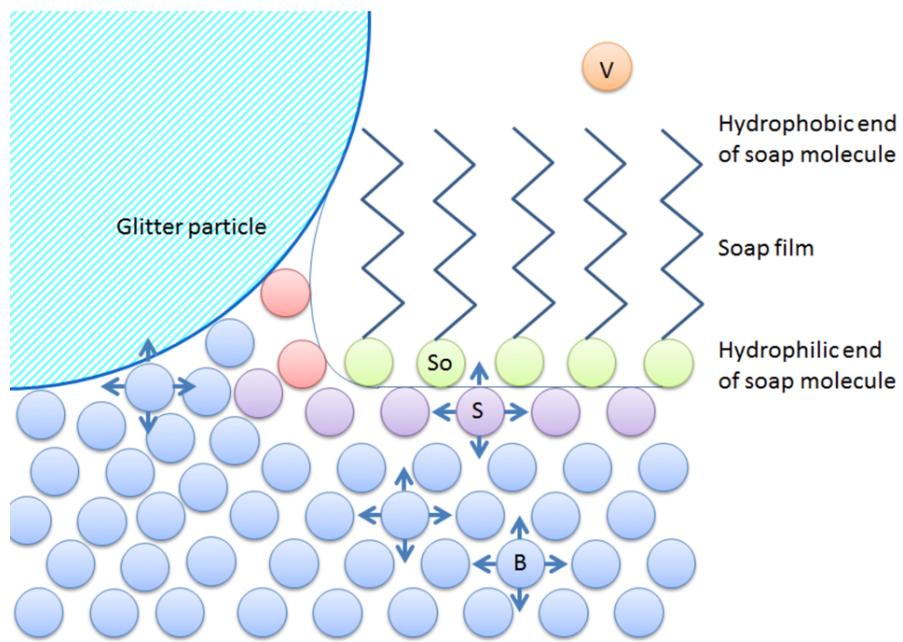


Рис. 3: Иллюстрация изменения поверхностного натяжения при добавлении в воду мыльного раствора

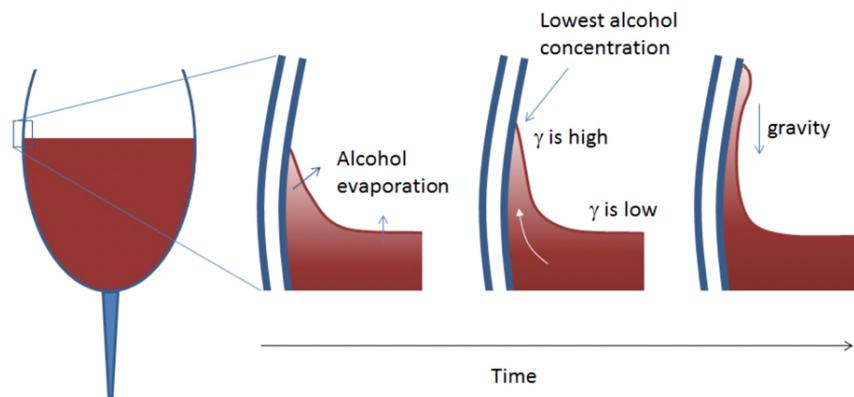


Рис. 4: Схема, поясняющая образование слез вина

3 Оценка скорости

3.1 Первый способ

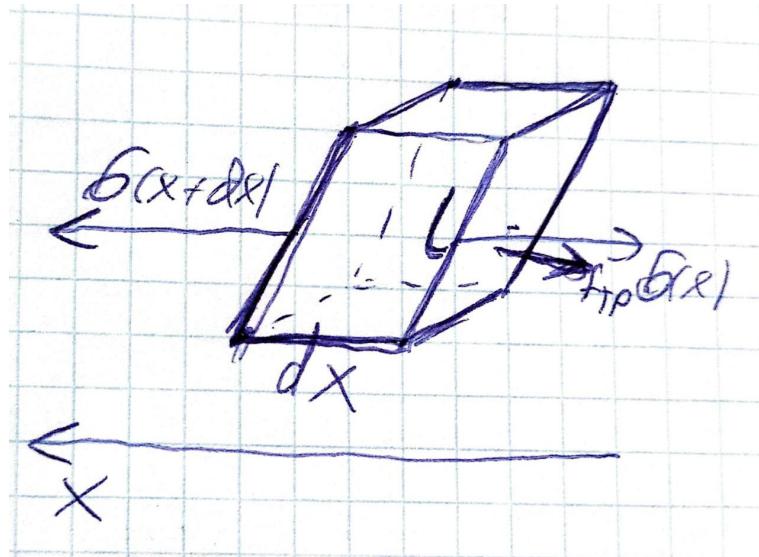


Рис. 5: Кусочек жидкости на границе фаз

Рассмотрим кусочек жидкости на границе фаз. На него с одной стороны действует сила $\sigma(x + dx)$, с другой стороны $\sigma(x)$ и в общем-то сила трения, препятствующая смещению пласти жидкости относительно поверхности. Запишем второй закон Ньютона для этого кусочка в проекции на Ох, также запишем что такая сила трения:

$$\begin{cases} \sigma(x + dx) \cdot L - \sigma(x) \cdot L = F_{\text{тр}} \\ F_{\text{тр}} = \eta \cdot \frac{\delta v}{\delta h} \cdot dS = \eta \cdot \frac{\delta v}{\delta h} \cdot L \cdot dx \end{cases} \Rightarrow \sigma'(x) = \eta \cdot \frac{\delta v}{\delta h}$$

Где h - высота кучечка. Оценим глубину поверхностного слоя, для этого воспользуемся следующей моделью: все молекулы внутреннего слоя имеют энергию взаимодействия с дрэгими молекулами $E_{\text{вн}}$, а молекулы поверхности имеют одинаковую энергию $E_{\text{п}} = \frac{1}{2} \cdot E_{\text{вн}}$ (из предположения, что молекулы внутри имеют очаги взаимодействия и над собой, и под собой, а поверхностные только под собой). Пусть площадь S , а глубина поверхностного слоя x .

Запишем чему равна поверхностная энергия:

$$\sigma \cdot S = E_{\text{п}} \cdot n \cdot x \cdot S \Rightarrow x = \frac{2\sigma}{E_{\text{вн}} \cdot n}$$

Если мы рассмотрим процесс испарения, то можем сказать, что испаряются молекулы внутреннего слоя (по факту испаряются из внешнего слоя, но их место тут же занимают молекулы внутреннего слоя). Вспомним, что удельная теплота парообразования – это количество теплоты необходимое для перевода одного моля вещества из жидкого состояния в парообразное, отсюда:

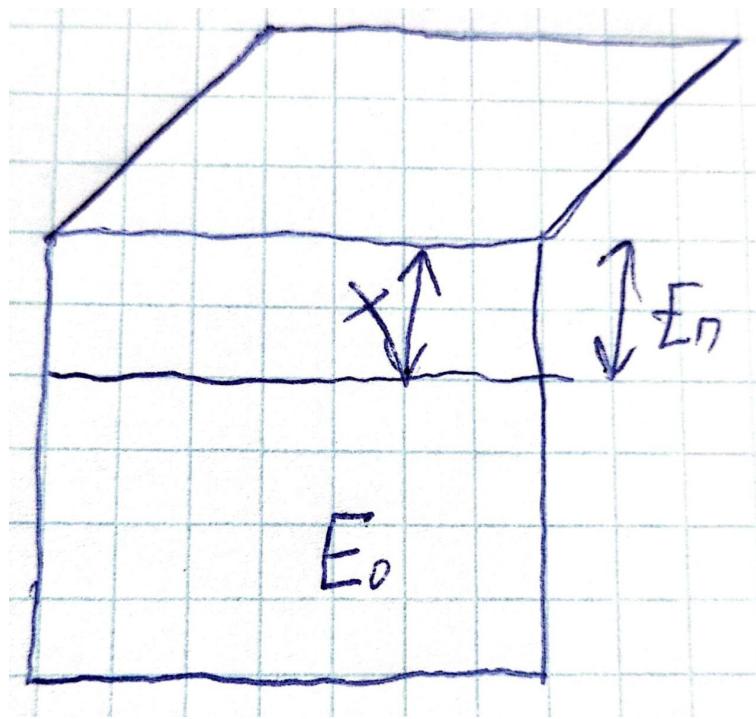


Рис. 6: Кусочек слоя на границе фаз для рассмотрения граничного слоя

$$m \cdot \Lambda = N_A \cdot \frac{m}{\mu} \cdot |E_{BH}| \Rightarrow |E_{BH}| = \frac{\mu \Lambda}{N_A} \Rightarrow x = \frac{2N_A \sigma}{\mu \lambda n}$$

Концентрация - это: $n = \frac{\rho}{\mu} \cdot N_A \Rightarrow x = \frac{2\sigma}{\Lambda\rho} = \frac{2 \cdot 7 \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 10^5 \cdot 10^3} = 7 \cdot 10^{-10} [\text{м}]$ Первая оценка строится на том, что движется только поверхностный слой, причем делает это со скоростью, не зависимой от высоты, в таком случае формула, связывающая вязкость и производную коэффициента поверхностного натяжения приобретает следующий вид:

$$\frac{\Delta\sigma}{2\lambda} \approx \frac{\Delta\sigma}{\Delta x} \approx \sigma'(x) = \eta \cdot \frac{v}{h} \Rightarrow v = \frac{3 \cdot 10^{-2} \cdot 7 \cdot 10^{-10}}{2 \cdot 10^{-8} \cdot 10^{-3}} \approx 1 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

3.2 Второй способ

Движущийся поток Марангони будет действовать силой лобового столкновения на плавающие перчинки, которая равна: $F = \rho v^2 h d$. Попробуем прикинуть размеры плавающих перчинок: глаз человека различает размеры вплоть до 0,1 мм, перчинки были различимы, поэтому порядок их размера будет 10^{-3} м. Тогда объем перчинки будет 10^{-12} , так как они плавают наполовину на поверхности воды. Запишем второй закон Ньютона на перчинку:

$$\frac{\rho v_{\text{потока}}^2 \cdot d \cdot h}{m_{\text{перчинки}}} = a \approx \frac{\langle v_{\text{перчинки}} \rangle}{t}$$

В нашем случае скорость получается примерно сантиметр в секунду, подставив все получим:

$$v = \sqrt{\frac{5 \cdot 10^{-2} \cdot 500 \cdot 10^{-10}}{10^3 \cdot 10^{-3} \cdot 7 \cdot 10^{-10}}} = 0.84 \approx 1 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

3.3 Третий способ

Он чем-то напоминает второй способ, но только мы воспользуемся законом сохранения энергии:

$$(\sigma_1 - \sigma_2)S = S \cdot \rho \cdot v^2 \cdot h \Rightarrow v = \sqrt{\frac{3 \cdot 10^{-2}}{10^3 \cdot 7 \cdot 10^{-10}}} \approx 100 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

4 Применение эффекта Марангони-Гиббса в жизни

1. Все мы пользуемся компьютерами и телефонами, это во многом благодаря интегральным схемам (объединение большого числа электронных схем из полупроводникового материала, обычно кремния), в процессе создания которых используется этот эффект. В одной из стадий производства кремниевые чипы (они имеют вафлистую структуру) подвергаются влажной обработке, однако пятна жидкости могут вызвать окисление, поэтому их необходимо избежать образование пятен, для этого пластину продувают парами спирта, чем создают градиент поверхностного натяжения, благодаря чему жидкость быстрее вытягивается с поверхности
2. Чистка загрязненных поверхностей. Для нерастворимых в воде веществах процесс более-менее понятен, но что будет в аналогичной растеканию капли масла ситуации, но для растворимой жидкости – загадка, однако после серии исследований ученые получили, что вещество успевает приобретать форму линзы и течения все же возникают. Ученые утверждают что это помогло бы отчищать поверхности жидкостей без вторичного загрязнения, как происходит с нерастворимыми веществами

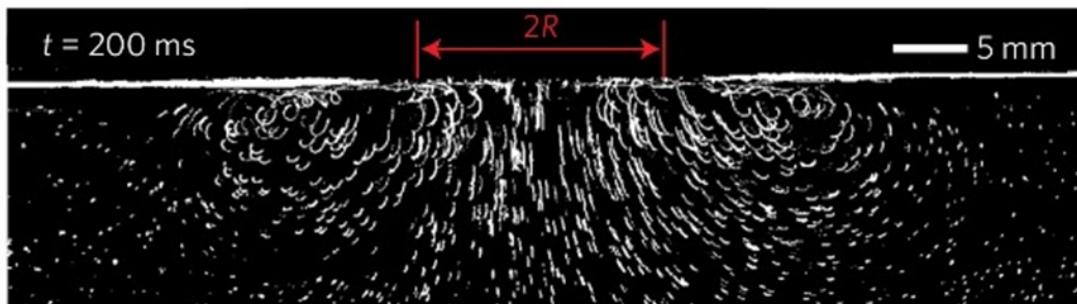


Рис. 7: фотография из опубликованном в *Nature Physics* исследовании

3. Есть еще ряд областей, где применяется данный эффект, например, сварка, выращивание кристаллов и электронно-лучевое плавление металла, также данный эффект проявляется в стабилизации мыльных пленок

5 Вывод

Был качественно описан эффект Марангони-Гиббса, проведен, на взгляд автора, интересный и, несмотря на простоту, зрелищный эксперимент, также были приведены области использования данного эффекта(текущие и перспективные) и оценка скорости тремя способами. Можно утверждать что модель приведенная в оценке скорости вполне рабочая, за исключением третьего способа, так как реальная скорость эффекта Марангони-Гиббса достигает $\approx 1 \frac{M}{c}$; из этого мы можем сделать вывод, что в законе сохранения энергии мы учитываем не все взаимодействия, так, например, логично было бы учитывать силу трения и взаимодействия воды с мылом. Однако, первые два способа вполне согласуются с реальными скоростями эффекта.