

Что учитель может посоветовать ученикам сделать самостоятельно?

«Мальчишек радостный народ коньками звучно режет лед!»
А.С. Пушкин.

Зима, каникулы! В это время можно сделать множество интересных экспериментов, которые летом не так-то просто провести. Школьникам 8 и 10 классов, в которых традиционно изучается молекулярная физика, нужно только подсказать - какие именно эксперименты интересны, и как их осуществить – а уж затем они сами со свойственным детям энтузиазмом сделают даже больше того, что им было предложено. Фотографии или видеоматериалы будут иллюстрировать отчет о проделанной работе.

Переохлажденная вода.

На мороз выставляется пластиковая бутылка с чистой (можно кипяченой) водой. Чтобы процесс охлаждения проходил медленно, бутылку следует «укутать» в одеяло или толстый шерстяной платок. Желательно бутылку вместе с утеплителем поместить в картонную коробку соответствующих размеров. Это нужно для того, чтобы исключить влияние ветра. При температуре окружающего воздуха от -3°C до -10°C вода в течение двух – трех суток не превратится в лёд, но приобретет «правильную» температуру.

Бутылку «в присутствии свидетелей» распаковывают и убеждаются в том, что вода сохранила свою прозрачность. Затем бутылку следует встряхнуть. В ней немедленно образуются кристаллики льда, и вода становится мутной. Сразу после образования льда вода и лед в бутылке имеют температуру близкую к 0°C . Оценить температуру, до которой была охлаждена вода в бутылке, можно, если выяснить, какая часть воды после встряхивания превратилась в лёд. Для этого нужно слить не замерзшую воду в подготовленную заранее пустую бутылку через сетку с мелкими ячейками.

Можно предложить выяснить, до какой минимальной температуры можно охладить воду, не превращая её в лёд. Здесь вне конкуренции могут оказаться школьники из Якутии, ведь известно, что там зимой температура воздуха опускается до -50°C . То есть у них самые лучшие условия для проведения таких экспериментов.

Можно ли вскипятить воду в ледяном стаканчике?

Оказывается можно, только для успешного проведения такого эксперимента воду нужно нагревать изнутри. Постановка эксперимента, который автор проводил сам:

В кусок льда, замороженный в морозильной камере холодильника до температуры -16°C : -18°C , с выемкой в форме стаканчика были поставлены два вложенных друг в друга прозрачных пластиковых стаканчика с водой. Двойные стенки такого стаканчика обеспечивали лучшую теплоизоляцию. Сверху стаканчики с водой закрыли куском полиэтиленовой пленки, а поверх пленки положили толстую (2 – 3 см) ледяную пластину. Таким образом, жидкая вода со всех сторон была окружена твердым холодным льдом. Затем кусок льда со стаканом воды внутри был помещен в микроволновую печь. Печка была включена и через 1,5 – 2 минуты лед вынули из печи. Ледяную крышку подняли, стаканчики вынули и насыпали в воду крупинки чая. Вода приобрела густой чайный цвет. Чай разлили по чашкам (предложили сахар по вкусу) и попросили зрителей объяснить, как удалось подогреть воду, если никакого кипятильника в стакане с водой не было, а вода была со всех сторон окружена льдом?

Микроволновая печь использует для разогрева предметов, содержащих воду, электромагнитные волны. Частоты электромагнитных колебаний, создаваемых в микроволновой печи – магнетроном – генератором, лежат в диапазоне сверхвысоких частот $2\div 3 \times 10^9$ Гц. Этому диапазону частот соответствуют сантиметровые длины волн в вакууме. Потенциальная энергия молекулы воды в электрическом поле зависит от взаимной ориентации вектора электрического дипольного момента молекулы и вектора напряженности электрического поля. Тепловое движение молекул приводит к тому, что

они за время релаксации (меньшее периода электромагнитных волн) приобретают преимущественную ориентацию во внешнем электрическом поле. Именно с этим обстоятельством связана большая величина статической диэлектрической проницаемости жидкой воды ($\epsilon = 81$). Ситуация с водой и электрическим полем аналогична механической ситуации: в корзинке находятся орехи, заполняющие её наполовину. Корзинку покачивают из стороны в сторону, и орехи с шумом пересыпаются от края к краю корзинки. При этом, естественно, выделяется энергия в виде звука (тепла). Многократные перемены в ориентации молекул воды приводят к рассеиванию (поглощению) энергии электромагнитных волн водой. Образно говоря, молекулы воды поворачиваются в среде (своих соседок молекул), которая оказывает сопротивление (действуют силы трения). В отличие от молекул, входящих в состав жидкой воды, молекулы, входящие в состав твёрдого льда, не могут переориентироваться. Под действием внешнего, созданного магнетроном, электромагнитного поля они могут отклониться от своего положения равновесия, заданного внутренними полями кристаллической решетки льда, только на небольшие углы. При этом происходят упругие колебания молекулы вблизи положения равновесия, которые не сопровождаются поглощением энергии. При одинаковых величинах напряженностей электрического и магнитного поля электромагнитной волны в СВЧ диапазоне лед в среднем за большой промежуток времени получает значительно меньше энергии, чем вода в жидком состоянии.

Электромагнитные волны сверхвысокочастотного диапазона практически без потерь проходят сквозь толстый слой льда и хорошо поглощаются в жидкой воде!

Может возникнуть резонный вопрос: а почему видимый свет проходит сквозь жидкую воду и очень слабо поглощается в ней? Ведь свет – это тоже электромагнитное излучение. Дело в том, что для установления преимущественной ориентации молекул воды в электрическом поле электромагнитной волны требуется определенное время – то самое время релаксации. За время, равное половине периода колебаний световой волны, молекула не успевает изменить свою ориентацию. Даже вращение свободной молекулы воды (находящейся в составе пара) происходит с большим периодом, чем периоды колебаний волн светового диапазона.

Пузырьки воздуха внутри льда

Замечали ли Вы, что при замерзании воды в бутылке, ведре или в бочке в образовавшемся слое льда практически всегда имеются в большом количестве пузырьки воздуха? Это обстоятельство приводит к тому, что *средняя* плотность льда с пузырьками гораздо меньше величины 900 кг/м^3 , которая приводится в справочниках для льда. Расположение пузырьков воздуха в объёме льда имеет определенную упорядоченность. Они образуют цепочки, вытянутые вдоль направления, в котором относительно стенок сосуда двигалась граница раздела вода – лёд. В некоторых случаях пузырьки сливаются, образуя сплошные трубочки из воздуха внутри льда. Можно предложить объяснить причину образования таких цепочек пузырьков.

При образовании из жидкой воды кристаллического льда расположение молекул воды приобретает упорядоченный характер. Замерзающая вода содержит растворенный в ней воздух. Молекулы кислорода и азота не встраиваются в кристаллическую решетку льда. Эти молекулы в прямом смысле «выживаются» из льда и перекочевывают в «лагеря беженцев» или в ближайшее жидкое окружение. Вблизи границы раздела фаз вода – лёд концентрация газа все время поддерживается избыточной. Каждой температуре, в том числе и температуре замерзания воды, соответствует определенная максимальная концентрация растворенного в жидкой воде газа (воздуха). Если газ присутствует в концентрации большей, чем максимально возможная, то он выделяется в виде пузырьков воздуха в жидкости. Прилипший к поверхности льда пузырек воздуха не успевает всплыть и вода вокруг него превращается в лед.

Продолжающееся замерзание воды в сосуде происходит так, что поток «холода» от стенок сосуда в том месте, где образовался пузырек, становится менее интенсивным. Воздух в пузырьке проводит тепло (и «холод») гораздо хуже, чем окружающий пузырек лед. За пузырьком (если смотреть вдоль направления движения границы лёд – вода) вода не так быстро охлаждается. Поэтому именно сюда в жидкую фазу будут вытесняться молекулы азота и кислорода из замерзающей вокруг воды. Значит, именно за пузырьком возникает повышенная концентрация газов в воде. Можно сделать вывод о том, что за уже существующими пузырьками создаются наиболее благоприятные условия для возникновения новых пузырьков.

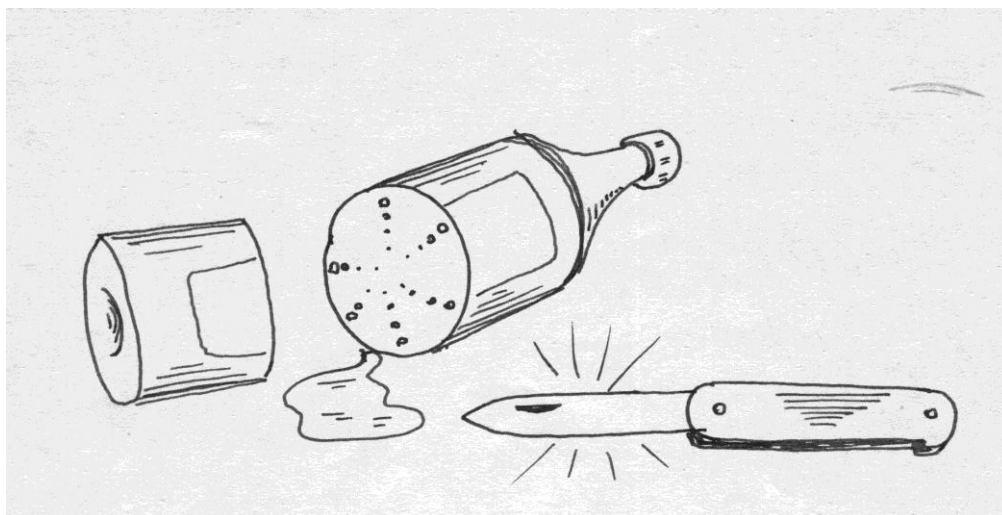


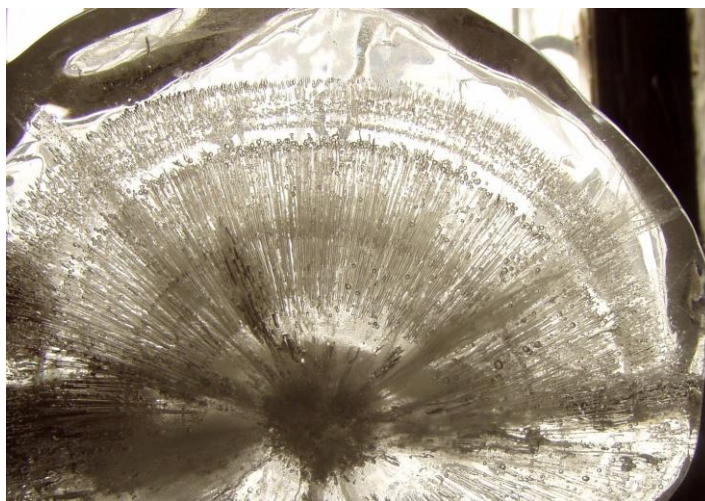
Рисунок В.Г. Бабаева к задаче о пузырьках во льду.

Если заморозить воду в пластиковой бутылке в морозильной камере холодильника, то цепочки пузырьков во льду тянутся от стенок бутылки почти до её середины. В самой середине бутылки возникает хаотическое нагромождение крупных и мелких пузырей воздуха. На рисунке пузырей в центре не видно, что свидетельствует о том, что рисунок, скорее всего, делался по памяти, а не с натуры!

На фотографии показано, как с помощью проволоки, по которой пропускается электрический ток, от куска льда из замёрзшей в водосточной трубе воды отрезается небольшой кусок льда для фотографирования льда с пузырьками.



На следующей фотографии показан фрагмент отрезанного куска льда с пузырьками воздуха внутри льда.



Разрезание льда проволокой

Этот эксперимент описан во многих книгах, но я нигде не встречал количественного расчета этого явления. Качественное объяснение явления состоит в следующем: Лед под проволокой испытывает повышенное давление. Температура плавления льда под проволокой и над ней отличаются друг от друга. Лед под проволокой имеет более низкую температуру плавления, чем окружающий его лед, не испытывающий давления со стороны проволоки. Под проволокой лед подтаивает, при этом он поглощает тепловую энергию от окружения и охлаждается. Образовавшаяся жидкая вода обходит проволоку, снова замерзает над ней и при этом нагревается. Верх и низ проволоки находятся при немного отличающихся температурах, поэтому теплота через проволоку передается от места, где она выделяется при замерзании воды (сверху), к месту, где она поглощается (под проволокой, где тает лёд). Теплота, естественно, уходит и в стороны. Температура участка льда после прохождения через него проволоки увеличивается. Это увеличение тепловой энергии связано с уменьшением потенциальной энергии системы «Земля – грузы» при опускании грузов в поле тяжести, а также с тем, что через проволоку за счёт механизма теплопроводности внутрь льда поступает тепловая энергия из окружающего лёд тёплого воздуха. Выделившаяся тепловая энергия будет рассеиваться в толще льда вследствие его теплопроводности.

Кусок льда берется из замерзшей в водосточной трубе воды. Диаметр трубы и, соответственно, куска льда $D=0,2$ м. Медная проволока диаметром 1 мм образует кольцо, она перекинута через кусок льда, и к ней снизу прикреплен груз 10 кг.



На фотографиях слева направо: 1. начало эксперимента, 2. через один час после начала, 3. через три часа после начала.



Дополнительное давление на лёд, которое создает проволока, по порядку величины равно:

$$\Delta P = Mg/(Dd).$$

По мере продвижения проволоки внутри льда это давление постепенно изменяется, становясь всё больше и больше. Этот вывод можно обосновать тем, что геометрические размеры проволочной петли внутри льда становятся всё меньше и меньше, а сила тяжести, действующая на грузы, остаётся неизменной.

Длительность прохождения проволоки через лед зависит от теплопроводности материала, из которого изготовлена проволока, α (медь имеет теплопроводность - 400 Вт/м/К), диаметра проволоки d , массы груза (M). Кроме того, эта длительность зависит от характеристик льда. К ним относятся: удельная теплоемкость льда C (2100 Дж/кг/К), теплопроводность льда β (2,2 Вт/м/К), теплота плавления льда λ ($3,34 \times 10^5$ Дж/кг), плотность льда ρ (900 кг/м³). Важной характеристикой, описывающей зависимость температуры плавления льда от внешнего давления, является наклон зависимости температуры плавления от давления ($\gamma = \Delta T_{\text{плав}}/\Delta P = -7,7 \times 10^{-2}$ К/МПа). Естественно, что длительность прохождения проволоки зависит от температуры самого льда, которая в условиях эксперимента (отчёт о котором на фотографиях) равна примерно:

$T_{\text{л}} =$ минус 0,5°C. Чем ближе температура льда к 0°C, тем, по-видимому, быстрее проволока проходит через лед. Присутствие в объёме льда воздушных пузырьков, конечно же, сказывается на процессе прохождения проволоки через лёд.

Суммарное внешнее давление, которое испытывает лёд под проволокой, равно ($P_{\text{атм}} + \Delta P$). При таком давлении лед плавится при температуре $T_{\text{пл}} = -\gamma \Delta P = -\gamma Mg/(Dd) = -0,037^\circ\text{C}$ ($\approx 0^\circ\text{C}$). То есть уменьшение температуры плавления льда (в сравнении с 0°C) достаточно мало.

Отсюда следует, что лед в том объёме, через который проходит проволока, должен нагреться примерно на 0,46°. Изменение внутренней энергии примерно равно:

$$\Delta U = \frac{C_{\text{л}} \Delta T \rho_{\text{л}} \pi D^2 d}{4} \approx 30 \text{ Дж}.$$

В том месте, где проволока входит в лёд, её температура примерно равна 0°C, так как лед на поверхности куска имеет в комнате температуру близкую к нулю. Внутри льда её температура постепенно уменьшается до температуры льда. Происходит это уменьшение на расстоянии порядка $D/2$. Оценка количества теплоты, которое поступает через два участка проволоки внутрь объема льда за время прохождения (за три часа), такова:

$$Q = \alpha \frac{\Delta T \pi d^2}{D} t \approx 68 \text{ Дж}.$$

Работа силы тяжести Земли в условиях описываемого эксперимента равна примерно $A=30$ Дж. То есть в сумме:

$$A+Q > \Delta U.$$

В этом месте, похоже, нужно остановиться, хотя мы и не получили формулы, которая позволила бы вычислить время прохождения проволоки через лёд, ведь должна же быть перспектива у тех, кто читает такие статьи. Дальнейшее исследование явления и расчеты читатели при возникшей заинтересованности могут продолжить самостоятельно.

С.Д. Варламов

9 января 2007 г.