

Демонстрации и опыты



Варламов Сергей Дмитриевич
Кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики специализированного учебно-научного центра (СУНЦ) МГУ им. М.В. Ломоносова, член жюри Московской городской и Всероссийской олимпиады школьников по физике.

Что учитель физики может посоветовать ученикам сделать самостоятельно зимой?

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

Зима! В это время можно проделать множество интересных экспериментов, которые летом не так-то просто провести. Школьникам 8-х и 10-х 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 отчёт о проделанной работе. В статье предлагаются опыты с переохлаждением воды, кипячением воды в ледяном стаканчике, наблюдением пузырьков воздуха внутри льда, разрезанием проволокой куска льда.

Переохлаждённая вода

На мороз выставляется пластиковая бутылка с чистой (можно кипячёной) водой, закрытая пробкой. 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-трёх суток не превратится в лёд, но приобретёт «правильную» температуру. Бутылку «в присутствии свидетелей» распаковывают и убеждаются в том, что вода сохранила свою прозрачность. Затем бутылку следует встряхнуть. В ней сразу же после встряхивания образуются кристаллики льда, и вода становится мутной.

Сразу после образования льда вода и лёд в бутылке имеют температу-

ру, близкую к 0°С. Оценить температуру, до которой была охлаждена вода в бутылке, можно, если выяснить, какая часть воды после встряхивания превратилась в лёд. Для этого нужно слить незамёрзшую воду в приготовленную заранее пустую бутылку через сетку с мелкими ячейками. Предположим, что масса воды в бутылке была M, а на сетке оказался лёд, масса которого равна m. Пренебрежём теплоёмкостью стенок бутылки и обозначим удельную теплоёмкость воды символом c. Если символом λ обозначить удельную теплоту замерзания воды (теплоту плавления льда), то для вычисления температуры, которую имела вода до встряхивания, можно воспользоваться формулой: $\Delta t = \frac{\lambda m}{cM}$.

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. Приведём постановку эксперимента, который автор проводил сам.

В кусок льда, замороженный в морозильной камере холодильника до температуры порядка -16°C или ниже, 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 плёнки, а поверх пленки положили толстую (2-3 см) ледяную пластину. Таким образом, жидкая вода со всех сторон была окружена твёрдым холодным льдом. Затем кусок льда со стаканом воды внутри был помещён в микроволновую печку. Печка была включена и через 1,5 – 2 минуты лёд вынули из печки. 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?



Дадим объяснение. Микроволновая печь использует для разогрева предметов, содержащих воду, электромагнитные волны. Частоты электромагнитных колебаний, создаваемых в микроволновой печке магнетроном – генератором колебаний, лежат в диапазоне сверхвысоких частот $2 \cdot 10^9 \div 3 \cdot 10^9$ 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 напряжённости 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 (в постоянном электрическом поле) диэлектрической проницаемости жидкой воды ($\varepsilon = 81$).

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 решётки льда, только на небольшие углы. При этом происходят упругие колебания молекулы вблизи положения равновесия, которые не сопровождаются поглощением энергии. При одинаковых величинах напряжённостей электрического и магнитного поля электромагнитной волны в СВЧ диапазоне лёд в среднем за большой промежуток времени получает значительно меньше энергии, чем вода в жидком состоянии. Электромагнитные волны СВЧ 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 бóльшим 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 (рис. 1)? 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 при замерзании воды граница раздела вода-лёд. В некоторых случаях пузырьки сливаются, образуя сплошные трубочки из воздуха внутри льда. Можно предложить учащимся объяснить причину образования таких цепочек пузырьков и исследовать явление при разных условиях замерзания воды. Например, воду можно предварительно вскипятить, затем охладить и залить в пластиковую бутылку «по самое горлышко», чтобы растворённого воздуха в ней было немного. В этом случае в замёрзшей воде пузырьков образуется мало.



Приведём качественное объяснение. При образовании из жидкой воды кристаллического льда расположение молекул воды приобретает упорядоченный характер. Замерзающая вода содержит растворённый в ней воздух. Молекулы кислорода и азота не встраиваются в кристаллическую решётку льда. Эти молекулы в прямом смысле «выживаются» изо льда и перекочёвывают в «лагеря беженцев» или в ближайшее жидкое окружение. Вблизи границы раздела фаз вода-лёд концентрация газа всё время поддерживается избыточной. Каждой температуре, в том числе и температуре замерзания воды, соответствует определённая максимальная концентрация растворённого 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

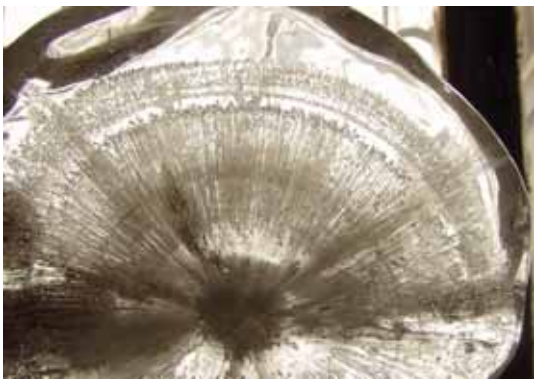


Рис. 1. Фрагмент отрезанного куска льда с пузырьками воздуха внутри льда

поверхности льда пузырёк воздуха не успевает всплыть, и вода вокруг него превращается в лёд.

Продолжающееся замерзание воды в сосуде происходит так, что поток «холода» от стенок сосуда в том месте, где образовался пузырёк, становится менее интенсивным. Воздух в пузырьке проводит тепло (и «холод») гораздо хуже, чем окружающий пузырёк лёд. 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.

Задача о пузырьках однажды была включена в список задач для турнира юных физиков (ТЮФ). Один из членов жюри этого турнира В.Г. Бабаев нарисовал шуточную иллюстрацию к этой задаче (рис. 2).



Рис. 2. 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 рисунке 3 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.



Рис. 3

Разрезание льда проволокой

Этот эксперимент описан во многих книгах, но я нигде не встречал количественного расчёта этого явления. Качественное объяснение явления состоит в следующем. Лёд под проволокой испытывает повышенное давление. Температура плавления льда под проволокой и над ней отличаются друг от друга. Лёд под проволокой имеет более низкую температуру плавления, чем окружающий его лёд, не испытывающий давления со стороны проволоки. Под проволокой лёд 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 энергия 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.

Для эксперимента был взят кусок льда из замёрзшей в водосточной трубе воды. Диаметр трубы и, соответственно, куска льда D=0,2 м. Медная проволока диаметром d=1 мм образует кольцо, она перекинута через кусок льда, и к ней снизу прикреплён груз массой M=10 кг (рис. 4). Дополнительное давление на лёд, которое создаёт 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



Рис. 4а. Начало эксперимента



Рис. 4б. Через один час после начала эксперимента



Рис. 4в. Через три часа после начала эксперимента

тановятся всё меньше и меньше, а сила тяжести, действующая на грузы, остаётся неизменной.

Длительность прохождения проволоки через лёд зависит от теплопроводности материала, из которого изготовлена проволока, напомним, что медь имеет коэффициент теплопроводности

$$\alpha = 400\ \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}},$$

а также диаметра проволоки d, массы груза M. Кроме того, эта длительность зависит от характеристик льда. К ним относятся: удельная теплоёмкость льда $c = 2100\ \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$, коэффициент теплопроводности

$$\beta = 2{,}2\ \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}},$$

теплота плавления льда

$$\lambda = 3{,}34\cdot 10^5\ \frac{\text{Дж}}{\text{кг}},$$

плотность льда $\rho = 900$ кг/м^3. Важной характеристикой, описывающей зависимость температуры плавления льда от внешнего давления, является коэффициент

$$\gamma = \frac{\Delta T_{\text{пл}}}{\Delta P} = -7{,}7\cdot 10^{-2}\ \text{К/МПа}.$$

Естественно, что длительность прохождения проволоки зависит от температуры самого льда, которая в условиях эксперимента (отчёт о котором на фотографиях) равна примерно $T_{\text{л}} = -0{,}5^\circ\text{C}$. Чем ближе температура льда к 0°C, тем, по-видимому, быстрее проволока проходит через лёд. Присутствие в объёме льда воздушных пузырьков, конечно же, сказывается на процессе прохождения проволоки через лёд.

Суммарное внешнее давление, которое испытывает лёд под проволокой, равно $(P_{\text{атм}} + P)$. При таком давлении лёд плавится при температуре

$$T_{\text{пл}} = -\gamma\Delta P = -\gamma Mg/(Dd) = -0{,}037^\circ\text{C}.$$

То есть уменьшение температуры плавления льда (в сравнении с 0°C) достаточно мало.

Отсюда следует, что лёд в том объёме, через который проходит проволока, должен нагреться до температуры $T_{\text{пл}}$, т.е. примерно на $\Delta T = 0{,}46^\circ\text{C}$. Изменение внутренней энергии пересечённого проволокой объёма льда при нагреве на ΔT примерно равно

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

В том месте, где проволока входит в лёд, её температура примерно равна 0°C, так как лёд 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 объёма 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

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

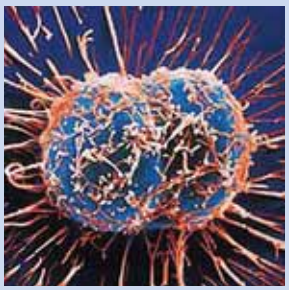
По логике именно таким и должно быть неравенство, ведь греется не только та часть объёма, в которой побывала проволока, но и соседние участки льда за счёт его теплопроводности.

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 расчёты читатели при возникшей заинтересованности могут продолжить самостоятельно.



Новости Новости Новости Новости Новости

Физика высоких энергий объясняет, как клетки становятся раковыми



Раковая клетка

Российские исследователи из МИФИ применили пакет программ ROOT (CERN), работающий с результатами экспериментов в физике высоких энергий, к изучению воздействия повреждающих факторов на клетки – важной проблемы, связанной со старением, канцерогенезом и эволюцией жизни. Учёные подошли к процессу повреждения клетки и превращения её в раковую как к сложной сети физико-химических реакций. Часть из этих реакций отвечает за частичную утрату клеточной специализации, превращение клетки из полезной в «плохую». Часть – за сохранение способности клетки делиться. В результате получились сложные прогностические зависимости вероятности злокачественного перерождения клетки от продолжительности и интенсивности повреждения. Анализ зависимостей показал, что возможны условия, когда вероятность злокачественной трансформации клетки в условиях повреждения оказывается меньше, чем в его отсутствии. Это реализуется при выполнении одного из двух условий: когда повреждение слабое и кратковременное, и когда оно сильное или/и длительное. Оба случая предоставляют реальные возможности для профилактики и для лечения рака. Кроме этого, российские учёные показали, что современные условия жизни максимально благоприятны для формирования «предраковых» состояний клеток.

Источник: материалы конференции ИВТН http://ivtn.ru