

# Ледяная выпуклость

**1** Добрый день, уважаемое жюри, команды-соперницы, а также зрители. Меня зовут Кирпич Юлия. Сегодня я от лица команды «Лицей БГУ 10» представлю вашему вниманию доклад о проделанной нами работе над задачей «Ледяная выпуклость».

**2** Позвольте напомнить условие этой задачи: наполните пластиковый лоток (контейнер) водой. При замораживании воды при некоторых условиях на поверхности льда появляется выпуклость. Исследуйте данное явление.

**3** Мы разделили задачу на несколько этапов:

- Качественно объяснить наблюдаемые явления
- Выявить ключевые зависимости
- Привести математическое описание
- Научиться прогнозировать результаты экспериментов, основываясь на математической модели

Подойдя к задаче общо, мы выдвинули гипотезу о причинах появления выпуклости. Однако мы не исключали возможности создания условий, когда выпуклости не появляется. Мы предположили, что выпуклость образуется вследствие промерзания

воды со стенок. **4** Мы предположили, что выпуклость образуется вследствие промерзания воды со стенок. Отдают теплоту стенки, затем начинает отдавать теплоту вода через стенки, сама кристаллизуется. Сначала лёд покрывает тонким слоем внутреннюю поверхность сосуда. Так как плотность льда меньше плотности воды, то лёд занимает больший объём, чем вода, из которой он образовался, объём содержимого сосуда увеличивается. Лёд неподвижен, а некоторый объём воды, вследствие её несжимаемости и текучести будет вытеснен. Куда он будет вытеснен? Туда, где ему окажут меньшее сопротивление, а именно вверх, в воздух, так как с других сторон - стенки. В силу присутствия поверхностного натяжения вода не растекается, а образует нечто наподобие ступеньки по отношению к высоте образованного льда. Далее холод передается уже льдом у стенок ближайшим к нему слоям воды, которая замерзает, превращаясь в лёд, потом уровень оставшейся жидкости повышается. Далее процесс кристаллизации и вытеснения повторяется до полного превращения воды в лёд.

**5** Для того чтобы было возможным формулировать описанный процесс, рассмотрим малое приращение толщины льда у стенок  $dr$ . Когда этот лёд образовался, вода вытеснилась на высоту  $dh$ , причём  $dr$  и  $dh$  много меньше  $r$  и  $h$  соответственно. Применим закон

сохранения массы для момента до замерзания и момента после замерзания  $dt$ . Получим следующее равенство (прочитать). После его преобразования получаем формулу зависимости текущей высоты выпуклости от текущего радиуса, если известна начальная высота жидкости, что означает, что мы знаем высоту выпуклости для каждого замороженного слоя воды. Эта формула задаёт поверхность выпуклости.

**6** Нас заинтересовало, может ли сформироваться вогнутость при замерзании воды. Многим показалось бы это невозможным, однако мы, основываясь на качественном объяснении промерзания воды со стенок, предположили, что вогнутость – это та же выпуклость, но по краям сосуда. Мы предположили, что источник холода нужно расположить в центре сосуда. Тогда должен наблюдаться аналогичный процесс вытеснения жидкости, но не к центру, а от центра. **7** Снова рассматривая малые приращения высоты выпуклости и текущего радиуса  $dh$  и  $dr$ , распишем закон сохранения массы и получим следующую зависимость (прочитать)

**8** По началу мы проводили опыты с использованием бытовых холодильников, однако мы убедились, что они приводят к результатам, которые различны даже при одинаковых начальных параметрах всей системы. В частности, было установлено, что выпуклость является несимметричной вследствие разности расстояний до стенок холодильника. **9** Чтобы идеализировать условия, было решено в качестве источника холода применять жидкий азот (как известно, температура кипения азота равна минус  $196^{\circ}\text{C}$ ). Мы брали сосуд, охлаждали его жидким азотом, а затем помещали в него другой сосуд с водой. Таким образом, теплообмен происходил через стенки. Периодически мы подливали в наружный сосуд азот, так как он испарялся. В итоге опыта наблюдалась выпуклость, идеально симметричная относительно оси сосуда.

Следующим шагом было оправдать либо опровергнуть нашу гипотезу с помощью ряда экспериментов. **10** Фото на слайде наглядно сопоставляется с графиком, полученным с помощью нашей математической модели, который описывает форму выпуклости в разрезе сбоку, и подтверждает её. **11** Не остался в стороне и опыт с замораживанием изнутри. Для этого мы использовали цилиндр, который помещался в центр сосуда с водой. Когда вся жидкость заморозилась, оказалось, что наблюдается небольшая приподнятость по мере приближения к краям сосуда. Это является ярким подтверждением нашей модели. Вы можете проследить за её образованием, которое представлено на экране.

**12**Далее нами было решено поставить опыт с водой, замораживание которой осуществлялось бы сверху. Не долго думая, мы налили жидкий азот прямо в сосуд с водой. Через некоторое время сосуд треснул. Мы понимаем это явление так: первыми подверглись теплообмену верхние слои воды. Образовалась некоторая корочка льда, в последствие, она являлась проводящим элементом между азотом и водой под ней, и в то же время, образно говоря, ещё одной «стенкой», которая ограничивает жидкость. Дальнейшее промерзание льда будет продолжаться до того момента, когда прочность льда сверху не станет большей прочности стенок сосуда. Затем сила давления разорвёт стенки.

**13**Наше любопытство не успокоилось, пока мы не провели опыт с замораживанием со дна. Мы собрали следующую установку. Взяли два сосуда одинакового основания, в один из них налили жидкий азот, а другой поставили сверху. Было заметным, как лёд образовывается слоями. В результате не наблюдалось ни выпуклости ни вогнутости.

**14**От цилиндрических сосудов мы перешли к сосудам прямоугольного сечения. Сосуд, имеющий в основании прямоугольник, наполнили водой, поместили его в сосуд с жидким азотом. Образование льда, согласно нашей модели, началось со стенок. Далее процесс аналогичен процессу в случае с цилиндрическим сосудом. Однако особенность его заключается в форме выпуклости. Она напоминает игрушечную пирамиду с составляющими не круглой, а эллиптической формы. Появление не прямоугольной выпуклости мы объясняем следующим образом: мы предполагаем, что наш сосуд с точки зрения результата замерзания можно считать таким же, как сосуд эллиптического основания, поскольку в углах сосуда теплообмен жидкости происходит с двумя стенками, следовательно толщина льда от углов будет увеличиваться с большей скоростью.

**15**Также нами были проведены опыты с другими веществами в качестве объекта замораживания, а именно воска. Когда он заморозился, появилась вогнутость. Это является вполне объяснимым. Воск при замораживании уменьшается в объёме.

**16**Неустанно занимаясь научными наблюдениями, мы выявили удивительное сходство замерзания воды с выпеканием мучных изделий. Форма ледяной выпуклости и выпуклости кекса одинаковы, а также похожи с точки зрения процесса образования. Тесто увеличивается в объёме при нагревании, а вода – при замораживании.

**17**Подведём итоги проделанной работы.

-Предложено качественное объяснение появления выпуклости

-Выведены формулы поверхности выпуклости для замораживания со стенок и из центра

-Предложены условия образования вогнутости

**18**-Изучены формы выпуклостей в сосудах не цилиндрической формы, а сосудах прямоугольного сечения.

-Осуществлено графическое сопоставление математической модели и результатов опытов

**19**Выводы:

-Выпуклость образуется в результате промерзания воды со стенок

-Контур поверхности выпуклости в разрезе сбоку напоминает гиперболу

-При промерзании со дна и сверху выпуклости не формируется

**20**-Образование вогнутости обеспечивает промерзание из центра

-Выпуклость в сосудах прямоугольного сечения не имеет углов и её основание напоминает фигуру основания сосуда со срезанными углами

-Если замораживать вещества, которые уменьшаются в объёме при переходе в твёрдое состояние, образуется вогнутость

**21**Спасибо за внимание =)