Булуус - подземный холодильник в условиях вечной мерзлоты

Филиппов К.

11-й университетский физмат-класс, МБОУ "Кобяйская СОШ имени Е.Е. Эверстова", с. Кобяй, Республики Саха (Якутия)

Руководитель: Иванова А.А. МБОУ "Кобяйская СОШ имени Е.Е. Эверстова", с. Кобяй, Республики Саха (Якутия)

Научный консультант: Местников А.Е, д.т.н., профессор, Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск

Введение

Актуальность. В зоне распространения многолетней (вечной) мерзлоты особенно актуальной является проблема эффективного применения естественного холода [1, 2]. В условиях Севера подземные холодильники являются одним из самых древних сооружений и используются для хранения замороженных продуктов. В них для обеспечения устойчивого холода используются два известных метода: зимняя хладозарядка и зимняя хладозарядка с выработкой искусственного холода, что является обязательным условием для промышленных холодильников [3].

Для индивидуальных подземных холодильников в условиях вечной мерзлоты, так называемых "булуус", бывает достаточным только первый метод. Но как показывает практика их эксплуатации, со временем наблюдается повышение температуры в мерзлых грунтах и бывают случаи преждевременного оттаивания продуктов и льда для пресной воды в летний период.

Идея (гипотеза) работы: Эффективность работы подземного холодильника можно повысить повышением его теплоаккумулирующей способности и тепловой защиты.

Цель работы: Изучение и совершенствование способов защиты подземного холодильника в условиях вечной мерзлоты от преждевременного оттаивания .

Задачи исследования:

1. Провести анализ достижений в области практического применения естественного холода вечной мерзлоты.

2. Изучить способы повышения эффективности работы подземного холодильника.

3. Изучить скорость таяния чистого льда, мерзлого грунта и ледяных композитов.

4. Изучить эффективность применения тепловой защиты на модели подземного холодильника.

Объект исследования: Энергия “вечной мерзлоты”.

Предмет исследования: Булуус - индивидуальный подземный холодильник в условиях вечной мерзлоты.

Методика исследования: В процессе выполнения исследовательской работы провел анализ научно-технической информации по практическому использованию энергии “вечной мерзлоты” в жизнедеятельности человека, вел натурное наблюдение за тепловым режимом работы и техническим состоянием семейного подземного холодильника - булуус, пользуясь знаниями по физике расчетно-экспериментальным методом установил удельную теплоту плавления льда от пресной воды и оценил теплоту его оттаивания. Экспериментальные работы провел с использованием приборов и принадлежностей кабинета физики.

Исследовательский проект посвящен изучению и совершенствованию способов защиты подземного холодильника в условиях вечной мерзлоты от преждевременного оттаивания с использованием законов физики, лабораторных опытов и натурного обследования.

Результаты и обсуждение.

Основу вечной мерзлоты составляет вода в замерзшем состоянии, которая характеризуется физическими величинами как плотность, удельная теплоемкость и др. Удельная теплоемкость воды равна 4200 Дж/(кг×°С). Высокая удельная теплоемкость воды широко используется в разных областях: от медицинских грелок до систем отопления и охлаждения, также используется в тушении пожаров, так как вода при соприкосновении с предметов забирает у него много большое количество теплоты. Благодаря высокой удельной теплоемкости мерзлый грунт обладает высокой теплоаккумулирующей способностью, т.е. служит хорошим аккумулятором естественного холода.

В лабораторной работе 8 класса мы изучали удельную теплоту плавления льда, что является теоретической основой сохранения естественного холода в подземных холодильниках.

Опыт № 1. Определение удельной теплоты плавления льда.

Оборудование: калориметр, термометр, измерительный цилиндр, сосуд с тёплой водой.

Содержание и метод выполнения работы:

Удельную теплоту плавления льда можно определить калориметрическим способом. Для этого в калориметр с тёплой водой погружают кусочки льда. Согласно уравнению теплового баланса $Q_{отд} = Q_{получ}$. В процессе теплообмена отдаёт теплоту горячая вода: $Q_{отд} = c_в m_в(t_в – t_{кон})$, где $c_в$ = 4200 Дж/кг°С, $m_в$ – масса воды, $t_в$ – начальная температура воды, $t_{кон}$ – конечная температура воды.

Лёд и образовавшаяся из него талая вода получают теплоту, при этом лёд плавится, а талая вода нагревается: $Q_{получ} = Q_{пл} + Q_{тв} = \lambda m_л + c_в m_л(t_л – t_{кон})$, где λ – удельная теплота плавления льда, $m_л$ – масса льда (талой воды), $t_л$ = 0°С – начальная температура льда.

Подставим формулы в уравнение теплового баланса:

$$\lambda m_л + c_в m_л(t_л – t_{кон}) = c_в m_в(t_в – t_{кон}), \text{ откуда}$$

$$\lambda = \frac{c_в m_в (t_в - t_{кон}) - c_в m_л (t_л - t_{кон})}{m_л}$$

Ход работы:

Во внутренний сосуд калориметра налить 150 см^3 тёплой воды.

1. Измерить начальную температуру воды $t_в$.

2. Взять небольшой кусочек льда и опустить его в воду. Когда весь лёд расплавится, отметить самую низкую установившуюся температуру $t_{кон}$.

3. Определить массу льда, измерив объем талой воды.

4. Используя данные опыта, составить уравнение теплового баланса и определить удельную теплоту плавления льда.

5. Сравнить полученный результат с табличным, и вычислите абсолютную погрешность измерений по формуле $\Delta\lambda = |\lambda - \lambda_{табл}|$

6. Вычислить относительную погрешность измерений $\varepsilon = {\Delta\lambda}/{\lambda_{табл}}$

7. Результаты измерений и вычислений записать в таблицу.

1) Лед 100%

$$\Delta\lambda = \lambda - \lambda_{табл} = 4{,}05 \cdot 10^5 \frac{Дж}{кг} - 3{,}33 \cdot 10^5 \frac{Дж}{кг} = 0{,}72 \cdot 10^5 \frac{Дж}{кг}$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_{табл}} \cdot 100\% = \frac{0{,}72 \cdot 10^5 \frac{Дж}{кг}}{3{,}33 \cdot 10^5 \frac{Дж}{кг}} \cdot 100\% \approx 0{,}22 \cdot 100\% = 22\%$$

Таблица 1 – Расчетные показатели льда

$m_в$, кг	$t_в$, °C	$t_{кон}$, °C	$m_л$, кг	$t_л$, °C	$c_в$, Дж/кг°C	λ, Дж/кг	$\lambda_{табл}$, Дж/кг
0,15	21	12	0,016	0	4200	$4{,}05 \cdot 10^5$	$3{,}33 \cdot 10^5$

Вывод. Вода, обладая очень высокой теплоемкостью в 4200 Дж/(кг×К) требует максимальных затрат теплоты для повышения ее температуры на 1 градус. Это свойство льда способствует поддержанию отрицательной температуры в булуусе летом.

Опыт № 2. Изучение эффективности применения тепловой защиты на модели подземного холодильника.

В этом эксперименте выяснил эффекты повышения теплоаккумулирующей способности чистого льда и ледовых композитов с разными добавками (песок, древесные опилки) и влияния теплоизоляции на время их оттаивания.

Первый стакан объемом 500 мл заполнил чистой водой. Два стакана заполнил густой смесью песка и опилок с водой.

Изготовил модель подземного холодильника из фанеры толщиной 9 мм размерами 30х30х20 см в масштабе 1:10 и теплоизолировал листом фольгоизола толщиной 10 мм. Образцы заморозил и поместил во внутрь модели подземного холодильника. Для наблюдения за температурой исследуемых образцов использовал термометры, установленные в сосуды через верхние отверстия (рис. 1).

Рисунок 1 - Модель подземного холодильника - булуус

Полученные результаты внесены в табл. 2.

Таблица 2 - Время оттаивания льда и ледяных композитов

№	Образец	Масса, г	Время, час - мин	
			Без теплоизоляции	С теплоизоляцией
1	Чистая вода	360	2-38	5-20
2	Вода с опилками	797	2-23	5-05
3	Вода с песком	1205	2-08	4-30

Выводы:

1) Время оттаивания льда зависит от количества воды в исследуемых образцах;

2) При использовании теплоизоляции время оттаивания чистого льда и ледяных композитов увеличилось в более чем 2 раза, что показывает эффективность использования теплоизоляции в конструкции подземного холодильника.

Опыт № 3. Натурные обследования температуры и технического состояния подземного холодильника.

Для натурного наблюдения за температурой воздуха и мерзлого грунта в булуусе (рис. 2) термометры устанавливали (рис. 3): 1 - на доски пола, 2 - в отверстиях, проделанных в мерзлом грунте. Одновременно контролировалась температура воздуха на улице.

Рисунок 2 - Вид булууса: слева - вход, справа - хранение льда

Рисунок 3 - Точки замера температуры

Полученные данные за первый год исследования приведены в табл. 3, за второй год исследований - в табл. 4.

Таблица 3 - Показатели температуры булууса в 2023 г.

Дата	**04.09.23**	**18.11.23**	**19.11.23**	**21.11.23**	**07.12.23**
Температура воздуха на улице, °С	-17	-26	-28	-27	-32
Температура воздуха в булуусе, °С	-1	-5	-11	-11	-12
Температура мерзлого грунта в булуусе, °С	0	-3	-3	-3	-6

Таблица 4 - Показатели температуры булууса в 2024-2025 гг.

Дата	**04.01.24**	**08.04.24**	**15.07.24**	**25.09.24**	**12.12.24**	**11.03.25**
Температура воздуха на улице, °С	-33	-10	+30	+3	-30	-24
Температура воздуха в булуусе, °С	-24	-20	-5	+1	-10	-12
Температура мерзлого грунта в булуусе, °С	-11	-18	-4	0	-6	-8

Рисунок 4 - Снимки в булуусе: слева - под полом талая вода со льдом, справа - появление плесени в стенах от 25 сентября 2024 г.

Как видно из рис. 4, к концу летнего периода внутри булууса устанавливается температурно-влажностный режим, характеризующийся

температурой воздуха и грунта около стены ± 1°С, появлением талой воды под полом из досок, конденсата и грибков на стене из древесины.

Вывод: 1) При естественной хладозарядке температура воздуха в булуусе и мерзлого грунта изменяется медленно за счет большой теплоемкости (теплоаккумулирующей способности) мерзлого грунта и отсутствия сквозной вентиляции воздуха.

Заключение

Результаты лабораторных и натурных исследований температурного режима подземного холодильника "Булуус" подтвердили рабочую гипотезу:

- В результате проведения натурных обследований булууса установил, что мерзлые грунты держат "тепло вечной мерзлоты". Поэтому при открытой двери в зимнее время с поступлением холодного воздуха в начальное время температура в булуусе была выше, чем на улице. Для эффективного охлаждения булууса и мрезло-талого грунта необходимо использовать вентилятор подачи холодного воздуха в зимний период;

- При использовании теплоизоляции с увеличением ее толщины время таяния чистого льда и ледяных композитов увеличилась в более чем 2 раза, мерзлого грунта 3 раза, что показывает эффективность использования теплоизоляции в конструкции подземного холодильника для сохранения естественного холода.

Список использованной литературы

1. География. [Электронный ресурс] URL: https://geographyofrussia.com/vechnaya-merzlota-vrag-ili-soyuznik/ (14.02.2023).

2. Многолетняя мерзлота [Электронный ресурс] URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Многолетняя_мерзлота (15.02.2023).

3. Кузьмин Г.П. Подземное пространство криолитозоны (проблемы и перспективы использования) // Наука и техника в Якутии. - № 1. - 2008. - С. 15-19.