УДК 624.139

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕПЛОТЫ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ ВОДЫ

Кузьмин Г.П.

Институт мерзлотоведения имени П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, e-mail: kuzmin@mpi.ysn.ru

Использование скрытой теплоты обратимого процесса фазового перехода плавление-кристаллизация воды является перспективным направлением получения возобновляемой тепловой энергии. Вода обладает высокой величиной этого показателя. Эффективность использования теплоты фазового перехода (ТФП) воды зависит от конструкции и работы устройств для аккумулирования и передачи теплоты. Предложены новые технологии использования ТФП воды для охлаждения жидкостей и газов в теплое время года в условиях распространения многолетнемерзлых грунтов (технология I) и стабилизации температуры в помещениях в климатических условиях, где в годовом цикле период с положительной температурой атмосферного воздуха сменяется периодом с отрицательной температурой (технология II). Технология I состоит в аккумулировании зимнего холода путем замораживания воды в подземных резервуарах с помощью воздушных охлаждающих устройств конвективного действия и охлаждении в летнее время жидкостей и газов с использованием водяной циркуляционной системы. Технология II заключается в обогреве закрытых помещений в зимнее время до околонулевых отрицательных температур за счет теплоты, выделяемой при замерзании воды в емкостях, устанавливаемых в помещении, и оттаивании льда в летнее время. Технология I использована в производственных условиях для охлаждения молока на летней ферме. Расход электроэнергии по сравнению с затратами для машинного охладителя сократился в 80 раз. Технология II была испытана на физической модели. Полученные результаты показывают практическую возможность ее использования.

Ключевые слова: Теплота фазового перехода воды, технология, аккумулятор-охладитель, стабилизация температуры

NEW TECHNOLOGIES UTILIZING LATENT HEAT OF WATER

Kuzmin G.P.

Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk, e-mail: kuzmin@mpi.ysn.ru

The use of latent heat of the reversible process of fusion and crystallization of water is a promising renewable source of thermal energy. Water has a high latent heat of fusion. The efficiency of its use depends on the design and performance of heat storage and transfer systems. The author proposes new technologies that use the latent heat of phase change of water to cool liquids and gases in the warm season in permafrost regions (technology I) and to stabilize indoor temperatures in climates where the annual cycle consists of a period with positive ambient temperatures succeeded by a period with subfreezing temperatures (technology II). Technology I involves accumulation of winter cold by freezing the water in underground tanks with convection air cooling systems and cooling the liquids and gases in summer with a water circulation system. Technology II is aimed to heat the indoor spaces in winter up to near 0 °C negative temperatures and consists of using the heat released by water which freezes in tanks placed indoors and melting of ice in summer. Technology I was applied in practice to cool milk in a summer farm. Power consumption was reduced 80 times compared to machine cooling. Technology II was tested on a physical model. The results obtained demonstrated its feasibility.

Keywords: Latent heat of water, technology, battery-cooler, temperature stabilization

Аккумулирование тепловой энергии ранее рассматривалось в основном как вспомогательный процесс в теплоснабжении и гелиоэнергетике [Бекман и др.,1987; Дибиров и др.,1993]. В настоящее время цели накопления тепловой энергии несколько изменились и аккумуляторы тепла могут использоваться для выполнения самостоятельных задач.

Разработка новых технологических решений в области тепловых аккумуляторов на основе фазовых переходов различных веществ является актуальной задачей, решение которой позволит снизить затраты теплоты за счет использования альтернативных источников энергии [Левенберг, 1991].

Одним из перспективных веществ в качестве аккумулятора теплоты является вода. Она обладает весьма высоким значением удельной теплоты фазовых переходов вода-лед, значительно превосходящим значение удельной теплоты плавления-затвердевания большинства металлов и органических веществ. Для сравнения укажем, что удельная теплота плавления стали составляет 80 кДж/кг, парафина 150 кДж/кг, а льда 335 кДж/кг. Это свойство воды обуславливает перспективу широкого ее применения в качестве аккумулятора «холода» и теплоты для последующего практического использования.

Эффект поглощения большого количества теплоты при таянии льда позволяет разрабатывать на этой основе охлаждающие устройства (технология I), а выделение теплоты при замерзании воды создает возможность использования ее в качестве

аккумулятора теплоты (технология II). В статье излагаются разработанные новые технологии аккумулирования и использования теплоты фазовых переходов воды.

Технология I – аккумулятор-охладитель

Технология аккумулирования и использования естественного холода в условиях распространения многолетнемерзлых грунтов [Кузьмин и др., 2014] состоит из режимов зарядки устройства холодом в зимнее время и разрядки, т.е. использования накопленного холода в теплое время года [Кузьмин, 2002]. Устройство включает (рис. 1) подземный резервуар *1,* воздушную замораживающую установку (ВЗУ) *2* и водяную насосно-циркуляционную систему. Подземный резервуар создается в толще мерзлых дисперсных грунтов методом размыва водой через буровую скважину [Кузьмин и др., 1986]. Сначала скважину бурят до проектной отметки кровли резервуара, обсаживают трубой на всю ее длину, затем бурят скважину меньшего диаметра до глубины, превышающей проектную отметку дна резервуара для накопления негабаритных кусков обломочного материала и растительных остатков. Размыв мерзлого грунта производится под действием теплового и механического воздействия водяных струй кольцевого гидромонитора, перемещаемого по вертикали по мере размыва стенок создаваемого резервуара. Выдача пульпы осуществляется гидроэлеватором, эрлифтом или последовательно соединенными гидроэлеватором и эрлифтом.

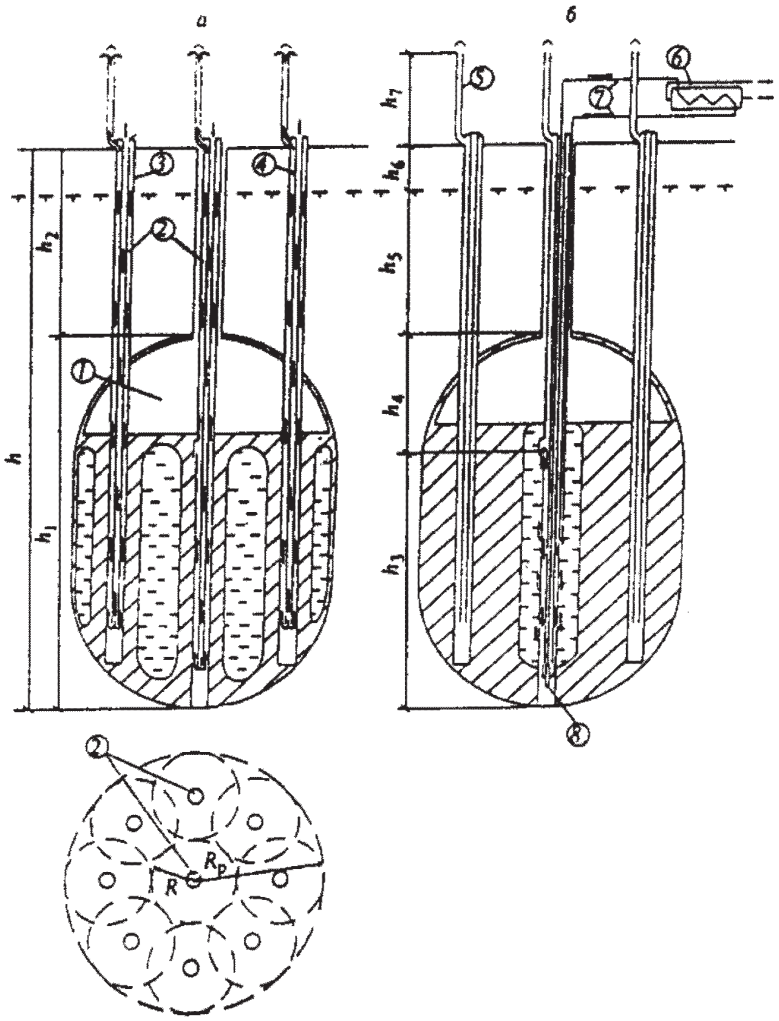

Рис. 1. Аккумулятор-охладитель: а – режим замораживания воды; б – режим охлаждения; 1 – подземный резервуар; 2 –воздушные замораживающие установки (ВЗУ); 3,4 и 5 – наружная, центральная и вытяжная трубы ВЗУ; 6 – теплообменник; 7 – нагнетательная и сливная трубы водяной насосно-циркуляционной системы (ВНЦС); 8 – погружной насос ВНЦС

Объем создаваемого резервуара зависит от мощности слоя размываемого грунта, допускаемого по условию устойчивости диаметра резервуара и содержания негабаритных кусков грунта и растительных остатков и приближенно определяется по формуле

$$V = \frac{1}{(1+k)}\left[\frac{\pi d^3}{6} + \frac{\pi d^2}{4}\left(h - h_k - d\right)\right],$$

где k – коэффициент объемного содержания негабаритных кусков в разрабатываемом слое грунта; d – диаметр резервуара; h – глубина до нижней отметки разрабатываемого слоя грунта; h_k – толщина кровли резервуара.

На рис. 2 представлены графики зависимости V и соответствующие значения аккумулируемой теплоты фазового перехода воды от h и d при $k = 0{,}05$ и $h_k = 6{,}0$ м. Как видно из приведенных графиков в подземных резервуарах можно аккумулировать огромное количество теплоты фазового перехода воды.

После окончания работ по размыву подземного резервуара через пробуренные в кровле скважины опускают в него воздушные замораживающие установки, располагая их равномерно по площади горизонтального сечения его. Минимальное количество ВЗУ определяется из условия полного замерзания воды в резервуаре к концу зимы по формуле [Кузьмин, 2002].

$$n = d^2 / d_i^2,$$

где d_i –диаметр ледяного цилиндра, намораживаемого вокруг корпуса ВЗУ.

ВЗУ новой конструкции [Кузьмин и др., 2012] состоит из цилиндрического корпуса *3*, центральной *4* и вытяжной *5* труб. Центральная труба с открытыми концами соосно монтируется внутри корпуса. Нижний ее конец отстоит от дна установки на расстоянии одного диаметра корпуса, а верхний ее конец располагается на уровне верхнего конца корпуса и закрепляется к нему при помощи фланца, закрывающего кольцевой канал. Вытяжная труба высотой в зависимости от ее диаметра 3-5 м с помощью колена присоединяется к верхнему концу корпуса, где на стенке предварительно вырезается окно для прохода воздуха из кольцевого межтрубного канала в вытяжную трубу. Такая конструкция термосифона обеспечивает движение воздуха всегда в одном направлении, в том числе в летнее время под действием ветра, создающего некоторое разряжение воздуха у верхнего конца вытяжной трубы. Воздух входит в центральную трубу, далее поднимается по межтрубному кольцевому пространству и через вытяжную трубу возвращается в атмосферу. В летнее время конденсат образуется в центральной трубе и намерзает на ее стенках. Диаметр центральной трубы значительно больше поперечного размера кольцевого канала. При равных площадях поперечного сечения центральной трубы и кольцевого канала отношение поперечных их размеров равно 4,83. Поэтому возможность закупорки льдом каналов воздушного термосифона новой конструкции минимальна. Эту опасность можно полностью исключить, если минимальные размеры каналов термосифонов определять по полученным в [Кузьмин, 2002] зависимостям их от срока службы и параметров процессов образования и испарения льда.

После окончания строительства подземный резервуар заполняется водой объемом, исключающим выпучивание кровли при замерзании воды. Предельно допускаемый объем воды, заливаемой в резервуар, определяется формулой

$$V_в = \frac{V}{1+\beta},$$

где β – коэффициент объемного расширения воды при ее замерзании.

В летнее время работа охлаждающего устройства обеспечивается с помощью водяной насосно-циркуляционной системы (ВНЦС), состоящей из погружного насоса *8*, помещаемого на дно центральной ВЗУ, соединительных труб 7 и наземного теплообменника *6*, в котором охлаждаются жидкости или газы, являющиеся охлаждаемыми объектами или хладагентами. Подготовка ВНЦС к работе состоит в заполнении корпуса центральной ВЗУ водой на высоту, превышающую уровень расположения перепускной щели на стенке корпуса. При включении насоса холодная вода из центрального ВЗУ по нагнетательному трубопроводу подается в наземный теплообменник, из которого нагретая вода по трубопроводу возвращается в резервуар. Охлажденная вода в результате теплообмена со льдом через щель на стенке корпуса попадает в центральную ВЗУ, где вновь всасывается насосом и подается в наземный теплообменник.

Подготовка устройства к зимней зарядке холодом заключается в опорожнении ВНЦС. Для этого вода из центральной ВЗУ откачивается полностью, при этом уровень воды в резервуаре устанавливается на уровне щели на корпусе центральной ВЗУ.

Опытный аккумулятор-охладитель с погружным насосом мощностью 1,3 кВт впервые был использован для охлаждения молока на летней ферме вместо двух машинных

охладителей МХУ-8 мощностью каждая 13,0 кВт, обеспечивающих охлаждение молока при беспрерывной работе. Расход электроэнергии при использовании аккумулятора-охладителя, обеспечивающего охлаждение молока при 6-ти часовой работе в сутки (1,3x6,0 = 7,8 *кВтч/сут*) сократился по сравнению с расходом электроэнергии на работу двух машинных охладителей (2x13,0x24 = 624 *кВтч/сут*) в 80 раз.

Технология II – стабилизатор температуры в закрытом помещении

При непосредственном использовании теплоты фазового перехода вода-лед в холодное время года в помещении можно поддерживать лишь высокие значения температур в отрицательном диапазоне. Однако видов помещений с таким температурным режимом достаточно много. К ним можно отнести стояночные гаражи, ангары, зимние катки, хранилища некоторых видов овощей, склады и т.д.

Устройство [Кузьмин и др. 2012] основано на компенсировании потерь тепла из помещения в зимнее время теплотой, выделяемой водой при ее замерзании. Необходимое количество воды в емкостях, размещаемых в помещении, определяют по суммарному количеству потерь тепла из помещения в холодное время года. В период положительных температур наружного воздуха весь образовавшийся за зиму лед в емкостях (стабилизаторе) должен растаять. Таким образом, в летнее время происходит зарядка стабилизатора , а зимой его разрядка. В соответствии с этим при проектировании устройства определяют размеры и конструкцию стабилизатора, зависящие от климатических условий местности, размеров и термического сопротивления ограждающих конструкций помещения, а также режима эксплуатации помещения.

При теплотехническом расчете устройства последовательно определяют:

– потери тепла через ограждающие конструкции помещения;

– дополнительные притоки и оттоки тепла;

– необходимое количество воды;

– максимальную толщину льда, образующегося на стенках емкостей;

– суммарную площадь теплообменной поверхности емкостей для воды;

– размеры сторон емкостей;

– притоки тепла в помещение в теплое время года;

– возможность дополнительной зарядки стабилизатора в случае превышения потерь тепла над его притоком в годовом цикле путем вентилирования помещения теплым воздухом и увеличения термического сопротивления ограждающих конструкций помещения.

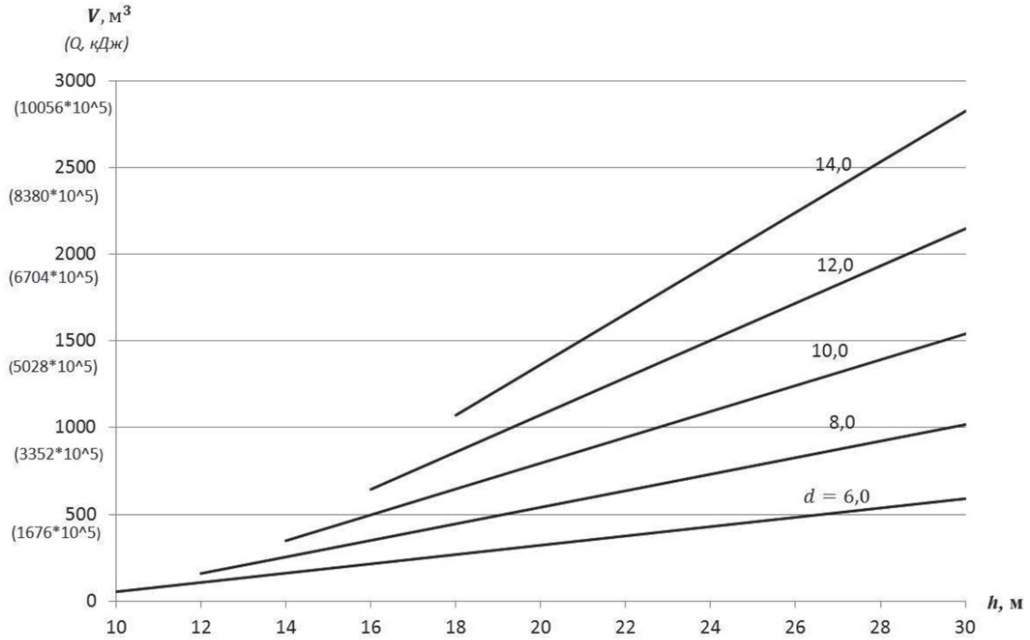

Рис. 2. Графики зависимости объема (количества теплоты фазового перехода) подземного резервуара от глубины размыва при различных диаметрах резервуара, толщине кровли 6,0 м и коэффициенте содержания негабаритных кусков 0,05

Выполнен теплотехнический расчет стабилизатора для опытного гаража на одну автомашину для климатических условий г. Якутска. Расчетные данные следующие:

– продолжительность периода с отрицательной температурой атмосферного воздуха 4964 ч;

– продолжительность периода с положительной температурой атмосферного воздуха 3796 ч;

– средняя зимняя температура атмосферного воздуха минус 23,0 °С;

– средняя летняя температура атмосферного воздуха 13,9 °С;

– средняя зимняя скорость ветра 1,9 м/с;

– средняя летняя скорость ветра 3,0 м/с;

– размеры гаража: ширина 9,0; длина 12,0 и высота 3,5 м;

– среднее значение термического сопротивления стен ограждающих конструкций гаража 9,71 ($м^2$ К)/Вт;

– среднее значение термического сопротивления пола гаража по грунту 5,78 ($м^2$ К)/Вт;

– среднее значение термического сопротивления стабилизатора 0,322 ($м^2$К)/Вт;

Количество воды для поддержания температуры в гараже в течение всего зимнего периода около минус 1,5 °С составляет 36,1 $м^3$. При этом необходимая расчетная теплообменная поверхность стабилизатора равна 127,0 $м^2$.Это условие выполняется при размерах металлических емкостей 1,3х1,2х23,8 м. Стабилизатор в течение летнего периода в условиях г. Якутска, несмотря на большую разницу суммы градусочасов зимнего (- 133776) и летнего (50364) периодов успевает зарядиться без дополнительных мер для оттаивания льда в стабилизаторе. Это объясняется небольшим термическим сопротивлением стабилизатора, определяемого термическим сопротивлением льда в емкостях относительно небольшой толщины.

Испытание гаража с устройством для стабилизации температуры на основе теплоты фазовых переходов воды запланировано провести в 2017-2018 годах в г. Якутске.

Выводы

1. Высокое значение удельной теплоты фазовых переходов вода-лед обуславливает перспективу широкого использования воды в качестве аккумулятора теплоты.

2. Эффективность и надежность охлаждающего устройства в условиях распространения многолетнемерзлых грунтов, основанного на фазовых переходах вода-лед, подтверждена опытно-производственными испытаниями.

3. Технология стабилизации температуры в помещениях в диапазоне отрицательных околонулевых ее значений может найти применение на большей части территории России, где в летнее время обеспечивается полное таяние льда, образующегося в стабилизаторе в зимнее время. Испытания устройства для стабилизации температуры на физической модели и результата теплотехнических расчетов показали практическую возможность реализации технологии.

4. Предложенные технологии для охлаждения жидкостей и газов и стабилизации температуры в помещениях обладают новизной, запатентованы в РФ и удостоены бронзовой медали на XVI Московской международной выставке «Архимед-2013».

Список литературы

1. Бекман Г., Гилли П. Тепловое аккумулирование энергии. – М.: Мир, 1987. 272 с.

2. Дибиров М.А., Мозговой А.Г. Теплофизические свойства теплоаккумулирующих материалов. 1993. Т. 66. В. 6. С. 1210-1216.

3. Кузьмин Г.П. Подземные сооружения в криолитозоне. – Новосибирск: Наука, 2002. – 176 с.

4. Кузьмин Г.П., Чжан Р.В., Ремизов В.А и др. Устройство для стабилизации температуры в закрытых помещениях. Патент РФ, № 112219, 2012.

5. Кузьмин Г.П., Чжан Р.В., Яковлев А.В. Устройство для охлаждения вечномерзлых грунтов. Патент РФ, № 120111, 2012.

6. Кузьмин Г.П., Чжан Р.В., Яковлев А.В. Устройство теплообмена жидкостей и газов. Патент РФ, № 2517844, 2014.

7. Кузьмин Г.П., Яковлев А.В. Рекомендации по проектированию и строительству геокриогенных охладителей. – Якутск: ИМЗ СО АН СССР, 1986 – 66 с.

8. Левенберг В.Д., Ткач М.Р., Гольстрем В.А. Аккумулирование тепла. Киев: Техника, 1991. С. 49–74.