

## СТАТЬИ

УДК 628.13

DOI 10.17513/use.38105

**УСТРОЙСТВА И ТЕХНОЛОГИИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ  
ПРИРОДНЫХ КРИОГЕННЫХ РЕСУРСОВ****Кузьмин Г.П.***ФГБУН «Институт мерзлотоведения имени П.И. Мельникова» Сибирского отделения  
Российской академии наук, Якутск, e-mail: gpkuzmin@mpi.usn.ru*

Кратко изложены физические свойства воздуха и воды как носителей тепловой энергии, применяемые или учитываемые при разработке устройств и технологий использования природных тепловых ресурсов. Представлены разработанные охлаждающие и нагревательные установки и технологии, в которых используется тепловая энергия воздуха и воды. Показано, как изменением конструкции достигнуто повышение надежности воздушного термосифона, используемого для локального охлаждения грунтов оснований сооружений. Приводится технология аккумуляции холода атмосферного воздуха в массиве мерзлых грунтов, вмещающих подземные сооружения, более десяти лет успешно используемая для управления температурным режимом Федерального криохранилища семян растений в г. Якутске, в котором впервые в мире используются только природные ресурсы холода. Излагаются технология создания подземного аккумулятора холода атмосферного воздуха путем замораживания воды и использования теплоты фазового перехода ее для охлаждения жидкостей и газов, а также результаты опытных испытаний. Показана эффективность использования теплоты фазового перехода воды для отопления некоторых видов производственных помещений. Описывается способ снижения выталкивающего воздействия морозного пучения грунтов на свайные фундаменты путем нагревания промерзающих пучинистых грунтов теплотой фазового перехода воды.

**Ключевые слова:** криогенные ресурсы, использование, вода, воздух, теплота, фазовый переход, установка, технология

**DEVICES AND TECHNOLOGIES FOR THE USE  
OF NATURAL CRYOGENIC RESOURCES****Kuzmin G.P.***Melnikov Permafrost Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk,  
e-mail: gpkuzmin@mpi.usn.ru*

The physical properties of air and water as carriers of thermal energy, used or taken into account in the development of devices and technologies for the use of natural thermal resources, are briefly stated. The developed cooling and heating devices and technologies that use the thermal energy of air and water are presented. It is shown how the change in the design achieved an increase in the reliability of the air thermosiphon used for local cooling of the soils of the foundations of structures. The technology of accumulating cold atmospheric air in an array of frozen soils containing underground structures, which has been successfully used for more than 10 years to control the temperature regime of the Federal Cryostorage of Plant Seeds in Yakutsk, in which only natural cold resources are used for the first time in the world, is given. The technology for creating an underground accumulator of cold atmospheric air by freezing water and using the heat of its phase transition to cool liquids and gases, as well as the results of experimental tests, are described. The efficiency of using the heat of the phase transition of water for heating some types of industrial premises is shown. A method for reducing the buoyant effect of frost heaving of soils on pile foundations by heating freezing heaving soils with the heat of the phase transition of water is described.

**Keywords:** cryogenic resources, use, water, air, heat, phase transition, installation, technology

В процессе жизнедеятельности человечество использует огромное количество природных ресурсов, под которыми понимают все то, что может быть применено для достижения какой-либо цели [1]. Криогенные ресурсы являются частью их. Они происходят и развиваются под воздействием холода (температуры среды ниже 0 °С). Согласно предложенной В.Р. Алексеевым классификации [1] криогенные ресурсы подразделяются (рис. 1) на энергетические, материальные и информационные, которые, в свою очередь, состоят из ряда видов. Те-

пловые ресурсы, которые рассматриваются в работе, входят в категорию криоэнергетических ресурсов.

Проблеме использования криогенных ресурсов уделяется внимание во всем мире не только потому, что истощаются запасы углеводородов, но и в связи с современными экологическими требованиями. При сжигании углеводородов выделяются парниковые газы, способствующие потеплению климата, последствия которого могут оказаться катастрофическими для всех обитателей Земли.

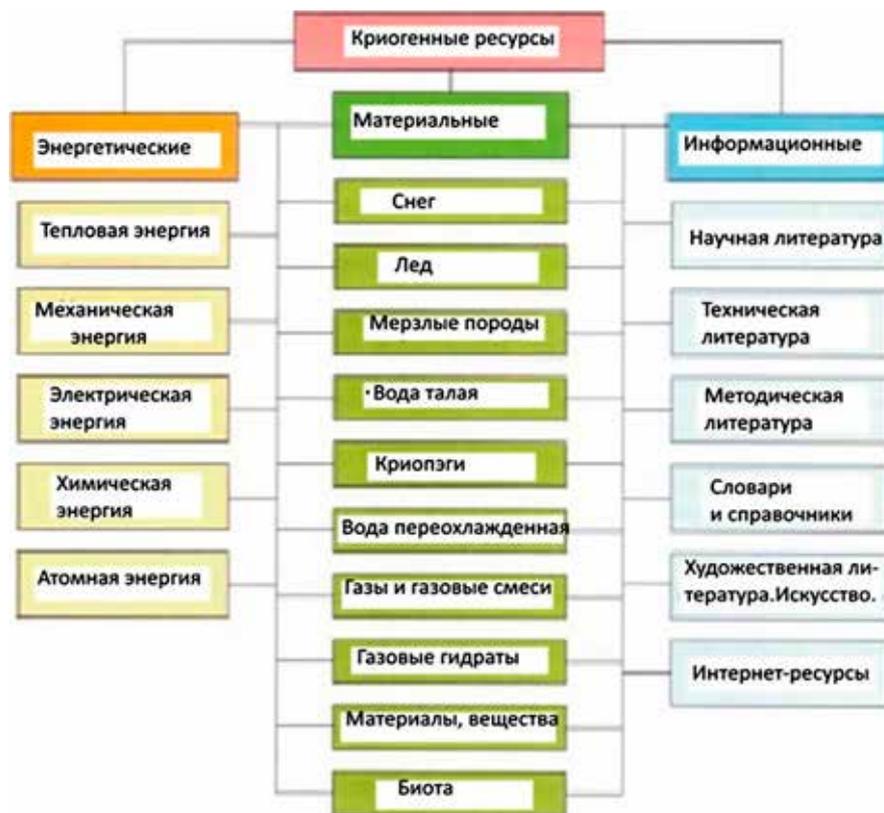


Рис. 1. Схема классификации криогенных ресурсов [1]

Длительное время природный холод рассматривался почти исключительно как условие, затрудняющее жизнь людей. В настоящее время опубликовано достаточно большое количество работ по вопросам возникновения, развития, опыта и перспектив использования криогенных ресурсов, а также нового направления исследований – криософии [2, 3].

Природные тепловые ресурсы используются человечеством с давних времен. Устройства и технологии их использования для управления температурным режимом природных и технических систем продолжают разрабатываться [4, 5], а область применения – расширяться, в частности, в насыпях [6]. В настоящее время наиболее широко используется теплота, носителем которой являются атмосферный воздух и вода.

Воздух характеризуется низкими значениями плотности, удельной теплоемкости и коэффициента теплообмена с твердыми телами. Поэтому для получения тепла из воздуха необходимо пропускать через теплообменные устройства большое количество воздуха. Этот недостаток воздуха как источника тепла в значительной мере компенсируется его доступностью.

Вода является уникальным веществом. В отличие от других известных жидкостей, плотность которых при понижении температуры монотонно увеличивается, плотность воды достигает максимума при температуре 4 °С и при дальнейшем понижении температуры уменьшается. Когда плотность воды в верхних слоях больше, чем в нижних, происходит перемешивание этих слоев. При нагревании и охлаждении изменяется кинетическая энергия и температура воды, а в процессе перехода ее из твердого состояния в жидкое и обратно изменяется потенциальная энергия с сохранением постоянной температуры, равной для пресной воды 0 °С. Теплота фазового перехода воды из жидкого состояния в твердое и из твердого в жидкое превышает по величине удельную теплоту плавления (затвердевания) большинства веществ, в том числе парафина в 2,3 раза, стали – в 4 раза.

Цель исследования – показать, что физические свойства воздуха и воды позволяют разрабатывать эффективные установки и технологии для управления температурным режимом грунтов в основаниях наземных и вокруг подземных сооружений, а также для обогрева помещений в зимнее время.

### Материалы и методы исследования

Проведенные исследования, основанные на известных положениях теплофизики, грунтоведения, механики грунтов и инженерного мерзлотоведения, и результаты, полученные автором или под его руководством, в виде описания установок и технологий представлены ниже.

1. *Сезонно действующая воздушная охлаждающая установка (воздушный термосифон) [7, с. 140].*

В настоящее время для локального охлаждения и замораживания грунтов основания зданий и сооружений применяют жидкостные и парожидкостные термосифоны. Воздушные термосифоны (ВТ) из-за низкой надежности не нашли применения (рис. 2).

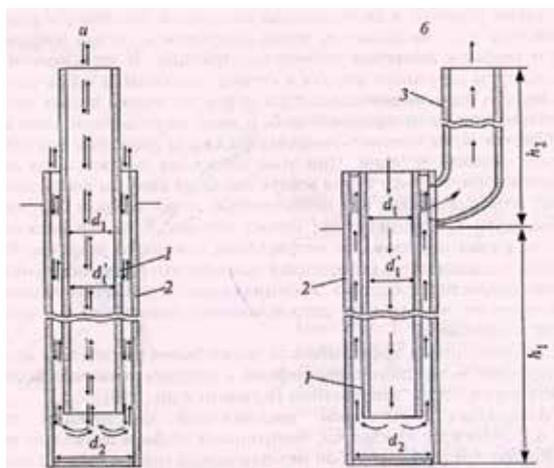


Рис. 2. Воздушный термосифон известной (а) и усовершенствованной (б) конструкции [7, с. 141]: 1 – центральная труба; 2 – корпус; 3 – вытяжная труба

В ВТ применявшейся конструкции (рис. 2, а) в летнее время под действием ветра у верхнего конца выступающей центральной трубы (1) происходит разрежение воздуха и теплый влажный воздух всасывается в узкий межтрубный канал. Здесь происходит конденсация влаги, которая, стекая вниз, намерзает на стенках труб термосифона в зоне мерзлых грунтов. Если намерзший в летнее время на стенках межтрубного канала слой льда полностью не испаряется в зимнее время, то происходит постепенное зарастание канала льдом и снижение охлаждающей способности термосифона. В термосифоне усовершенствованной новой конструкции (рис. 2, б) воздух поступает в центральную трубу в летнее время под действием ветра, а в зимнее время – в результате нагревания воздуха в межтрубном

канале от теплового воздействия окружающих грунтов. Диаметр центральной трубы существенно больше поперечного размера межтрубного канала. Из условия равенства площадей поперечного сечения каналов нисходящего и восходящего потоков воздуха без учета толщины центральной трубы следует

$$d_2 = \sqrt{2}d_1. \quad (1)$$

При этом отношение поперечных размеров каналов с учетом (1) составит

$$\frac{d_1}{b} = \frac{2d_1}{d_2 - d_1} = 4,83, \quad (2)$$

где  $b$  – поперечный размер межтрубного канала.

Образование льда в летнее время на стенке широкого канала термосифона усовершенствованной конструкции и более интенсивное его испарение в зимнее время под воздействием сухого нисходящего потока воздуха значительно снижает льдонакопление и потерю охлаждающей способности устройства.

2. *Аккумулятор-охладитель жидкостей и газов [7, с. 151].*

Подземный резервуар, созданный в массиве мерзлых грунтов размывом водой через скважину, не более чем на 90% его объема заполняется водой (рис. 3), которая в зимнее время замораживается с помощью воздушных термосифонов 2, опущенных в резервуар через скважины в его кровле.

В летнее время охлаждение жидкостей и газов осуществляется в теплообменнике 6, представляющем сосуд с водяной рубашкой. Холодная вода из резервуара подается в теплообменник с помощью погружного насоса 8 по нагнетательному шлангу 7. Нагретая в теплообменнике вода возвращается в резервуар по сливному трубопроводу 7. Холодная вода из резервуара перетекает в центральный термосифон, в котором размещен погружной насос, через щель на корпусе термосифона. Перед пуском циркуляционной системы в резервуар наливают воду до уровня, обеспечивающего работу этой системы в течение теплого периода года. После окончания периода охлаждения вода откачивается из резервуара до уровня расположения щели и из термосифона полностью.

Устройство было испытано на летней ферме для охлаждения около 3000 л молока в сутки. Расход электрической энергии для работы погружного насоса в опытном охлаждающем устройстве был в 40 раз меньше суммарного расхода электроэнергии при машинном охлаждении.

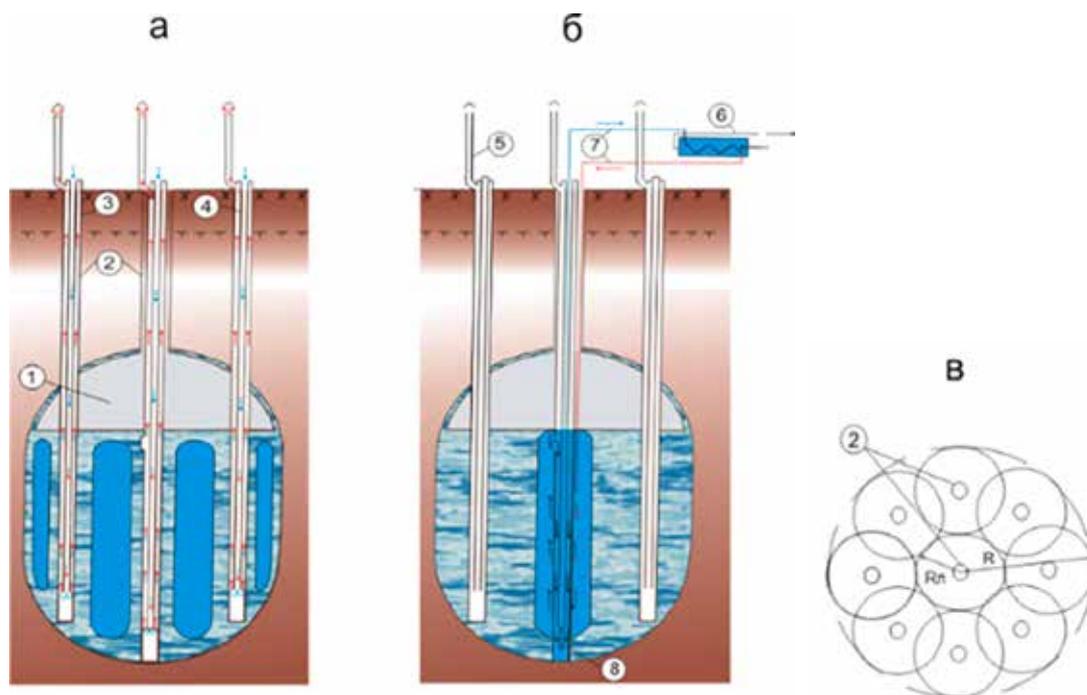


Рис. 3. Аккумулятор-охладитель [7, с. 152]: а – режим замораживания воды; б – режим охлаждения; 1 – подземный резервуар; 2 – воздушные замораживающие устройства (ВЗУ); 3, 4 и 5 – наружная, центральная и вытяжная трубы ВЗУ; 6 – теплообменник; 7 – нагнетательная и сливная трубы водяной циркуляционной системы (ВЦС); 8 – погружной насос ВЦС

3. Система управления температурным режимом подземных сооружений в массиве мерзлых грунтов [8].

Подземные сооружения, построенные в массиве мерзлых грунтов, охлаждают для повышения их устойчивости или обеспечения необходимого температурного режима.

В подземное сооружение холодный воздух подают принудительным способом или за счет естественной тяги. Способ управления температурным режимом подземных сооружений путем аккумуляции холода атмосферного воздуха в мерзлых грунтах, непосредственно окружающих их, недостаточно эффективен из-за относительно малой площади контакта холодного воздуха и грунта, а также малого объема грунтового аккумулятора холода. Холод распространяется вглубь массива мерзлых грунтов, и необходимая температура в сооружении в летнее время не поддерживается.

В связи с этим разработана технология дополнительного аккумуляции холода атмосферного воздуха в массиве мерзлых грунтов кровли сооружения (рис. 3). Для этого в основании слоя сезонного оттаивания над сооружением укладывается ряд охлаждающих каналов воздушной системы конвективного действия. После начала

работы охлаждающей системы холодная температурная волна от охлаждающих каналов распространяется вглубь массива и достигает уровня расположения сооружения, построенного на определенной глубине, к началу теплого периода года и продолжает поступать в течение времени, равного продолжительности сезонного функционирования воздушного охлаждающего устройства. Глубина заложения подземного сооружения определяется на основе второго закона Фурье, согласно которому в однородных грунтах температурные колебания происходят со сдвигом фаз, пропорциональным глубине

$$\tau = \frac{1}{2} z \sqrt{\frac{TC}{\pi\lambda}}, \quad (3)$$

где  $z$  – глубина;  $T$  – период колебаний температуры воздуха;  $C$  – объемная теплоемкость грунта;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности грунта. В формуле (3)  $\tau$  время движения температурной волны в кровле сооружения задается.

Такая технология управления температурным режимом подземного сооружения более десяти лет действует в Федеральном криохранилище семян растений на 100 тыс. образцов, оборудованном в бывшей под-

земной лаборатории Института. При естественной температуре грунтов на глубине расположения хранилища минус 1,5 °С температура в хранилище в теплое время года не поднимается выше минус 6 °С. Впервые в мире в этом криохранилище необходимая температура создается за счет только естественного холода окружающих мерзлых грунтов и аккумулированного в них холода атмосферного воздуха. Кроме того, циркуляция холодного воздуха в охлаждающих устройствах осуществляется конвективным путем. Таким образом, управление температурным режимом криохранилища производится впервые в мире без затрат товарной энергии и без применения нагнетательных механизмов.

*4. Отопление помещений теплотой фазового перехода воды [9].*

В некоторых видах производственных помещений допустимыми являются высокие отрицательные температуры, близкие к 0 °С. Отопление и обогрев таких помещений может осуществляться теплотой, выделяемой при замерзании воды в металлических емкостях – водяных аккумуляторов тепла, установленных внутри помещения. В теплое время года лед в аккумуляторах тает под действием тепла солнечной радиации (зарядка аккумуляторов тепла). Количество воды в емкостях определяется суммарным количеством потерь тепла из помещения в течение всего холодного периода года и необходимым количеством остающейся в незамерзшем состоянии воды в аккумуляторах. Потери тепла зависят от климатических условий местности расположения помещения, его размеров, термического сопротивления ограждающих конструкций и технологических параметров объекта.

В суровых климатических условиях г. Якутска в течение пяти лет успешно проходит испытания опытный гараж, оборудованный водяными аккумуляторами тепла.

*5. Снижение воздействия морозного пучения на свайные фундаменты.*

Малонагруженные фундаменты в пучинистых грунтах подвержены, как известно, выталкивающему воздействию сил морозного пучения. Разработан способ снижения сил пучения на свайные фундаменты в условиях сезонного промерзания нагреванием промерзающих пучинистых грунтов вокруг свай [10]. Способ заключается в замедлении промерзания пучинистого грунта в слое сезонного промерзания путем передачи тепла из массива талого грунта с помощью известных сезонно действующих охлажда-

ющих устройств. Недостатками устройства являются применение способа только в области сезонного промерзания грунтов и уязвимость применяемого оборудования. Для замедления процесса промерзания грунтов в условиях как сезонного промерзания, так и сезонного оттаивания грунтов предложено нагревать грунты в зоне пучения теплотой фазового перехода воды. Для этого в верхней части полый свай создается полость в пределах зоны пучения, ограниченная водонепроницаемой перегородкой. Полость заполняется водой. Выделяемая при замерзании воды в полости свай теплота нагревает окружающие грунты и замедляет их промерзание. Вследствие миграции воды из незамерзшей части грунта около свайного пространства к фронту промерзания снижается влажность и, следовательно, пучинистость грунта. Кроме того, до полного замерзания воды в полости температура на контакте поверхности свай и замерзшей части грунта поддерживается на более высоком уровне, чем в окружающих грунтах, снижая силы смерзания.

Предложенный способ снижения воздействия морозного пучения на свайные фундаменты можно без эксплуатационных проблем применять как в условиях сезонного промерзания, так и в условиях сезонного оттаивания при строительстве малоэтажных зданий и надземных трубопроводов.

Показано, что воздух и вода как экологически безопасные природные энергетические ресурсы могут эффективно использоваться для управления температурным режимом различных природно-технических систем на обширной территории криолитозоны.

**Заключение**

1. Разработанные устройства и технологии, кроме способа воздействия морозного пучения на свайные фундаменты, прошли опытные и опытно-промышленные испытания, показавшие функциональность и эффективность их использования.

2. Охлаждающие воздушные и нагревательные водяные устройства отличаются простотой конструкции и надежностью функционирования.

**Список литературы**

1. Алексеев В.Р. Криогенные ресурсы и судьба цивилизации // Наука и техника в Якутии. 2011. № 1 (20). С. 85–90.  
 2. Мельников В.П., Федоров Р.Ю. Роль природных криогенных ресурсов в традиционных системах жизнеобеспечения народов Сибири и Дальнего Востока // Вестник Томского государственного университета. 2018. № 426. С. 133–141.

3. Федоров Р.Ю. Проблемы и перспективы изучения роли природных криогенных ресурсов в культуре жизнеобеспечения народов Сибири // *Человек и Север: Антропология, археология, экология: материалы Всероссийской научной конференции*. Тюмень: ФИЦ ТНЦ СО РАН, 2018. С. 439–441.
4. Долгих Г.М., Окунев С.Н. Анализ надежности и эффективности систем температурной стабилизации многолетнемерзлых грунтов в основании зданий и сооружений // *Основания, фундаменты и механика грунтов*. 2015. № 5. С. 14–17.
5. Чжан Р.В. К вопросу использования криопэггов как криогенного ресурса криолитозоны при строительстве и эксплуатации сооружений // *Фундаментальные исследования*. 2017. № 5. С. 98–104.
6. Чжан А.А. Оценка возможности термостабилизации дорожных насыпей с помощью термоизоляции откосов в криолитозоне // «Устойчивость природных и технических систем в криолитозоне»: материалы Всероссийской конференции с международным участием, посвященной 60-летию образования Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН (Якутск, 28–30 сентября 2020 г.). Якутск: Издательство ФГБУН Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 2019. С. 436–439.
7. Кузьмин Г.П. Подземные сооружения в криолитозоне. Новосибирск: Наука, 2002. 176 с.
8. Кузьмин Г.П., Панин В.И. Способ охлаждения подземных сооружений в массиве многолетнемерзлых горных пород и устройство для его осуществления // Патент № 2621912 РФ. Патентообладатель Учреждение РАН Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН (RU). 2017.
9. Кузьмин Г.П. Устройство для поддержания околонулевой температуры в закрытых помещениях // Патент № 2617579 РФ. Патентообладатель Учреждение РАН Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН. 2017.
10. Остробородов С.В., Пустовойт Г.П., Харивский О.Л., Хромьшев Н.К., Шевцов К.П., Лязгин А.Л. Способ замедления процесса сезонного промерзания // Патент 2318098 С1 РФ. Патентообладатель Открытое Акционерное Общество «Проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт по проектированию энергетических систем и электрических сетей» «Энергосетьпроект» (RU). 2008.