

УДК 624.139

## К ВОПРОСУ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КРИОПЭГОВ КАК КРИОГЕННОГО РЕСУРСА КРИОЛИТОЗОНЫ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ И ЭКСПЛУАТАЦИИ СООРУЖЕНИЙ

Чжан Р.В.

*Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, e-mail: zhang@mpi.ysn.ru*

Строительство инженерных сооружений в криолитозоне сопряжено с наличием многолетнемерзлых льдистых грунтов, которые при переходе в талое состояние теряют несущую способность. При освоении этих территорий, которые характеризуются ещё и суровыми природно-климатическими условиями, необходимо решение ряда проблем технико-экономического, экологического и инженерного характера. Остро стоит задача обеспечения устойчивости как отдельных сооружений, так и комплекса природно-технических систем. Как один из вариантов решения этих проблем – использование в строительстве ресурсного подхода территорий. Ресурсный подход в природопользовании криолитозоны сформулировал представление о своеобразном природном ресурсе многолетнемерзлой толщи – криогенном ресурсе. В статье предложена инновационная технология повышения несущей способности грунтов основания за счёт использования естественных криогенных ресурсов Земли, в частности, криопэггов.

**Ключевые слова:** криолитозона, криопэг, криогенный ресурс, природно-техническая система, сооружение, основание

## TO THE QUESTION OF USING CRYOPEGS AS A CRYOGENIC RESOURCE OF CRYOLITHOZONE IN CONSTRUCTION AND CONSERVATION OF FACILITIES

Zhang R.V.

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

Construction of engineering structures in permafrost is associated with the presence of icy permafrost soils, which are in the transition to the melted state lose their bearing capacity. During the development of these territories, which is characterized by even and harsh climatic conditions requires the solution of several problems of feasibility, environmental and engineering nature. Acute problem of sustainability as separate structures, and complex natural-technical systems. As an option, the solution of these problems is possible on the basis of using the resource approach of the territories in the construction. The resource approach in the nature management of the cryolithozone formulated the idea of a kind of natural resource of the permafrost layer – a cryogenic resource. The article proposes an innovative technology for increasing the load-bearing capacity of soil grounds by using natural cryogenic resources of the Earth, in particular cryopegs.

**Keywords:** permafrost zone, cryopeg, cryogenic resource, natural-technical system, structure, foundation

Стратегический тыл России – Сибирь и Дальний Восток – сосредоточил до 75% всех полезных ископаемых страны. Однако освоение этих территорий сопряжено с большими трудностями, так как большая её часть расположена в криолитозоне, характеризующейся суровыми природно-климатическими и сложными мерзлотно-геологическими условиями. Возникла необходимость решения ряда проблем технико-экономического, экологического и инженерного характера. Остро стоит задача обеспечения устойчивости как отдельных сооружений, так и комплекса природно-технических систем. Для успешного освоения холодных регионов необходимо грамотно, на научной основе использовать ресурсы этих территорий. Понятие «ресурсы» вобрало в себя множество категорий живой и неживой природы, включая экономические и информационные источники [1, 5, 6, 8]. Ресурсный подход в природопользовании криолитозоны сформулировал представление о своеобразном природном ресурсе много-

летнемерзлой толщи – криогенном ресурсе. Криогенный ресурс литогенной основы с успехом используется в фундаментостроении отдельных сооружений и целых технических систем. Однако многолетнемерзлые грунты, используемые в качестве оснований сооружений в процессе эксплуатации, подвержены изменениям в результате антропогенного влияния и изменения климата на Земле, которое началось с середины прошлого столетия. Эти два фактора направлены на повышение температуры грунтов и, как следствие, на понижение их прочностных свойств. В сложившейся ситуации необходимо принимать меры по сохранению теплового состояния грунтов, обеспечивающих их нормативную несущую способность. В этой связи возникла мысль о создании инновационной технологии по обеспечению устойчивости грунтов, используемых в качестве оснований сооружений, обладающей высоким эколого-экономическим эффектом с использованием криогенных ресурсов криолитозоны.

### Криогенные ресурсы

**Криогенные ресурсы** – это часть природных ресурсов, под которыми понимаем: «материальные объекты знания и силы природы, происхождение и развитие которых обусловлено сферой холода (температурой среды ниже нуля) и которые используются или могут быть использованы человеком в качестве предметов или средств производства [1]». Различают искусственные и естественные криогенные ресурсы. Искусственные криогенные ресурсы создаются человеком, естественные криогенные ресурсы – чисто природный продукт, который является «составным элементом холодного географического пространства... и распространён во всех трёх сферах планеты Земля – в атмосфере, литосфере и гидросфере».

На рис. 1 представлена схема классификации криогенных ресурсов.

Схема иллюстрирует, что наряду с материальными, в классификацию криоген-

ных ресурсов включены энергетические и информационные ресурсы. Последние в настоящее время приобретают важнейшее значение, так как позволяют объединить мировую логистику хозяйственной деятельности на благо народов [6]. В таком виде классификация приобретает современный вид, оставляя место для дальнейшего уточнения, расширения и развития этого нового направления в науке о криологии Земли. Следует отметить, что классификация криогенных процессов находится в начальной стадии разработки и является довольно сложным делом. Такая классификация под руководством профессора В.Р. Алексеева в настоящее время разрабатывается в Институте мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН [1, 2]. Безусловно, не исключена возможность и других гносеологических подходов в разработке классификации криогенных ресурсов, но на данный момент это пока что первое и единственное предложение.

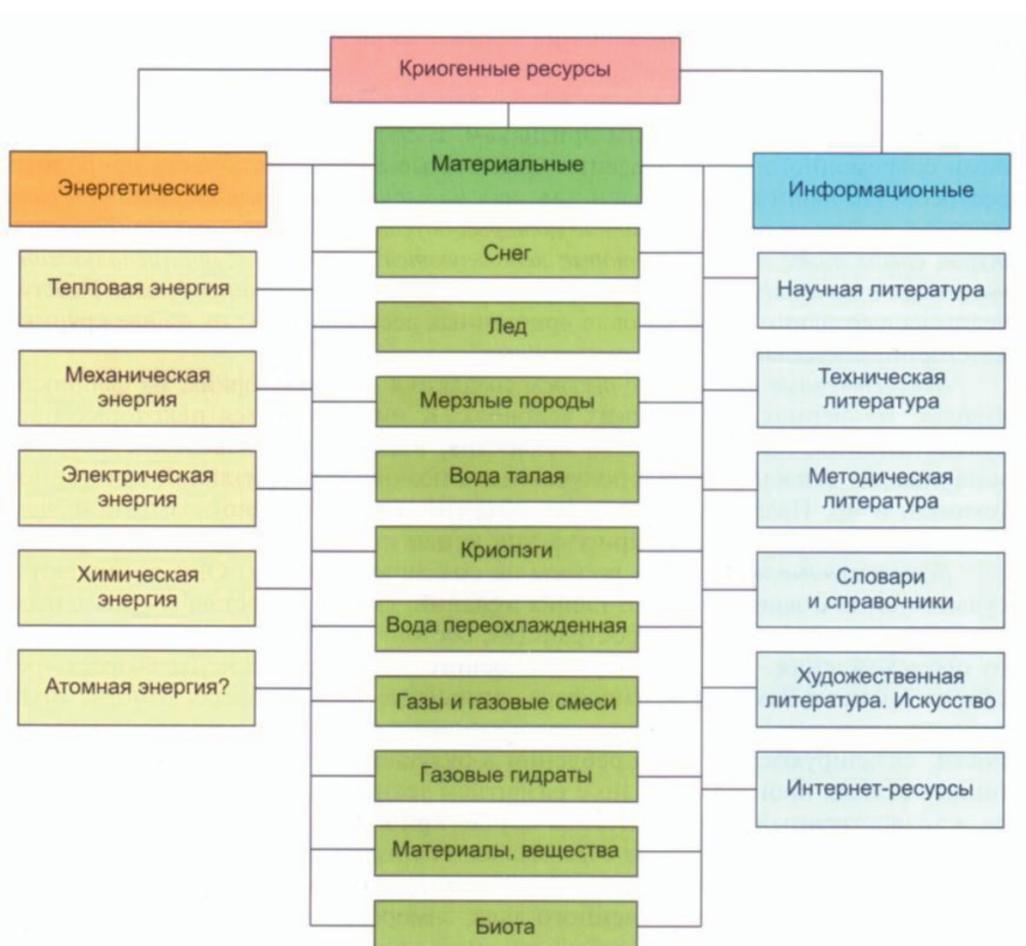


Рис. 1. Схема классификации криогенных ресурсов [1]

### Криопэги

**Криопэги** (жидкая мерзлота) – это солёные подземные воды (рассолы), имеющие отрицательную температуру, но находящиеся в жидком состоянии. Вода не замерзает при низких температурах в результате высокой минерализации (от 30 до 300 г/л и выше). В криолитозоне различают естественные и техногенные криопэги. Естественные криопэги залегают обычно ниже подошвы многолетнемёрзлых пород, но встречаются также меж- и надмерзлотные. Техногенные криопэги залегают от поверхности на глубинах, исчисляемых первыми десятками метров. Их минерализация, как правило, составляет от 1 до 10 г/л.

Криопэги являются одним из многочисленных естественных криогенных ресурсов криолитозоны (см. рис. 1), которые можно использовать для охлаждения и замораживания грунтов. Оставаясь в жидкой фазе, они активно влияют на интенсивное охлаждение пород, аномально увеличивая мощности криогенной части разреза за счёт больших запасов холода в них. Такими

своеобразными природными «машинами-холодильниками», содержащими криопэги, являются, например, территории Сибирской платформы: Верхне-Виллойское, Верхне-Мархинское и Туруханское поднятия, Путоранский вулканогенный массив и др., в пределах которых сосредоточены месторождения углеводородов, алмазов и драгоценных металлов [7, 4]. Кроме того, эти природные образования имеют самостоятельное значение как природный ресурс полезных ископаемых. Безусловно, этот вид полезных ископаемых даёт толчок к развитию химической промышленности и, как следствие, к возведению в этих регионах инженерных сооружений различного назначения. Тот факт, что эти подземные воды (криопэги) имеют отрицательные значения температуры, позволяет использовать их в охлаждающих устройствах круглогодично в качестве дополнительных источников холода для температурной стабилизации грунтов, являющихся основанием, средой и строительным материалом для различных сооружений.

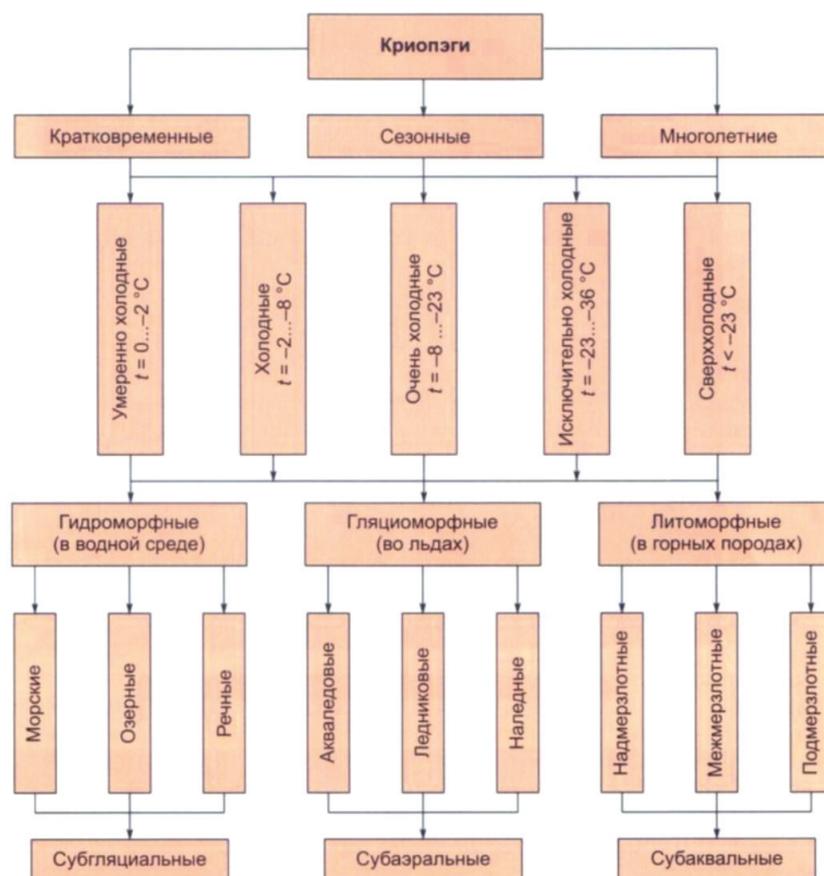


Рис. 2. Схема классификации криопэгов [1]

Ниже речь пойдёт об использовании подземных высокоминерализованных криопэггов криолитозоны – литоморфных (в горных породах) – для охлаждения и замораживания грунтов основания сооружений. Температура подземных и надмерзлотных криопэггов достигает  $-30 - -40^{\circ}\text{C}$ , межмерзлотных  $-2 - -12^{\circ}\text{C}$ , подмерзлотных  $0 - -5^{\circ}\text{C}$  [1, 5].

Первую классификацию природных вод по температурному режиму предложил Н.И. Толстихин [9]. Она оказалась классическим примером систематизации криогенной системы Земли, оставаясь открытой для пополнения её новыми знаниями об этом уникальном явлении природы.

На рис. 2 приведена схема классификации криопэггов, дополненная новыми группами и подгруппами – гидроморфные, гляциоморфные, литоморфные и др. [1].

### Инновационное предложение

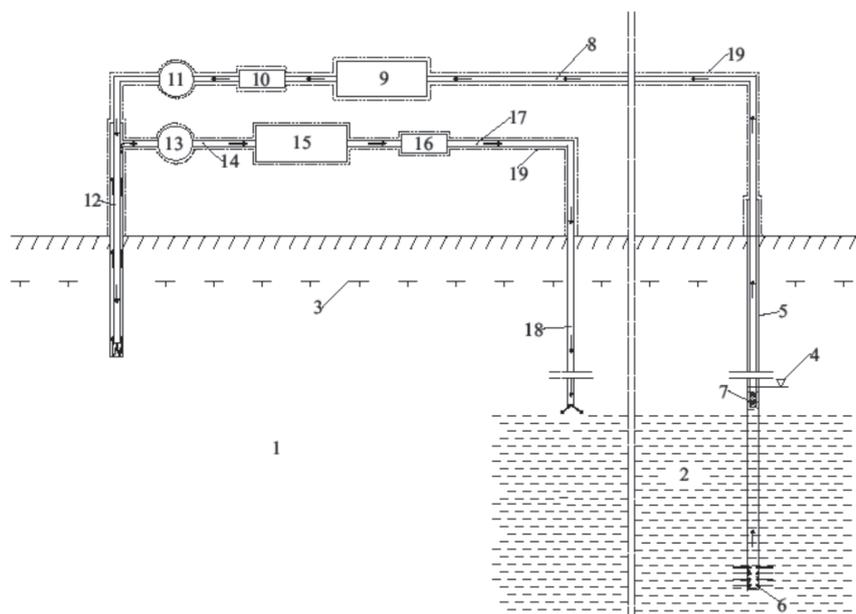
Разработаны две принципиальных схемы технологических систем для охлаждения и замораживания грунтов:

а) для охлаждения и замораживания грунтов, используемых в качестве оснований зданий и промышленных сооружений;

б) для охлаждения и замораживания грунтов, используемых в качестве мерзлого противодиффузионного устройства плотины.

### Охлаждение и замораживание грунтов, используемых в качестве оснований зданий и промышленных сооружений

Известно, что несущая способность мёрзлых грунтов зависит от их температурно-криогенного состояния. При эксплуатации это состояние грунтов нередко нарушается, что приводит к резкому снижению их прочностных свойств. Для восстановления несущей способности грунтов, в практике строительства криолитозоны применяют различные приёмы по сохранению проектного состояния грунтов оснований. Основным приёмом сохранения грунтов основания в проектном температурном режиме является устройство так называемого «приветриваемого подполья». В дополнение к этому способу в последнее время используют и другие. Одним из распространённых является целый кластер охлаждающих устройств трубных конструкций, в которых в качестве охлаждающего флюида используются воздух, жидкости и парожидкости.



Фигура 1

Рис. 3. Принципиальная схема системы для охлаждения и замораживания грунта оснований зданий и промышленных сооружений: 1 – криолитозона; 2 – горизонт криопэггов; 3 – верхняя граница криолитозоны; 4 – уровень статического напора криопэггов; 5 – скважина, подающая криопэг; 6 – фильтр; 7 – глубинный насос; 8 – трубопровод, подающий криопэг; 9 – резервуар; 10 – магистральный насос; 11 – коллектор, подающий криопэг; 12 – замораживающие скважины; 13 – коллектор, собирающий отработанный криопэг; 14 – трубопровод; 15 – резервуар; 16 – насос; 17 – трубопровод; 18 – скважина, закачивающая отработанный криопэг; 19 – теплоизолятор

Задачей инженеров является разработка и создание наиболее эффективных (инновационных) устройств и технологических систем, обладающих высокими технико-экономическими, экологическими и энергосберегающими показателями. В настоящей работе предлагается одно из технологических решений с использованием естественных криогенных ресурсов – криопэггов, отвечающее вышеуказанным требованиям.

На рис. 3 показана принципиальная технологическая схема системы охлаждения и замораживания грунтов оснований зданий и промышленных сооружений с использованием естественных криопэггов в качестве криогенного флюида.

Поставленная задача решается предложенной системой следующим образом. Система представляет собой циркуляционный контур, состоящий из двух частей: подводящей и отводящей рассолы.

*Подводящая часть.* Из водоносного горизонта 2, содержащего естественные природные рассолы – криопэги криолитозоны 1 по скважине 5, имеющей фильтр 6, с помощью насоса 7 закачивается по трубопроводу 8 в резервуар 9, и насосом 10 заполняется коллектор 11, из которого криопэг поступает в замораживающие устройства 12.

*Отводящая часть.* Отработанные рассолы-криопэги поступают в коллектор 13, далее по трубопроводу 14 – в резервуар 15, и насосом 16 по трубопроводу 17 закачиваются через скважину 18 в массив криолитозоны 1, содержащий криопэг 2. Для обеспечения нормальной работы циркуляционный контур 19 теплоизолируется.

Технический результат достигается за счёт использования массива многолетнемерзлых пород как природной замораживающей машины, обеспечивающей формирование и длительное (сотни, тысячи лет) существование криопэггов – рассолов с низкими отрицательными температурами.

Инновацией является то, что в циркуляционном контуре охлаждения используются природные растворы (криопэги) с низкими отрицательными температурами, исключая применение специальной охлаждающей машины и реагентов для их приготовления.

#### **Охлаждение и замораживание грунтов, используемых в качестве мёрзлого противofильтрационного устройства плотины**

При разработке полезных ископаемых в криолитозоне вскрываются подземные воды – криопэги (рассолы), имеющие отрицательные температуры и мешающие

добычным работам в котлованах. Для производства работ «насухо» рассолы перекачивают в специально создаваемые рассолохранилища, образуемые с помощью грунтовых плотин.

Проблема обеспечения устойчивости грунтовых плотин в криолитозоне в процессе эксплуатации до сих пор является актуальной. В суровых природно-климатических и сложных геокриологических условиях криолитозоны (наличие ледового комплекса) в большинстве случаев возможно использовать только плотины **мёрзлого типа**.

Гидроузлы для хранения рассолов в условиях криолитозоны являются специфическими гидротехническими сооружениями. Специфичность их заключается в том, что рассолохранилища в процессе эксплуатации приобретают по глубине характерный температурный и гидрохимический режим. Установлено, что придонные слои круглый год имеют высокую концентрацию солей (120–130 г/л) и устойчивую отрицательную температуру от  $-4^{\circ}\text{C}$  до  $-8,3^{\circ}\text{C}$  [2]. При взаимодействии рассолов (криопэггов) с многолетнемерзлыми породами лёд, содержащийся в них, растворяется. Породы переходят в новое криогенное состояние, но уже с измененными физико-механическими свойствами. Особенно изменяются их фильтрационные и прочностные характеристики, которые определяют устойчивость сооружения в целом. В случае потери устойчивости сооружения возникает ряд проблем экологического характера, вплоть до нарушения биоты целых регионов.

Предлагается следующая инновационная система для обеспечения статической и фильтрационной устойчивости плотин в криолитозоне. На рис. 4 показана принципиальная технологическая схема системы охлаждения и замораживания грунтов мёрзлого противofильтрационного устройства плотины с использованием в качестве криогенного флюида естественного криопэга.

В состав гидроузла входят следующие сооружения: грунтовая плотина, замораживающая система, рассолохранилище. Грунтовая плотина возводится на многолетнемерзлом основании 1 и содержит мёрзлое противofильтрационное ядро из суглинка 2; геосинтетический солезашитный экран 3; верхнюю и низовую упорные призмы из дисперсного грунта или каменной наброски 4 и 5; переходные зоны из песка 6 и 7; замораживающее устройство 8, переходящее в понур. Противofильтрационное ядро 2 отсыпается из грунта, увлажнённого пресной водой до **состояния полной влагоёмкости**.

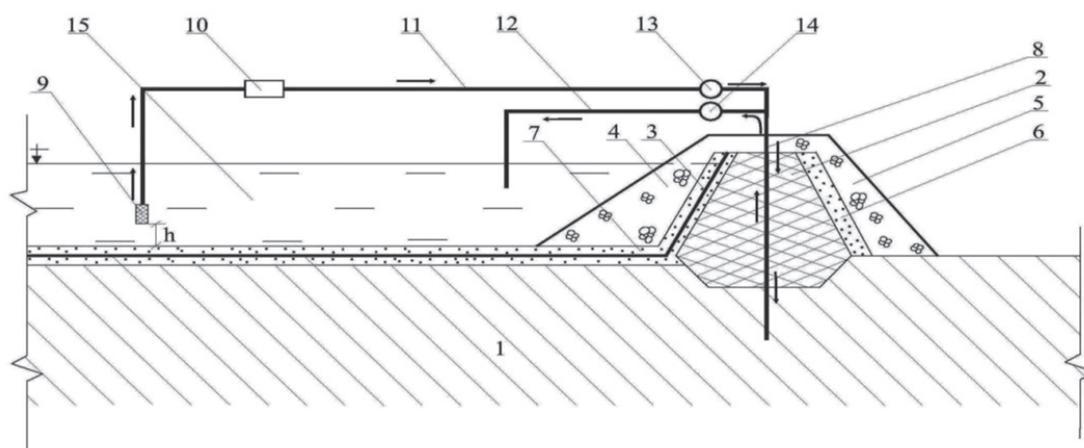


Рис. 4. Принципиальная схема системы для охлаждения и замораживания грунта мёрзлого противофильтрационного устройства плотины: 1 – многолетнемёрзлое основание; 2 – мёрзлое противофильтрационное ядро из суглинка; 3 – геосинтетический солезащитный экран, переходящий в понур; 4, 5 – верховая и низовая упорные призмы из дисперсного грунта или каменной наброски; 6, 7 – переходные зоны из песка; 8 – замораживающее устройство; 9 – рассолозаборник; 10 – насос; 11, 12 – подающий и отводящий рассолопроводы; 13, 14 – подводящий и отводящий коллекторы; 15 – рассолохранилище естественных природных рассолов

Замораживающая система содержит следующие конструктивные элементы: замораживающее устройство 8; рассолозаборник 9; насос 10; подающий 11 и отводящий 12 рассолопроводы; подводящий 13 и отводящий 14 коллекторы; рассолохранилище естественных природных рассолов 15.

Со стороны верхнего бьефа на откос ядра и в основании верховой упорной призмы в виде понура плотины по переходному слою из песка 7 уложен геосинтетический экран 3 (типа HDPE). Со стороны нижнего бьефа к противофильтрационному экрану 3 примыкает льдогрунтовая мерзлотная завеса, которая создаётся посредством колонок замораживающей системы 8 и герметически присоединена к экрану в результате смерзания.

Предложенная технологическая схема с использованием в качестве криогенного флюида естественного криопэга позволит повысить надёжность плотины (фильтрационную и статическую устойчивость) за счет эффективности круглогодичной работы замораживающей системы, образующей мёрзлую противофильтрационную завесу в теле и основании, а использование геосинтетического экрана с понуром обеспечивает дополнительную фильтрационную, в том числе солезащитную, устойчивость сооружения.

Технический результат достигается за счёт использования рассолохранилища, как природной замораживающей машины, обе-

спечаивающей формирование и длительное существование рассолов с низкими отрицательными температурами, используемых для поддержания тела и основания плотины в мёрзлом состоянии.

Новым в предложенной технологической схеме является то, что в циркуляционном контуре охлаждения используются природные растворы, низкие отрицательные температуры в которых формируются за счёт теплообмена рассолохранилища с окружающей средой.

### Заключение

В настоящее время криогенные ресурсы, как часть природного ресурса, приобретают глобальный характер. Постоянно разрабатываются новые инновационные технические средства для рациональному их использованию. Разработанная схема системы с использованием криопэгов для охлаждения, понижения температуры и замораживания грунтов в качестве оснований, материала и вмещающей среды как отдельных сооружений, так и целых природно-технических систем, является инновационной разработкой и имеет хорошие перспективы.

Одновременно, вслед за академиком В.П. Мельниковым и профессором В.Р. Алексеевым, следует отметить, что настало время разработать детальную классификацию криогенных ресурсов холодных регионов, как одного из крупнейших

кластеров природных ресурсов Земли. Это позволит оптимизировать природопользование и жизнедеятельность человека в холодных регионах планеты.

#### Список литературы

1. Алексеев В.Р. Притяжение мерзлой земли / В.Р. Алексеев; отв. ред. В.В. Шепелёв; Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова. – Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2016. – 538 с.
2. Алексеев В.Р., Чжан Р.В. Криогенные строительные материалы / В.Р. Алексеев, Р.В. Чжан; отв. ред. Д.М. Шестернёв; Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Ин-т мерзлотоведения им. П.И. Мельникова. – Якутск: Изд-во Института мерзлотоведения СО РАН, 2011. – 68 с.
3. Большая Советская энциклопедия. 3-е издание. Т. 20. – М.: Изд-во «Советская энциклопедия», 1975. – С. 593–595.
4. Ершов Э.Д. Общая геокриология: учебник. – М.: Изд-во МГУ, 2002. – 372 с.
5. Криопэги – отрицательные температуры воды земли / Р.С. Кононова, Я.В. Неизвестнов, Н.И. Толстихин, О.Н. Толстихин // Мерзлотные исследования. – М.: Изд-во Моск. гос. ун-та, 1971. – Вып. XI. – С. 75–88.
6. Мельников В.П. Актуальность ресурсного подхода в криологии (приветственная речь на открытии конференции «Криосфера нефтегазовых провинций», Тюмень, 2004) // Криосфера Земли. – 2005. – Т. IX, № 1. – С. 3–6.
7. Промышленные рассолы Сибирской платформы: гидрогеология, бурение и добыча, переработка, утилизация / С.В. Алексеев, А.Г. Вахрамеев, Н.П. Коцупало, А.Д. Рябцев – Иркутск: Изд-во «Географ», 2014. – 162 с.
8. Реймерс Н.Ф. Природопользование: Словарь-справочник. – М.: Изд-во «Мысль», 1990. – 631 с.
9. Толстихин Н.И. Криосфера и криопэги // Изв. вузов. Геология и разведка. – 1982. – № 3. – С. 115–117.