

## ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ

УДК 621.57;

### АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРАКТИЧЕСКОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИСТЕМ СЕЗОННОГО АККУМУЛИРОВАНИЯ ПРИРОДНОГО ХОЛОДА

О. С. Попель<sup>1</sup>, С. Е. Фрид<sup>1</sup>, А. Б. Тарасенко<sup>1,2</sup>, А. А. Чернявский<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ОИВТ РАН, <sup>2</sup> ЗАО «Энергетические проекты», <sup>3</sup> Ростовтеплоэлектропроект

---

Рассмотрены системы холодоснабжения на основе сезонного аккумулирования природного холода, накапливаемого путем производства льда в зимнее время и сохранения его в теплоизолированном хранилище с постепенным расходом накопленного «холода» в теплый период года. Предложена конструкция сезонного накопителя холода, оснащенного системой мелкодисперсного распыления воды в холодный воздух для получения льда. Выполнены технико-экономические оценки эффективности использования таких устройств на примере овощехранилища.

A system of cooling on the basis of seasonal storage of natural cold accumulated through the production of ice in winter time and stored in insulated storage with utilization of the stored "cold" in warm seasons is described. A design of seasonal cold storage, equipped with a system for fine spraying of water into the cold air to get ice is discussed. Results of economic evaluation of such devices utilization for cold supply of vegetable stores are presented.

Ключевые слова: сезонное аккумулирование холода; холодоснабжение; мелкодисперсное распыление воды.

Keywords: seasonal cold storage; refrigeration; fine water spray.

Расширение масштабов применения систем кондиционирования воздуха в зданиях и холодильных установок для хранения сельскохозяйственной и другой продукции вызывает нарастающие проблемы, связанные с ростом нагрузки на местные электрические сети при ограниченной их пропускной способности по электрической мощности. Наибольшие проблемы возникают в сельской местности, в частности, в фермерских и подсобных хозяйствах, специализирующихся на производстве продукции, требующей хранения при пониженных температурах (овощехранилища, молочные фермы и т.п.). Слабые сельские электрические сети и существующие ограничения по подключению электрической мощности сдерживают развитие фермерских и подсобных хозяйств. Там же, где электроэнергия доступна, серьезным ограничением является рост тарифов на нее и высокие затраты на подключение к сети.

Обычно для холодоснабжения потребителей применяются парокомпрессионные холодильные установки, как правило, работающие по текущему графику холодильной нагрузки. При этом мощность холодильной установки выбирается из расчета максимальной холодильной нагрузки, которая для большинства типичных потребителей холода (кондиционирование воздуха в помещениях, хранение сельхозпродукции и т.п.) приходится на наиболее жаркие летние дни. Максимальное потребление электроэнергии холодильной установкой относится к дневному времени, усиливая дневную пиковую нагрузку на электрическую сеть. При этом работа холодильной установки приходится преимущественно на часы с максимальными значениями тарифов, что ведет к повышенным эксплуатационным затратам. Кроме того, работа холодильной установки в дневные часы с максимальной температурой наружного воздуха, в который сбрасывается теплота конденсации рабочего тела в холодильном цикле, сопряжена со снижением холодильного коэффициента установки и ведет к увеличенному расходу электроэнергии.

Покрывание холодильных нагрузок становится из года в год все более значимой статьей в энергетическом балансе населенных пунктов, сельскохозяйственных

---

---

комплексов и фермерских хозяйств, в результате чего поиск более эффективных путей обеспечения холодоснабжения является важной составляющей политики энергосбережения и повышения энергоэффективности экономики. Проблема кондиционирования воздуха на объектах рекреационного сектора, стремящегося к повышению качества обслуживания отдыхающих, также стоит весьма остро в связи с ограниченностью мощности имеющихся электрических сетей.

В статье представлены некоторые результаты исследований и разработок систем холодоснабжения на основе сезонного аккумулирования природного холода, накапливаемого путем производства льда в зимнее время и сохранения его в теплоизолированном хранилище с постепенным расходом накопленного «холода» в теплый период года.

Применяемые для холодоснабжения парокомпрессионные холодильные машины имеют относительно невысокий холодильный коэффициент, который при получении температуры холодоносителя на уровне  $+5... +10^{\circ}\text{C}$  при температуре окружающей среды  $+20... +30^{\circ}\text{C}$  не превышает 2.5... 3.5, что означает, что на 1 кВт затраченной электрической мощности на привод компрессора холодильной машины можно получить лишь 2.5... 3.5 кВт холодильной мощности.

Сезонное аккумулирование природного холода обеспечивает многократное снижение затрат электроэнергии на холодоснабжение потребителей. При этом сама по себе идея аккумулирования холода с использованием замороженной воды не является новой.

#### **Краткий обзор способов аккумулирования природного холода**

Снег и лед издавна собирали во многих странах и хранили его для холодильных целей. Так, в Греции лед нарезался с поверхности замерзающих в зимнее время рек и озер, складировался в штабеля и укрывался сверху опилками [1]. Аналогично поступали в России и во многих странах Европы и Северной Америки вплоть до начала XX в., когда электрические холодильные машины стали постепенно вытеснять эту трудоемкую технологию [2].

Во времена отсутствия доступной электрической энергии и холодильных машин в России и ряде других стран хранение скоропортящихся продуктов и сельскохозяйственной продукции осуществлялось в погребах, температура грунта в которых при глубине погреба около 5 м круглогодично поддерживается на 2–3 градуса выше среднегодовой температуры наружного воздуха в месте его создания (в Москве около  $+7^{\circ}\text{C}$ , в Сочи  $+12^{\circ}\text{C}$ ). Создание ледников позволяло дополнительно понизить эту температуру или строить хранилища с меньшей глубиной залегания в грунте. В холодные зимние периоды вода послойно намораживалась в виде ледяных глыб, которые размещались в гидроизолированных контейнерах, охлаждая при постепенном таянии воздух в хранилище и размещенную в нем продукцию.

Аккумулирование природного холода довольно широко применяется и сегодня. Известно довольно большое число технологий создания крупных сезонных аккумуляторов льда и снега. Наиболее распространенными являются так называемые «ледяные пруды» ("ice ponds"). Ледяные пруды создаются для длительного хранения снега, льда или смеси снега и льда с водой. Дно и боковые стенки пруда гидроизолируются для предотвращения утечки воды в грунт, пруд тщательно теплоизолируется сверху. Объем пруда заполняется зимой льдом или снегом, в ряде случаев генерируемом с помощью специальных устройств различной конструкции [3].

Интересно отметить, что ледяные пруды иногда используются и как средство для очистки и опреснения воды. Так, в Greenport, США [1], для генерации льда используется морская вода, которая в результате замерзания очищается от содержащихся в ней солей с 30 000 ppm примерно до 5 ppm и в соответствии с действующими там техническими нормами может использоваться в технических целях. По оценкам зарубежных специалистов, технология сезонного аккумулирования холода в ледяных прудах становится интересна с практической точки зрения в районах, где число часов с отрицательными температурами наружного воздуха составляет не менее 500 часов в году. Затраты электрической энергии на производство льда или снега варьируется для разных устройств от 0.5 до 2 кВтч на тонну льда, холодильный коэффициент – от 50 до 200. Известны

---

---

ледяные пруды, созданные для сезонного хранения холода емкостью от 50 до 650 МВтч, обеспечивающие холодом потребителей с максимальной холодильной мощностью от 8 кВт до 1600 кВт [4].

Другая распространенная технология производства льда получила за рубежом название «Iceboxes». Суть этой технологии состоит в том, что в специально создаваемые теплоизолированные и гидроизолированные конструкции зимой при низких отрицательных температурах воздуха заливается тонкими слоями (как правило, толщиной несколько мм) вода. В результате контакта с холодным воздухом слой воды замерзает, после этого заливается следующий тонкий слой воды. Процесс намораживания льда в таких устройствах протекает довольно медленно, однако, по данным [5], в некоторых регионах с очень холодными зимами за холодный период года возможно намораживание до 10 м льда. Технология намораживания льда в «ледяных ящиках» может быть полностью автоматизирована. При больших объемах намораживаемого льда требуется уделять внимание его температурному расширению, для чего должно быть предусмотрено наличие в конструкциях «ящиков» температурных компенсаторов. По сравнению с ледяными прудами данная технология более дорогая, но также характеризуется высокими значениями холодильного коэффициента (до 100). Известны конструкции, рассчитанные на холодильную емкость от нескольких МВтч до 250 МВтч [6] с расчетной холодопроизводительностью от нескольких кВт до нескольких МВт [5].

В Японии довольно широкое применение нашли аккумуляторы природного холода, предназначенные для хранения овощей и фруктов и получившие название «Nimuros». Как правило, такие аккумуляторы являются частью здания или овощехранилища. «Ледяная комната» создается либо на том же этаже, где хранятся овощи, либо над ним [6]. Помещения связаны друг с другом по воздуху, и за счет естественной циркуляции воздуха в хранилище поддерживается температура вблизи 0°C и высокая влажность, чем создаются идеальные условия для длительного хранения сельхозпродукции. Лед получают либо искусственно, либо загружают извне. Известны сотни «Nimuros», построенных в Японии. Наиболее крупные имеют емкость по холоду до 25 000 МВтч [7].

В районах, характеризующихся снежными зимами, в качестве сезонных аккумуляторов используются «снежные свалки», куда вывозится с городских улиц и площадей снег. Такие снежные свалки создаются, например, в Оттаве, Канада, объемом снега до 90 000 м<sup>3</sup>, что обеспечивает возможность создания источника холодоснабжения мощностью до 7 МВт. Снег сверху укрывается теплоизоляционным и отражающим солнечное излучение покрытием. Для отбора из хранилища холода используется внешний теплообменник. Талая вода после теплообменника вновь возвращается в снегохранилище. Использование снежных свалок в качестве источника холода для кондиционирования зданий считается в Канаде вполне экономически целесообразным. Необходимые для этого первоначальные затраты окупаются в срок до 10 лет [8]. Схожим способом создаются сезонные аккумуляторы холода в Швеции, где в том числе для хранения снега используются каверны большого объема в скалах.

В последнее время все больший интерес для создания сезонных аккумуляторов холода проявляется к искусственной генерации льда/снега путем охлаждения и замораживания диспергированных водяных капель в потоке холодного воздуха. На выходе из форсунок водяная капля имеет температуру выше точки замерзания. Поэтому в начале процесса она охлаждается до точки замерзания, отдавая тепло в окружающую воздушную среду преимущественно испарением со свободной поверхности капли. В каплях микронного размера этот процесс длится миллисекунды. После этого начинается процесс замерзания капли с отдачей конвекцией тепла замерзания (кристаллизации) окружающему воздуху.

Для эффективного образования льда необходимо обеспечить интенсивное протекание процесса охлаждения капли (задача Стефана с подвижной границей фазового перехода). При одной и той же температуре охлаждающего воздуха замерзание капли будет происходить тем интенсивнее и за меньшие сроки (на меньших «длинах пролета»), чем меньше диаметр капель на выходе из распыливающего устройства. Время «полного» замерзания капли в первом приближении пропорционально квадрату ее начального диаметра. Это

обеспечивается большей удельной (на единицу объема капли) поверхностью теплоотдачи, меньшими значениями числа Био. Одновременно очень важным является оптимальное распределение капель по фронту намораживания льда. Это особенно важно в связи с тем, что мелкие капли имеют склонность к «шнурованию» в несущем потоке (следованию за потоком сносящего воздуха).

Необходимо отметить, что в широко используемых сегодня снежных пушках характерный размер водяных капель, как правило, составляет порядка 100 мкм. В случае генерации льда для аккумуляторов холода, как показывают оценки, требуется получение более мелких размеров капель (не более 20–50 мкм).

Преимущества и недостатки известных вариантов систем холодоснабжения обсуждаются в табл. 1. Наиболее интересным и перспективным для использования в современных условиях представляется вариант 3б, ставший основным объектом исследований в рамках настоящей работы.

Одной из ключевых задач при использовании для получения льда мелкодисперсного путем распыления воды в морозный воздух является разработка и создание специальных распылителей (форсунок) воды. Для изучения дисперсионных характеристик факелов распыла воды в ОИВТ РАН создан специальный экспериментальный стенд «Распыл», оснащенный современным диагностическим оборудованием. Результаты расчетных и экспериментальных исследований различных типов форсунок для указанных целей опубликованы в работе [9].

В данной статье остановимся на некоторых результатах разработки облика сезонного аккумулятора природного холода и его технико-экономических показателей.

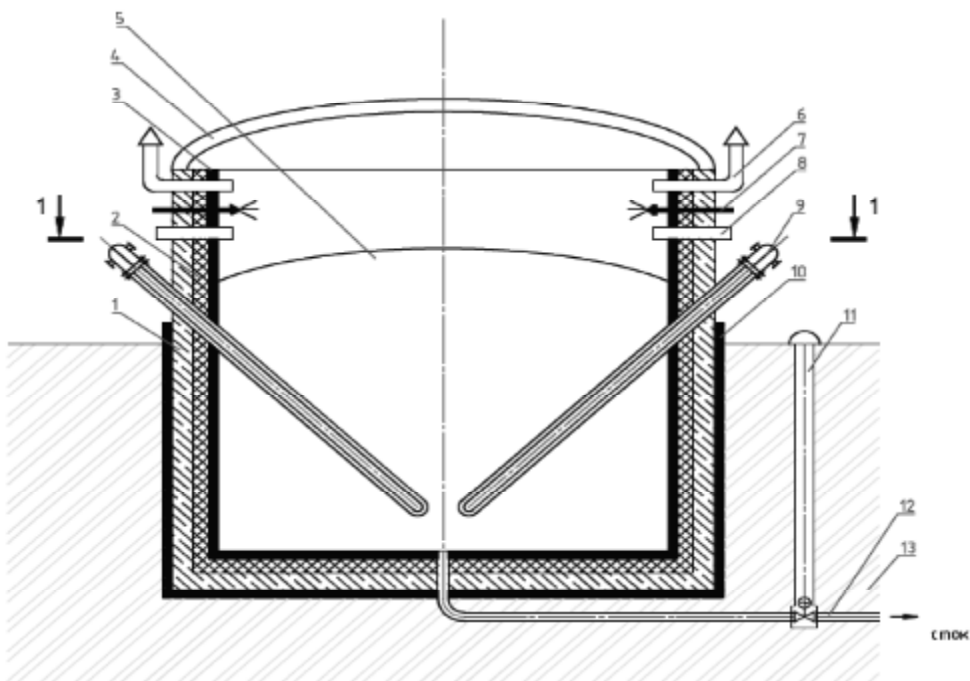
**Таблица 1.** Основные варианты систем холодоснабжения

Вариант	Краткое описание	Преимущества	Недостатки
1	Используется только холодильная установка	Компактность системы, отсутствие дополнительных затрат на систему аккумуляирования холода и дополнительное инженерное оборудование	Повышенная установленная мощность холодильной установки, большая нагрузка на электрическую сеть, совпадающая с пиком нагрузки, повышенные эксплуатационные затраты на электроэнергию по высокому тарифу
2	Используется холодильная установка и краткосрочный аккумулятор холода (лед). Лед производится холодильной машиной в часы провала электрической нагрузки при низких тарифах на электроэнергию. В дневное время охлаждение осуществляется преимущественно за счет плавления льда	Снижение установленной мощности холодильной установки и затрат на нее, снижение эксплуатационных затрат на электроэнергию за счет работы холодильной установки преимущественно в часы с низкими тарифами и за счет работы установки с большим холодильным коэффициентом (при более низкой температуре наружного воздуха), уменьшение пиковой нагрузки на электрическую сеть	Дополнительные затраты на систему аккумуляирования холода, потребность в дополнительных площадях для размещения аккумулятора холода и дополнительного инженерного оборудования

3	Холодильная установка не используется. Лед/снег получают при отрицательных температурах наружного воздуха и накапливают в сезонном теплоизолированном хранилище одним из способов:	Отсутствуют затраты на холодильную установку, многократно снижается потребление энергии на холодоснабжение	Требуются дополнительные площади под сезонный аккумулятор холода, требуются затраты на его создание
3а	– путем сбора снега с окружающей объект территории и/или послынного намораживания льда из воды	Отсутствует система генерации снега путем распыла воды и затраты на ее функционирование	Требуются затраты на сбор и транспортировку снега, технология пригодна только для районов с обильными снегопадами и большой длительностью сохранения снежного покрова, в случае намораживания льда процесс медленный, требуется наличие большого числа часов с низкими отрицательными наружными температурами
3б	– путем искусственной генерации снега/льда в результате мелкодисперсного разбрызгивания воды в окружающий воздух с отрицательной температурой	Производство льда возможно при относительно высоких отрицательных температурах воздуха, технология пригодна для малоснежных районов с малой продолжительностью сохранения снежного покрова, затраты на производство льда невысокие	Требуются затраты на создание системы мелкодисперсного распыления воды и ее обслуживание, требуются затраты электроэнергии на распыл воды (малые)

**Облик сезонного аккумулятора холода с распылителями воды для генерации льда**

Конструкция сезонного аккумулятора природного холода разработана специалистами Института «Ростовтеплоэлектропроект», г. Ростов-на-Дону и поясняется рис. 1.



**Рис. 1.** Конструкция аккумулятора холода на 100 МВтч с бетонным подземным резервуаром объемом 2000 м<sup>3</sup>: 1 – бетонный резервуар; 2 – слой теплоизоляции; 3 – внутренняя гидроизоляция резервуара; 4 – надувной сводчатый купол; 5 – ледяная масса; 6 – воздухоотбрасывающее устройство; 7 – форсунка; 8 – вентиляционные каналы; 9 – трубный пучок; 10 – наружная гидроизоляция; 11 – колодец с задвижкой на стоке; 12 – сток в канализацию; 13 – уплотнительный грунт

Аккумулятор содержит железобетонную емкость 1, слой теплоизоляции 2, внутренний слой гидроизоляции 3, надувной сводчатый купол 4, ледяную массу 5, получаемую в зимний период путем замораживания мелкодисперсных частиц воды, распыливаемых форсунками 7. Холодный воздух для получения снежной массы подается в резервуар через вентиляционные каналы 8. Резервуар оснащается также слоем внешней гидроизоляции 10, канализационным колодцем 11 с электроуправляемой задвижкой на стоке 12 водоотведения.

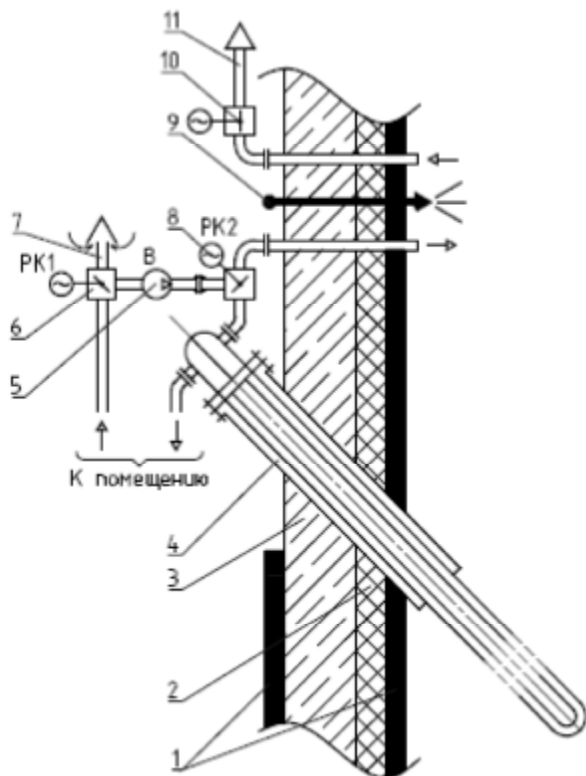
В весенне-летне-осенний период, когда необходимо использовать холод из аккумулятора, в работу включаются теплообменные пучки труб 9. По этим пучкам может циркулировать как жидкий незамерзающий теплоноситель (например, раствор этиленгликоля или пропиленгликоля в воде), так и воздух, подаваемый после охлаждения в трубных пучках непосредственно в кондиционируемые помещения или хранилища сельхозпродукции. Свободно подвешенные пучки теплообменных труб исключают повреждение оборудования из-за разных температурных коэффициентов расширения материалов труб и корпуса резервуара.

Для сооружения аккумуляторов холода в простейшем случае могут быть использованы стандартные трубные пучки, предназначенные для работы в кожухотрубчатых теплообменниках. Однако такие пучки, используемые обычно для передачи тепла от воды к воде или от пара к воде, не могут обеспечить оптимальную эффективность теплопередачи при использовании снега в качестве хладагента. Поэтому конструкция теплообменников «снег – воздух» или «снег – незамерзающая жидкость» требует детальной дополнительной экспериментально-теоретической проработки.

По предварительной оценке, в таких «специальных» трубных пучках более интенсивный теплообмен для воздуха может обеспечить применение труб с развитой, оребренной внешней поверхностью и с увеличенным внутренним диаметром, но при организации турбулентного движения воздуха в этих трубах.

Аккумуляторы холода могут использовать как цилиндрические резервуары, так и резервуары прямоугольной формы. В любом случае по периметру резервуара устанавливаются равномерно распределенные теплообменные трубные пучки.

Оптимальное количество этих пучков определяется расчетом для получения необходимой площади теплообмена.



**Рис. 2.** Установка оборудования на резервуаре: 1 – гидроизоляция; 2 – теплоизоляция; 3 – стенка резервуара; 4 – теплообменный пучок из U-образных труб; 5 – вентилятор; 6 – распределительный клапан на всасе вентилятора; 7 – воздушозаборное устройство; 8 – распределительный клапан на выходе вентилятора; 9 – форсунка; 10 –

На рис. 2 показана схема обвязки одного комплекта оборудования, устанавливаемого на каждом из теплообменных пучков. На этой схеме показан зимний режим работы оборудования (режим заряда аккумулятора). Этот режим определяется положением заслонок в распределительных клапанах 6 и 8 и запорном клапане 10. При указанных на рисунке положениях заслонок воздух из воздушозаборного устройства 7 поступает на вентилятор 5, который через клапан 8 подает холодный воздух в резервуар – навстречу факелу форсунки 9, установленной на противоположной стене. Отработанный воздух сбрасывается в атмосферу через запорный клапан 10 и воздушосбросное устройство 11.

В режиме разряда аккумулятора заслонки в клапанах 6, 8 и 9 поворачиваются на 90°. При этом вентилятор 5 начинает всасывать воздух из охлаждаемых помещений и подает этот воздух в теплообменный трубный пучок 4. Охлажденный в теплообменном пучке воздух подается обратно в кондиционируемые помещения с требуемым расходом, определяемым системой автоматического регулирования температуры. Клапан 10 в режиме разряда закрывается и преграждает доступ теплого атмосферного воздуха в резервуар во

избежание попадания туда излишнего тепла.

В рассматриваемом аккумуляторе холода, имеющем значительные размеры, наружное верхнее покрытие 4 может быть наиболее экономично выполнено из воздуходувных конструкций. Такие конструкции широко распространены в настоящее время, обладают небольшой массой, хорошими теплоизоляционными свойствами, быстро монтируются и имеют продолжительный срок службы при относительно невысокой стоимости. Работа аккумулятора и системы холодоснабжения может быть полностью автоматизирована.

#### **Результаты оценки экономической эффективности применения сезонных аккумуляторов природного холода**

Выполненные в рамках проекта исследования и разработки показали, что предлагаемая технология использования природного холода может найти применение в разнообразных отраслях народного хозяйства. Приоритетными представляются следующие сферы применения:

- хранение больших объемов продукции во фруктохранилищах, в овощехранилищах при температурах 0... 14°C;
- дозревание фруктов в охлажденных камерах при температурах 10... 20°C;
- хранение молока и молочной продукции при температурах 5... 8°C;
- предпродажное хранение мясных и рыбных продуктов без заморозки – при температурах 2... 4°C;

- хранение рассады сельхозрастений при температурах 10... 15°C;
- хранение черенков и саженцев плодовых деревьев при температурах 5... 10°C;
- хранение срезанных цветов декоративных культур при температурах 5... 8°C;
- хранение пищевой массы в консервной промышленности при температурах 3... 7°C;
- хранение готовой пищевой продукции (колбасы, сыры, полуфабрикаты и т.п.) на складах торгово-закупочных предприятий.

Следует отметить, что сегодня в Российской Федерации действует 25 000 сельхозпредприятий и 257 000 фермерских хозяйств, использующих холодильные технологии электрической мощностью до 35 кВт (холодильная мощность до 100 кВт). Существующее на этих предприятиях традиционное холодильное оборудование является дорогостоящим, энергоемким, требует высокой квалификации обслуживающего персонала, приобретения дорогих запасных частей, смазочных масел, хладагентов. Трудозатраты на проведение текущего обслуживания холодильного хозяйства, например, на ферме в 400 голов крупного рогатого скота составляют более 1000 человеко-часов в год. Во многих хозяйствах холодильное оборудование сильно изношено и требует замены. Внедрение в этих хозяйствах простых и недорогих технологий сезонного аккумулирования природного холода может существенно снизить их производственные издержки и, в конечном итоге, отпускные цены на продовольственную продукцию для населения.

В качестве примера рассмотрим альтернативные варианты (традиционный и предлагаемый нами) системы холодоснабжения картофелехранилища емкостью 300 т.

Исходные данные для сравнительной оценки технико-экономических показателей традиционной и предлагаемой систем холодоснабжения приведены в табл. 2. Характеристики и показатели существующей системы холодоснабжения получены от компании, эксплуатирующей систему холодоснабжения картофелехранилища в Ростовской области.

**Таблица 2.** Исходные данные для расчета системы холодоснабжения

Город, регион	г. Ростов-на-Дону
Сведения о хранилище	
Габаритные размеры камеры, мм	длина / ширина / высота - 25000 / 10000 / 6000
Материал стен	железобетон
Толщина стены, мм	200
Материал пола	железобетон
Толщина пола, мм	150
Материал потолка	цементные плиты
Толщина потолка, мм	120
Материал теплоизоляции	Mascout
Толщина теплоизоляции, мм	0.5 мм
Размер двери, мм	ширина / высота / толщина - 2000 / 2800 / 120
Приток наружного воздуха в камеру хранилища, м <sup>3</sup> /сутки	15 000
Вытяжка, м <sup>3</sup> /сутки	15 000
Относительная влажность воздуха в холодильной камере, %	70%
Максимальная температура окружающей среды, °С	+40
Месторасположение камеры	на улице
Число сотрудников, работающих в камере	2 чел.
Количество подъемно-транспортных средств в камере, шт.	1 шт.
Мощность электроприводов подъемно-транспортного средства, Вт	1.2 кВт
Количество/мощность светильников камеры, шт./Вт	12 / 10 Вт (светодиодные)
Количество/мощность прочих механизмов в камере, шт./Вт	нет
Сведения о хранящемся продукте	
Поступающий продукт	картофель



Максимальная загрузка камеры, кг	300 000
Суточный грузооборот продукта, кг	10 000
Упаковка продукта	в навал (без упаковки)
Температура поступающего продукта, °С	+ 5... 30
Температура в камере, °С	+ 4

Предлагаемый нами вариант холодоснабжения овощехранилища сравнивался с «традиционным» вариантом использования парокомпрессионной холодильной машины. В частности, в данном случае рассматривался компрессорно-конденсаторный агрегат на базе полугерметичного компрессора FRASCOLD (Франция) и кубических воздухоохладителей ЕСО. Общая сумма инвестиций в такую установку составляет (без учета НДС и инфляции в период проектирования и строительства) около 11 млн руб. Номинальная холодильная мощность установки –  $N_x = 58$  кВт. Номинальная электрическая мощность компрессора –  $N_{эл} = 32$  кВт. Коэффициент преобразования холодильной машины:  $k = 58/32 = 1.81$ . Среднесезонная холодильная мощность –  $N_x^{CP} = 0.55 N_x = 0.55 \times 58 = 31.9$  кВт. Среднесезонная потребляемая мощность –  $N_{эл}^{CP} = N_{эл}/k = 32/1.81 = 17.7$  кВт.

При относительно небольших капитальных затратах на установку, как показали расчеты, эксплуатационные затраты, включающие затраты на электроэнергию, на водяное охлаждение, на канализационные стоки, на оплату труда обслуживающего персонала, на смазочное масло, на ремонт и запасные части, а также амортизационные отчисления, для данного варианта системы холодоснабжения весьма велики и суммарно оцениваются примерно в 15 млн руб. в год.

Для аналогичной системы холодоснабжения на базе предлагаемого сезонного аккумулятора холода холодильной емкостью 100 МВтч капитальные затраты оцениваются около

12 млн руб. Однако эксплуатационные затраты существенно снижаются до уровня 3... 5 млн руб. в год и срок ее окупаемости не превышает 3... 4 лет. При этом увеличении стоимости

1 кг картофеля в результате затрат на холодоснабжение для его хранения не превышает

1.5... 2 руб./кг. Таким образом, предлагаемая технология получения холода представляется более экономически и экологически эффективной, чем использование традиционных парокомпрессионных холодильных машин. Важно отметить, что предлагаемая система является на порядок более энергоэффективной (холодильный коэффициент на уровне 50 и более) и не приводит к заметным дополнительным пиковым нагрузкам на электрическую сеть, что особенно важно для энергодефицитных регионов и сельских районов со слабыми электрическими сетями.

Выполненные исследования и предварительные опытно-конструкторские разработки позволяют перейти к проектированию пилотного объекта на юге России.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ (госконтракт № 16.516.11.6043).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Taylor T.B. Ice ponds // AIP Conference Proceedings. 1985. P. 562–575.
2. MacCracken C.D., Silvetti B.M. Charging and discharging long-term ice storage // ASHRAE Transactions. 1987. Vol. 93. P. 1766–1772.
3. Viklander M. Melting of Urban Snow Deposits – A Water Quality Study. Licentiate Thesis 1994:19L. Luleå University of Technology, 1994.
4. Abdelnour R., Labrecque B., Underdown A. Technoeconomic analysis of three seasonal cooling technologies; ice block, frozen pond and waste snow pit // Calorstock '94, Conference on thermal energy storage. 1994.
5. Morofsky E.L. Developing and introducing an innovative building cooling technology: Strategy formulation based on market and technology considerations // Issues in strategic management, Adm 6395. 1984.
6. Okajima K., Nakagawa H., Matsuda S., Yamasita T. A cold storage for food using only natural energy. Snow Engineering, 1997. P. 569–572.
7. Kobiyama M. Himuro type storage shed using the ice stored in winter season // Proc. International symposium on cold regions heat transfer. 1987. P. 167–170.

8. Morofsky E.L. Long-term latent energy storage - the Canadian perspective // US-China conference on energy, resources and environment. 1982.

9. Система сезонного аккумулирования природного холода для круглогодичного холодоснабжения зданий и сельскохозяйственных объектов / Ю.А. Зейгарник, О.С. Попель, В.Л. Низовский, Л.В. Низовский // Изв. РАН. Энергетика. 2012. № 5. С. 90-97.

*Поступила в редакцию 27.09.2012 г.*

*Принята к печати 26.06.2013 г.*