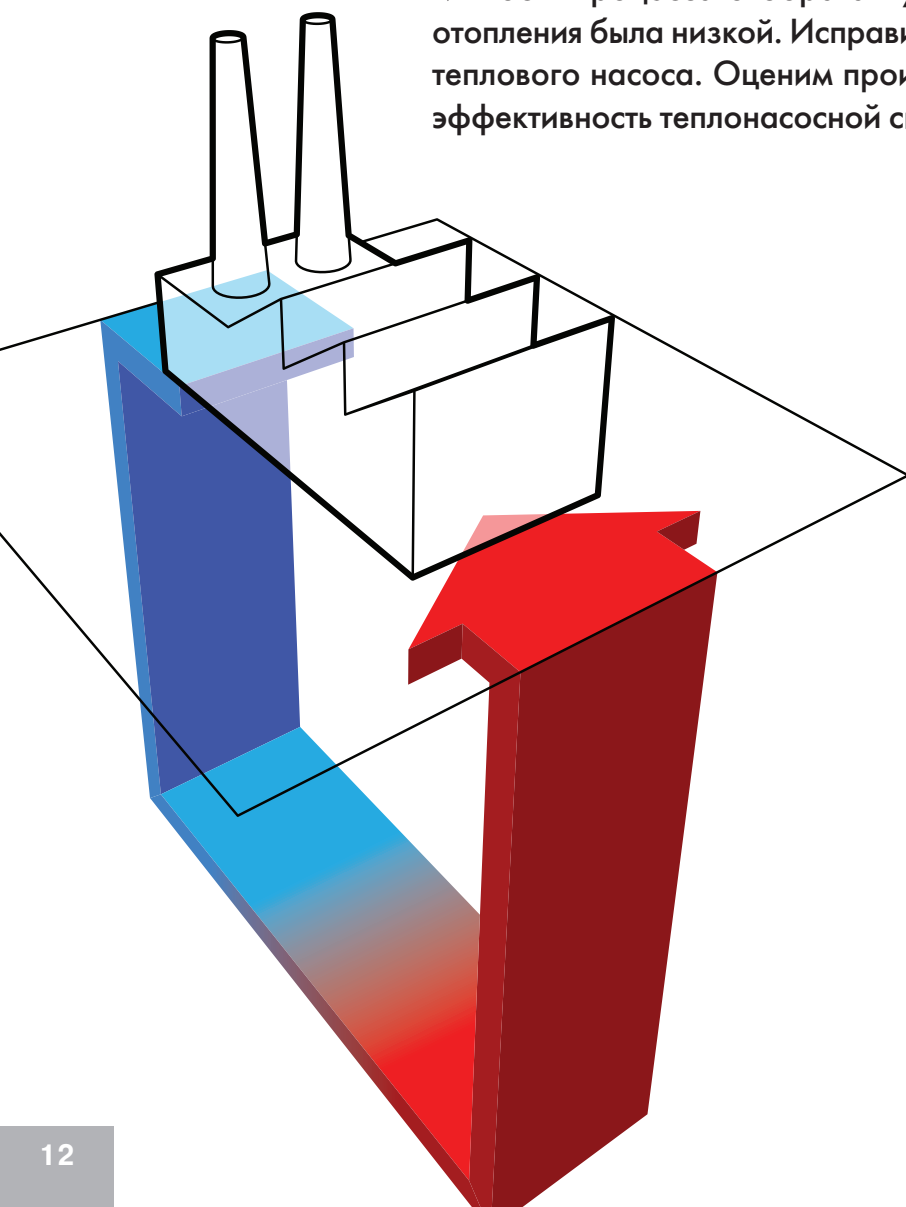


# ТЕПЛОВЫЕ НАСОСЫ ХУЛЕМ ПОВЫСИЛИ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СБРОСНОГО ТЕПЛА ДЛЯ ОТОПЛЕНИЯ

**Олоф Андерссон** (Olof Andersson), канд. техн. наук, внештатный преподаватель, старший консультант, Sweco AB, Geostrata HB; **Никлас Хоканссон** (Niklas Håkansson), инженер по эксплуатации, Xylem Water Solutions; **Лейф Райделл** (Leif Rydell), старший консультант, инженер по эксплуатации, Xylem Water Solutions, Reikab AB

В одном из городов Швеции было организовано хранение сбросного тепла, образующегося в летнее время, с его последующим использованием для отопления в зимний период. Однако эффективность процесса отбора аккумулированного тепла в систему отопления была низкой. Исправить ситуацию позволила установка теплового насоса. Оценим производительность и экономическую эффективность теплонасосной системы.



В 2010 году в городе Эммабуда (Швеция) компания Xylem (ранее известная как Flygt) ввела в эксплуатацию систему аккумулирования сбросного тепла – высокотемпературное скважинное хранилище тепловой энергии (High Temperature Borehole Thermal Energy Storage, HT-BTES), предназначенное для утилизации излишков теплоты, образующихся в летнее время. Хранилище было рассчитано на закачку 3,6 ГВт•ч сбросного тепла с последующим отбором в зимний период около 2,2 ГВт•ч тепловой энергии для нужд отопления. Рабочая температура в хранилище согласно расчету должна составлять от 60 до 40 °С. Цель системы BTES – существенно снизить количество тепловой энергии, закупаемой из системы центрального отопления (рис. 1).

В первый год эксплуатации выяснилось, что закачиваемого в хранилище количества сбросного тепла от высокотемпературных источников было недостаточно, поэтому был реализован ряд

мер, направленных на рекуперацию низкопотенциального сбросного тепла, например от системы вентиляции, которая работает на охлаждение рабочих мест. Эти меры позволили постоянно увеличивать количество утилизируемой тепловой энергии для аккумулирования и последующего использования. Заявленная емкость хранилища была практически достигнута в 2014 году. К этому времени в хранилище было закачано около 10 ГВт·ч теплоты, что привело к повышению температуры чуть более 40 °С.

В течение следующих трех лет температура в системе стабильно держалась на отметке 45 °С, несмотря на то, что доступность сбросного тепла оставалась высокой. Причина заключалась в том, что значительная часть аккумулированного тепла «расползлась в стороны», что, в свою очередь, увеличивало потери при хранении. Таким образом, температура в хранилище не смогла подняться настолько высоко, чтобы сбросное тепло можно было использовать для отопления напрямую (без подогрева). В результате с 2015 по 2017 год было отобрано только около 10 % от накопленного тепла. Чтобы не ликвидировать данное хранилище, необходимо было повысить производительность системы отбора тепла. Выходом стало использование теплонасосной системы.

### Конструкция скважинного хранилища

Хранилище сбросного тепла, построенное зимой 2009–2010 годов, расположено в поле рядом с промышленным объектом (литейное производство) и занимает прямоугольный участок длиной 60 м и шириной 40 м. Хранилище состоит из 140 скважин глубиной 150 м с межосевым расстоянием 4 м. Скважинное поле разделено на семь секций (рис. 3, А–Г) по 20 скважин в каждом.

Скважинные теплообменники коаксиального типа выполнены из секций двойных труб с теплоизоляцией между ними, длина которых 10 м. Одно из преимуществ теплообменника данного типа заключается в том, что в нем возможен двунаправленный поток. Таким образом, в нижней части хра-

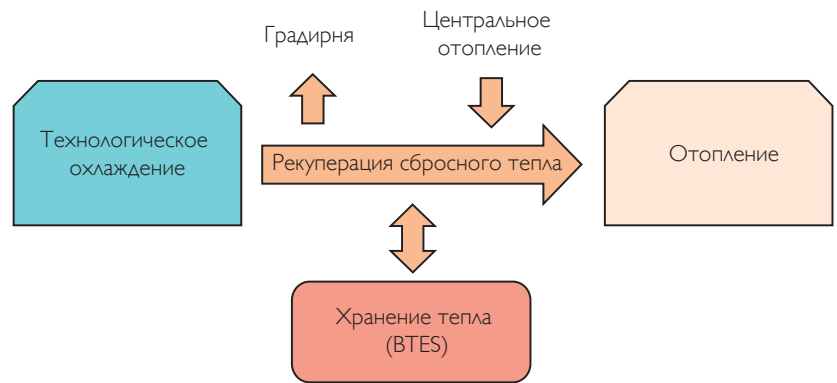


Рис. 1. Схема рекуперации и хранения тепловой энергии с тепловым аккумулятором (BTES)

нилища всегда поддерживается наибольшая температура хранения. Еще одно преимущество заключается в том, что сопротивление теплопередаче значительно ниже, чем в традиционной U-образной трубе. В последнем варианте теплопроводность обычно составляла около 0,08 К (Вт/м). Измеренная теплопроводность коаксиального теплообменника составила 0,02 К (Вт/м), то есть эффективность повышена четырехкратно.

Предполагается, что наибольшая температура сохраняется в трех внутренних секциях хранилища, а четыре наружные секции выполняют функцию буферной зоны, температура в которых несколько ниже, чем в центре. Такая схема позволяет регулировать

температуру при отборе тепла в соответствии с потребностью. Для этого на сборочных трубах в центре хранилища устанавливаются управляющие клапаны (рис. 2).

### Теплонасосная система

Несколько лет потребовалось на принятие и реализацию решения установить теплонасосную систему (ТНС), которую в эксплуатацию в сентябре 2018 года. ТНС включает в себя 8 подключенных параллельно тепловых насосов Nibe F1345-60. Испаритель подключен к подающим и обратным трубопроводам хранилища, а конденсатор – к внутренней сети отопления (рис. 4). Высокая

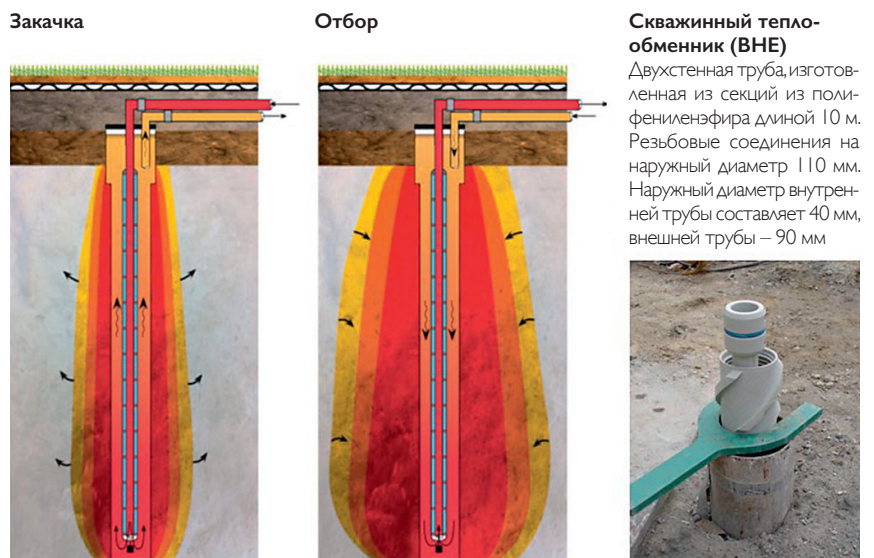
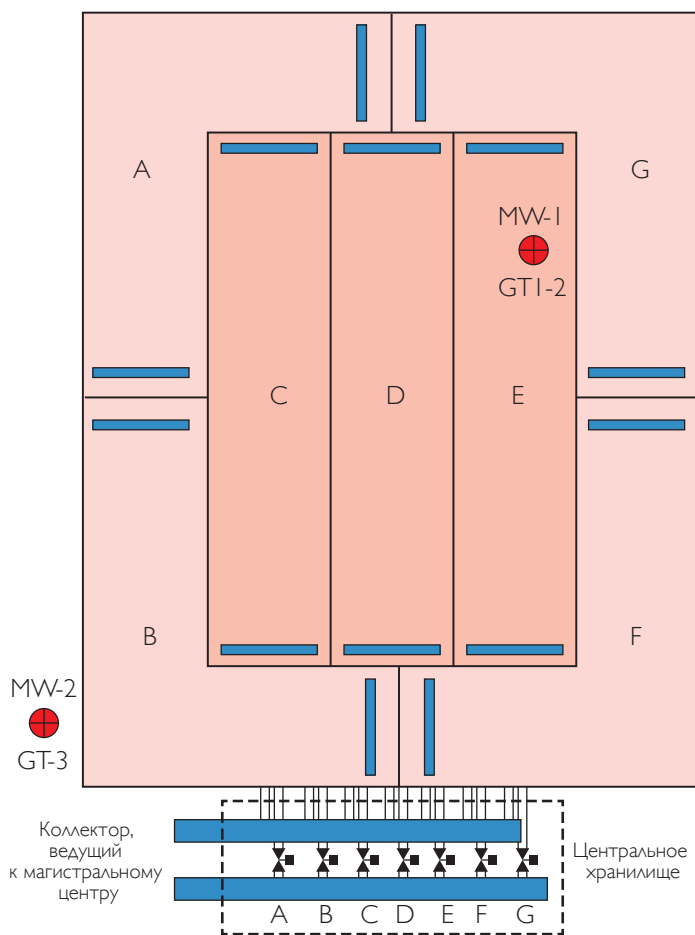


Рис. 2. Система с коаксиальным скважинным теплообменником с функцией двойного потока



(A–G). На каждом участке располагается 20 скважин, из которых две работают последовательно. Скважины соединены трубами с наружным диаметром 40 мм, которые выводятся в полевые коллекторы с наружным диаметром 90 мм, расположенные с обоих концов каждого участка (отмечены синим). Далее полевые коллекторы соединяются с главными коллекторами в центральном хранилище. MW – наблюдательные скважины, GT – датчики температуры

Рис. 3. Конструкция скважинного хранилища, состоящего из семи участков

температура со стороны испарителя позволяет системе работать с производительностью, значительно превышающей номинальную, в данный момент – до 800 кВт. Тепловые насосы совместно с прямой рециркуляцией могут снижать потребность в тепле до температуры наружного воздуха около  $-5^{\circ}\text{C}$ . При более низких температурах наружного воздуха сгладить пиковые нагрузки помогает система центрального теплоснабжения.

### Система мониторинга

Горизонтальная трубопроводная система хранилища погружена в грунт: над ней слой песка около 30 см, выше идет слой изоляционного пеностекла – 40 см, а затем почвенный слой – около 30 см. Теплоизоляционную способность отслеживают датчики температуры, расположенные под слоем пеностекла и над ним, а также в верхней части почвенного слоя. Для измерения температуры в хранилище предусмотрены две контролируемые скважины (MW): одна находится внутри хранилища, а вторая – в нескольких метрах за его пределами. В них установлены датчики температуры (рис. 3, GTI-3). Кроме того, ведется мониторинг температуры теплоносителя, подаваемого в каждую секцию и отбираемого из нее, а также давления в двух сборочных трубах в центральном хранилище.

Из главного технического центра, расположенного на расстоянии 200 м от хранилища, теплоноситель перекачивается через коллектор циркуляционным насосом с частотно-регулируемым приводом, рассчитанным на максимальный расход  $21 \text{ л/с}$  ( $3 \text{ л/с}$  на секцию). Тепло подается в хранилище или отбирается из него с помощью теплообменника HEX, вторичная сторона которого подключена к собственной сети теплоснабжения компании Xylem. В системе установлены датчики измерения температуры, расхода и давления в режиме реального времени (рис. 4). Кроме того, с каждой стороны теплообменника (HEX) фиксируется величина потребляемой тепловым насосом и циркуляционными насосами электроэнергии для расчета сезонной характеристики энергоэффективности (SPF) системы.

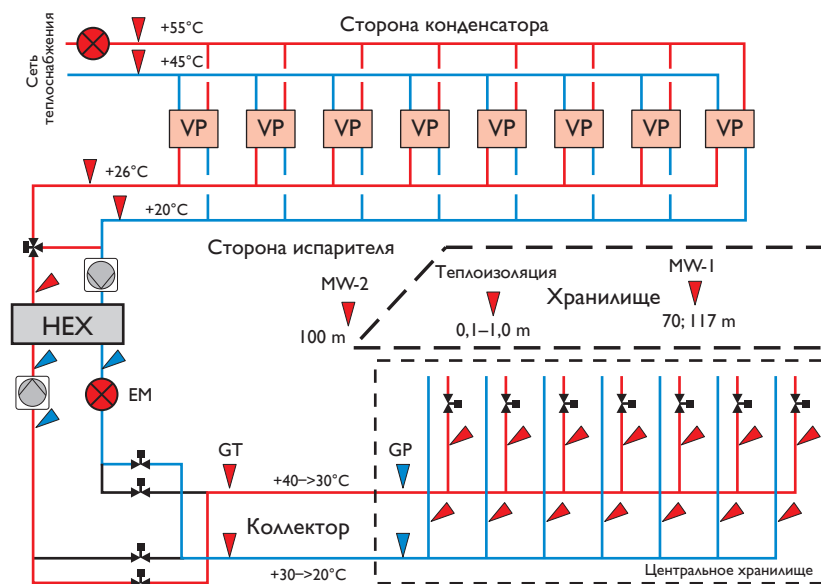


Рис. 4. Упрощенная схема отбора тепла с датчиками для измерения количества энергии (EM), давления в системе (GP) и температуры (GT). Кроме того, измеряется электропотребление тепловых насосов и циркуляционных насосов

# HYDROVAR

## ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ НАСОСАМИ



Реклама



**Lowara HYDROVAR предназначен для того, чтобы ваша система работала эффективно.**

Этот интеллектуальный частотно-регулируемый привод управляет насосом точно в соответствии с текущими требованиями. По сравнению с нерегулируемой системой, HYDROVAR экономит до 70% энергии. Плавное регулирование при работе в оптимальном режиме повышает не только эффективность, но и срок эксплуатации компонентов системы, а также уменьшает затраты на обслуживание. Узнайте подробности на [xylem.ru](http://xylem.ru)

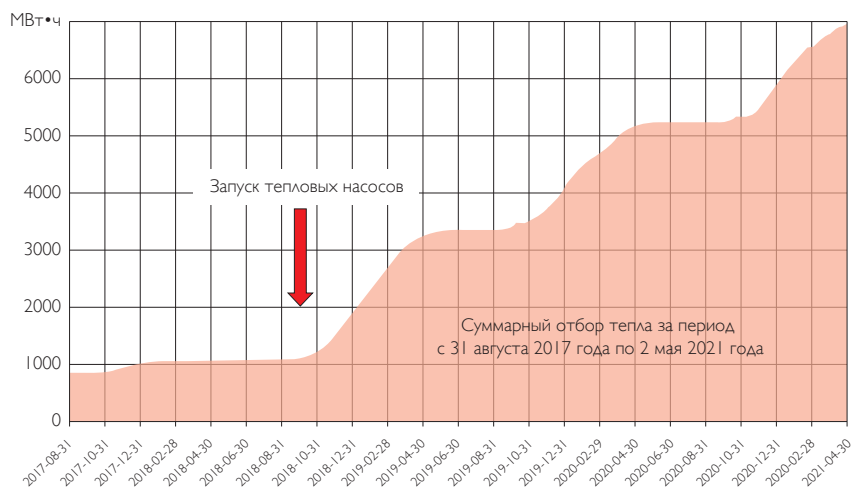


Рис. 5. Суммарный отбор тепла из хранилища за последние пять лет

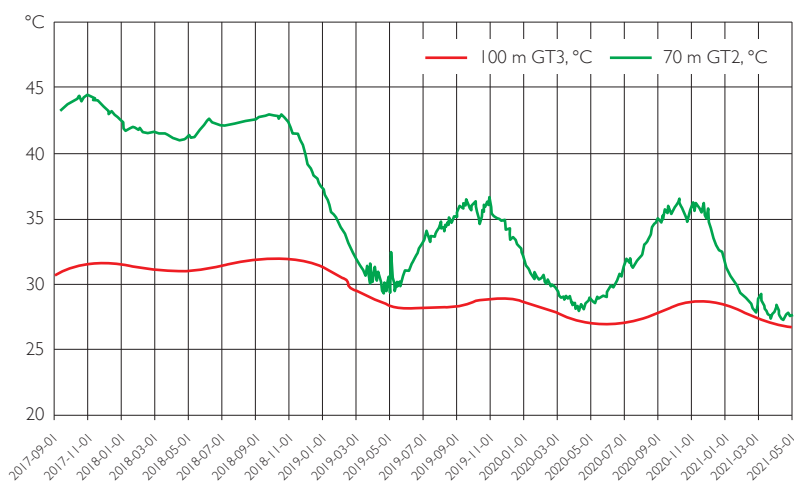


Рис. 6. Динамика температуры внутри хранилища (GT1) и сразу за его пределами (GT3) за последние пять лет

## Результаты эксплуатации

Энергоэффективность хранилища контролируется в рамках международного исследовательского проекта IEA HPT Annex 52<sup>1</sup>. К настоящему времени доступны эксплуатационные данные за три полных отопительных периода работы с тепловыми насосами (рис. 5), из которых видно, что отбор из хранилища аккумулированного тепла с конца 2018 года резко увеличился. В результате к концу отопительного периода температура в хранилище постепенно

снижается – почти до 25 °C. Это приводит к уменьшению градиента температур между центральной частью хранилища и его периметром, а значит, практически не происходит боковых утечек тепла (рис. 6). Снижение температуры в хранилище, рассчитанном на график теплоснабжения 40/20 °C, дает и другие преимущества, из которых наиболее значимы следующие:

- Значительно повысилась производительность системы хранилища по охлаждению в летнее время, что, в свою очередь, позволяет аккумули-

ровать больше тепла с меньшими затратами на работу градирни.

- Снижены потери тепла благодаря уменьшению боковых утечек аккумулированной тепловой энергии.

- Тепловые насосы для рекуперации низкопотенциального сбросного тепла могут работать с меньшей температурой конденсации и, как следствие, более высоким КПД.

- Снижен риск технических проблем в контуре теплоносителя хранилища, что означает меньший риск кавитации циркуляционного насоса, дегазации теплоносителя и засорения труб и теплообменника.

## Экономическая эффективность

Капитальные затраты на первоначальную систему составили порядка 12,5 млн шведских крон (около 1,25 млн евро), из которых 30 % было получено в виде государственной субсидии. По оценке, срок окупаемости должен был составить 5–6 лет. Предполагалось, что аккумулированное сбросное тепло сможет заменить около 2 000 МВт•ч/год покупной тепловой энергии из централизованной системы теплоснабжения. Однако с 2014 по 2017 годы было использовано только 1 200 МВт•ч отобранного тепла. С другой стороны, концепция такого хранения привела к росту утилизации низкопотенциального сбросного тепла в 2011–2014 годах. Это само по себе является выгодным, так как прямую рекуперацию тепла в зимний период можно будет удвоить приблизительно до 7 000 МВт•ч/год (2020).

Другим бонусом стало то, что находящийся рядом промышленный объект (литейное производство) был обеспечен естественным охлаждением, и объем закупок сетевой воды для охлаждения в бассейнах существенно уменьшился. Кроме того, увеличение использования сбросного тепла привело к снижению эксплуатационных расходов и расходов на техническое обслуживание градирни. Эти выгоды пока не пересчитаны в денежный эквивалент.

<sup>1</sup> IEA HPT Annex 52 «Долгосрочные измерения эффективности геотермальной теплонасосной системы в коммерческих, административных и многоквартирных домах». ТНС компании Хулет является одной из 40 геотермальных установок неглубокого залегания, контролируемых IEA HPT Annex 52, и единственной работающей в промышленном секторе.

Дополнительные затраты на новую теплонасосную систему составили порядка 2,5 млн шведских крон. В течение первых трех лет эксплуатации было произведено 6 500 МВт•ч тепловой энергии и затрачено на собственные нужды системы 1 440 МВт•ч электроэнергии, то есть сезонный коэффициент энергоэффективности (SPF) составил 4,5, что обеспечивает экономию порядка 78 % энергии. Экономия денежных средств при текущих ценах на энергию составляет порядка 3,8 млн шведских крон. Таким образом, затраты на установку новой ТНС окупились после трех отопительных периодов.

### Выводы и рекомендации

В целом оценка данного типа систем BTES в части температуры отбора аккумулированного тепла завышена. Согласно нашей оценке, для полного использования преимуществ

хранилища требуется ТНС. Возможно, что система HT-BTES может работать только с теплообменом, но температура при закачке должна быть значительно выше, чем температура отбора теплоносителя.

Систему HT-BTES можно построить почти в любых геологических условиях, но капитальные затраты довольно высоки. Однако, поскольку срок службы системы составляет многие годы (> 50 лет), капитальные затраты можно распределить на длительный срок. Поскольку аккумулированное сбросное тепло является, по сути, бесплатным, имеется существенный потенциал для создания хранилищ с высокой рентабельностью, включая стоимость вспомогательных тепловых насосов при отборе.

Вложения в коаксиальные скважинные теплообменники помогли добиться благоприятного теплового режима в хранилище в г. Эммабуда. Однако исходный проект оказался

несостоятельным при поддержании высокой температуры тепла, отбираемого на отопление. Для предотвращения технических проблем, таких как образование вакуума и дегазация, рекомендуется использовать традиционные скважинные теплообменники (тепlostойкие U-образные трубы) в полностью замкнутом контуре. В г. Эммабуда данная проблема вызвала серьезную озабоченность в первые годы эксплуатации. Считаем, что лучше применять менее эффективный скважинный теплообменник и компенсировать такой выбор использованием тепловых насосов для эффективного отбора аккумулированного тепла. ■

*Материал подготовлен на основе статьи «Heat pumps rescued Xylem's heat storage facility in Emmaboda, Sweden», опубликованной в REHVA Journal – август 2021 года.*

# ДЕКАРБОНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА, ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, ЗДОРОВЫЕ ЗДАНИЯ



[zvt.abok.ru](http://zvt.abok.ru)

**Электронный ресурс №2-2021**

**ЗДАНИЯ ВЫСОКИХ ТЕХНОЛОГИЙ**  
SUSTAINABLE BUILDING TECHNOLOGIES

- КОМФОРТНЫЙ КЛИМАТ В ТЕАТРАХ КАК РЕЗУЛЬТАТ ЗАВОЕДЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА
- КОМПЛЕКСНОЕ ОСВЕЩЕНИЕ КВАРТАЛА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ ДОМОВ В ЗОНЕ ВЕЧНОЙ МЕРЛОТЫ
- ПЕРВАЯ ШКОЛА БЕЗ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ В КАНАДЕ

**В ТЮМЕНИ БУДЕТ ПОСТРОЕН ПЕРВЫЙ ДОМ УРОВНЯ EXCELLENT СОГЛАСНО МЕТОДОЛОГИИ VREEAM**

**Электронный ресурс №1-2021**

**ЗДАНИЯ ВЫСОКИХ ТЕХНОЛОГИЙ**  
SUSTAINABLE BUILDING TECHNOLOGIES

- СНИЖЕНИЕ СТОИМОСТИ ВЛАДЕНИЯ ОБЪЕКТАМИ НЕДВИЖИМОСТИ СОЦИАЛЬНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ МУНИЦИПАЛЬНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ – РЕЗУЛЬТАТ ВНЕДРЕНИЯ СИСТЕМ ДИСПЕТЧЕРИЗАЦИИ
- МОНИТОРИНГ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА МЕДИЦИНСКОГО ХОЛОДИЛЬНИКОВ НА ОБЪЕКТАХ ЗДРАВООХРАНЕНИЯ

**УМНЫЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ЗДОРОВОЙ СРЕДЫ ОБИТАНИЯ**

**Электронный ресурс №3-2020**

**ЗДАНИЯ ВЫСОКИХ ТЕХНОЛОГИЙ**  
SUSTAINABLE BUILDING TECHNOLOGIES

- ЗДАНИЯ, КОТОРЫЕ ПОМОГУТ НАМ ВЕСТИ ЗДОРОВЫЙ ОБРАЗ ЖИЗНИ. НОВЫЙ СТАНДАРТ «ЗДОРОВОЙ СРЕДЫ» FITWEL
- КОММЕРЧЕСКОЕ ЗДАНИЕ В ПЕРИОД ПАНДЕМИИ И ВЫХОДА ИЗ НЕЕ – КОМФОРТ И ЭНЕРГОЭКОНОМНОСТЬ, ЗДОРОВЬЕ И БЕЗОПАСНОСТЬ

**TROTEC**  
ИЗМЕРЕНИЯ, ДОСТУПНЫЕ КАЖДОМУ