

Сезонный аккумулятор теплоты и холода для системы энергоснабжения здания*

* Статья подготовлена на основе доклада, представленного на V отраслевой конференции «Промышленные тепловые насосы. Системы хранения тепла и холода», проведённой журналом СОК 3 февраля 2021 года в рамках выставки Aquatherm Moscow.

Рецензия эксперта на статью получена
15.02.2021 [The expert review on the article
received on February 15, 2021].

Улучшенные тепловые характеристики здания и интеграция возобновляемых источников энергии — два наиболее эффективных средства уменьшения зависимости дома от ископаемого топлива для удовлетворения потребностей в энергии.

Стандарт «пассивного дома» устанавливает методы улучшения тепловых характеристик здания — использование повышенной изоляции строительных конструкций и высокое качество строительства — для достижения очень низкого уровня потребления энергии на отопление (в три-пять раз меньше по сравнению с домами, построенными в соответствии с минимальными требованиями строительных норм [1]). Одним из основных требований к «пассивным домам» является удельный расход тепловой энергии на отопление не более 15 кВт·ч/(м²·год).

В условиях сурового российского климата очень сложно добиться выполнения требований, характерных для «пассивного дома». Как правило, фактическое энергопотребление домов в России превышает эти требования в два раза и более [2, 3]. В работе [4] было показано, что для выполнения требований «пассивного дома» в условиях московского региона необходимо иметь коэффициент термического сопротивления ограждающих конструкций (стен, крыши) на уровне $R = 15 \text{ м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт}$ и более, что существенно превышает нормативные значения требуемого сопротивления теплопередаче $R = 3,13\text{--}3,8 \text{ м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт}$.

Использование солнечных комбинированных систем и накопления тепловой

Реальность такова, что в условиях сурового российского климата очень сложно добиться выполнения требований, характерных для «пассивного дома»

энергии в домах с низким энергопотреблением способно значительно снизить потребности в отоплении помещений и снабжении горячей водой (ГВС) [5].

Одним из путей снижения энергопотребления здания является использование ВИЭ для производства электрической и тепловой энергии [6, 7], благодаря чему здание становится активным и в состоянии снизить энергопотребление до уровня близкого к нулевому [8–10].

Большое количество исследований посвящено правильному подбору компонентов комбинированных солнечных систем, предусматривающих хранение тепловой энергии [5, 11–13].

Возможны два варианта сезонного хранения теплоты и холода: в теплоаккумуляторе [6] и льдоаккумуляторе [14–16], размещённых под землёй и нагреваемых солнечными коллекторами для отопления и кондиционирования здания совместно с тепловым насосом. В качестве теплоносителя в подземных ёмкостях может использоваться вода в жидком и твёрдом состоянии. В связи с тем, что у каждого аккумулятора тепловой энергии есть свои преимущества и недостатки, проводится работа по выбору оптимального решения для внедрения в существующую систему энергоснабжения объекта.

УДК 620.92:658.26. Научная специальность: 05.14.04.

Разработка и исследование сезонного аккумулятора теплоты и холода для системы энергоснабжения здания

И. А. Султангузин, д.т.н., профессор, Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт» (НИУ «МЭИ»); **Б. А. Христенко**, аспирант, НИУ «МЭИ»; **В. Ю. Чайкин**, магистрант, НИУ «МЭИ»; **Т. В. Яцук**, инженер-архитектор, Агентство проектного консалтинга «Содетивие»; **Д. А. Кругликов**, аспирант, НИУ «МЭИ»; **Ю. В. Яворовский**, к.т.н., заведующий кафедрой промышленных теплоэнергетических систем, НИУ «МЭИ»; **А. Н. Нечаев**, генеральный директор ООО «ТНС»; **А. В. Скоробатюк**, генеральный директор ООО «Новый полюс»

Россия относится к странам с суровым климатом: для многих регионов свойственна холодная зима и жаркое лето. В связи с этим актуальной проблемой является сезонное аккумулирование тепловой энергии летом для зимнего периода и холода зимы для летнего периода. Главной задачей данной работы является исследование, проектирование и создание подземного аккумулятора для внедрения в существующую систему теплоснабжения энергоэффективного дома. Возможны два типа сезонного аккумулятора: с повышенной температурой до 60–70 °С и льдоаккумулятор с хранением энергии при температурном режиме 0–30 °С в жидкой фазе и в фазе льда. Разработано проектное решение по внедрению аккумуляторов двух типов в существующую систему теплоснабжения энергоэффективного дома. Произведён расчёт аккумулирующей способности аккумуляторов. Разработана схема испытательного стенда.

Ключевые слова: льдоаккумулятор, тепловой аккумулятор, тепловой насос, сезонное аккумулирование, солнечный коллектор, энергоэффективность, энергосбережение, BIM, BEM, CFD, ArchiCAD, «пассивный дом».

UDC 620.92:658.26. Number of the scientific specialty: 05.14.04.

Development and research of seasonal heat and cold storage for building energy supply system

I. A. Sultanguzin, Doctor of Technical Science, Professor, National Research University "Moscow Power Engineering Institute" (NRU "MPEI"); **B. A. Khristenko**, postgraduate student, NRU "MPEI"; **V. Yu. Chaykin**, master student, NRU "MPEI"; **T. V. Yatsuk**, engineer-architect, "Agency of project consulting "Sodeistvie", LLC; **D. A. Kruglikov**, master, postgraduate student, NRU "MPEI"; **Yu. V. Yavorovskiy**, PhD, Head of Industrial Thermal Engineering Systems Department, NRU "MPEI"; **A. N. Nechaev**, general director, "TNS", LLC; **A. V. Skorobatyuk**, general director, "New Polus" LLC

Russia is a country with a harsh climate for many of the regions are characterized by cold winters and hot summers. In this regard, the current problem is the seasonal accumulation of thermal energy in the summer for the winter period and the cold of winter for the summer period. The main task of this work is to study, design and create an underground battery for the introduction of an energy-efficient house into the existing heat supply system. There are two types of seasonal accumulator: with an increased temperature of up to 60–70 °C and an ice accumulator with energy storage at a temperature of 0–30 °C in the liquid phase and in the ice phase. A design solution has been developed for the introduction of two types of batteries into the existing heat supply system of an energy-efficient house. The accumulating capacity of the accumulators is calculated. The scheme of the test bench is developed.

Key words: heat storage, ice accumulator, heat accumulator, heat pump, seasonal accumulator, solar collector, energy efficiency, energy saving, BIM, BEM, CFD, ArchiCAD, passive house.

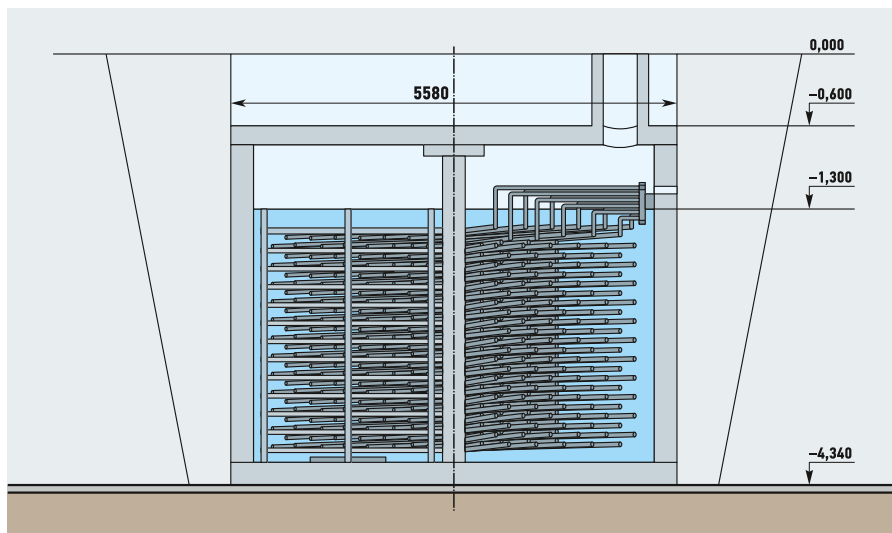


Рис. 1. Чертеж подземного льдоаккумулятора водонаполнением 53 м³

Применение льдоаккумулятора

В России официально не зафиксировано применение льдоаккумуляторов в качестве низкопотенциального источника тепла для тепловых насосов типа «рассол — вода». Основным преимуществом данной системы является то, что, в отличие от геотермальных зондов, она не требует специальных разрешений на строительство. Это помогает решить ряд проблем, возникающих на стадиях проектирования, строительства и дальнейшей эксплуатации. Основной трудностью для некоторых регионов является большая глубина промерзания грунта.

Схема установки состоит из одного или двух льдоаккумуляторов (расположенных на расстоянии более 2 м друг от друга), подобранного согласно проекторочному расчёту количества солнечных коллекторов, реверсивного теплового насоса и буферной ёмкости для приготовления горячей воды [13, 14].

Установленные на крыше гелио-воздушные абсорберы вырабатывают тепло из окружающей среды, в дневное время получая его за счёт инсоляции, а далее подают тепло в тепловой насос. Если энергия не отбирается тепловым насосом, она служит для регенерации льдоаккумулятора либо для нагрева буферной ёмкости. Льдоаккумулятор со встроенным теплообменником устанавливается ниже глубины промерзания грунта, наполняется подготовленной водой и используется в качестве низкопотенциального источника тепла [16]. Тепловой насос должен иметь возможность работать в реверсивном режиме. В летний период, когда потребность в отоплении отсутствует, а тепловая нагрузка на горячее водоснабжение минимальна, с помощью солнечных коллекторов тепловая энергия подаётся в бак-ак-

кумулятор. Когда начинается отопительный период тепловые нагрузки возрастают, а потребность в кондиционировании снижается. Тогда тепловой насос начинает отбирать тепло из льдоаккумулятора, вплоть до контролируемого обледенения при 0°C. Далее в хранилище происходит фазовый переход воды из жидкого в твёрдое состояние. Параллельно осуществляется процесс теплообмена между льдоаккумулятором и окружающей средой (грунтом). По завершении отопительного периода потребность в отоплении здания снижается, и тепловой насос переходит в реверсивный режим работы. В данном

Основным преимуществом рассматриваемой в данной статье системы является то, что, в отличие от геотермальных зондов, она не требует никаких специальных разрешений на строительство

Параметры теплообменника льдоаккумулятора водонаполнением 53 м³

табл. 1

№ змее- вика	Параметры					
	Длина, м	Диаметр, мм	Скорость, м/с	Площадь поверхности теплообмена, м²	Кол-во петель, шт.	Водонапол- нение, л
1	94,5	32	1	11,25	11	76
2	95	32	1	11,14	12	76
3	81	32	1	9,64	11	65
4	80,5	32	1	9,58	12	65
5	67,5	32	1	8,03	11	54
6	65,5	32	1	7,82	12	53
7	54	32	1	6,42	11	43
8	51	32	1	6,06	12	41
9	40,5	32	1	4,81	11	32
10	36,5	32	1	4,31	12	29
11	27	32	1	3,21	11	22
Итого	700 (693)	–	1	82,43	–	555

режиме происходит регенерация льдоаккумулятора. Производится отбор холода из хранилища и направляется на кондиционирование помещений. Лёд в бак-аккумуляторе начинает таять, и происходит постепенное накопление тепла. Таким образом, цикл замыкается [15, 16].

Первой, кто оформила патент на данное решение, является компания Isocal. В 2011 году ею был реализован ряд проектов с использованием систем тепло- и холодоснабжения на основе льдоаккумуляторов: детский сад (три льдоаккумулятора с водонаполнением 12 м³ каждый позволяют полностью покрыть тепловую нагрузку детского сада, равную 24 кВт), жилой комплекс из 112 квартир (льдоаккумулятор водонаполнением 400 м³ покрывает потребности до 140 кВт) и др.

В 2012 году компания Viessmann приобрела компанию Isocal и теперь владеет патентом на данную технологию. Совместно было разработано стандартное решение [14], которое состоит из теплового насоса, хранилища льда (объём 12 м³) и комплекта солнечных коллекторов и компании активно занимаются его реализацией в странах Европы. Помимо этого, компания Viessmann также занимается разработкой решений для крупных объектов. С 2012 по 2018 годы было продано и установлено более 180 систем хранения льда для офисных зданий и других крупных сооружений, а также более 1100 систем Vitofriocal для частных домов.

Проектное решение (ёмкость объёмом 53 м³) представлена на рис. 1. Характеристики теплообменника представлены в табл. 1 [15]. Данное решение позволяет использовать ёмкость, как в режиме льдоаккумулятора, так и в режиме теплового аккумулятора (для данного случая необходимо применение теплоизоляции ограждающих конструкций).

Применение теплоаккумулятора

Применение теплового аккумулятора схоже с льдоаккумулятором, но его отличительной особенностью является то, что температура в ёмкости в тёплый период года повышается с помощью солнечных коллекторов до 60–70 °С, а сама ёмкость требует повышенного утепления (с применение теплоизоляционных материалов толщиной до 500–600 мм) для достижения эффекта «термоса». До конца ноября тепловой аккумулятор позволяет производить отбор тепла на нужды отопления дома напрямую из ёмкости, а после — использовать тепловой насос до охлаждения воды в ёмкости до 0–1 °С (эксплуатация ниже данной отметки не рекомендуется).

За прототип тепловой схемы с теплоаккумулятором принимается «пассивный дом» площадью 215 м² в Ирландии с подземной ёмкостью 23 м³ и солнечными коллекторами общей площадью 10,6 м² [5]. Для данного региона характерен морской климат с относительно тёплой зимой (0 °С в декабре) и нежарким летом (+19 °С в июне). Объём солнечной радиации за год равен 1160 кВт·ч/м². Годовая потребность «пассивного дома» в тепле составляет 2050 кВт·ч с удельным расходом тепловой энергии 9,5 кВт·ч/(м²·год). Известно, что коэффициент термического сопротивления стен равен $R = 10,1 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$.

Обращает на себя внимание то, что средняя толщина теплоизоляции дна, стен и крыши (экструдированный пенополистирол и полиуретановое напыление) подземного аккумулятора составляет 500 мм (рис. 2) [5], что обеспечивает термическое сопротивление $17 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$.

Эксперимент в течение года показал, что средняя температура в подземном межсезонном накопителе изменялась от 65 °С в августе до 20 °С в январе. То есть здание отапливалось в основном за счёт теплоаккумулятора без теплового насоса. При снижении температуры воздуха в помещении ниже 19,5 °С включался электрокотёл мощностью 1,4 кВт. Был также предусмотрен резервный электрический подогрев водяного тёплого пола мощностью 0,81 кВт в те моменты, когда тепла, поступающего от солнечных панелей или из теплоаккумулятора, недостаточно для удовлетворения потребности в отоплении помещения. Бак ГВС ёмкостью 300 л оборудован электрическим нагревательным элементом мощностью 3 кВт для резервного нагрева.

Кроме того, в работе [6] были проведены расчёты в программе TRNSYS, которые показали удовлетворительную точность по сравнению с физическим экспериментом с погрешностью 4,7 %.



Рис. 2. Процесс монтажа теплоизоляции теплового аккумулятора [6]

Численная модель TRNSYS позволила провести параметрический анализ по определению соотношения площади солнечных коллекторов и объёма подземного межсезонного накопителя. В результате итеративного моделирования для заданных площадей коллекторов были выявлены минимально допустимые объёмы теплоаккумулятора, которые не допускали бы кипения теплоносителя в любой период года. Физически разумное соотношение объёма хранилища и площади коллекторов имеет минимальный предел на уровне 0,9–1,1 м³/м².

Другим важным результатом этого исследования является то, что увеличение ёмкости аккумулятора более 40 м³ для дома указанных размеров (площадью 215 м²) доля использования солнечной энергии изменяется незначительно — с 0,65 до 0,78, даже если объём межсезонного накопителя увеличится до 140 м³.

В недавней работе [12] приводится детальный обзор современных теплоизоляционных материалов для систем хранения тепловой энергии. Среди группы исследованных материалов выделяются вакуумные изоляционные панели (ВИП) и кремнезёмные аэрогели, как материалы с самой низкой теплопроводностью.

Аэрогели диоксида кремния вместе с ВИП-аэрогелями считаются одними из самых перспективных современных теплоизоляционных материалов. Кремнезёмный аэрогель — это высокопрозрачный материал, состоящий из наноструктурированной сетки SiO₂ с пористостью

до 99,8 % и низкими значениями теплопроводности от 0,004 до 0,02 Вт/(м·К). Препятствием для применения кремнезёмных аэрогелей в качестве теплоизоляции является их очень высокая стоимость (€547 за 1 м²), что примерно в 10–20 раз выше, чем стоимость традиционных теплоизоляционных материалов.

Вакуумные изоляционные панели демонстрируют самую низкую теплопроводность — 0,004–0,008 Вт/(м·К). Коллоидный диоксид кремния является наиболее часто используемым материалом для сердцевин ВИП в строительном секторе из-за его высокой ожидаемой продолжительности жизни (более 50 лет), однако этому материалу свойственны хрупкость, высокая стоимость (€247 за 1 м²) и необратимое увеличение теплопроводности из-за диффузии водяного пара и воздуха через оболочку в сердцевину ВИП. По сравнению с ВИП, для которых свойственно необратимое ухудшение характеристик, материалы из пенополиуретана (PUR или ППУ) и полиизоцианурата (PIR) являются более надёжным решением, а также они значительно дешевле (€59 за 1 м²). PUR и PIR — это два родственных класса полимеров, имеющих закрытую ячеистую структуру. Ячейки наполнены вспенивающим агентом (газом) с низкой степенью теплопроводности 0,022 Вт/(м·К). Эти материалы хорошо подойдут для утепления стен и крыши подземного теплоаккумулятора.

Для утепления дна лучше использовать экструдированный пенополистирол типа «шведская плита» (XPS SP) повышенной прочности с теплопроводностью 0,029 Вт/(м·К). Также для удешевления стоимости теплоизоляции крыши и стен подземного аккумулятора совместно с PUR и PIR может быть применён экструдированный пенополистирол (XPS), являющийся самым дешёвым из рассмотренных теплоизоляционных материалов (€32 за 1 м²), к тому же он широко представлен на российском рынке.

В табл. 2 представлены основные параметры для двух вариантов теплоаккумулятора с водонаполнением 53 и 43 м³.

Таблица 2. Параметры теплоаккумулятора для вариантов с водонаполнением 53 и 43 м³

табл. 2

Параметры аккумулятора	Вариант 1	Вариант 2
Внутренний диаметр, м	5	4,5
Внутренняя высота, м	3,2	3,2
Объём воды, м ³	53	43
Толщина теплоизоляции, мм	500	500
Объём бетона, м ³	32	28
Объём теплоизоляции, м ³	77	64
Стоимость теплоизоляции, тыс. руб.	426	357

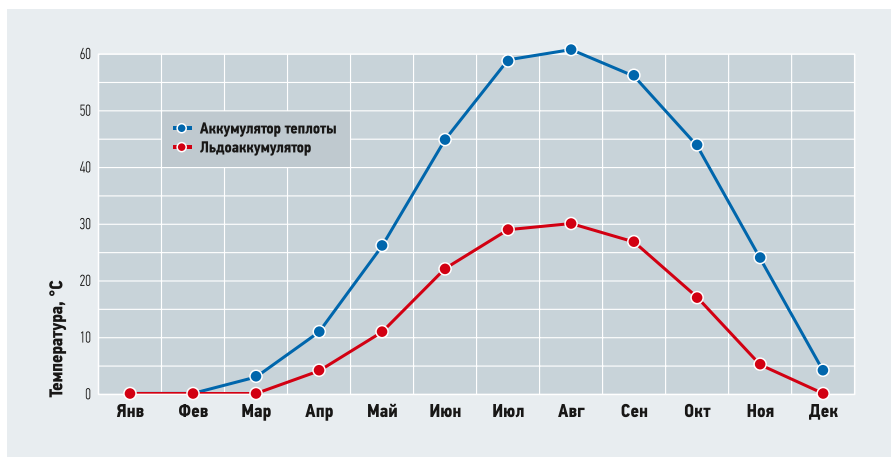


Рис. 3. Прогноз сезонного изменения температуры в аккумуляторах энергии различного типа

Если делать теплоаккумулятор такого же объёма, как и льдоаккумулятор, то требуется 77 м³ теплоизоляции при средней толщине 500 мм стоимостью 426 тыс. рублей. Если же уменьшить внутренний диаметр с 5 до 4,5 м, то затраты на теплоизоляцию могут быть сокращены на 69 тыс. рублей (16%). Как показал анализ результатов работы [5], сокращение ёмкости теплоаккумулятора на 10 м³ не должно существенно уменьшить долю использования солнечной энергии и теплоаккумулирующую способность подземного межсезонного накопителя.

Льдоаккумулятор не предполагает применение теплоизоляционных материалов, тем самым обеспечивая непрерывный теплообмен с грунтом

Сравнительный анализ преимуществ и недостатков систем

На рис. 3 представлены прогнозируемые графики изменения средней температуры теплоносителя для теплоаккумулятора и льдоаккумулятора. Как видно из графиков, температурный режим в тепловом аккумуляторе в пиковых своих точках будет достигать отметки в 60 °С, что в свою очередь позволит отбирать тепло на нужды отопления напрямую из ёмкости в октябре и ноябре. Подобная эксплуатация позволит получить существенную экономию на эксплуатации теплового насоса, однако повлечёт за собой существенные финансовые затраты на применение теплоизоляционных материалов для уменьшения тепловых потерь в окружающую среду (грунт). В январе и феврале теплоаккумулятор может выйти на режим, аналогичный льдоаккумулятору, то есть на 0 °С. В марте и апреле можно будет отапливать дом напрямую от солнечных коллекторов, минуя подземный аккумулятор. Таким образом, тепловой насос будет работать вместо семи месяцев

только три — с существенной экономией электроэнергии. Предварительные расчёты и последующий натурный эксперимент должны подтвердить или уточнить эти предположения. Льдоаккумулятор не предполагает применение теплоизоляционных материалов, тем самым обеспечивая непрерывный теплообмен с грунтом (восполняя тепловую энергию при понижении температуры воды в ёмкости ниже 5–8 °С). Перегрев теплоносителя в ёмкости более 30 °С приводит к большим тепловым потерям в окружающую среду и уменьшению влагосодержания грунта (снижению его регенеративных свойств).

Основные недостатки и преимущества рассматриваемых аккумуляторов тепловой энергии представлены в табл. 3.

Преимущества и недостатки аккумуляторов тепловой энергии

табл. 3

Преимущества		Недостатки	
Теплоаккумулятор	Льдоаккумулятор	Теплоаккумулятор	Льдоаккумулятор
Снижение энергозатрат на эксплуатацию теплового насоса за счёт прямого отбора тепла	Низкие затраты на изготовление ёмкости относительно теплового аккумулятора	Высокие затраты на теплоизоляционные материалы	Потребность в большом объёме ёмкости
Возможность уменьшения объёма ёмкости	Возможность постоянного теплообмена с окружающей средой	Узкий диапазон работы	Контроль равномерного образования льда
	Использование скрытой теплоты фазового перехода (более высокая энергоёмкость)		

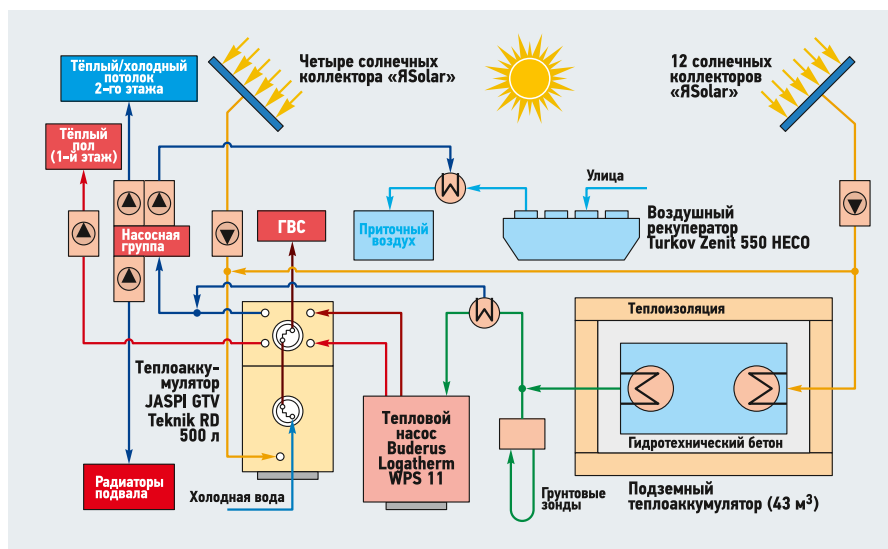


Рис. 4. Развитие системы теплоснабжения здания с подземным аккумулятором

Эксплуатация теплового насоса на двух существующих скважинах показала, что при длительной эксплуатации происходит падение температуры обратной линии ниже -1°C , что свидетельствует о низкой производительности скважины. Подобный режим эксплуатации ограничивает по времени работы теплового насоса и не позволяет полноценно использовать ночной тариф электроэнергии. В связи с чем было принято решение о применении дополнительного аккумулятора тепла. В работе [15] описан процесс проектирования бетонной ёмкости и теплообменника. Врезка аккумулятора будет сделана в существующую систему энергоснабжения параллельно геотермальным зондам (рис. 5).

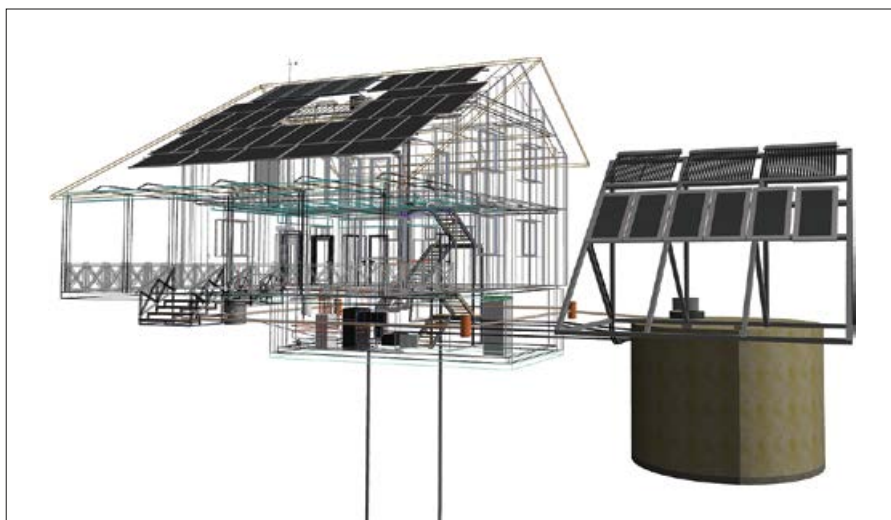
Конфигурация теплообменника подземного аккумулятора выполнена таким образом, что она позволяет поочерёдное подключение змеевиков. Нечётные змеевики (начиная от бетонной стенки аккумулятора) подключены напрямую к солнечным коллекторам, а чётные — к тепловому насосу. Подобное подключение исключает риск повреждения бетонной ёмкости.

Крыша двускатная, площадь крыши с южной стороны 130 м^2 . Данная площадь используется для размещения четырёх солнечных коллекторов «ЯSolar» и 30 солнечных панелей Delta электрической мощностью $11,9\text{ кВт}$ [10, 19], установленных недавно для достижения энергопотребления здания, близкого к нулевому.

Наблюдается явная неравномерность избытка солнечной энергии для производства тепловой и электрической энергии летом и недостатка этих энергетических ресурсов в зимний период.

Подземный межсезонный накопитель позволит аккумулировать тепловую энергию летом для использования её зимой. Сезонно аккумулировать электрическую энергию значительно сложнее. Однако за рубежом уже имеется опыт производства водорода от избыточной солнечной электроэнергии путём электролиза [21] и использования накопленного водорода зимой для производства в топливных элементах электрической и тепловой энергии для многоквартирного дома площадью 1000 м^2 [22].

Совместная реализация технологий сезонного аккумулирования тепла и холода в подземном аккумуляторе и производства водорода от солнечных панелей для хранения и использования в топливных элементах позволит зданию функционировать автономно с нулевым энергопотреблением.



❖ Рис. 5. BIM-модель здания с подземным аккумулятором теплоты и холода (ArchiCAD)

Практическое применение BIM-, BEM- и CFD-моделирования

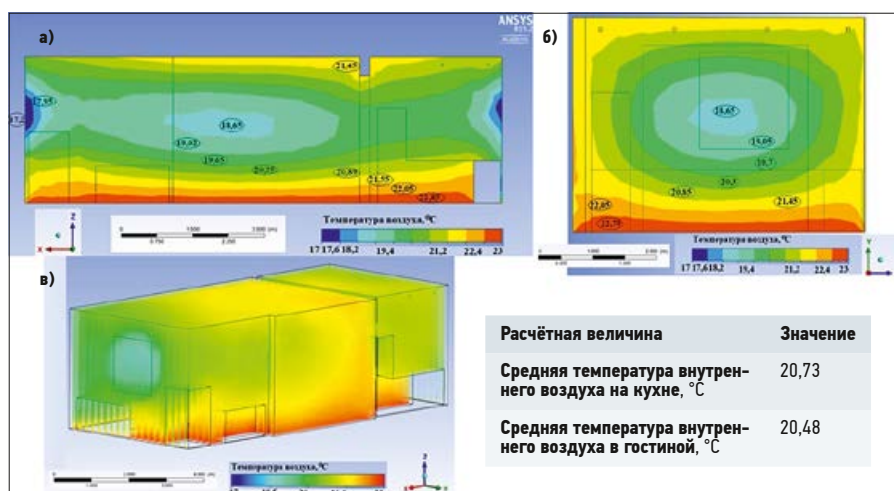
Применение BIM-модели для проектирования подземного аккумулятора

Важной задачей является правильный выбор места и глубины установки подземного аккумулятора. Очевидно, что для регенерации и предотвращения захлаживания ёмкости необходимо смонтировать её на глубину ниже промерзания грунта [16]. Конструкция аккумулятора по форме колодца с внутренним диаметром 5 м и высотой $3,2\text{ м}$ заливается по месту гидробетоном на подготовленное основание, дно и стенки конструкции составляют единое целое. В зависимости от типа аккумулятора выбрано два типа утепления — при варианте использования тепла земли утепление производится по верхней поверхности конструкции с выпуском по периметру листов утеплителя на 1 м , а при варианте теплоаккумулирования будет осуществлено утепление всей конструкции по всей поверхности. Сам аккумулятор размещён в 5 м от жилого дома. Над аккумулятором в информационной модели могут быть размещены плоские и вакуумные солнечные коллекторы «ЯSolar» с площадью поверхности $24\text{--}32\text{ м}^2$.

Сводная координационная BIM-модель данного объекта в среде ArchiCAD более подробно представлена в [18, 19]. В данной модели дома (рис. 5) выполнена предварительная раскладка труб для подключения системы аккумулятора к существующей системе отопления в соответствии с тепловой схемой (рис. 4).

Применение CFD-моделирования для исследования тепловых процессов в здании и в подземном аккумуляторе

Для более детального исследования применяемых технологий строительства и работы внутренних инженерных систем (вентиляции и отопления) необходимо применять CFD-моделирование в связке с BIM- и BEM-моделированием [18, 20]. Моделирование приточно-вытяжной вентиляции в подвальном помещении и моделирование теплового состояния гостиной и кухни в CFD-пакете Ansys Fluent показало эффективность численного моделирования для выбора верных инженерных решений на базе BIM-модели. На рис. 6 приведены расчётные температурные поля в продольном (а), в поперечном (б) и в объёмном (в) представлениях гостиной и кухни первого этажа здания.



❖ Рис. 6. Температурные поля в продольном разрезе (а), в поперечном разрезе (б) и в 3D-объёмном представлении (в) первого этажа здания

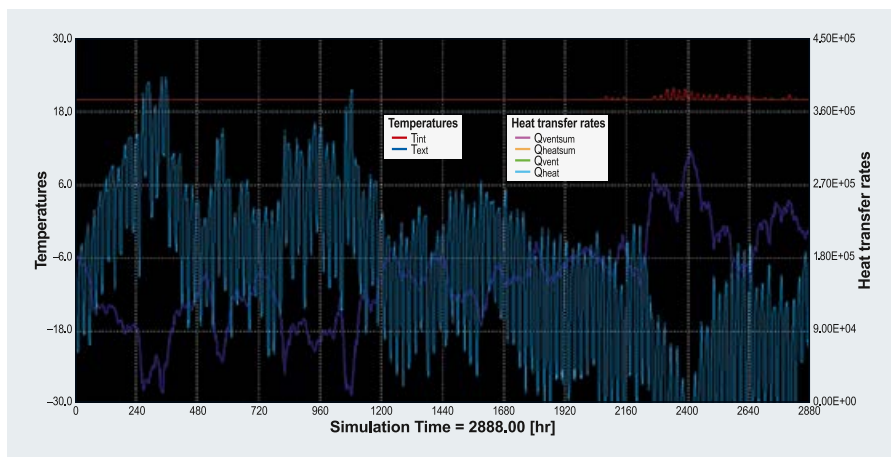


Рис. 7. Результаты расчёта системы теплоснабжения здания в программе TRNSYS

Этот же подход необходимо использовать для моделирования сезонного аккумулятора теплоты и холода. На первом этапе моделирования необходимо выполнить экспорт BIM-модели сезонного аккумулятора в CFD-пакет, а затем построить сетку конечных элементов и задать крайние условия.

Применение ПО TRNSYS для моделирования системы «энергоэффективный дом — подземный аккумулятор»

Для проектирования подземного аккумулятора следует использовать программы BEM-моделирования. Одной из них является программный пакет TRNSYS, разработанный в 1994 году в США и представляющий собой пакет для моделирования сложных объектов и систем. Программа имеет встроенные базы по оборудованию и климатологические справочники. Её в основном используют при проек-

тировании возобновляемых источников энергии и моделировании систем теплоснабжения зданий [5, 23].

Основным преимуществом TRNSYS является то, что она уже использовалась для расчёта на внедряемом объекте. С её помощью уже были посчитаны различные нагрузки и потери, которые возникли в течение всего года. Объективность этих данных подтверждена с помощью различных систем мониторинга, в результате она доказала свою точность.

В работах [17, 18, 20] уже было выполнено успешное энергетическое моделирование описанного выше энергоэффективного дома. Энергетическое моделирование выполнялось в модуле TRNBuild. Отопительный период условно разделили на два временных этапа: с 0 до 2880 ч и с 6288 до 8760 ч (в остальные часы года отопительная нагрузка нулевая). На рис. 7 приведён расчётный график TRNSYS, по-

казывающий изменения температуры наружного и внутреннего воздуха T_{ext} и T_{int} , а также отопительной нагрузки Q_{heat} с января по апрель.

Разработанная энергетическая модель энергоэффективного дома в TRNBuild будет служить структурной подосновой для разработки новой расширенной модели сезонного аккумулятора теплоты и холода.

Для расчётов используются данные от систем мониторинга. Раньше данные брались из открытых источников, теперь — из собственных. При модификации уже существующей системы можно рассчитать особенности работы аккумулятора.

Заключение

Исходя из того, что в существующей практике не существует модели и программного обеспечения для расчёта льдоаккумулятора и теплового аккумулятора, в работе предложено универсальное решение, позволяющее путём минимальных изменений (применение теплоизоляции ограждающих конструкций) внедрить один из двух видов аккумулятора.

Для принятия решения необходимо произвести всесторонний анализ не только аккумулятора, но и всей системы теплоснабжения существующего объекта с применением BIM-, BEM- и CFD-моделирования. Реализация технологии сезонного аккумулирования теплоты и холода в подземном аккумуляторе позволит реально приблизиться к нулевому энергопотреблению здания. ●

1. Файст В.В. Основные положения по проектированию «пассивных домов». — М.: ООО «Контрпринт», 2015. 144 с.
2. Николаев Б.А. Первый «активный дом» // Точка опоры, июнь 2015. №198. С. 8–11.
3. Султангузин И.А., Шютц У., Калякин И.Д., Говорин А.В., Яворовский Ю.В., Жигулина Е.В., Хромченко В.Г., Малахова А.А., Ланцке Б., Дамен А. Расчёт, строительство и обследование фасада энергоэффективного дома // Строительство и реконструкция, 2017. №4. С. 110–118.
4. Hill B. Passive house development in Russia. III World Summit Smart Energy Russia. Kazan, Russia. March 26–27, 2019. 95 p.
5. Clarke J., Colclough S., Griffiths P., McLeskey J.T. Jr. A passive house with seasonal solar energy store: in situ data and numerical modelling. International Journal of Ambient Energy. 2014. Vol. 35. Pp. 37–50.
6. Good C., Andersen I., Hestnes A.G. Solar energy for net zero energy building: A comparison between solar thermal, PV and photovoltaic thermal (PV/T) systems. Solar Energy. 2015. Vol. 122. Pp. 986–996.
7. Бутузов А.В., Бутузов В.В. Использование солнечной энергии для производства тепловой энергии. — М.: Интехэнерго-Издательство, 2015. 304 с.
8. Казанци О., Скрупскелис М., Олесен Б., Павлов Г. Здание с нулевым балансом энергопотребления // Здания высоких технологий, лето 2013. С. 24–35.
9. Sultanguzin I.A., Kalyakin I.D., Govorin A.V., Khristenko B.A., Yavorovsky Yu.V. Optimization of the energy efficient active house. 3. Ingenieurtag 2016. Der Fakultät Maschinenbau, Elektro- und Energiesysteme. GUS- und Osteuropatag. NESEFF-Netzwerktag 2016. Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg, Cottbus, Germany. November 14–15, 2016. Pp. 8–12.
10. Петров В.А., Чайкин В.Ю., Христенко Б.А., Савицкий И.Д., Султангузин И.А., Демидов Е.А., Нечаев А.Н., Скоробатюк А.В. Перспективы развития инженерной системы энергоэффективного дома / Энергосбережение — теория и практика: Труды X Межд. школы-семинара молодых учёных и специалистов. Москва, НИУ «МЭИ», 19–23.10.2020. — Курск: Изд-во «Университетская книга», 2020. С. 66–72.
11. Yumrutas R., Unsal M. Energy analysis and modeling of a solar assisted house heating system with a heat pump and an underground energy storage tank. Solar Energy. 2012. Vol. 86. Pp. 983–993.
12. Villasmil W., Fischer L.J., Worlitschek J. A review and evaluation of thermal insulation materials and methods for thermal energy storage systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2019. Vol. 109. Pp. 71–84.
13. Carbonell D., Philippen D., Haller M.Y., Frank E. Development and validation of mathematical model for ice storages with heat exchangers that can be de-iced. Solar World Congress 2013. The International Solar Energy Society (ISES). Cancún, Mexico. 2013. Pp. 2342–2352.
14. Рекомендации по проектированию и монтажу системы VitoFrioal. Viessmann. — М.: 2018, 40 с.
15. Христенко Б.А. Проектирование льдоаккумулятора и внедрение технологии в систему теплоснабжения существующего объекта: Магист. дисс. — М.: НИУ «МЭИ», 2020. 87 с.
16. Христенко Б.А., Крутчиков Д.А., Чайкин В.Ю., Петров В.А., Султангузин И.А. Проектирование льдоаккумулятора и внедрение технологии в систему теплоснабжения здания / Энергосбережение — теория и практика: Труды X Межд. школы-семинара молодых учёных и специалистов. Москва, НИУ «МЭИ», 19–23.10.2020. — Курск: Изд-во «Университетская книга», 2020. С. 173–179.
17. Яворовский Ю.В., Султангузин И.А., Крутчиков Д.А., Калякин И.Д., Яцок Т.В. Сравнение результатов энергетического моделирования жилого дома с помощью разных программных средств // Вестник МЭИ, 2020. №3. С. 31–39.
18. Султангузин И.А., Крутчиков Д.А., Яворовский Ю.В., Жигулина Е.В., Калякин И.Д., Говорин А.В., Яцок Т.В., Бартедьев А.И., Хромченко В.Г. Применение BIM-, BEM- и CFD-технологий для проектирования, строительства и эксплуатации энергоэффективного дома // Журнал СОК, 2019. №9. С. 36–42.
19. Яцок Т.В., Султангузин И.А., Чайкин В.Ю., Крутчиков Д.А., Яворовский Ю.В., Христенко Б.А. BIM-моделирование для жизненного цикла здания: реалии современности и потребности развития в России // Журнал СОК, 2021. №2. С. 30–39.
20. Крутчиков Д.А. Современный комплексный подход к проектированию, строительству и эксплуатации энергоэффективных домов на основе BIM-, BEM- и CFD-технологий. — М.: НИУ МЭИ, 2019. 142 с.
21. Fischer U., Tannert D., Voigt A., Ziemis Ch., Krautz H.-J. Renewable energy storage by hydrogen production from water electrolysis. Technical and Economic Aspects of Renewable Energies — Know-How Transfer as Development Opportunity for Southern Europe. Berlin, Germany. 2016. Pp. 118–126.
22. Сидорович В. Автономный дом — солнечная электростанция плюс водород [Электр. текст]. RenEn. Режим доступа: renen.ru. Дата обрац.: 12.02.2021.
23. Sweet M.L., McLeskey J.T. Jr. Numerical simulation of underground seasonal solar thermal energy storage (SSTES) for a single family dwelling using TRNSYS. Solar Energy. 2012. Vol. 86. Pp. 289–300.

References — see page 78.

Development and research of seasonal heat and cold storage for building energy supply system. Pp. 39–44.

Ildar A. Sultanguzin, Doctor of Technical Science, Professor, National Research University "Moscow Power Engineering Institute" (NRU "MPEI"); **Bogdan A. Khristenko**, postgraduate student, NRU "MPEI"; **Vladislav Yu. Chaykin**, master student, NRU "MPEI"; **Tatyana V. Yatsyuk**, architectural engineer, "Agency of project consulting "Sodeistvie", LLC; **Dmitry A. Kruglikov**, master, postgraduate student, NRU "MPEI"; **Yuri V. Yavorovskiy**, PhD, Head of Industrial Thermal Engineering Systems Department, NRU "MPEI"; **Andrey N. Nechaev**, general director, "TNS", LLC; **Alexey V. Skorobatyuk**, general director, "New Polus" LLC

1. V.V. Fajst. *Osnovnye polozheniya po proektirovaniyu "passivnykh domov"* [Basic provisions for the design of passive houses]. Moscow. OOO "Kontrprint" ["Contrprint" LLC]. 2015. 144 p. [In Russian]
2. B.A. Nikolaev. *Pervyy "aktivnyy dom"* [The first active house]. *Tochka opory* ["Pivot point" Russian business magazine]. June 2015. No. 198. Pp. 8–11. [In Russian]
3. I.A. Sultanguzin, U. Shjutc, I.D. Kaljakin, A.V. Govorin, Ju.V. Javorovskij, E.V. Zhigulina, V.G. Hromchenkov, A.A. Malahova, B. Lancke, A. Damen. *Raschjot, stroitel'stvo i obsledovanie fasada jenergoeffektivnogo doma* [Calculation, construction and inspection of the facade of an energy efficient house]. *Stroitel'stvo i rekonstrukcija* ["Construction and reconstruction" Magazine]. 2017. No. 4. Pp. 110–118. [In Russian]
4. B. Hill. Passive house development in Russia. III World Summit Smart Energy Russia. Kazan, Russia. March 26–27, 2019. 95 p.
5. J. Clarke, S. Colclough, P. Griffiths, J.T. Jr. McLeskey. A passive house with seasonal solar energy store: in situ data and numerical modelling. *International Journal of Ambient Energy*. 2014. Vol. 35. Pp. 37–50.
6. C. Good, I. Andersen, A.G. Hestnes. Solar energy for net zero energy building: A comparison between solar thermal, PV and photovoltaic thermal (PV/T) systems. *Solar Energy*. 2015. Vol. 122. Pp. 986–996.
7. A.V. Butuzov, V.V. Butuzov. *Ispol'zovanie solnechnoj jenergii dlja proizvodstva teplovoj jenergii* [Use of solar energy for the production of thermal energy]. Moscow. *Intehjenergo-Izdat; Teplojenergetik* ["Intekjenergo-Publishing"; "Heat power engineer" Publishers]. 2015. 304 p. [In Russian]
8. O. Kazanci, M. Skrupskelis, B. Olesen, G. Pavlov. *Zdanie s nulevym balansom jenergotreblenija* [Building with a zero balance of energy consumption]. *Zdaniya vysokih tehnologij* ["High technology buildings" Magazine]. Summer 2013. Pp. 24–35. [In Russian]
9. I.A. Sultanguzin, I.D. Kalyakin, A.V. Govorin, B.A. Khristenko, Yu.V. Yavorovskiy. Optimization of the energy efficient active house. 3. Ingenieurtag 2016. Der Fakultät Maschinenbau, Elektro- und Energiesysteme. GUS- und Osteuropatag. NESEFF-Netzwerktreffen 2016. Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg. Cottbus, Germany. November 14–15, 2016. Pp. 8–12.
10. V.A. Petrov, V.Ju. Chajkin, B.A. Hristenko, I.D. Savickij, I.A. Sultanguzin, E.A. Demidov, A.N. Nechaev, A.V. Skorobatyuk. *Perspektivy razvitiya inzhenernoj sistemy jenergoeffektivnogo doma* [Prospects for the development of an energy efficient home engineering system]. *Jenergoberezenie — teorija i praktika: Trudy X Mezhd. shkoly-seminara molodykh uchenykh i specialistov* [Energy saving: theory and practice. Proc. of the X International School-Seminar for Young Scientists and Specialists]. Moscow. NIU "MJeI" [National Research University "Moscow Power Engineering Institute"]. October 19–23, 2020. Kursk. *Izd-vo "Universitetskaja kniga"* ["University book" Publishers]. 2020. Pp. 66–72. [In Russian]
11. R. Yumrutas, M. Unsal. Energy analysis and modeling of a solar assisted house heating system with a heat pump and an underground energy storage tank. *Solar Energy*. 2012. Vol. 86. Pp. 983–993.
12. W. Villasmil, L.J. Fischer, J. Worlitschek. A review and evaluation of thermal insulation materials and methods for thermal energy storage systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019. Vol. 109. Pp. 71–84.
13. D. Carbonell, D. Philippen, M.Y. Haller, E. Frank. Development and validation of mathematical model for ice storages with heat exchangers that can be de-iced. *Solar World Congress 2013. The International Solar Energy Society (ISES). Cancún, Mexico*. 2013. Pp. 2342–2352.
14. *Rekomendacii po proektirovaniyu i montazhu sistemy Vitofriocal* [Recommendations for the planning and installation of the Vitofriocal system]. Viessmann Climate Solutions SE. Moscow. 2018. 40 p. [In Russian]
15. B.A. Hristenko. *Proektirovanie ldoakkumuljatora i vnedrenie tehnologii v sistemu teplosnabzhenija sushhestvujushhego ob'ekta: Magis. diss.* [Designing an ice storage device and introducing technology into the heat supply system of an existing facility. Final work for the Master's qualification]. Moscow. NIU "MJeI" [National Research University "Moscow Power Engineering Institute"]. 2020. 87 p. [In Russian]
16. B.A. Hristenko, D.A. Kruglikov, V.Ju. Chajkin, V.A. Petrov, I.A. Sultanguzin. *Proektirovanie ldoakkumuljatora i vnedrenie tehnologii v sistemu teplosnabzhenija zdaniya* [Designing an ice storage device and introducing technology into the building's heat supply system]. *Jenergoberezenie — teorija i praktika: Trudy X Mezhd. shkoly-seminara molodykh uchenykh i specialistov* [Energy saving: theory and practice. Proc. of the X International School-Seminar for Young Scientists and Specialists]. Moscow. NIU "MJeI" [National Research University "Moscow Power Engineering Institute"]. October 19–23, 2020. Kursk. *Izd-vo "Universitetskaja kniga"* ["University book" Publishers]. 2020. Pp. 173–179. [In Russian]
17. Ju.V. Javorovskij, I.A. Sultanguzin, D.A. Kruglikov, I.D. Kaljakin, T.V. Yatsyuk. *Sravnenie rezul'tatov jenergeticheskogo modelirovanija zhilogo doma s pomoshh'ju raznykh programnykh sredstv* [Comparison of the results of energy modeling of a residential building using different software]. *Vestnik MJeI* [Bulletin of Moscow Power Engineering Institute]. 2020. No. 3. Pp. 31–39. [In Russian]
18. I.A. Sultanguzin, D.A. Kruglikov, Ju.V. Javorovskij, E.V. Zhigulina, I.D. Kaljakin, A.V. Govorin, T.V. Yatsyuk, A.I. Barten'ev, V.G. Hromchenkov. *Primenenie BIM-, BEM- i CFD-tehnologij dlja proektirovanija, stroitel'stva i jekspluatacii jenergoeffektivnogo doma* [Application of BIM, BEM and CFD technologies for the design, construction and operation of an energy efficient house]. *Zhurnal Santehnika, otoplenie, kondicionirovanie (SOK)* [Journal of Plumbing. Heating. Ventilation]. 2019. No. 9. Pp. 36–42. [In Russian]
19. T.V. Yatsyuk, I.A. Sultanguzin, V.Ju. Chajkin, D.A. Kruglikov, Ju.V. Javorovskij, B.A. Hristenko. *BIM-modelirovanie dlja zhiznennogo cikla zdaniya: realii sovremennosti i potrebnosti razvitiya v Rossii* [BIM modeling for the life cycle of a building: modern realities and development needs in Russia]. *Zhurnal Santehnika, otoplenie, kondicionirovanie (SOK)* [Journal of Plumbing. Heating. Ventilation]. 2021. No. 2. Pp. 30–39. [In Russian]
20. D.A. Kruglikov. *Sovremennyy kompleksnyj podhod k proektirovaniyu, stroitel'stvu i jekspluatacii jenergoeffektivnykh domov na osnove BIM-, BEM- i CFD-tehnologij: Magist. diss.* [A modern integrated approach to the design, construction and operation of energy efficient houses based on BIM, BEM and CFD technologies. Final work for the Master's qualification]. Moscow. NIU "MJeI" [National Research University "Moscow Power Engineering Institute"]. 2019. 142 p. [In Russian]
21. U. Fischer, D. Tannert, A. Voigt, Ch. Ziem, H.-J. Krautz. Renewable energy storage by hydrogen production from water electrolysis. *Technical and Economic Aspects of Renewable Energies — Know-How Transfer as Development Opportunity for Southern Europe*. Berlin, Germany. 2016. Pp. 118–126.
22. V. Sidorovich. *Avtonomnyy dom — solnechnaja jelektrostantsija pljus vodorod* [Autonomous house — solar power plant plus hydrogen]. "RenEn". December 22, 2016. Web-source: renew.ru. Access data: February 12, 2021. [In Russian]
23. M.L. Sweet, J.T. Jr. McLeskey. Numerical simulation of underground seasonal solar thermal energy storage (SSTES) for a single family dwelling using TRNSYS. *Solar Energy*. 2012. Vol. 86. Pp. 289–300.