

Применение BIM-, BEM- и CFD-технологий для проектирования, строительства и эксплуатации энергоэффективного дома*

Рецензия эксперта на статью получена 27.03.2019 [Expert review on the article received Mart 27, 2019].

Проблемы строительства энергоэффективного дома

Идея строительства энергоэффективных домов с минимально возможным потреблением энергии «виталя в воздухе» ещё в 1980-х годах. Впервые расчёты дома без отопления были представлены Вольфгангом Файстом и Бо Адамсоном в климатических условиях Германии в 1988 году [1–4], в дальнейшем данный замысел стал называться концепцией «пассивного» дома. В России интерес к этой теме активно развивается последнее десятилетие, были опубликованы работы по исследованию и разработке концепций «домов с нулевым энергопотреблением» [5–9].

Основными критериями «пассивного» дома являются [1–3]: удельный расход тепловой энергии на отопление не более 15 кВт·ч/(м²·год); кратность воздухообмена при разности давлений 50 Па наружного и внутреннего воздуха $n_{50} \leq 0,6 \text{ ч}^{-1}$; общий расход первичной энергии не более 120 кВт·ч/(м²·год); удельная отопительная нагрузка не выше 10 Вт/м².

Однако в России климат более суровый, чем в Германии, поэтому в нашей стране пока нет объектов, которые по всем критериям удовлетворяли бы стандарту «пассивного» дома. Однако уже есть «активные» здания, которые компенсируют более высокое потребление энергоресурсов за счёт использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ) [10].

Относительно легкодоступных запасов природного газа в России остаётся чуть более чем на 50 лет [11]. В этих условиях строить здания на сотни лет, ориентируясь только на отопление природным газом, было бы не совсем разумно. Перефразируя слова Д.И. Менделеева, ещё в XIX веке

В России климат более суровый, чем в Германии, поэтому в России пока нет объектов, которые по всем критериям удовлетворяли бы стандарту «пассивного» дома. Однако уже есть «активные» здания, которые компенсируют более высокое потребление энергоресурсов за счёт ВИЭ

сказавшего, что «сжигать нефть — всё равно что топить ассигнациями», то же самое в XXI веке можно сказать о природном газе. Природный газ есть достояние нынешнего и будущих поколений.

Ситуация усугубляется также и тем, что, согласно испытаниям [12], термическое сопротивление стен современных зданий (99 % панельных и более 90 % зданий с вентилируемым фасадом) не соответствует проекту и нормативным требованиям. Большинство этих зданий имеет высокие тепловые потери через ограждающую оболочку. Теплоснабжение значительной части из них осуществляется от котельных, которые недостаточно эффективно используют такой ценный вид топлива, как природный газ. В ближайшие десятилетия потребуются огромные капитальные вложения на реконструкцию жилых зданий, поэтому принятие правильных решений при строительстве и реконструкции — это вопрос энергетической безопасности страны. Использование старых технологий в современном строительстве может привести к коллапсу энергетической системы в будущем, так как ресурсы природного газа в отдалённой перспективе будут ограничены, и его сжигание станет чрезвычайно дорогим.

УДК 628.8:697.1:004.942. Научная специальность: 05.14.04.

Применение BIM-, BEM- и CFD-технологий для проектирования, строительства и эксплуатации энергоэффективного дома

Ильдар А. Султангузин, д.т.н., профессор (1); Дмитрий А. Кругликов, магистр (1); Татьяна В. Яцюк, инженер-архитектор (2); Иван Д. Калякин, аспирант (1); Юрий В. Яворовский, к.т.н., заведующий кафедрой промышленных теплоэнергетических систем (1); Алексей И. Бартев, магистр (1); Александр В. Говорин, аспирант (1); Екатерина В. Жигулина, к.т.н., доцент (1); Валерий Г. Хромченков, старший преподаватель; (1) — Национальный исследовательский университет Московский энергетический институт (НИУ «МЭИ»); (2) — ООО «Агентство проектного консалтинга «Содействие»

В статье представлена концепция и процесс комплексного проектирования, строительства и эксплуатации энергоэффективного дома в течение жизненного цикла на основе применения BIM-, BEM- и CFD-технологий. Задача комплексного проектирования — это создание дома с гармоничной архитектурой и минимальными затратами энергоресурсов на поддержание комфортного микроклимата, в том числе с использованием возобновляемых источников энергии. В статье показана эффективность применения комплексного подхода в проектировании дома, приближенного к стандарту «пассивного» дома (Passive House).

Ключевые слова: ArchiCAD, BIM, BEM, CFD, «пассивный» дом, PHPP, энергоэффективность, энергосбережение, вентиляция, рекуперация, тепловой насос, теплоаккумулятор, солнечный коллектор, солнечная батарея.

УДК 628.8:697.1:004.942. Number of scientific specialty: 05.14.04.

Application of BIM-, BIM- and CFD-technologies for design, construction and operation of an energy-efficient house

Ildar A. Sultanguzin, Doctor of Technical Sciences, Professor (1); Dmitry A. Kruglikov, master (1); Tatiana V. Yatsyuk, Engineer-Architect (2); Ivan D. Kalyakin, postgraduate student (1); Yuri V. Yavorovsky, PhD, Head of the Department of Industrial Heat and Power Systems (1); Alexey I. Bartenev, master (1); Alexander V. Govorin, postgraduate student (1); Ekaterina V. Zhigulina, PhD, Associate Professor (1); Valery G. Khromchenkov, Senior Lecturer; (1) — National Research University "Moscow Power Engineering Institute" (NRU "MPEI"); (2) — "Project consulting Agency "Assistance", LLC

The article presents the concept and the process of integrated design, construction and operation of an energy-efficient house during the life cycle based on the use of BIM, BEM and CFD technologies. The task of complex design is to create a house with harmonious architecture and with minimal energy costs to maintain a comfortable microclimate, including using renewable energy sources. The article shows the effectiveness of the use of an integrated approach in the design of a house close to the Passive House standard.

Key words: ArchiCAD, BIM (Building Information Model), BEM (Building Energy Modeling), CFD (Computational Fluid Dynamics), Passive House, PHPP, energy efficiency, energy saving, ventilation, recuperation, heat pump, heat accumulator, solar collector, solar battery.

В связи с этим необходимо найти обоснованные решения строительства энергоэффективных зданий, которые бы решали задачи комфортного проживания граждан страны, эффективного использования ресурсов, внедрения передовых технологий с использованием альтернативных источников энергии.

В книге [13] излагается концепция Третьей промышленной революции, которая основывалась бы на пяти столпах: *«переход на возобновляемые источники энергии; превращение всех зданий в мини-электростанции, вырабатывающие электроэнергию в месте её потребления; использование технологий в каждом здании для аккумулирования периодически генерируемой энергии; использование интернет-технологий для превращения энергосистемы каждого континента в интеллектуальную электросеть; перевод автомобильного парка на электромобили, которые могут получать энергию от интеллектуальной континентальной электросети и отдавать избытки в сеть»*. Данная концепция представляется вполне разумной для XXI века.

Цель работы заключается в построении энергоэффективного здания с минимальным потреблением энергии в течение жизненного цикла «от колыбели до могилы» (From the Cradle to the Grave), исчисляемого как минимум в 100 лет.

В 2014 году Национальным объединением проектировщиков была разработана методика расчёта жизненного цикла жилого здания [14], согласно которой можно было бы объективно сравнивать строительство энергоэффективных зданий с традиционными.

В работе [15] показано, что применение технологии информационного моделирования здания Building Information Modeling (BIM) позволяет быстро проектировать и строить энергоэффективные дома, затем их эффективно эксплуатировать, а демонтировать и утилизировать в конце установленного жизненного цикла.

Основные проектные решения для применения BIM-технологии

Форма дома спроектирована по внешним размерам, близким к кубу, для снижения теплопотерь здания через наружную поверхность дома: длина здания 12 м, ширина — 11 м, высота конька крыши над уровнем земли — 10 м.

Крыша двускатная, площадь крыши с южной стороны составляет 130 м² для размещения солнечных коллекторов и солнечных батарей. Веранда под крышей с южной стороны имеет размеры 12 × 3 м = 36 м². Летом навес верандой

защищает здание от солнечного перегрева, а в зимний период при низком солнце солнечные лучи свободно проникают внутрь дома через окно и стеклянную дверь. Обустройство веранды с навесом с южной стороны отличает данное рассматриваемое здание от традиционных «пассивных» домов, у которых большинство окон обращено на юг для увеличения теплопритока через них зимой, однако при отсутствии решений по защите дома от перегрева возникают сложности с охлаждением его летом.



Утепление крыши выполнено древесным волокном Steico Zell толщиной 30 см (с высокой теплоёмкостью для поддержания комфортных температур в летний период), а также негорючим и экологичным материалом URSA PureOne толщиной 15 см (стекловолокном с акриловым связующим, имеющим сертификат для использования в детских и медицинских учреждениях). Расчётный коэффициент термического сопротивления крыши составил 12 м²·К/Вт [16].

Окна являются наиболее слабым звеном в оболочке здания, поэтому выбор окон осуществлялся путём анализа характеристик стеклопакета и профиля.

Окна и стеклянные двери выбирались на основе тендера из более чем десяти вариантов. В результате были выбраны ПВХ-окна фирмы Deckeunink с утеплённым профилем Eforte и двухкамерным стеклопакетом, заполненным аргоном. Стёкла этих окон имеют два напыления: энергосберегающее и мультифункциональное (для защиты от перегрева летом и утепления зимой). Коэффициент термического сопротивления стеклопакетов составил 1,67 м²·К/Вт, а профиля — 1,05 м²·К/Вт, что в два-три раза лучше обычных окон.

Для утепления внешних стен был выбран минерально-ватный утеплитель с вентилируемым фасадом, который позволяет равномерно со всех сторон удалять влагу из здания через воздушный зазор. В качестве внешней защиты стен здания были выбраны фиброцементные панели KMEW толщиной 16 и 18 мм, срок службы которых составляет более 50 лет. Для их крепления применялась металлическая вертикальная Т-образная подсистема креплений «Альт-фасад».

Расчёты показали, что срок окупаемости тепловой изоляции составляет около девяти лет. Согласно [17], при сроке эксплуатации 100 лет срок окупаемости теплоизоляции в 10–20 лет считается вполне приемлемым и выгодным.

Не следует путать данные показатели с критериями, которыми оперируют некоторые предприниматели, рассчитывающие на значительно более короткие сроки (до пяти лет), так как они сами не знают, будет ли существовать их фирма более этого срока. Человек строит энергоэффективный дом и намеревается прожить в нём гораздо больше пятилетнего срока, поэтому процесс проектирования для создания таких зданий должен учитывать весь жизненный цикл.

Расчёты показали, что срок окупаемости тепловой изоляции составляет около девяти лет. Согласно [17] при сроке эксплуатации 100 лет срок окупаемости теплоизоляции в 10–20 лет считается вполне приемлемым и выгодным. Не следует путать эти показатели с критериями, которыми оперируют предприниматели, которые рассчитывают на более короткие сроки

Применение BIM-технологии

Комплексное проектирование здания включает в себя все этапы создания пространственной модели здания с оптимальными характеристиками его оболочки и эффективным энергопотреблением, а также наблюдение результатов эксплуатации после строительства объекта, то есть охватывает все этапы жизненного цикла здания. Именно связка технологий BIM и энергомоделирования зданий BEM (Building Energy Modeling) в проектировании позволяет продумать все процессы внутри смоделированного пространства и внедрить их на практике. Программный комплекс ArchiCAD позволяет структурировать все элементы модели в определённые группы, анализировать их в отдельности и совместно, исключая коллизии, одновременно прорабатывая пространственные элементы всех разделов рабочей документации в одной системе.

BIM-модель экспериментального энергоэффективного дома была создана в программе ArchiCAD. На первом этапе были разработаны планировочно-пространственные решения с учётом предварительного размещения оборудования и мебели, при этом были учтены потребности в жилых и технических пространствах, продумано расположение зон относительно друг друга с целью минимизации времени перехода из одного помещения в другое, учтены входные группы

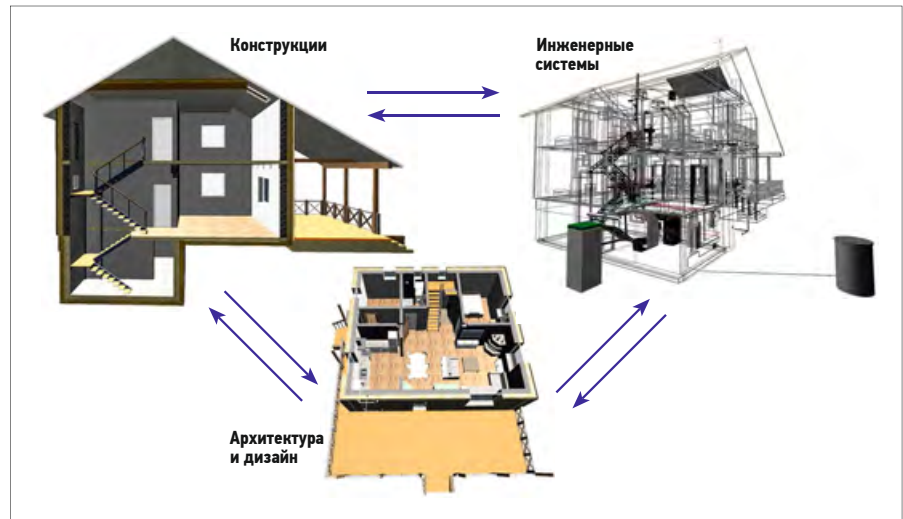


Рис. 1. BIM-проектирование энергоэффективного дома в ArchiCAD 22

относительно участка, дорожек соседних домов и основной дороги, учтено расположение сторон света. При проектировании гармоничного и энергоэффективного пространства требования получают разнонаправленными и порой взаимо-конфликтными [18, 19], поэтому стояла задача уравновесить все требования в одной модели посредством диалога специалистов разных направлений, объединённых в одну команду. Техничко-экономические показатели здания приведены в табл. 1.

Концепция планировочно-пространственных решений стала основой для дальнейшей разработки рабочей документации и дизайн-проекта. Последовательность и взаимосвязь этапов проектирования отражена на рис. 1, где задачи

выбора архитектуры и дизайна здания, его конструкции, а также инженерной системы решаются и уточняются в итерационном процессе.

На базе архитектурного проекта спроектированы конструктивный и инженерный разделы дома согласно выбранным параметрам тепловой оболочки и инженерного оборудования. В ходе проектных работ выбиралось наиболее удобное расположение инженерного оборудования и трасс отопления, вентиляции, подачи и отвода воды и хозяйственно-бытовых стоков. В программном комплексе ArchiCAD все элементы структурированы согласно слоям, детализация элементов составила LOD 300.

Техничко-экономические показатели здания

табл. 1

Наименование	Количество
Площадь застройки / из них площадь застройки здания / крыльца, пандусы, веранды, приямки, м ²	115 / 115 / 56
Общая площадь здания / наземной части / подземной части, м ²	205 / 165 / 40
Количество проживающих, чел.	4–5
Строительный объём / в том числе наземной части / подземной части, м ³	962 / 829 / 133
Объёмный коэффициент, м	4,6

Конструктивные и отделочные материалы дома

табл. 2

Тип материала	Материал
Несущая конструкция здания	Железобетонные конструкции фундамента, железобетонные армопояса
Ограждающие конструкции здания	Газобетонный блок Drauber D500 300 × 200 × 600 мм
Утепление пола первого этажа	Шведская плита «Технониколь» Carbon Eco 400 SP 200 мм
Утепление стен подвала	Пенополистирол «Технониколь» Carbon Eco 200 мм
Окна	Профиль ПВХ Deckeunink Eforte / Стеклопакет двухкамерный — аргон 90 %; напыления энергосберегающее и мультифункциональное
Отделочные и облицовочные материалы / Система крепления фасада	Навесной вентфасад с облицовкой фиброцементными панелями KMEW толщиной 18 и 16 мм / Вертикальная Т-образная подсистема «Альт-Фасад»
Материалы покрытия полов	Паркетная доска толщиной 7 мм / Керамическая плитка
Тёплый пол	Трубы Уропор
Кровельные материалы	Мягкая черепица Shinglas «Кантри Аризона»
Перегородки (огражд. конструкции)	Газобетонный блок Drauber D500 200 × 200 × 600 мм
Теплоизоляционные материалы (ограждающие стены) / Крепление	Минвата ISOROC «Изолайт» 50 кг/м ³ 200 мм / Минвата ISOROC «Изовент-Л» 80 кг/м ³ 50 мм / Стеклопластиковые дюбели Tech-KREP IZS 300 и 260 мм
Теплоизоляционные материалы (крыша)	Задувная теплоизоляция из древесного волокна Steico Zell 300 мм, плиты URSA Pure One 150 мм

Данная BIM-модель экспериментального энергоэффективного здания была создана в программном комплексе ArchiCAD. Сначала на первом этапе были разработаны необходимые планировочно-пространственные решения

Все конструктивные элементы и отделочные материалы, которые применялись в BIM-модели, приведены в табл. 2.

В исходной модели было расставлено оборудование и произведена разводка трасс оптимальным способом (рис. 2).

Источник тепла для отопления и подогрева ГВС — геотермальный тепловой насос и солнечные коллектора. Для работы оборудования используется электричество от распределительной электросети напряжением 380 В.

Система отопления: радиаторы в подвальном помещении, тёплый пол на первом этаже и поверхностное потолочное отопление на втором этаже, которое зимой служит для отопления, а летом — для охлаждения помещений.



Рис. 2. Инженерное оборудование с разводкой трасс

Состав инженерного оборудования BIM-модели таков:

1. Тепловой насос Buderus — модель Logatherm WPS 11.
2. Солнечные коллекторы модели Jysolar (четыре штуки).
3. Теплоаккумулятор JÄSPI модели GTV Teknik RD.
4. Теплоаккумулирующий камин Tulikivi модели KTU 1010/92 с КПД = 91 %. Теплотехнические испытания камина показали, что для достижения заданного КПД требуется закладывать не две порции по 4 кг дров (в этом случае температура уходящих газов превышает величину 200°C и КПД снижается до 70%), а четыре закладки древесных брикетов по 2 кг, при этом температура уходящих газов остаётся на уровне 100°C, тогда КПД находится на уровне 90 % и более. Кроме того, достигается экологический эффект — снижается образование NO_x и CO, а также сжигание древесных брикетов позволяет иметь практически нулевой баланс по выбросам парниковых газов.
5. Приточно-вытяжная установка (ПВУ) с рекуперацией тепла Turkov Zenit 550 НЕСО с КПД, равным 79 %.
6. Низкотемпературная система отопления первого этажа, тёплый пол с улучшенными характеристиками. Работа в температурном диапазоне теплоносителя от 22 до 30°C.
7. Система потолочного отопления и охлаждения второго этажа.
8. Система подогрева воздуха после рекуператора системы вентиляции.
9. Все системы объединены в гибридную систему и работают на получение максимального эффекта по энергетической эффективности.

Применение ВЕМ-технологии

Применение ВЕМ-технологии основывалось на расчётах энергопотребления здания с помощью программ Passive House Planning Package (PHPP) и Design PH.

Программы PHPP и Design PH позволяют моделировать все составляющие системы энергоснабжения. С помощью этого инструмента проектирования можно задавать параметры оборудования, а также климатические условия, режимы эксплуатации здания, характеристики оболочки и прочие параметры, и рассчитывать как потребление энергии оборудованием, так и её выработку.

Выбор толщины дополнительной теплоизоляции под вентилируемым фасадом определялся на основе вычислений по программе PHPP. Расчёты показали, что для того, чтобы термическое сопротивление стен составило 10 м²·К/Вт (что и требуется для «пассивного» дома), необходи-

мо иметь теплоизоляцию из базальтового волокна толщиной 25 см, что было применено для данного дома. Для крепления теплоизоляции было использовано примерно 4000 стеклопластиковых дюбелей, которые не являются «мостиками холода» в стенах, в отличие от металлических.

В работе сравнивались пять вариантов состава оборудования: грунтовый тепловой насос, воздушный тепловой насос и газовый котёл. Для воздушного теплового насоса рассматривались два источника низкопотенциальной теплоты: наружный воздух и удаляемый из помещений после рекуператора. Котёл рассматривался при отсутствии ВИЭ и рекуперации в системе вентиляции. Грунтовый тепловой насос рассматривался при шести и при 36 солнечных панелях. Сравнение вариантов проводилось по годовому энергопотреблению системой в целом и основным оборудованием.

Как видно из табл. 3, самой эффективной системой является система с грунтовым тепловым насосом и 36 солнечными панелями [20, 21]. Следует отметить, что с тепловым насосом используются вертикальные зонды. Здесь мы имеем нулевое по балансу энергопотребление всей системы в целом.

Расчёт энергобаланса дома производился для полученного пространства в программном комплексе PHPP (рис. 3).

Рис. 3. Сравнение вариантов состава оборудования

табл. 3

Параметр	Грунтовый ТН (36 солн. батарей)	Грунтовый ТН (6 солн. батарей)	Газовый котёл	Компактный ТН (удаляемый «воздух-вода»)	Воздушный ТН (наружный «воздух-вода»)
Потребление энергии в условном топливе оборудованием, т.у.т./год	0,961	1,072	1,522	1,326	1,754
Потребление первичной энергии оборудованием, кВт·ч/год	7248	8089	13099	10004	13233
Удельное потребление первичной энергии системой, кВт·ч/(м ² ·год)	105	108	126	113	135
Удельное потребление энергии на отопление, кВт·ч/(м ² ·год)	37	42	46	42	41

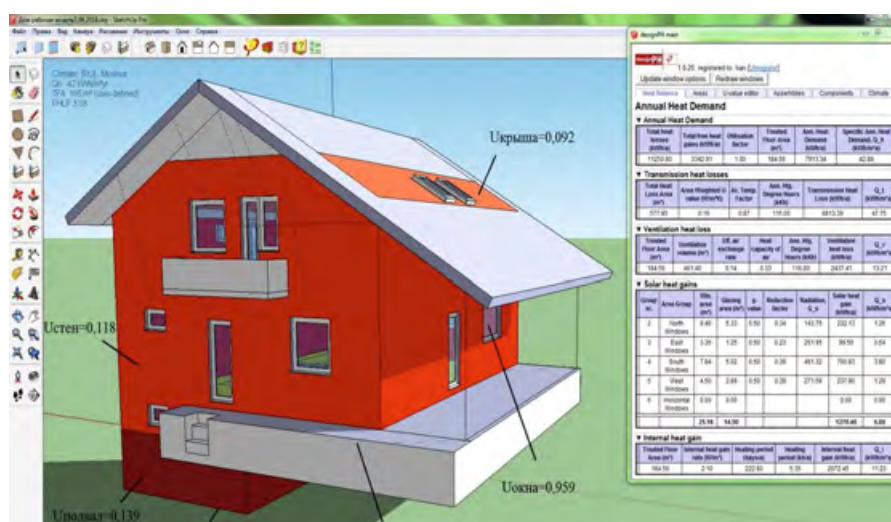


Рис. 3. Расчет энергобаланса дома в программном комплексе PHPP

Рассчитаны теплопотери (через ограждающие конструкции — окна, стены, пол, кровлю) и теплопоступления (от солнечной радиации, людей, освещения и оборудования). По рассчитанной нагрузке на отопление подобрано инженерное оборудование для нескольких вариантов оболочки дома. После нескольких итераций вариантов оболочки и инженерного оборудования нагрузка на отопление была снижена с 42 до 37 кВт·ч/(м²·год).

Для аккумуляции электроэнергии, вырабатываемой солнечными батареями, будут использоваться аккумуляторные батареи, для аккумуляции тепловой энергии используется бак-аккумулятор горячей воды. В тёплый период тепловой насос работать не будет, для покрытия нагрузки от системы кондиционирования воздуха будут использоваться грунтовые зонды.

Для достижения нулевого энергопотребления дома требуется 36 солнечных панелей номинальной мощностью 320 Вт и четыре солнечных коллектора площадью 2 м² при соответствующих характеристиках теплоизоляции [20].

Применение CFD-технологии для моделирования системы вентиляции

В связи с тем, что в энергоэффективном доме инфильтрация воздуха через окна и наружные стены сведена к минимуму, остро стоит вопрос вентиляции дома. Тепловые потери на вентиляцию в «пассивных» домах — одна из наибольших составляющих данных потерь [20], поэтому для вентиляции дома была подобрана приточно-вытяжная установка с рекуперацией тепла и влаги Turkov Zenit 550 HECO. Для догрева воздуха после рекуператора (в холодный период) и для его охлаждения (в летний период) в приточный воздуховод установили канальный водяной теплообменник Zilon ZWS-W 400 × 200/3.

Догрев воздуха осуществляется горячей водой из теплоаккумулятора, а охлаждение — холодной водой, которая будет

охлаждаться через геотермальный контур теплового насоса.

В табл. 4 приведены расчётные расходы приточного воздуха по помещениям дома. Подача свежего воздуха в жилые помещения первого этажа осуществляется через потолочные анемостаты, а в жилые помещения второго этажа — через напольные решётки, расположенные вдоль внешних стен дома, под окнами. Вытяжка первого и второго этажа организована через санузлы и вытяжные решётки у лестничного холла.



Магистралей вентиляционной сети в BIM-модели энергоэффективного дома выполнены из стальных оцинкованных воздуховодов, ответвления от магистрального воздуховода — гибкими шумопоглощающими воздуховодами.

Применение гибких шумопоглощающих воздуховодов совместно с шумоглушителями на подаче в дом и на выбросе воздуха на улицу позволило снизить шум в вентиляционной сети.

Для анализа температурных полей и полей скорости по помещениям дома BIM-модель экспортировалась в пакет

вычислительной гидродинамики Computational Fluid Dynamics (CFD) — ANSYS Fluent. Численное моделирование в CFD решает дифференциальные уравнения аэродинамики и теплофизики в частных производных методом конечных элементов [25, 26]. Суть метода конечных элементов заключается в разбиении расчётной модели на дискретные ячейки, в которых производятся расчёты.

В созданной математической модели для описания физических процессов (выход турбулентного потока воздуха из

воздухораспределителей, взаимодействие потока приточного воздуха с воздухом рабочей зоны) и элементарных способов переноса теплоты были использованы следующие дифференциальные уравнения гидродинамики и теплообмена:

- уравнения движения или неизотермического течения вязкого газа в декартовых координатах (k - ϵ -модель турбулентности);
- уравнение неразрывности (сохранения массы);
- уравнение энергии (переноса тепла) в прямоугольных декартовых координатах.

Сетка конечных элементов уплотняется в местах выхода воздуха из воздухо-распределителей, в местах удаления воздуха через вытяжные отверстия, у радиаторов в подвале.

В статье проведено моделирование вентиляции подвала. Были заданы определённые граничные условия: скорость воздуха на выходе из приточных воздуховодов, температура приточного воздуха, температуры нагретых поверхностей (радиаторы, котельное оборудование), температура оконного проёма.

Граничное условие на вытяжке задано через давление.

• • • Расчётные расходы приточного воздуха по помещениям дома

табл. 4

Помещение	Объём помещения, м³	Расход приточного воздуха, м³/ч	Кратность воздухообмена, ч⁻¹
Техкомната подвала	52	25	0,48
Кладовка подвала	32	25	0,78
Техкомната — гардероб первого этажа	23	50	2,17
Кухня — гостиная	120	100	0,83
Комната 1	36	60	1,66
Комната 2	35	60	1,71
Комната 3	35	60	1,71
Комната 4	37	60	1,62
Зал	87	110	1,26
Суммарный расход, м³/ч		550	

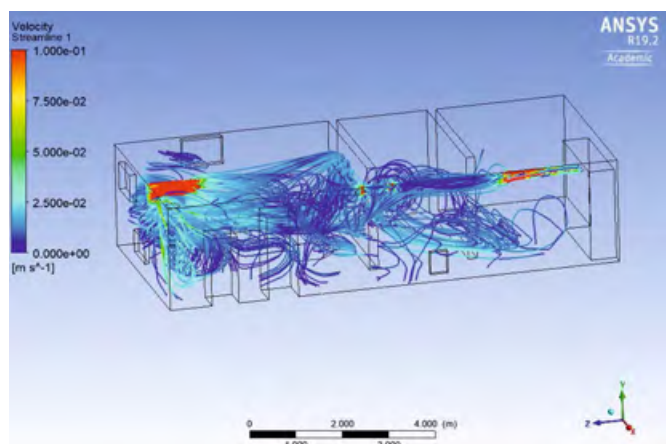


Рис. 4. Линии тока в помещении, смоделированные в Ansys Fluent

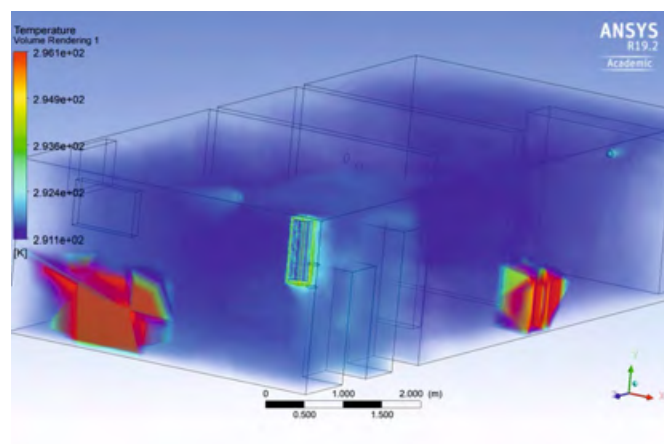


Рис. 5. Моделирование температурных полей помещения в Ansys Fluent

На рис. 4 приведено изображение линий тока в подвальном помещении. На рис. 5 приведено изображение температурных потоков в объеме подвального помещения. Анализ результатов расчёта позволяет оценить эффективность вентиляции, выбрать наиболее оптимальные точки распределения и удаления воздуха. По результатам CFD-моделирования вентиляции подвала было принято решение о переносе точки притока в кладовке в край помещения.

В ходе эксплуатации дома производится измерение фактических параметров для сравнения с расчётными данными и управлением микроклиматом.

Измеряемые показатели: температура внутреннего воздуха на разной высоте в разных помещениях, расходы теплоносителей в контурах отопительного оборудования, температуры поверхностей, расходы и температуры жидкостей на входе и выходе инженерного оборудования, расход воздуха в вентиляционной системе, температуры воздуха на входе и выходе из рекуператора.

Эксплуатация здания

За первый отопительный сезон, когда происходила сушка подвала и стен здания, расход электроэнергии составил 4,9 тыс. кВт·ч, и затраты на покупку электроэнергии для инженерной системы, включая тепловой насос и циркуляционные насосы, составили 17 тыс. руб. В октябре-ноябре работали только три радиаторные батареи в подвале, обогревая весь дом. В декабре залили и высушивали тёплый пол на первом этаже. В январе включили тёплый пол. В феврале установили оптимальный режим отопления с коэффициентом трансформации теплового насоса более 4,0. В апреле подключили солнечные коллекторы, которые позволили повысить суммарный коэффициент трансформации до 6,0 и более (рис. 6).

С целью выявления «тепловых мостов» была проведена тепловизионная съёмка объекта. Видимые теплопотери наблюдались на стыке некоторых оконных рам со стенами, также «тепловой мост» существовал на первом этаже на стыке фасада стен и цокольного этажа [20]. Последующие работы позволили устранить эти недостатки. Повторное тепловизионное обследование показало хорошее состояние теплоизоляции фасада здания.

Основным источником теплоснабжения служит грунтовый тепловой насос. В рассматриваемом здании с помощью применения современных теплоизоляционных материалов, энергоэффективных окон и системы приточно-вытяжной вентиляции с рекуперацией теплоты удаляемого воздуха удалось достичь годового потребления тепловой энергии на отопление 7736 кВт·ч. За счёт возобновляемых источников энергии планируется генерация большей части тепловой энергии,

требуемой для системы горячего водоснабжения. Для выравнивания температурного градиента в помещении используется система «тёплый пол», что также уменьшает температуру теплоносителя по сравнению с традиционными отопительными приборами.

Следует отметить, что в настоящее время невозможно управлять по оптимальному критерию инженерной системой энергоэффективного дома без современных технологий «умного дома» и интернет-технологий [22, 23].

Мониторинг и управление совместной работой теплового насоса, солнечных коллекторов и аккумуляторных батарей осуществляется с помощью системы «Тепло-МОНИТОР» от компании «Гидро ЛОГО».

Для сравнения на рис. 6 показано, как работал тепловой насос 10 марта (13 включений) и 11 апреля (три пуска), что было обусловлено эффективной работой солнечных коллекторов в апреле месяце.

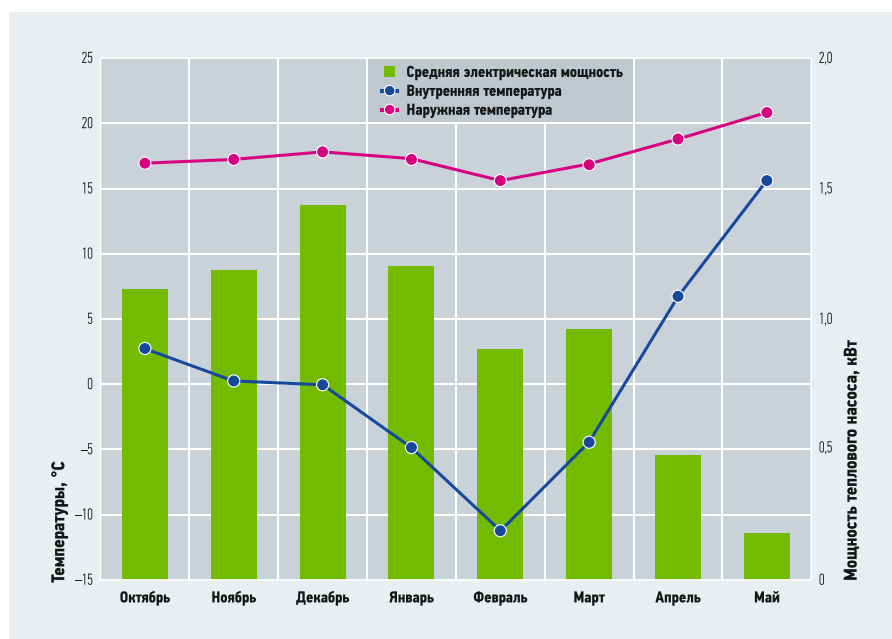


Рис. 6. Потребляемая мощность теплового насоса, наружная и внутренняя температуры воздуха в отопительный сезон 2017–2018 годов

Данная система служит прежде всего для управления системой энергоснабжения здания. Для полного сбора данных о температурах воздуха в различных помещениях применяется система ПТК «ПолиТЭР» компании НПП «Политех-Автоматика» [24]. Система, оснащённая беспроводными температурными датчиками, начала работу в июне 2018 года. На первом этаже сохранялась комфортная температура на уровне 23–24°C, а на втором этаже, несмотря на хорошую теплоизоляцию крыши, температура повышалась до 26°C, в подвале температура воздуха составляла 17°C, что было вызвано тем, что солнечные коллекторы через теплообменник и зонды нагревали грунт, температура которого поднялась до 12°C.

В связи с тем, что второй этаж с тремя спальнями перегревался, возник вопрос об охлаждении потолочными капиллярными матами, которые в зимний период будут использоваться для отопления.

Также встал вопрос об использовании ПВУ с рекуперацией тепла в качестве воздушного охладителя в летний период. В летний период капиллярные маты и приточно-вытяжная установка с рекуперацией тепла будут получать холод через теплообменник, связанный с контуром грунтовых зондов, при этом нагревая землю для использования тепловой энергии в зимний период. В зимний период капиллярные маты и ПВУ Turkov Zenit 550 НЕСО будут нагреваться от теплового насоса через верхнюю часть 500-литрового аккумулятора JÄSPI.



В настоящее время реализуется проект «цифровизации» на основе построения энергетического баланса за различные периоды времени (час, сутки, месяц и т.д.) в рамках расширения системы ПТК «ПолиТЭР» с установкой 15 расходомеров, 20 термопар и шести электросчётчиков для последующего анализа и выбора оптимальных режимов энергоснабжения. Планируемое развитие проекта связано с переходом на автономное существование с нулевым энергопотреблением без вредного воздействия на окружающую среду.

Заключение

Данный проект совместными усилиями студентов, аспирантов и преподавателей используется прежде всего для образовательных целей: проведение энергетического обследования здания, изучение работы инженерного оборудования и его воздействия на окружающую среду. Результаты исследований публикуются в печати, оформляются в виде выпускных и научно-исследовательских работ студентов, а также в виде разделов диссертационных работ.

При проектировании, строительстве и эксплуатации энергоэффективных зданий рекомендуется применять современные методы BIM-, BEM- и CFD-моделирования в комплексе.

Последовательность и взаимосвязь этапов проектирования здания или сооружения при BIM-моделировании включает в себя задачи выбора архитектурных и дизайнерских решений, конструкции здания и его инженерных систем с учётом множества факторов.

BEM-моделирование на основе применения программ PHPP и Design PH позволяет по рассчитанной тепловой нагрузке подобрать оборудование инженерных систем.

Применение технологий вычислительной гидродинамики (CFD) для моделирования системы вентиляции позволило рассчитать траекторию течения воздуха и распределения температур с целью поддержания комфортной среды в рассматриваемом помещении. ●

1. Файст В. Основные положения по проектированию «пассивных» домов. — М.: Континпринт, 2015. 144 с.
2. Feist W., Schnieder J. Energy efficiency — a key to sustainable housing. European Physical Journal. Special Topics. 2009. Vol. 176. Pp. 141–153.
3. Feist W., Schnieder J., Dorer V., Haas A. Re-inventing air heating: Convenient and comfortable within the frame of the Passive House concept. Energy and Buildings. 2005. Vol. 37. Pp. 1186–1203.
4. Schütz W. Energy saving regulations in Germany, history — status — future. 3. Ingenieurtag 2016 der Fakultät Maschinenbau, Elektro- und Energiesysteme — GUS und Osteuropatag. NESEFF-Netzwerktreffen 2016. Tagungsband. Herausgeber: Prof. Sylvio Simon. Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg. November 14–15, 2016. Pp. 167–173.
5. Бродяч М.М., Ливчак В.И. Здание с близким к нулевому энергетическим балансом // АВОК, 2011. №5.
6. Елохов А.Е. «Пассивные» здания. Сравнительный анализ методик расчёта // Здания высоких технологий, лето 2013. С. 36–44.
7. Шилкин Н.В. Здания с нулевым энергопотреблением. Возможности и перспективы // Энергосбережение, 2015. №7. С. 4–6.
8. Табунчиков Ю.А., Бродяч М.М. Математическое моделирование и оптимизация тепловой эффективности зданий. — М.: АВОК-Пресс, 2002. 194 с.
9. Султангузин И.А., Яворовский Ю.В., Жигулина Е.В., Калякин И.Д., Говорин А.В., Кролин А.А., Гужов С.В. Развитие системы энергоснабжения студгородка МЭИ на основе концепции «зелёного» строительства // Журнал С.О.К., 2018. №1. С. 106–109.
10. Николаев Б.А. Первый активный дом // Точка опоры, 2015. №198.
11. BP Statistical Review of World Energy. June 2017. Pureprint Group Limited. London, UK. 2017. 49 p.
12. Крышов С.И., Курилок И.С. Проблемы экспертной оценки тепловой защиты зданий // Жилищное строительство, 2016. №7. С. 3–5.
13. Рифкин Дж. Третья промышленная революция: как горизонтальные взаимосвязи меняют энергетику, экономику и мир в целом. — М.: Альпина нон-фикшн, 2015. 410 с.
14. Методика расчёта жизненного цикла жилого здания с учётом стоимости совокупных затрат. — М.: НО-ПРИЗ, 2014. 72 с.
15. Талапов В.В. Жизненный цикл здания и его связь с внедрением технологии BIM [Электр. ресурс]. Портал «Строительный Эксперт». Оpubл.: 20.01.2017. Режим доступа: arDEXPERT.ru. Дата обраб.: 11.03.2019.
16. Говорин А.В., Султангузин И.А. Энергоэффективный жилой дом с минимальным потреблением энергии от внешних сетей (Ашукино, Московская область) / Мат. II Климатического Форума городов России «Возобновляемая энергетика: будущее рядом». — М.: ВДНХ, 2018. С. 18–21.
17. Габриель И., Ладенер Х. Реконструкция зданий по стандартам энергоэффективного дома. — СПб.: Изд-во «БХВ-Петербург», 2011. 480 с.
18. Дэй К. Места, где обитает душа: Архитектура и среда как лечебное средство. Пер. с англ. В.Л. Глазачева. — М.: Изд-во «Ладья», 2000. 280 с.
19. Lequenne Ph., Rigassi V. Habitat passif et basse consommation. France, 2011. 221 p. [In French]
20. 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-Netzwerktreffen 2016. Tagungsband. Herausgeber: Prof. Sylvio Simon. Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg. November 14–15, 2016. Pp. 8–12.
21. 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.
22. Шувалов Д.Г., Турков О.Ж., Кругликов Д.А., Султангузин И.А., Рудомазин В.В. Энергоэффективные системы вентиляции здания с рекуперацией тепла // Журнал С.О.К., 2018. №9. С. 88–96.
23. Sultanguzin I.A., Toefer H., Kalyakin I.D., Govorin A.V., Zhigulina E.V., Kurzanov S.Yu., Yavorovsky Yu.V. Mathematical modeling and control system of nearly zero energy building. Informatyka, Automatyka, Pomiar w Gospodarce i Ochronie Środowiska. 2018. No. 2. Pp. 21–24.
24. Абдуллин В.В., Шнайдер Д.А., Курзанов С.Ю., Яворовский Ю.В. Использование технологии «интернета вещей» в отоплении зданий: упреждающее управление, распределённый мониторинг, интеллектуальный балансировка // Журнал С.О.К., 2018. №8. С. 54–58.
25. ANSYS Fluent 14.0. Theory Guide. ANSYS, Inc. Southpointe. 2011. 862 p.
26. ANSYS Fluent 14.0. Tutorial Guide. ANSYS, Inc. Southpointe. 2011. 1146 p.

References — see page 94.

Application of BIM-, BIM- and CFD-technologies for design, construction and operation of an energy-efficient house. Pp. 36–42.

Ildar A. Sultanguzin, Doctor of Technical Sciences, Professor (1); **Dmitry A. Kruglikov**, master (1); **Tatiana V. Yatsyuk**, Engineer-Architect (2); **Ivan D. Kalyakin**, postgraduate student (1); **Yuri V. Yavorovsky**, PhD, Head of the Department of Industrial Heat and Power Systems (1); **Alexey I. Bartenev**, master (1); **Alexander V. Govorin**, postgraduate student (1); **Ekaterina V. Zhigulina**, PhD, Associate Professor (1); **Valery G. Khromchenkov**, Senior Lecturer; (1) — National Research University "Moscow Power Engineering Institute" (NRU "MPEI"); (2) — "Project consulting Agency "Assistance", LLC

1. Fajst V. *Osnovnye polozenija po proektirovaniu "passivnyh" domov* [The main provisions for the design of "passive" houses]. Moscow. *Kontiprint* ["Contiprint", LLC]. 2015. 144 p.
2. Feist W., Schnieder J. Energy efficiency — a key to sustainable housing. *European Physical Journal. Special Topics*. 2009. Vol. 176. Pp. 141–153.
3. Feist W., Schnieders J., Dorer V., Haas A. Re-inventing air heating: Convenient and comfortable within the frame of the Passive House concept. *Energy and Buildings*. 2005. Vol. 37. Pp. 1186–1203.
4. Schütz W. Energy saving regulations in Germany, history — status — future. 3. Ingenieurtag 2016 der Fakultät Maschinenbau, Elektro- und Energiesysteme — GUS und Osteuropatag. NESEFF-Netzwerktreffen 2016. Tagungsband. Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg, November 14–15, 2016. Pp. 167–173.
5. Brodach M.M., Livchak V.I. *Zdanie s blizkim k nulevomu jenergeticheskim balansom* [Building with energy balance close to zero]. AVOK [The Non-commercial partnership "Engineers for heating, ventilation, air conditioning, heat supply and construction thermal physics"]. 2011. No. 5.
6. Elovov A.E. "Passivnye" zdaniya. *Sravnitel'nyj analiz metodik rascheta* ["Passive" buildings. Comparative analysis of calculation methods]. *Zdaniya vysokih tehnologij* [The "High-tech buildings" Magazine]. The summer of 2013. Pp. 36–44.
7. Shilkin N.V. *Zdaniya s nulevym jenergotrebleniem. Vozmozhnosti i perspektivy* [Buildings with zero power consumption. Opportunities and prospects]. *Jenergoberezhenie* [The "Energy saving" Magazine]. 2015. No. 7. Pp. 4–6.
8. Tabunshnikov Ju.A., Brodach M.M. *Matematicheskoe modelirovanie i optimizacija teplovoj jeffektivnosti zdaniy* [Mathematical modeling and optimization of thermal efficiency of buildings]. Moscow. AVOK-Press [The Publishing House of the Non-commercial partnership "Engineers for heating, ventilation, air conditioning, heat supply and construction thermal physics"]. 2002. 194 p.
9. Sultanguzin I.A., Javorovskij Ju.V., Zhigulina E.V., Kaljakin I.D., Govorin A.V., Krolin A.A., Guzhov S.V. *Razvitie sistemy jenergosnabzhenija studgorodka MJeI na osnove koncepcii "zele-nogo" stroitel'stva* [The development of the power supply system of the campus of NRU "MPEI" on the basis of the concept of "green" construction]. *Zhurnal Santehnika, otoplenie, kondicionirovanie (S.O.K.)* [The Journal of Plumbing. Heating. Ventilation]. 2018. No. 1. Pp. 106–109.
10. Nikolaev B.A. *Pervyj aktivnyj dom* [The first active home]. *Tochka opory* ["The fulcrum" Magazine]. 2015. No. 198.
11. BP Statistical Review of World Energy, June 2017. Pureprint Group Limited. London, UK. 2017. 49 p.
12. Kryshov S.I., Kuriljuk I.S. *Problemy jekspertnoj ocenki teplovoj zashhity zdaniy* [The problems of expert assessment of thermal insulation of buildings]. *Zhilishhnoe stroitel'stvo* [The "Housing construction" Magazine]. 2016. No. 7. Pp. 3–5.
13. Rifkin Dzh. *Tret'ja promyshlennaja revolyucija: Kak gorizontaI'nye vzaimosvjazi menjajut jenergetiku, jekonomiku i mir v celom* [The third industrial revolution: how horizontal relationships change energy, the economy and the world as a whole]. Moscow. *Al'pina non-fikshn* [The "Alpina non-fiction" Publishing House]. 2015. 410 p.
14. *Metodika rascheta zhiznennogo cikla zhilogo zdaniya s uchetom stoimosti sovokupnyh zatrat* [The method of calculating the life cycle of a residential building, taking into account the cost]. Moscow. NOPRIZ [National Association of Prospectors and Designing Engineers]. 2014. 72 p.
15. Talapov V.V. *Zhiznennyj cikl zdaniya i ego svyaz' s vnedreniem tehnologii BIM* [The life cycle of the building and its relationship with the introduction of BIM technology]. *Portal "Stroitel'nyj Jekspert"* [The "Construction Expert" Portal]. Web-source: ardexpert.ru. Published: January 20, 2017. Access data: Mart 11, 2019.
16. Govorin A.V., Sultanguzin I.A. *Jenergojeffektivnyj zhiloy dom s minimal'nyim potreblen- niem jenerгии ot vneshnih setej (Ashukino, Moskovskaja oblast')* [Energy efficient residen- tial building with minimal power consumption from external networks (Ashukino, Mos- cow region)]. *Mat. II Klimaticheskogo Foruma gorodov Rossii "Vozobnovljaemaja jenerget- ika: budushhee rjadam"* [Proc. of the II Climate Forum of Russian Cities "Renewable En- ergy: the Future is Near"]. Moscow. VDNH [Exhibition of Achievements of the National Economy in Moscow]. 2018. Pp. 18–21.
17. Gabriel' I., Ladener H. *Rekonstrukcija zdaniy po standartam jenergojeffektivnogo doma* [Re- construction of buildings in accordance with the standards of an energy-efficient home]. St. Petersburg. *Izd-vo "BHV-Peterburg"* [The "BHV-Petersburg" Publishing House]. 2011. 480 p.
18. Dzej K. *Mesta, gde obitaet dusha: Arhitektura i sreda kak lechebnoe sredstvo* [Places where the soul lives: Architecture and environment as a healing tool]. Transl. from English by V.L. Glazychev. Moscow. *Izd-vo "Lad'ja"* [The "Ladya" Publishing House]. 2000. 280 p.
19. Lequenne Ph., Rigassi V. *Habitat passif et basse consommation*. France, 2011. 221 p. [In French]
20. Sultanguzin I.A., Kalyakin I.D., Govorin A.V., Khristenko B.A., Yavorovsky Yu.V. Optimi- zation of the energy efficient active house. 3. Ingenieurtag 2016 der Fakultät Maschinen- bau, Elektro- und Energiesysteme — GUS und Osteuropatag. NESEFF-Netzwerktreffen 2016. Tagungsband. Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg, No- vember 14–15, 2016. Pp. 8–12.

21. Sultanguzin I.A., Shjutc U., Kaljakin I.D., Govorin A.V., Javorovskij Ju.V., Zhigulina E.V., Hromchenkov V.G., Malahova A.A., Lancke B., Damen A. *Raschet, stroitel'stvo i obsledo- vanie fasada jenergojeffektivnogo doma* [Calculation, construction and inspection of the facade of an energy-efficient home]. *Stroitel'stvo i rekonstrukcija* [The "Construction and reconstruction" Magazine]. 2017. No. 4. Pp. 110–118.
22. Shuvalov D.G., Turkov O.Zh., Kruglikov D.A., Sultanguzin I.A., Rudomazin V.V. *Jenergo- jeffektivnye sistemy ventiljacii zdaniya s rekuperaciej tepla* [Energy efficient building ventila- tion systems with heat recovery]. *Zhurnal Santehnika, otoplenie, kondicionirovanie (S.O.K.)* [The Journal of Plumbing. Heating. Ventilation]. 2018. No. 9. Pp. 88–96.
23. Sultanguzin I.A., Toepfer H., Kalyakin I.D., Govorin A.V., Zhigulina E.V., Kurzanov S.Yu., Yavorovsky Yu.V. Mathematical modeling and control system of nearly zero energy build- ing. *Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska*. 2018. No. 2. Pp. 21–24.
24. Abdullin V.V., Shnajder D.A., Kurzanov S.Ju., Javorovskij Ju.V. *Ispol'zovanie tehnologii "in- terneta veshhej" v otoplenii zdaniy: uprezhdajushhee upravlenie, raspredelennyj monitor- ing, intellektual'naja balansirovka* [The use of technology "Internet of Things" in heating buildings: proactive management, distributed monitoring, intelligent balancing]. *Zhurnal Santehnika, otoplenie, kondicionirovanie (S.O.K.)* [The Journal of Plumbing. Heating. Ven- tilation]. 2018. No. 8. Pp. 54–58.
25. ANSYS Fluent 14.0. Theory Guide. ANSYS, Inc. Southpointe. 2011. 862 p.
26. ANSYS Fluent 14.0. Tutorial Guide. ANSYS, Inc. Southpointe. 2011. 1146 p.