

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОПОТЕРЬ ИНДИВИДУАЛЬНОГО ЖИЛОГО ДОМА, ПОСТРОЕННОГО С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕСТНЫХ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Е. В. КРЕСОВА¹⁾, Д. Ю. КУЖЕЛКО¹⁾, С. П. КУНДАС²⁾

¹⁾Белорусский государственный университет,
Международный государственный экологический институт им. А. Д. Сахарова,
ул. Долгобродская, 23/1, 220070, Минск, Беларусь

²⁾Белорусский национальный технический университет, пр. Независимости, 65, 220013, Минск, Беларусь

Исследуется эффективность применения новых теплоизоляционных материалов при их использовании в многослойных конструкциях. Обращается внимание на применение местных экологически чистых материалов для индивидуального строительства в соответствии с направлениями устойчивого развития, что поможет снизить в условиях Беларуси стоимость строительства жилья, потребление энергии и выбросы парниковых газов. Приводится анализ эффективности использования местных изоляционных материалов методами компьютерного моделирования и экспериментальных исследований. Численные 3D модели были разработаны с помощью программных пакетов SolidWorks и COMSOL Multiphysics. Для анализа эффективности тепловой изоляции местных экологически чистых материалов проводились экспериментальные тепловизионные исследования для домов каркасного типа со следующими ограждающими конструкциями: 1) тростник; 2) тростник и глина + солома; 3) тростник + эковата + льняные волокна; 4) кирпич (в качестве референтного материала). Полученные в результате измерения и численный расчет показали большую эффективность использования исследуемых материалов для изоляции, по сравнению с традиционным кирпичом.

Ключевые слова: местные экологически чистые теплоизоляционные материалы; строительство; энергоэффективность; численные и экспериментальные исследования.

STUDY OF THE HEAT LOSS OF AN INDIVIDUAL HOUSE BUILT WITH THE USE OF LOCAL THERMAL INSULATION MATERIALS

A. V. KRESAVA^a, D. YU. KUZHELKA^a, S. P. KUNDAS^b

^aBelarusian State University, International Sakharov Environmental Institute,
Dolgobrodskaya street, 23/1, 220070, Minsk, Belarus

^bBelarusian National Technical University, Nezavisimosty avenue, 65, 220013, Minsk, Belarus

Corresponding author: elena-kresova@mail.ru

Образец цитирования:

Кресова Е. В., Кужелко Д. Ю., Кундас С. П. Исследование теплопотерь индивидуального жилого дома, построенного с применением местных теплоизоляционных материалов // Журн. Белорус. гос. ун-та. Экология. 2017. № 4. С. 92–99.

For citation:

Kresava A. V., Kuzhelka D. Yu., Kundas S. P. Study of the heat loss of an individual house built with the use of local thermal insulation materials. *J. Belarus. State Univ. Ecol.* 2017. No. 4. P. 92–99 (in Russ.).

Автор:

Елена Владимировна Кресова – старший преподаватель кафедры энергоэффективных технологий.

Дмитрий Юрьевич Кужелко – студент кафедры энергоэффективных технологий.

Семен Петрович Кундас – доктор технических наук; профессор кафедры профессор кафедры теплогазоснабжения и вентиляции.

Author:

Alena V. Kresava, senior lecturer of the department of energy efficient technologies.

elena-kresova@mail.ru

Dzmitrij Yu. Kuzhelka, student of the department of energy efficient technologies.

kuzhelko.dmitry@yandex.ru

Sjiamjon P. Kundas, doctor of sciences (engineering); professor of the department of heat and gas supply and air-conditioning.

kundas@tut.by

Application of new insulating materials requires research for their efficiency, especially if these materials are used in multilayer structures. This work was focused on the study of environmentally friendly local materials for individual building insulation, under the directions of local community's sustainable development. This was done to help decrease housing construction cost, energy consumption and greenhouse gas emissions, and is currently under development in Belarus. The aim of this work is to analyze the efficiency of local insulating material usage with the use of computer simulation methods. Numerical 3D models were developed in the software packages using SolidWorks and COMSOL Multiphysics. Experimental thermography measurements were also completed for insulating efficiency analysis of local environmental friendly material. Numerical analysis and thermographic measurement was performed for framework type homes with the following thermal insulation envelopes: 1) reed; 2) reed and clay + straw; 3) reed + ecowool + flax fibers; 4) brick (as reference material). The resulting measurements and numerical calculation had shown the effectiveness of using these materials for insulation in comparison with traditional brick constructions.

Key words: Local Environmental Friendly Insulating Materials; Building; Energy Efficiency, Numerical and Experimental Study.

Введение

Экологическое строительство сегодня – важная составляющая устойчивого развития Республики Беларусь. Понятие «зеленое строительство» включает совокупность мер, ориентированных на снижение уровня потребления природных ресурсов при проектировании, строительстве, эксплуатации новых зданий и реконструкции ветхих, мер, направленных на повышение комфорта внутренней среды зданий. Экостроительство представляет собой многосложный комплексный подход ко всему строительному и проектному процессу [1]. Сегодня за этим определением стоит кардинальное изменение подхода ко всему строительному и проектному процессу, которое стало возможным благодаря появлению инновационных (высоких) технологий [2].

В Республике Беларусь направление экологически чистого индивидуального строительства начало развивать Международное благотворительное общественное объединение «ЭкоДом» [4]. По технологии этой организации были построены индивидуальные дома в д. Стаховцы Мядельского р-на Минской обл. и в д. Старый Лепель Лепельского р-на Витебской обл. В настоящее время наиболее активно на рынке страны продвигает это направление частное производственное унитарное предприятие «Эко-Строитель» [3; 5].

Применение новых теплоизоляционных материалов требует проведения исследований их эффективности, особенно, если указанные материалы используются в многослойных конструкциях. Перспективным направлением решения указанной задачи является компьютерное моделирование [1]. Современные коммерческие программные комплексы соответствующего назначения чаще всего невозможно применить для указанных целей без их адаптации и доработки. Поэтому цель настоящей работы – создание моделей, описывающих тепловые характеристики исследуемого дома, с возможностью их практического использования в среде программного комплекса COMSOL Multiphysics и проведение с их помощью исследований эффективности применения местных теплоизоляционных материалов в ограждающих конструкциях.

Характеристика объекта моделирования

В качестве объекта исследований выбран дом, расположенный в г. Минске по адресу пер. Бумажкова, 4 (рис. 1, 2), который был реконструирован фирмой «ЭкоСтроитель». Как следует из рис. 1–3, старая деревянная конструкция стен была заменена на каркасную с применением в качестве теплоизоляционных материалов тростника, эковаты и утеплителя из льняных волокон.

Теплофизические характеристики применяемых теплоизоляционных и конструкционных материалов приведены в табл. 1. Рассчитанное сопротивление теплопередаче стены составило $R_t = 7,58 \text{ м}^2 \times ^\circ\text{C}/\text{Вт}$, что значительно превышает нормативное значение – $3,2 \text{ м}^2 \times ^\circ\text{C}/\text{Вт}$ [6]. Для сравнения: сопротивление теплопередаче бревенчатых стен дома до реконструкции составляло $R_t = 1,44 \text{ м}^2 \times ^\circ\text{C}/\text{Вт}$.

Использование в качестве теплоизоляционного материала тростниковых плит обеспечивает ряд преимуществ:

- При изготовлении тростниковых плит не используются вредные для здоровья химические вещества.
- Изготовление плит не требует больших затрат энергии. Энергия тратится в основном на их транспортировку.
- Шероховатая поверхность плит обеспечивает хорошую основу под глиняную штукатурку.

• Плиты являются эффективным теплоизоляционным материалом: зимой они удерживают тепло, а летом охлаждают воздух. Утеплитель задерживает поступление тепла из атмосферного воздуха в стену, понижая тем самым ее температуру [7].

«Эковата» как теплоизоляционный материал характеризуется высокими практическими свойствами, экологической чистотой, относительно низкой стоимостью, биологической устойчивостью (не гниет, не плесневеет, не заводятся грызуны и насекомые), простотой использования, возможностью получения бесшовного слоя. Теплоизоляция из эковаты хорошо пропускает воздух, стены «дышат» [1].



Рис. 1. Общий вид дома до и после модернизации

Fig. 1. General view of the house before and after modernization

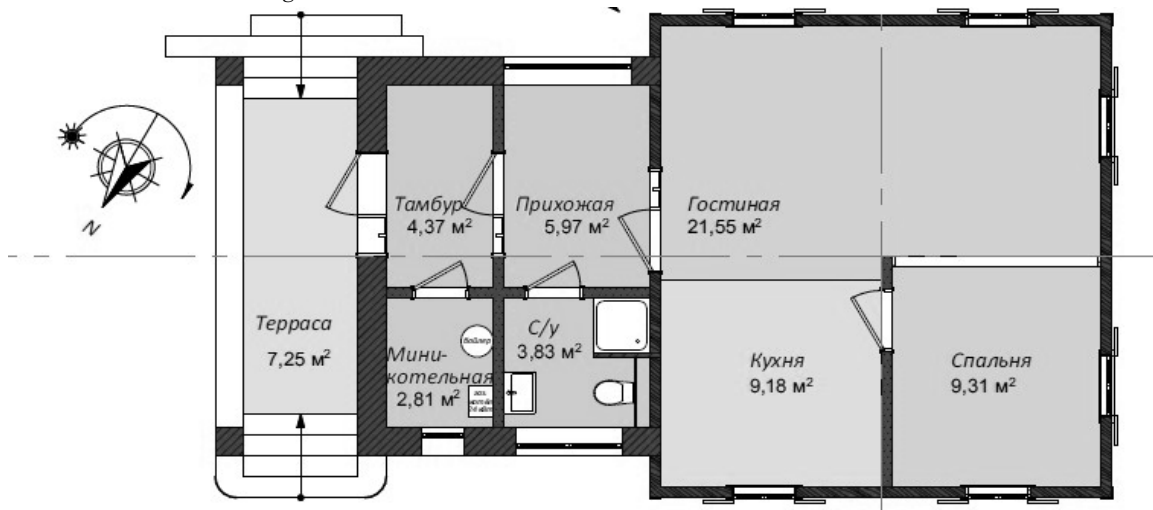


Рис. 2. Планировка дома после модернизации

Fig. 2. House plan after modernization

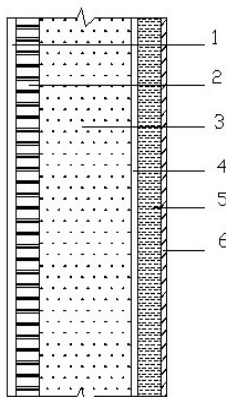


Рис. 3. Конструкция стен дома: 1 – штукатурка – 20 мм; 2 – утеплитель тростниковый – 50 мм; 3 – каркасная система стены – 200 мм, стеновое утепление – 200 мм эковаты; 4 – OSB-плита – 15 мм; 5 – утеплитель из льняных волокон – 50 мм; 6 – ГКЛ (гипсокартон) – 12,5 мм

Fig. 3. Construction of wall: 1 – clay plaster; 2 – reed plate – 50 mm; 3 – frame wall system – 200 mm, wall insulation – 200 mm «Ecowool»; 4 – OSB-plate – 15 mm; 5 – linen fibers insulation – 50 mm; 6 – GKL (gypsum board) – 12,5 mm

Таблица 1

Характеристики теплоизоляционных и конструкционных материалов

Table 1

Technical characteristics of building envelope

Материал	Коэффициент теплопроводности, λ , Вт/м °С	Теплоемкость, с, Дж/кг °С	Плотность, ρ , кг/м ³
Штукатурка	0,58	840	1800
Тростник	0,067	2300	120
Эковата	0,038	2100	40
OSB-плита	0,35	2300	600
Утеплитель из льняных волокон	0,04	1600	30
ГКЛ	0,15	840	800

Конструкция фундамента и кровли:

Фундамент (толщина слоев):

- Штукатурка – 20 мм.
- Пенополистирол – 50 мм.
- Гидроизоляционный слой.
- Фундамент 250–300 мм.

Кровля:

- Фальцевая кровля – 28 мм.
- Подкладочный ковер.
- Обрешетка сплошная из доски – 25 мм.
- Контробрешетка – 500 мм (воздушная прослойка).
- Гидро-, ветрозащита.
- Стропильная система 250 мм, кровельный утеплитель 250 мм – эковата.
- Внутренняя обрешетка 50 мм, кровельный утеплитель 50 мм – эковата.
- OSB-плита – 15 мм.
- ГКЛ – 12,5 мм.

Результаты численного анализа динамики охлаждения дома

Для проведения исследований на основе модели теплопереноса, разработаны конструктивная, конечно-элементная и расчетно-аналитические модели, которые практически реализованы в программных комплексах SolidWorks и COMSOL Multiphysics [8; 9].

Для упрощения модели было определено, какой процент занимают деревянные стойки каркаса от всего объема ограждающей конструкции. Вычисления показали, что эта величина составляет примерно 4 %. Это доказывает на незначительное влияние стоек на тепловое сопротивление ограждающих конструкций и позволяет не учитывать их при моделировании [10].

Предварительные численные исследования разработанных моделей показали, что для проведения расчетов всего дома требуется применения специальной высокопроизводительной вычислительной техники. Поэтому в рамках настоящей работы расчет изменения температуры был выполнен на суперкомпьютере «СКИФ» ОИПИ Национальной академии наук Беларуси.

Начальная температура воздуха в помещении (во всем объеме) задавалась равной 22 °С, стен и окон – 18 °С. Температура на внешней стороне ограждающей конструкции принималась равной изменению температуры атмосферного воздуха в течение всего периода моделирования (неделя). В модели были учтены теплообмен с окружающей средой и конвекция воздуха в помещении. Как следует из рис. 4, в течение недели температура внутри дома снижается с 22 до 12 °С. При этом относительно интенсивное охлаждение дома имеет место в первые трое суток и преимущественно в ночное время при более низкой температуре окружающей среды (большее значение разности температур).

Как видно из результатов 3-D моделирования [11], распределения температуры (рис. 4) в доме после 2-х суток более интенсивное снижение температуры наблюдается вблизи окон и нижней части дома, что закономерно и связано с меньшим тепловым сопротивлением этих конструкций, а также естественной

тепловой конвекцией (теплый воздух локализуется в верхней части дома). После трех суток градиент температуры внутри дома уменьшается.

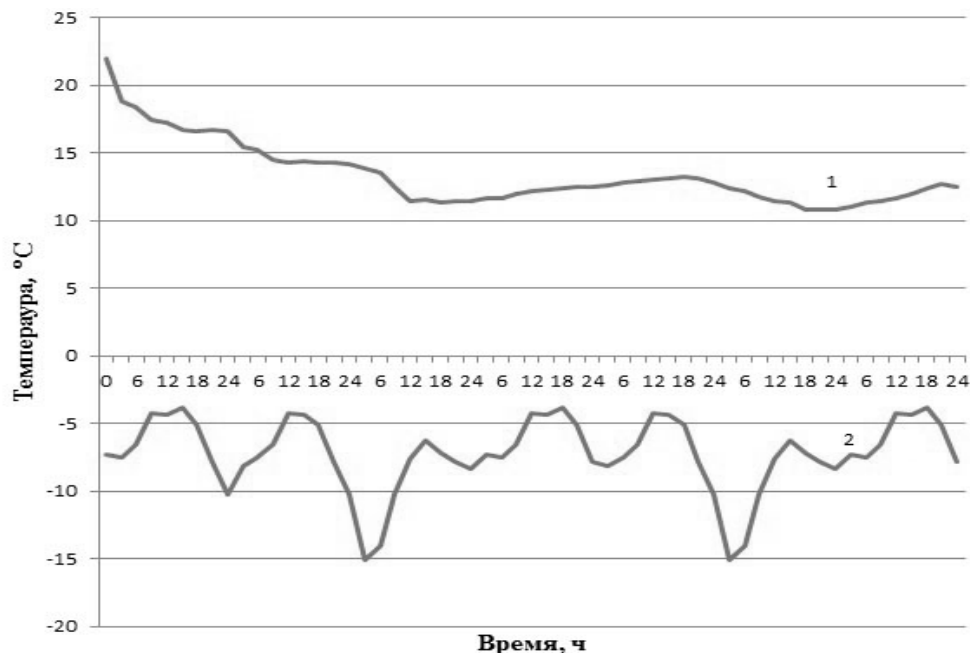


Рис. 4. Результаты моделирования динамики естественного охлаждения дома:
1 – температура в помещении; 2 – температура атмосферного воздуха

Fig. 4. Results modeling of outside and inside temperature changes: 1 – air temperature inside the house; 2 – outdoor temperature

Для подтверждения эффективности теплоизоляционных свойств использованных материалов и конструктивных решений проведен сравнительный численный анализ динамики охлаждения аналогичных по размерам и конструкции домов, построенных фирмой «Экостроитель», в которых в качестве теплоизоляционных материалов применен только тростник (400 мм), тростник и глина+солома (100 мм + 300 мм), а также традиционный кирпич (400 мм). Как видно из рис. 5, даже при меньшей толщине теплоизоляционного слоя, конструкция дома с утеплителем на основе «Эковаты» обеспечивает наибольшую степень теплоизоляции. Как и следовало ожидать, наибольшие теплопотери имеет традиционный кирпичный дом.

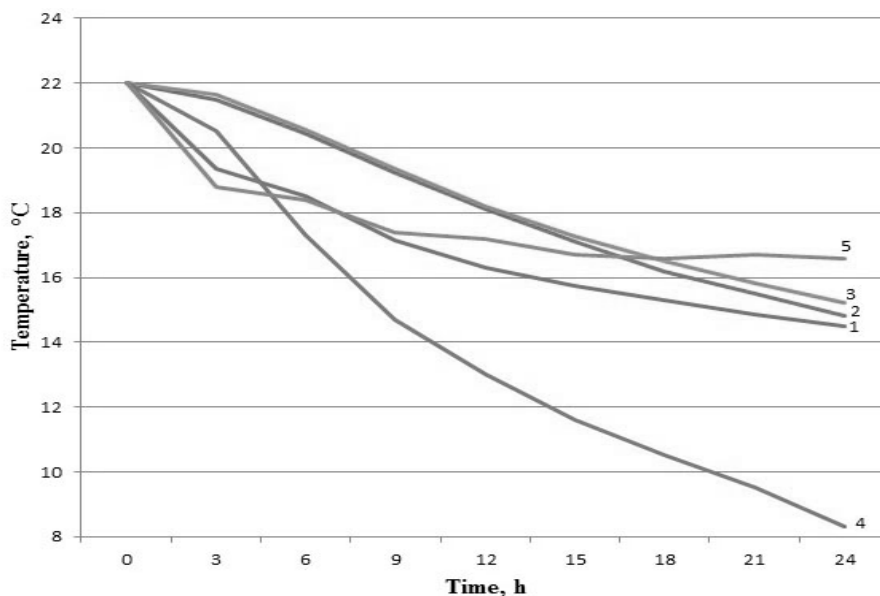


Рис. 5. Результаты сравнительных численных исследований динамики охлаждения в течение суток домов с различными вариантами утепления: 1 – эксперимент, 2 – тростник, 3 – глина + солома + тростник, 4 – кирпич, 5 – эковата

Fig. 5. Results of comparative simulation of houses cooling: 1 – experiment, 2 – reed, 3 – clay + straw + reed, 4 – brick, 5 – ecowool

Для оценки погрешности результатов моделирования на рис. 5 приведены также показатели экспериментальных измерений динамики охлаждения дома с теплоизоляцией с помощью тростниковых плит и с заполнением стен смесью глина + солома (100 мм + 300 мм). Измерения осуществлялись с помощью электронного термометра testo 405-V1. Видно, что погрешность моделирования не превышает 15 % и имеет большую величину на начальной стадии охлаждения.

Определение удельного расхода тепловой энергии на отопление здания

Для решения одной из задач по повышению эффективности дома был проведен расчет сопротивления теплопередаче наружных ограждающих конструкций здания. Значения для него брались из проектной документации.

Расчет сопротивления теплопередаче произведем для трех вариантов исполнения здания:

1) базовый вариант. Наружные ограждающие конструкции в жилом здании выполнены из деревянного сруба.

2) проектный вариант № 1. Основным теплоизоляционным слоем является заполнение целлюлозным утеплителем «Эковата» плюс плиты из тростника по СТБ 1868 – 2008.

3) проектный вариант № 2. Основным теплоизоляционным слоем является заполнение глина + щепа + плиты из тростника по СТБ 1868 – 2008.

Результаты расхода тепловой энергии приведены в табл. 2.

Таблица 2

Данные расчета расхода тепловой энергии в различных вариантах исполнения здания

Table 2

Calculation data for heat consumption in various building designs

Наименование величины	Размерность	Вариант исполнения		
		1	2	3
Градусо-сутки отопительного периода, D_d	$^{\circ}\text{C}\cdot\text{сут}$	4138,2		
Средняя плотность наружного воздуха за отопительный период, ρ_a^{ht}	$\text{кг}/\text{м}^3$	1,25		
Средняя кратность воздухообмена здания за отопительный период, n_a	ч^{-1}	0,24		
Приведенный коэффициент теплопередачи через наружные ограждающие конструкции здания, K_m^{tr}	$\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot^{\circ}\text{C})$	0,61	0,20	0,23
Условный коэффициент теплопередачи здания, учитывающий теплопотери за счет инфильтрации и вентиляции, K_m^{int}	$\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot^{\circ}\text{C})$	0,05		
Общий приведенный коэффициент теплопередачи здания, K_m	$\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot^{\circ}\text{C})$	0,66	0,25	0,28
Общие теплопотери здания за отопительный период, Q_h	МДж	55444,1	20974,8	24281,2
Бытовые теплопоступления в течение отопительного периода, Q_{int}	МДж	5919,9		
Расход тепловой энергии на отопление здания, Q_h^y	МДж	52901,6	16708,9	19687,6

По результатам расчета удельного расхода тепловой энергии на отопление здания был определен класс энергетической эффективности для каждого из вариантов исполнения дома (согласно Изменению №3 ТКП 45-2.04-196-2010 (02250)). Результаты приведены в табл. 3.

Таблица 3

Классификация жилых зданий по показателю удельного расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию в отопительном периоде

Table 3

Classification of residential buildings according to the specific heat consumption for heating and ventilation in the heating season

Наименование характеристики	Размерность	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
Удельный расход тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания в отопительном периоде $q_{h,des}$	МДж/м ²	882	279	328
	кВт·ч/м ²	245	77	91
Нормативное значение удельного расхода для класса	МДж/м ²	832 и более	234–328	234–328
	кВт·ч/м ²	231 и более	65–91	65–91
Класс по показателю удельного расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания в отопительный период	—	Класс G	Класс B	Класс B

Расчеты свидетельствуют, что использование таких изоляционных материалов, как плиты ТСТ, целлюлозный утеплитель «Эковата», утеплитель из льняных волокон и заполнение в виде глины со щепой являются технически целесообразными для строительства каркасных домов. Такие материалы позволяют строить здания с хорошими показателями удельного расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию (согласно ТКП 45-2.04-196-2010 (02250)).

В работе также был сделан расчет снижения выбросов в окружающую среду после внедрения проектных решений. Результаты представлены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты расчетов снижения выбросов в окружающую среду после внедрения проектных решений

Table 4

Results of calculations of reduce emissions to the environment after implementation of project solutions

Наименование показателя	Обозначение/единицы измерения	Базовый вариант	Проектный вариант № 1	Проектный вариант № 2
Расход тепловой энергии системой теплоснабжения	$Q_{отоп, год}$, ГДж	47,9	16,7	19,7
Снижение потребления общих энергетических единиц	ΔE^{te} , ГДж/год	—	31,2	28,3
Снижение выбросов метана	M_{CH_4} , т/год	—	0,000156	0,000141
Снижение выбросов закиси азота	MN_2O , т/год	—	$3,12 \cdot 10^{-6}$	$2,83 \cdot 10^{-6}$
Снижение расхода условного топлива	ΔB , т у.т./год	—	3,46	3,35
Снижение выбросов диоксида углерода	ΔMCO_2 , т/год	—	5,96	5,77

Заключение

С помощью разработанной 3D тепловой модели выполнен анализ эффективности применения в качестве теплоизоляционного материала «Эковата» для теплоизоляции индивидуальных жилых домов. Исследования динамики изменения температуры воздуха в реконструированном доме при его естественном охлаждении показали, что в течение недели температура внутри дома снижается с 22 до 12 °С. При этом более интенсивное охлаждение имеет место в первые трое суток и преимущественно

в ночное время при более низкой температуре окружающей среды. Проведенный сравнительный численный анализ динамики охлаждения различных вариантов теплоизоляции дома на основе эковаты, тростника (400 мм), тростника и глины + соломы (100 мм + 300 мм), а также традиционного кирпича (400 мм) показал теплоизоляционную эффективность применения конструкции на основе «Эковаты», которая характеризуется лучшими экологическими свойствами.

Проведены расчеты удельного расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию в отопительном периоде. Они свидетельствуют о том, что применение местных экологически чистых материалов позволяет строить здания с установленными показателями удельного расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию, которые соответствуют энергоэффективным технологиям.

Библиографические ссылки

1. Ялунина О. В., Бессонов И. В. Экологические аспекты применения стеновых материалов // Актуальные проблемы строительной теплофизики: сб. докл. науч.-практ. конф. НИИСФ. М., 2003. С. 181–187.
2. Титаренко Л. Г. Экологические ценности населения Республики Беларусь: теоретический и эмпирический уровни // Социологический альманах. 2013. № 4, С. 352–359.
3. Мядельский районный исполнительный комитет. [Электронный ресурс]. URL: <http://myadel.minsk-region.by/> (дата обращения: 06.08.2016).
4. Международное благотворительное общественное объединение «ЭкоСтроитель» [Электронный ресурс]. URL: <http://www.oekodomstroj.by/> (дата обращения: 18.02.2016).
5. Галинко И. Строительство. Экостроительство в Лепельском районе: планируется построить здание дневного пребывания инвалидов [Электронный ресурс]. Архитектурно-строительный портал. URL: <http://ais.by/> (дата обращения: 15.07.2016).
6. ТКП 45-2.04-43-2006 (02250) «Строительная теплотехника. Строительные нормы проектирования». Минск, 2006.
7. Учебно-практические семинары Энергоэффективное строительство: тростниковые крыши и тепловой реабилитации каркасных домов: материалы учеб. практ. семинаров (д. Стаховцы, Мядельский р-н, Минская обл.). 2010.
8. Кундас С. П., Кресова Е. В. Моделирование и анализ тепловых режимов энергоэффективного дома // Энергоэффективность. 2014. № 12. С. 20–22.
9. Кресова Е. В., Кундас С. П. Тепловая модель индивидуального жилого дома // Информатика. 2015. № 1. С. 56–63.
10. Kundas S., Kresova E., Suprinovich Y. Modeling of Temperature Regimes of Energy Efficiency House // Open Access Library J. 2015. № 2. P. 1–9. URL: <http://www.oalib.com/articles/3151130#.V11Ecj4sSNY> (date of access: 05.03.2016).
11. Kundas S. P., Kresova E. V. Numerical and Experimental Study of Local Materials Using for the Thermal Insulation of Individual Houses // Нетрадиційні і поновлювані джерела енергії як альтернативні первинним джерелам енергії в регіоні: Матеріали Дев'ятої міжнародної наук.-практ. конф. (Львів, 6–7 квітня 2017 р.): зб. наук. статей. Львів, 2017. С. 62–66.

References

1. Yalunina O. V., Bessonov I. V. [Environmental Aspects of Usage of Wall Materials]. *Actual Problems of Building Thermal Physics*: Proceedings of NIISF. Moscow. 2003, P. 181–187 (in Russ.).
2. Titarenko L. G. [The Ecological Values of the Population in the Republic of Belarus: Theoretical and Empirical Levels]. *Sociological almanac*. 2013. No. 4. P. 352–359 (in Russ.).
3. Myadel District Executive Committee. URL: <http://myadel.minsk-region.by/> (date of access: 06.08.2016).
4. International Charitable Public Association «EcoBuilder». URL: <http://www.oekodomstroj.by/> (date of access: 18.02.2016)..
5. Galinko I. Building. Green Building in Lepel District: It Is Planned to Construct a Day Stay Building for Persons With Disabilities. Architecture and Construction Portal. URL: <http://ais.by/> (date of access: 15.07.2016).
6. [Technical Code of Good Practice 45-2.04-43-2006 (02250) «Building heating engineer. Building design standards». Minsk, RUE «Stroitechnorm». Minsk, 2006 (in Russ.).
7. [Energy Efficient construction: Reed Roof and Thermal Rehabilitation of Frame House: proceedings training Seminars and Workshops. (v.) Stahovtsy, Myadel district, Minsk region. 2010] (in Russ.).
8. Kundas S. P., Kresova E. V. [Simulation and Analysis of Thermal Regimes of Energy Efficiency House]. *Energy efficiency*. 2014. No. 12. P. 20–22 (in Russ.).
9. Kresova E. V., Kundas S. P. [The Thermal Model of Individual House]. *Informatics*. 2015. No. 1. P. 56–63 (in Russ.).
10. Kundas S., Kresova E., Suprinovich Y. Modeling of Temperature Regimes of Energy Efficiency House. *Open Access Library J*. 2015. No. 2. P. 1–9. URL: <http://www.oalib.com/articles/3151130#.V11Ecj4sSNY> (date of access: 05.03.2016).
11. Kundas S. P., Kresova E. V. Numerical and Experimental Study of Local Materials Using for the Thermal Insulation of Individual Houses. *Alternative. Renewable Energy Sources As Alternative Primary Energy Sources in the Region*: IX International Scientific Conference (Lviv, 2017). Lviv, 2017. P. 62–66.

Статья поступила в редколлегию 21.11.2017
Received by editorial board 21.11.2017