http://vestnik.mrsu.ru
ISSN Print 0236-2910
ISSN Online 2313-0636

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ / PHYSICS AND MATHEMATICS

УДК 624.94:697.27 DOI: 10.15507/0236-2910.027.201702.198-214

КОМБИНИРОВАННАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ОТОПЛЕНИЯ ДЛЯ КАРКАСНЫХ ДОМОВ

И. Ю. Шелехов*, Т. И. Шишелова, Е. И. Смирнов, В. П. Иноземцев
ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет» (г. Иркутск, Россия)
*promteplo@yandex.ru

Введение. В статье представлен обзор факторов, влияющих на снижение энергетических затрат при строительстве и эксплуатации зданий каркасного типа. Авторами была поставлена задача по повышению эффективности использования электрической энергии и экономии затрат, связанных с отоплением каркасного помещения электроотопительными приборами.
Материалы и методы. Эксперименты проводились в индивидуальном жилом доме общей площадью 80 м^2. В процессе работы использовались две запатентованные панели с инфракрасным нагревательным элементом с положительным коэффициентом термического сопротивления и термоэлектрические датчики температуры. Сигналы с датчиков регистрировались приборами фирмы «ОВЕН» марки ТРМ138 с помощью штатного программного обеспечения, поставляемого совместно с приборами (Owen Process Manager). Полученные графики распределения температурных полей импортировались в программу MS Excel. Учет потребленной энергии фиксировался электросчетчиком CE 101 производства концерна «Энергомера».
Результаты исследования. В статье приводятся результаты исследования параметров комбинированной электрической системы отопления при взаимном влиянии двух нагревательных приборов, изготовленных на основе нагревательных элементов с положительным коэффициентом термического сопротивления. Авторами также были детально рассмотрены основные сценарии изменения параметров микроклимата в каркасных сооружениях, проведены исследования изменения данных параметров при проникновении холодных потоков воздуха в помещение через дверной проем и при понижении температуры ограждающих конструкций.
Обсуждение и заключения. Отопительные приборы, использующие эффекты саморегулирования и взаимного регулирования, уменьшают время выхода помещения на стационарный режим. При этом снижается инерционность системы отопления, происходит быстрое восстановление параметров микроклимата, снижаются энергетические затраты и тепловые потери.

Ключевые слова: каркасное домостроение, нагревательный элемент, энергосбережение, климатические условия, энергоэффективность, саморегулирование, температурный коэффициент сопротивления, радиационный обогрев, конвекционный обогрев

Для цитирования: Комбинированная электрическая система отопления для каркасных домов / И. Ю. Шелехов [и др.] // Вестник Мордовского университета. 2017. Т. 27, № 2. С. 198–214. DOI: 10.15507/0236-2910.027.201702.198-214

© Шелехов И. Ю., Шишелова Т. И., Смирнов Е. И., Иноземцев В. П., 2017

COMBINED ELECTRIC HEATING SYSTEM FOR TIMBER FRAME HOUSES

I. Yu. Shelekhov*, T. I. Shishelova, Ye. I. Smirnov, V. P. Inozemtsev
National Research Irkutsk State Technical University (Irkutsk, Russia)
**promteplo@yandex.ru*

Introduction. The article presents an overview of the factors affecting the decrease in energy costs during the construction and operation of frame type buildings. The authors propose the methods to increase energy efficiency in heating of frame type buildings.
Materials and Methods. The experiment was conducted in an individual residential building with a total area of 80 square meters. Two panels with an infrared heating element and thermoelectric temperature sensors were used. Signals from the sensors were registered by measuring instruments. The amount of the consumed energy was measured by the electric meter.
Results. The article identifies the problem and researches of parameters of the combined electric heating system, mutual influence of the two heating devices which are made on the basis of the heating elements with a positive temperature coefficient of resistance. The authors considered the basic scenario, and change of microclimate parameters. They studied the changes of microclimate parameters in the penetration of cold airflows into the room through the opening, and when the temperature of the walls decreases.
Discussion and Conclusions. The heating unit using the effect of self-regulation reduces the time for establishing the stationary regime. It helps to reduce the inertia of the heating system and to promote rapid recovery of the microclimate parameters, reducing energy costs and heat loss.

Keywords: frame structures, heating element, energy saving, climatic conditions, energy efficiency, self-regulation, temperature coefficient of resistance, radiation heating, convection heating

For citation: Shelekhov I. Yu., Shishelova T. I., Smirnov Ye. I., Inozemtsev V. P. Combined electric heating system for timber frame houses. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2017; 2(27):198-214. DOI: 10.15507/0236-2910.027.201702.198-214

Введение

Принцип каркасного домостроения был изобретен достаточно давно. У тюркских и монгольских народов технология каркасного домостроения реализована в виде юрт; в советские времена данная технология применялась для изготовления дачных домиков, быстровозводимых сооружений в сельской местности и при производстве строительных работ; в 1990-е гг. по этому типу строились торговые павильоны. В последние годы интерес к каркасному домостроению значительно вырос, что обусловлено появлением на рынке новых технологий и строительных материалов. В настоящее время по данной технологии строятся промышленные и административные помещения, жилые дома, поселки городского типа. При строительстве малоэтажного жилья можно заказать индивидуальный проект и все элементы возводимой конструкции, которые с помощью специального программного обеспечения и оборудования будут изготовлены в короткие сроки и с высокой точностью [1]. При этом если покупатель имеет минимальные строительные навыки, то он сам может «собрать» свой дом, следуя рекомендациям проектной документации.

Одним из обязательных условий надежности и долговечности каркасно-

го сооружения является наличие постоянной вентиляции, что не обязательно для других конструкций [2]. Данное требование обусловлено стационарными воздушно-тепловыми потоками по всему объему помещения, которые приходят в дисбаланс при любом внешнем воздействии (открывании входной двери, резком изменении внешних метеорологических условий и др.) [3]. Кроме этого, отсутствие в таких сооружениях массивных конструкций с большой теплоемкостью делает их безынерционными и неустойчивыми при колебаниях внешней температуры с точки зрения сохранения тепла. Отсутствие инерционности также затрудняет создание равномерного теплового поля, а в случае его реализации требуются значительные энергетические затраты. Во время эксплуатации происходят изменения теплотехнических характеристик, что в основном связано с нарушением стыковых соединений, «проседанием» наполнителя.

Рациональная и эффективная система отопления в таких сооружениях играет большую роль в обеспечении комфортных условий [4].

Решив задачу эффективного обогрева каркасных сооружений, можно расширить сферу их применения, уменьшить затраты на жизнеобеспечение, а также снизить экологическую нагрузку в местах их использования.

Обзор литературы

На внутренние климатические условия в зданиях каркасного типа в основном влияют 2 фактора: теплоизоляционные свойства ограждающих конструкций и отсутствие конструкций с большой теплоемкостью. Анализ литературных данных показал, что основные научные исследования связаны с теплоизоляционными свойствами ограждающих конструкций в области вентиляции и систем обогрева с аккумулирующими установками.

По мнению многих экспертов, Российская Федерация обладает гигантским потенциалом энергосбережения – > 40 % от общего энергопотребления [5].

Основным направлением исследований в области энергосбережения является оптимизация ограждающих конструкций каркасного сооружения; множество работ посвящено основным архитектурно-планировочным, объемно-пространственным и конструктивным решениям, которые направленны на энергосбережение и обеспечение энергетической эффективности каркасных зданий. В работах приведены определяющие факторы для обеспечения низкого уровня потребляемой в зданиях тепловой энергии на отопление: высокий уровень теплоизоляции наружных ограждающих конструкций (стен, окон, покрытий и др.), герметичность наружной оболочки здания и его компактности [6–14].

Система вентиляции в зданиях каркасного типа влияет не только на параметры микроклимата, но и является одним из основных источников энергетических затрат. Затраты на вентиляцию в современных зданиях составляют 40–50 % всех затрат на отопление. Имеются публикации, в которых рассматриваются различные энергоэффективные системы вентиляции, анализируются их достоинства и недостатки [15–18]. В ряде статей приводится поиск различных решений энергосбережения и снижения энергетических затрат при помощи применения энергоэффективных систем вентиляций.

Воздухообмен в помещениях – один из наиболее важных факторов, обеспечивающих оптимальный микроклимат в помещении. С его помощью происходит удаление внутренних загрязнений, бактерий, излишней влажности и поддерживается оптимальное соотношение концентрации кислорода и углекислого газа. Этот процесс является энергозатратным, поэтому крайне актуален вопрос создания вентиляционных систем с рекуперацией тепла и влаги [19–21].

Ограждающие конструкции и система вентиляции оказывают существенное влияние на параметры микроклимата в помещении, которые необходимо учитывать при проектировании системы отопления. В основном в зданиях каркасного типа используется индивидуальное теплоснабжение, которое имеет ряд преимуществ для потребителей, строительных и эксплуатирующих организаций [22]. Основные способы рационального использования тепловой энергии представлены в работах Д. Н. Ватузова, С. М. Пуринга и Е. Б. Филатова [23], а также Y. Cheng, J. Nin, N. Gao [24]. Авторы подчеркивают необходимость дальнейших комплексных исследований в данном направлении.

Особый интерес представляет работа Ю. М. Мацеватого [25]. Совместно с соавторами им был сделан вывод об отсутствии комплексной оценки энергетической и экономической эффективности различных систем электротеплоаккумуляционного отопления; также был проведен сравнительный анализ параметров этих систем и параметров традиционных систем водяного отопления. В данной статье дается оценка целесообразности применения электрических тепловых аккумуляторов различного типа для повышения энергетической эффективности систем теплоснабжения гражданских зданий. Приводятся результаты расчета энергетической эффективности различных видов систем электротеплоаккумуляционного отопления; описываются преимущества данных систем отопления по сравнению с традиционной водяной, а также достигаемая экономическая эффективность и сроки окупаемости систем. Детально рассматривается проблема каркасных сооружений, возникающая из-за отсутствия в таких сооружениях массивных конструкций; приводятся способы решения данной проблемы.

В. Ю. Карницкий и В. С. Ушников [26] рассматривают решение данной проблемы с помощью инфракрасного отопления. В их работе показана прямо пропорциональная зависимость теплозащиты здания и энергии, которая тратится на поддержание требуемых параметров микроклимата. Использование инфракрасных обогревателей значительно уменьшает расходы на обогрев и помогает сэкономить > 45 % электроэнергии по сравнению с другими системами отопления. Таким образом, стоимость оборудования, монтажа и эксплуатации инфракрасного отопления почти в 2,5 раза дешевле, чем в случае использования водяного отопления.

Следует отметить, что мнения других авторов расходятся относительно оптимальной доли лучистой теплоотдачи: некоторые из них утверждают, что следует обеспечивать максимальную теплоотдачу нагревательных устройств излучением[1–2]. Им противопоставляется точка зрения ученых, предпочитающих применение панелей с долей лучистой теплоотдачи порядка 60–70 %[3–4].

Материалы и методы

Рассмотрим 2 классических события, при которых происходит изменение параметров микроклимата в каркасных помещениях.

---

[1] Инфракрасное отопление [Электронный ресурс]. URL: http://www. otopimdom.ru/index. php?id=394 (дата обращения: 07.11.2016).

[2] Инфракрасное излучение и его влияние на человека [Электронный ресурс]. URL: http://otravleniya.net/izluchenie/infrakrasnoe-izluchenie-vliyanie-na-cheloveka.html (дата обращения: 07.11.2016).

[3] Все об инфракрасных обогревателях для дачи [Электронный ресурс]. URL: http://oblagorod.ru/obogrev/infrakrasnye-obogrevateli-s-termoregulyatorom-dlya-dachi.html#i-11 (дата обращения: 07.11.2016).

[4] Экономический эффект от применения инфракрасных обогревателей: расчет затрат [Электронный ресурс]. URL: http://www.teplo.ufakit.ru/?partid =56 (дата обращения: 07.11.2016).

1. При эксплуатации помещения через дверной проем поступают холодные потоки воздуха; первоначально – в центр помещения, после чего постепенно распространяются по всему объему в направлении ограждающих конструкций.

2. При изменении внешних метеорологических условий процесс идет в обратном направлении, от ограждающих конструкций в центр помещения.

С помощью одного отопительного прибора добиться равномерного нагрева практически невозможно. При установке нескольких отопительных приборов ситуация улучшается, но из-за их инерционности равномерный нагрев помещения происходит со значительным перерасходом энергии и за большой промежуток времени.

Алгоритм восстановления параметров микроклимата не зависит от факторов, влияющих на общую температуру помещения. Изменение температуры в одной части помещения неизбежно приводит к аналогичному изменению в другой его части через определенный промежуток времени, при этом работа одного отопительного прибора никак не зависит от работы другого. Именно поэтому перед тем как в помещении по всему объему станет «тепло», предварительно неизбежно состояние «жарко». Особенно ярко это выражено в помещениях малого объема с недостаточными теплоизоляционными свойствами ограждающих конструкций, к которым относятся малые каркасные сооружения[5].

Целью нашей работы является исследование параметров комбинированной электрической системы обогрева при взаимном влиянии двух нагревательных приборов, изготовленных на основе нагревательных элементов с положительным коэффициентом термического сопротивления. При этом необходимо оценить снижение тепловых потерь и скорость восстановления параметров микроклимата за счет обеспечения саморегулирования и взаимного регулирования.

Было рассмотрено 2 основных сценария изменения параметров микроклимата, возникающих из-за холодных потоков воздуха, который поступает в помещение через дверной проем, и из-за понижения температуры ограждающих конструкций. В процессе исследования использовались две панели с инфракрасным нагревательным элементом с положительным коэффициентом термического сопротивления[6–7], которые подключаются в электрическую сеть последовательно. Одна нагревательная панель была установлена на внутренней стене между комнатами, другая – на внешней, рядом с оконным проемом.

В стационарном режиме, когда количество холодных потоков воздуха постоянно, в зависимости от температуры воздуха изменяется температура на теплопередающей поверхности нагревательных панелей и, следовательно, их мощность. При понижении температуры электрическое сопротивление резистивного слоя уменьшается, а выделяемая мощность, соответственно, увеличивается. При повышении температуры ситуация обратная. Процесс длится до момента равновесия (стационарного состояния), когда на

[5] Патент 2016149900 (РФ). Нагревательный прибор для комбинированной системы обогрева помещений с низкой теплоизоляцией / И. Ю. Шелехов, И. В. Шелехова, М. И. Шелехов, Е. И. Смирнов, В. П. Иноземцев, К. П. Кашко. Опубл. 16.12.2016. Патентообладатель ООО «Термостат+». URL: http://www1.fips.ru/fips_servl/fips_servlet

[6] Патент на полезную модель 109628 (РФ). Нагревательный элемент, патент на полезную модель / И. Ю. Шелехов, И. В. Шелехова, Н. А. Иванов, Kim Byoung Chul, И. М. Головных. URL: http://www1.fips.ru/fips_servl/fips_servlet

[7] Патент на изобретение 2463748 (РФ). Способ изготовления толстопленочного резистивного нагревателя, патент на изобретение / И. Ю. Шелехов, И. В. Шелехова, Н. А. Иванов, И. М. Головных, Ким Бьянг Чул. Опубл. 10.08.2012. URL: http://www1.fips.ru/fips_servl/fips_servlet

нагревательных панелях установится выделяемая мощность, при которой изменение температуры в помещении не происходит.

При возникновении не стационарного режима (в период времени, когда в помещении открывается дверь) холодные потоки воздуха движутся вдоль внутренних стен, постепенно распространяясь по всему объему помещения в направлении ограждающих конструкций (внешних стен). При этом понижается температура на теплопередающей поверхности панели, установленной на внутренней стене, происходит уменьшение электрического сопротивления, а поскольку панели соединены последовательно, то увеличивается напряжение, поступающее на панель на внешней стене. Фактически, нагревательная панель, которая находится в зоне понижения температуры, управляет выделяемой мощностью панели, к которой движутся холодные потоки воздуха. При этом снижается инерционность системы и осуществляется пропорциональное регулирование, поскольку изменение электрического сопротивления пропорционально изменениям температуры воздуха. При понижении или увеличении внешней температуры, усилении или ослаблении ветра процесс идет в обратном направлении. Нагревательная панель, установленная на внешней стене, управляет работой панели, установленной на внутренней стене, увеличивая или уменьшая напряжение на ней.

Комфортное состояние человека в обогреваемом помещении зависит от многих факторов: температуры воздуха, его скорости движения и влажности; радиационной температуры от окружающих предметов, в т. ч. отопительных приборов и ограждающих конструкций; состояния, в котором человек находится. Комфорт достигается при достижении общего теплового (энергетического) баланса между человеком и окружающей средой.

Эксперименты проводились в индивидуальном жилом доме общей площадью 80 м^2, который был построен в 2013 г. по программе «Доступное жилье», в соответствии с проектной документацией. Системы жизнеобеспечения, в т. ч. отопление, были рассчитаны по нормам и методикам, которые подробно описаны в учебнике В. Н. Богословского[8]. Дом состоит из коридора, гостиной, кухни, двух спальных комнат, туалета и ванной. Оборудование для проведения экспериментов было установлено в гостиной (общая площадь – 24 м^2; две стены внутренние, две внешние). На одной из внешних стен имеется окно размерами 1,4x3,0 м^2 и стационарное электрическое отопление общей мощностью 2,5 кВт (отопительные приборы конвекционного типа, производства РФ; регулирование выделяемой мощности в отопительных приборах осуществляется позиционными биметаллическими регуляторами).

Через равные промежутки площади помещения были попарно установлены термоэлектрические датчики температуры для фиксации температуры воздуха и радиационного излучения соответственно. Сигналы с датчиков поступали на приборы фирмы «ОВЕН» марки ТРМ138 с помощью штатного программного обеспечения, поставляемого совместно с приборами (Owen Process Manager) и предназначенного для регистрации и отображения данных, а также для их обработки и анализа. Данные аппроксимировались, полученные графики распределения температурных полей импортировались

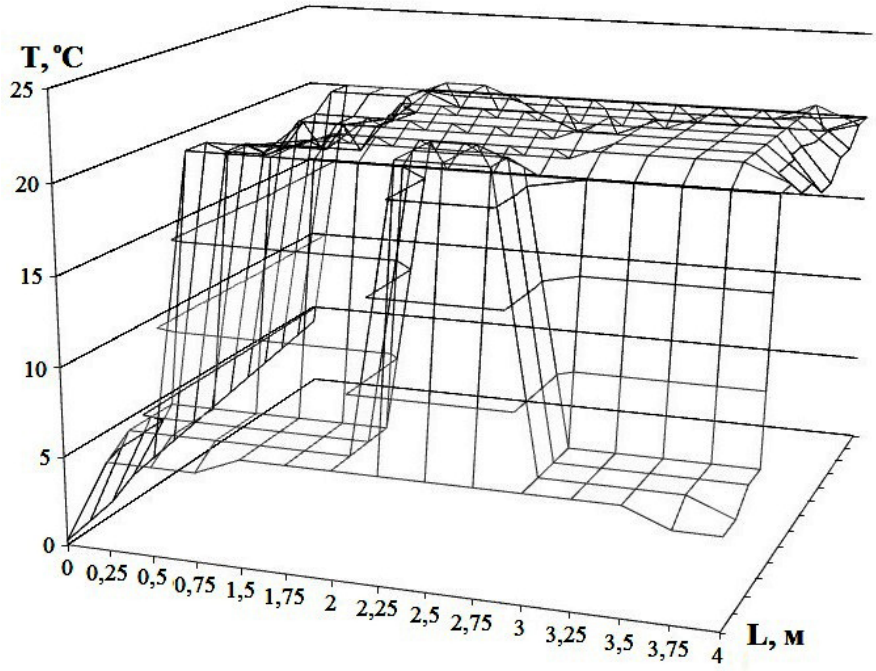
[8] **Богословский В. Н.** Строительная теплофизика (теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха) : учеб. для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Высш. школа, 1982. 415 с. URL: http://www.twirpx.com/file/5619

в программу MS Excel. Учет потребленной энергии фиксировался электросчетчиком CE 101 («Энергомера»).

При обработке данных учитывалось, что целенаправленное использование лучевого теплообмена позволяет снизить температуру окружающего воздуха без нарушений условий теплового комфорта[9] [27–28], а также тот факт, что действие лучистого тепла в определенных пределах может оказывать на организм благоприятное влияние [29].

Результаты исследования

В связи с тем что абсолютно одинаковые погодные условия устанавливаются достаточно редко, эксперименты со штатным стационарным отоплением проводились несколько дней подряд. После этого были выбраны результаты, полученные при схожих погодных условиях, что и во время экспериментов с инфракрасным панелями. На рис. 1 показано распределение температурных полей при конвекционном типе отопления в 7:00 при внешней температуре –17 °С. Из представленного графика видно, что благоприятная для человека температура установилась только на 20 % площади. Видно, что конвекционный поток от обогревателя распространялся по помещению, но не охватывал зону около «холодной» стены, где температура опустилась ниже всех существующих норм.

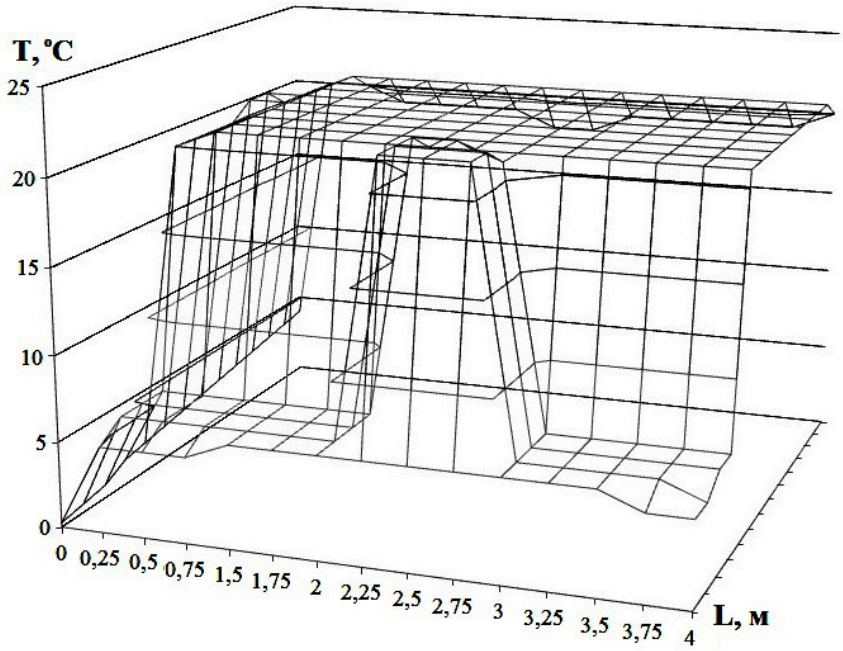


Р и с. 1. Распределение температурного поля по помещению при конвекционном типе отопления в 7:00

F i g. 1. Distribution of temperature field in room with convective type of heating at 7 AM

[9] **Куриленко Н. И.** Научно-технические основы формирования микроклимата промышленных объектов с лучистыми системами отопления : дис. на соиск. … докт. техн. наук. 2015. С. 235. URL: http://www.tgasu.ru/content/page/post-4931/dissertaciya._docx.pdf

На рис. 2 показано распределение температурных полей в 10:00 при внешней температуре –15 °С. Из графика видно, что благоприятная для человека температура распространилась на 50 % площади. Однако при этом, несмотря на то что на половине помещения температура практически идеальна, видно, что конвекционный поток от обогревателя не охватывает зону около «холодной» стены. Температура в помещении установилась через 1 ч 57 мин и в дальнейшем практически не менялась. За 3 ч потребление электрической энергии составило 6,48 кВт.

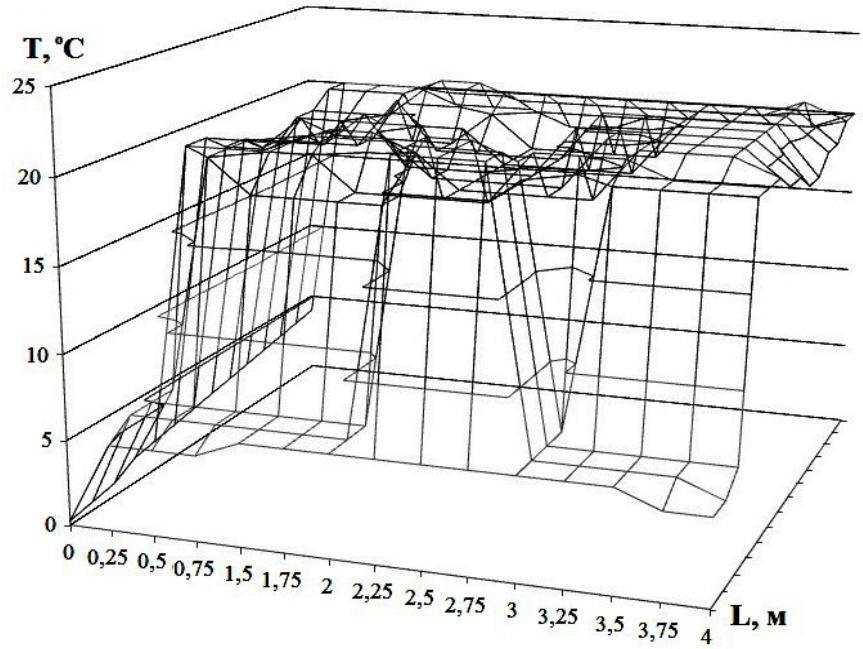


Р и с. 2. Распределение температурного поля по помещению при конвекционном типе отопления в 10:00

F i g. 2. Distribution of temperature field in room with convective type of heating at 10 AM

Как было отмечено выше, одним из основных требований при строительстве каркасных сооружений является наличие вентиляции. При эксплуатации помещения возникают факторы, которые нарушают параметры микроклимата, изменяя движение воздушных потоков. Одним из таких факторов является поступление холодных воздушных потоков через дверной проем. В ходе эксперимента входная дверь открывалась на 5 мин – достаточное время для того, чтобы войти в помещение или выйти из него.

На рис. 3 показано распределение температурных полей через 15 мин после дополнительного притока холодного воздуха. При этом зона неблагоприятной температуры уменьшилась более чем в 2 раза, причем неблагоприятное изменение температуры в остальной части помещения произошло только в неотапливаемых зонах.



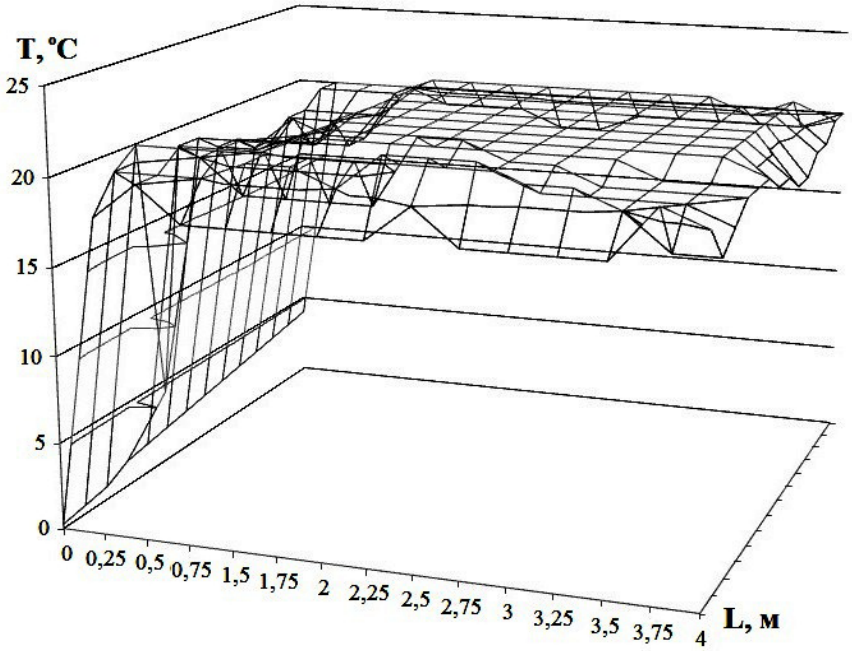
Р и с. 3. Распределение температурного поля по помещению при конвекционном типе отопления через 15 мин после дополнительного притока холодного воздуха

F i g. 3. Distribution of temperature field in room with convective type of heating 15 minutes after additional inflow of cold air

На рис. 4 показано распределение температурных полей при конвекционном типе отопления через 1 ч; видно, что зоны с неблагоприятной температурой в помещении исчезли. Данный факт объясняется тем, что при постоянной работе обогревателей рассматриваемого типа конвекционный поток от обогревателя встраивается в общее движение воздушных потоков, создаваемых вентиляцией, что не всегда благоприятно сказывается на микроклимате.

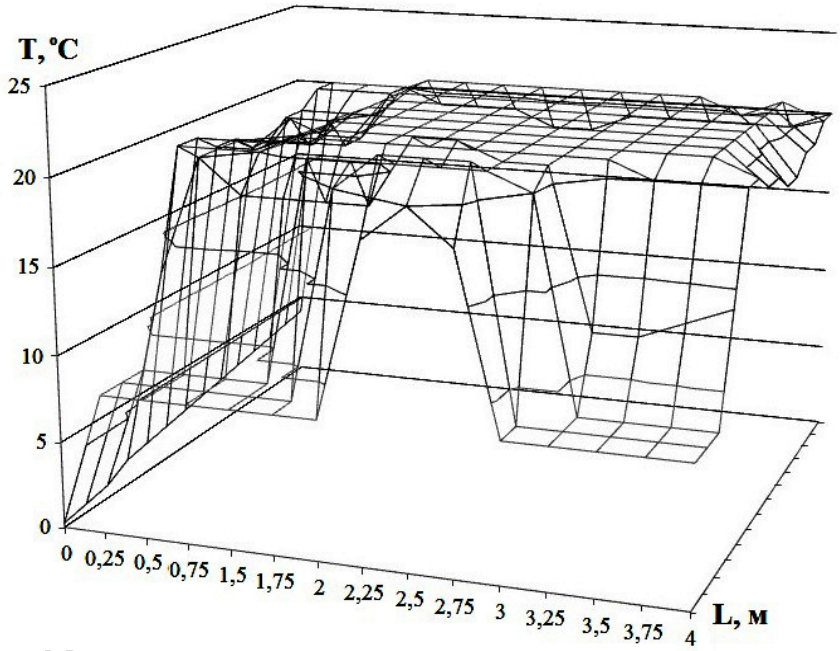
В период низких температур приборы работают постоянно и распределение температуры по помещению происходит по пути движения воздушных потоков. Аналогичный результат был получен при принудительном выключении обогревателей на непродолжительный промежуток времени, что также доказывает правильность нашего предположения.

Были проведены аналогичные испытания, где в качестве обогревателей использовались панели с инфракрасными нагревательными элементами с положительным коэффициентом термического сопротивления аналогичной мощности. На рис. 5 показано распределение температурных полей при саморегуляционном радиационном типе отопления в 7:00 при внешней температуре –18 °С. Из представленного графика видно, что благоприятная для человека температура установилась на 60 % площади. Также видно, что рядом с «холодной» стеной присутствуют зоны неблагоприятных температур, но их площадь намного меньше, чем при конвективном обогреве, а величина – в 2 раза выше.



Р и с. 4. Распределение температурного поля по помещению при конвекционном типе отопления через 1 ч после дополнительного притока холодного воздуха

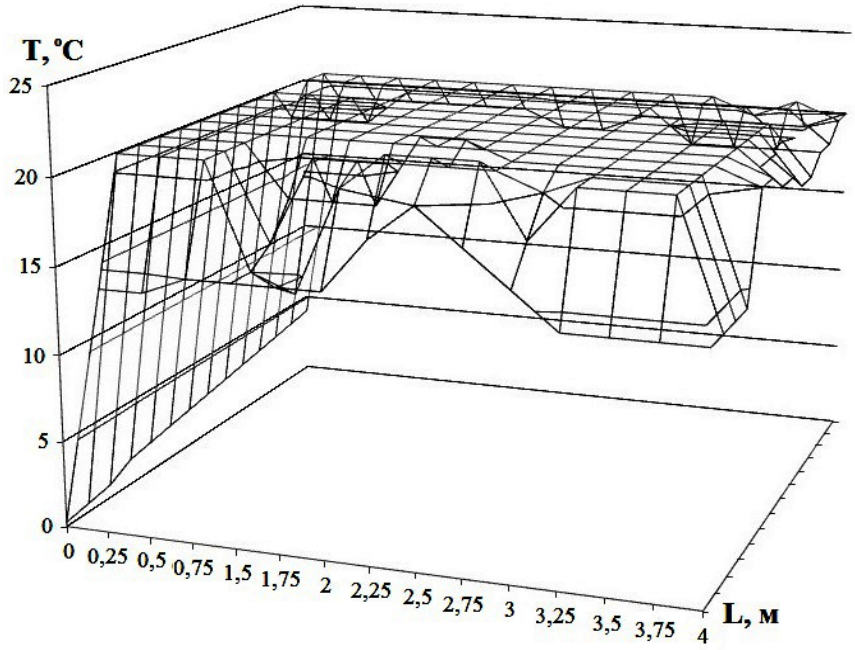
F i g. 4. Distribution of temperature field in room with convective type of heating 1 hour after additional inflow of cold air



Р и с. 5. Распределение температурного поля по помещению при саморегулируемом радиационном типе отопления в 7:00

F i g. 5. Distribution of temperature field around the room during self-regulated radiation type heating at 7 AM

На рис. 6 показано распределение температурных полей в 10:00 при внешней температуре –15 °С. Из графика видно, что благоприятная для человека температура распространилась практически по всей площади помещения, кроме узких зон у стены справа и слева от окна. Данный факт объясняется отсутствием внешних воздушных потоков, которые мешают естественному распределению температуры. Температура в помещении установилась через 1 ч 3 мин и в дальнейшем практически не изменялась. За 3 ч потребление электрической энергии составило 5,04 кВт.

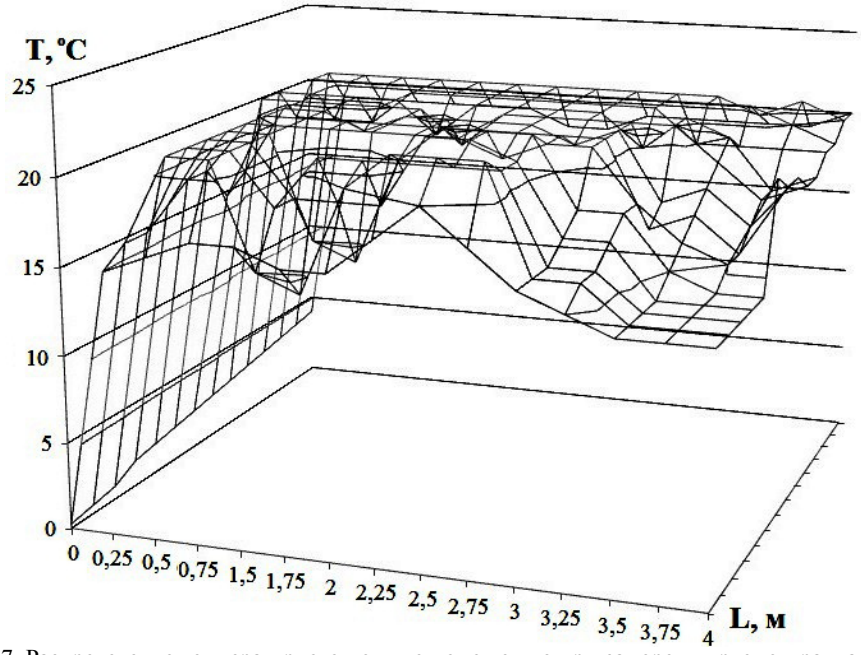


Р и с. 6. Распределение температурного поля по помещению при саморегулируемом радиационном типе отопления в 10:00

F i g. 6. The distribution of temperature field around the room during self-regulated radiation type of heater at 10 AM

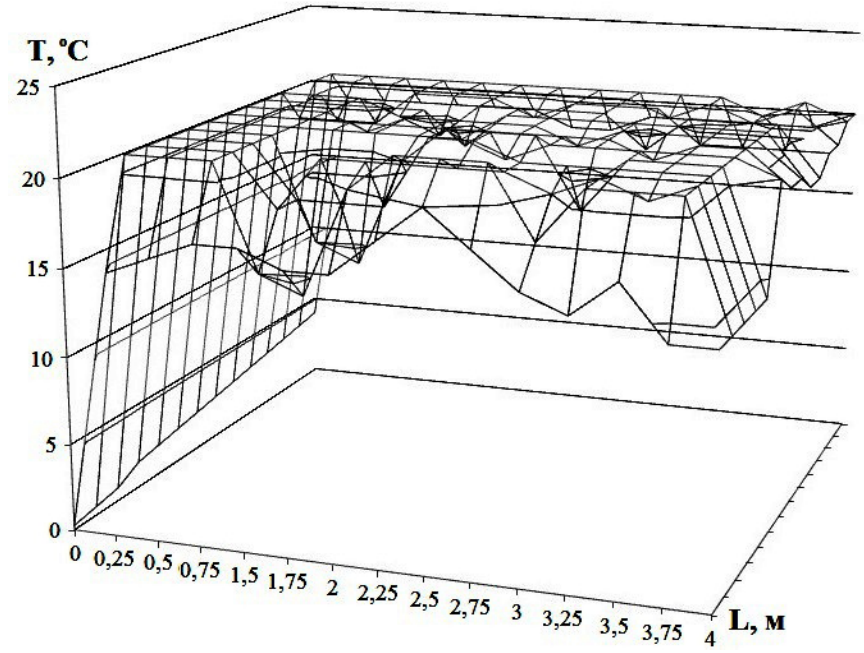
На рис. 7 показано распределение температурных полей через 15 мин после дополнительного притока холодного воздуха. Диапазон неблагоприятных температур увеличился в основном в неотапливаемых зонах и в зонах расположения металлических стоек, служащих для установки датчиков температуры.

На рис. 8 показано распределение температурных полей через 1 ч; на графике безошибочно определяются места установки металлических стоек. Кроме этих точечных зон, где температура ниже приблизительно на 1° С, температура в помещении приобрела исходное значение.



Р и с. 7. Распределение температурного поля по помещению при саморегулируемом радиационном типе отопления через 15 мин после дополнительного притока холодного воздуха

F i g. 7. The distribution of temperature field around the room in self-regulating the radiation type of heating 15 minutes after additional inflow of cold air



Р и с. 8. Распределение температурного поля по помещению при саморегулируемом радиационном типе отопления через 1 ч после дополнительного притока холодного воздуха

F i g. 8. The distribution of temperature field around the room in self-regulating the radiation type of heating 1 hour after additional inflow of cold air

Обсуждение и заключения

Новые способы отопления с помощью саморегулируемых нагревательных элементов помогают снизить затраты при строительстве и эксплуатации каркасных сооружений и создать комфортный микроклимат.

Отопительные приборы с само- и взаиморегулированием уменьшают время выхода помещения на стационарный режим. При этом снижается инерционность системы отопления, происходит быстрое восстановление микроклимата, уменьшаются энергетические и тепловые затраты.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Гусева Т. П.** Инновационные технологии для жилищного строительства // Жилищное строительство. 2009. № 4. С. 4–6. URL: http://irbis.bstu.ru›cgi…irbis64r_12/cgiirbis_64.exe?LNG

2. **Петросова Д. В.** Фильтрация воздуха через ограждающие конструкции // Инженерно-строительный журнал. 2012. Т. 28, № 2. С. 24–31. URL: http://engstroy.spbstu.ru/index_2012_02/petrosova.pdf

3. **Stanke D.** Ventilation: where it's needed // ASHRAE Journal. 1998. P. 39–47. URL: http://ashrae.org/File Library.eNewsletters/Stanke-Oct98

4. **Гошка Л. Л.** К вопросу о необходимости внедрения эффективных систем климатизации зданий // Инженерно-строительный журнал. 2009. № 7. С. 33–37. URL: http://engstroy.spbstu.ru/index_2009_07/goshka_chapter7.pdf

5. **Алексеенко С.** Энергосбережение – ключ к темпам роста национальной экономики // Наука в Сибири. 2004. № 48 (2484). С. 1–13. URL: http://unistroy.spbstu.ru/index_2013_11/1_ z_p_o_11.pdf

6. **Юрченко В. В.** Проектирование каркасов зданий из тонкостенных холодногнутых профилей в среде «SCAD Office» // Инженерно-строительный журнал. 2010. № 8 (18). С. 38–46. URL: http://engstroy.spbstu.ru/index_2010_08/yurchenko.html

7. **Шелехов И. Ю., Шишелова Т. И.** Разработка отопительного оборудования и исследования его эффективности в системах жизнеобеспечения // Вестник ИрГТУ. 2007. №1 (29). С. 104–109. URL: http://journals.istu.edu/vestnik_irgtu/journals/2007/01a

8. **Рыбаков В. А., Недвига П. Н.** Эмпирические методы оценки несущей способности стальных тонкостенных просечно-перфорированных балок и балок со сплошной стенкой // Инженерно-строительный журнал. 2009. № 8. С. 27–30. URL: http://engstroy.spbstu.ru/index_ 2009_08/index_2009_08.html

9. **Рыбаков В. А., Морозов С. А.** Исследование конечных элементов для расчета тонкостенных стержневых систем // Инженерно-строительный журнал. 2012. Т. 27, № 1. С. 53–73. URL: http://engstroy.spbstu.ru/index_ 2012 _01/index_2012_01.html

10. **Айрумян Э. Л., Белый Г. И.** Исследования работы стальной фермы из холодногнутых профилей с учетом их местной и общей устойчивости // Промышленное и гражданское строительство. 2010. № 5. С. 41–44. URL: http://www.pgs1923.ru/russian/rindex.htm

11. **Ватин Н. И., Рыбаков В. А.** Расчет металлоконструкций: седьмая степень свободы // Стройпрофиль. 2007. № 2. С. 60. URL: http://www. stroikafedra.spb.ru/publikacii/2007/stroiprofil_N_3_2007.pdf

12. **Каталонская М. А.** ЛСТК – быстрое решение для строительства доступного жилья // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2008. № 10. С. 75–75. URL: http://www.stroymat21.ru/00/arch.php?file_=./2009-07/newtxt.htm

13. Technical note: airtightness of older-generation energy-efficient houses in Saskatoon / H. Orr [et al.] // Journal of Building Physics. 2013. Vol. 36. P. 294–307. URL: http://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/1744259112460748

14. **Tenpieric M., Van der Spoel W., Cauberg H.** An analytical model for calculating thermal bridge effects in high performance building enclosure // Journal of Building Physics. 2008. Vol. 31. P. 361–387. URL: http://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/1744259107088008

15. **Немова Д. В.** Системы вентиляции в жилых зданиях как средство повышения энергоэффективности // Строительство уникальных зданий и сооружений : интернет-журнал. 2012. № 3.

URL: http://www.allbeton.ru/upload/mediawiki/2aa/energoeffektivnye-tekhnologii-v-ograzhdayushchikh-konstruktsiyakh-_nemova_.pdf

16. **Губернский Ю. Д., Шилькрот Е. О.** Сколько воздуха нужно человеку для комфорта // АВОК: Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. 2008. № 4. С. 4–12. URL: http://www.allbeton.ru/upload/iblock/45f/skolko-vozduha-nujno-cheloveku-dlya-komforta-ushilkrotn.pdf

17. **Dieckmann J.** Improving humidity control with energy recovery // ASHRAE Journal. 2008. P. 38–45. URL: http://www.airxchange. com/ Collateral/Documents/English-US/Dieckmann_Ashrae_Article.pdf

18. **Шелехов И. Ю., Шишелова Т. И.** Повышение эффективности приточных установок в системе вентиляции зданий // Фундаментальные исследования. 2011. № 8, ч. 3. С. 683–686. URL: https://fundamental-research.ru/ru/issue/view?id=411

19. **Иванов О. П., Тихомиров С. А.** Анализ сроков окупаемости пластинчатого и роторного теплоутилизаторов // Холодильная техника и кондиционирование. 2007. № 1. С. 1–5. URL: http://refrigeration.open-mechanics.com/articles/41.pdf

20. Анализ возможности использования термоэлектрических генераторов в системах вентиляции / И. Ю. Шелехов [и др.] // Научное обозрение. 2015. № 8. С. 67–75. URL: http://engineering.science-review.ru/ru/issue/view?id=3

21. **Шелехов И. Ю., Смирнов Е. И., Иноземцев В. П.** Нагревательный элемент с распределенным греющим слоем для систем приточной вентиляции // Сб. публикаций науч. журнала «Globus» по мат-лам V Междунар. науч.-практ. конф. «Достижения и проблемы современной науки» г. Санкт-Петербурга. СПб. : Научный журнал «Globus», 2016. С. 68–70. URL: http://globus-science.ru/Archive/new/Globus_Multi_February_2016_part_III.pdf

22. **Щелоков А. И., Филатова Е. Б.** Сравнительный анализ эффективности теплоснабжения объектов ЖКХ // Вестник Самарского государственного технического университета (Сер. «Технические науки»). 2011. № 2. С. 206–212. URL: http://vestnik-teh.samgtu.ru/sites/vestnik-teh.samgtu.ru/files/content/soderzanie _2011_2.doc

23. **Ватузов Д. Н., Пуринг С. М., Филатова Е. Б.** Способы повышения рационального потребления и распределения тепловой энергии в жилых зданиях // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2013. Т. 2, № 3 (6). С. 33–35. URL: http://journal.samgasu.ru/vestnik_sgasu/ 2014_04_ 13.pdf

24. **Jun Chen, Chi-sun Poon.** Photocatalytic construction and building materials: from fundamentals to applications // Building and Environment. 2009. Vol. 44. P. 1899–1906. URL: http://www.brimee.eu/documents/28616/28897/Photocatalytic+construction+and+building+materials+-+From+fundamentals+to+applications.pdf/8f626406-e272-40aa-bd6e-c0ea2abf4b55?version=1.0

25. **Мацевитый Ю. М., Ганжа Н. Г., Хименко А. В.** Оценка энергетической эффективности систем электротеплоаккумуляционного отопления административных зданий // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. 2011. № 10. С. 9–16. URL: http://archive.kharkiv.org/View/35770

26. **Карницкий В. Ю., Ушников В. С.** Инфракрасное отопление как экономичный и эффективный вид отопления // Известия Тульского государственного университета. 2016. № 12-3. С. 96–98. URL: http://cyberleninka.ru/article/n/infrakrasnoe-otoplenie-kak-ekonomichnyy-i-effektivnyy-vid-otopleniya

27. **Шелехов И. Ю., Смирнов Е. И., Иноземцев В. П.** Конструкции отопительных приборов на основе физико-математического моделирования // Научное обозрение. 2016. № 1. С. 42–48. URL: http://engineering.science-review.ru/ru/issue/view?id=4

28. **Шелехов И. Ю., Шишелова Т. И., Духовный Л. И.** Особенности использования отопительного оборудования в зданиях с переменным тепловым режимом // Фундаментальные исследования. 2012. № 3, ч. 2. С. 437–440 URL: https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=29625

29. **Шелехов И. Ю., Шишелова Т. И.** Сравнительный анализ использования электронагревательных приборов в жилых помещениях // Фундаментальные исследования. 2012. № 9-2. С. 421–424. https://fundamental-research.ru/ru/issue/view?id=457

Поступила 21.03.2017; принята к публикации 26.04.2017; опубликована онлайн 14.06.2017

Об авторах:

Шелехов Игорь Юрьевич, доцент кафедры городского строительства и хозяйства, Институт архитектуры и строительства, ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет» (664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 83), кандидат технических наук, **ORCID: http://orcid.org/0000-0002-7677-3187**, promteplo@yandex.ru

Шишелова Тамара Ильинична, профессор кафедры физики, Физико-технический институт, ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет» (664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 83), доктор технических наук, **ORCID: http://orcid.org/0000-0003-2372-8144**, tamara.shishelova@gmail.com

Смирнов Евгений Игоревич, аспирант кафедры инженерных коммуникаций и систем жизнеобеспечения, Институт архитектуры и строительства, ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет» (664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 83), **ORCID: http://orcid.org/0000-0003-4999-7342,** jeka7.7.7@mail.ru

Иноземцев Виктор Петрович, аспирант кафедры инженерных коммуникаций и систем жизнеобеспечения, Институт архитектуры и строительства, ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет» (664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 83), **ORCID: http://orcid.org/0000-0002-5015-3553**, 06091989dhsotr@mail.ru

Вклад соавторов: И. Ю. Шелехов: анализ литературных данных, научное руководство, постановка задачи исследования, обработка данных, написание текста статьи; Т. И. Шишелова: анализ литературных данных, верстка и редактирование текста; Е. И. Смирнов: анализ литературных данных, подготовка образцов, поиск и анализ аналитических и практических материалов; В. П. Иноземцев: анализ литературных данных, разработка методики проведения эксперимента, компьютерная реализация решения задачи.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Guseva T. P. Innovation technologies for housing construction. *Zhilishchnoye stroitelstvo* = Housing Construction. 2009; 4:4-6. Available at: http://irbis.bstu.ru›cgi…irbis64r_12/cgiirbis_64.exe?LNG (In Russ.)

2. Petrosova D. V. Air filtering through the building envelope. *Inzhenerno-stroitelnyy zhurnal* = Engineering and Construction Journal. 2012; 2(28):24-31. Available at: http://engstroy.spbstu.ru/index_2012_02/petrosova.pdf (In Russ.)

3. Stanke D. Ventilation: where it's needed // ASHRAE Journal. 1998; 39-47. Available at: http://ashrae.org/File Library.eNewsletters/Stanke-Oct98

4. Goshka L. L. [On the need to introduce effective climate control systems for buildings]. *Inzhenerno-stroitelnyy zhurnal* = Engineering and Construction Journal. 2009; 7:33-37. Available at: http://engstroy.spbstu.ru/index_2009_07/goshka_chapter7.pdf (In Russ.)

5. Alekseenko S. [Energy saving is the key to growth rate of the national economy]. *Nauka v Sibiri* = Science in Siberia. 2004; 48(2484):1-13. Available at: http://unistroy.spbstu.ru/index_2013_11/1_ z_p_o_11.pdf (In Russ.)

6. Yurchenko V. V. [Designing of building frame from thin-walled cold-formed profiles in SCAD Office]. *Inzhenerno-stroitelnyy zhurnal* = Engineering and Construction Journal. 2010; 8(18):38-46. Available at: http://engstroy. spbstu.ru/index_2010_08/yurchenko.html (In Russ.)

7. Shelekhov I. Yu., Shishelova T. I. [Development of heating equipment and research of its effectiveness in life support systems]. *Vestnik IrGTU* = Irkutsk State Technical University Bulletin. 2007; 1(29):104-109. Available at: http://journals.istu.edu/vestnik_irgtu/journals/2007/01a (In Russ.)

8. Rybakov V. A., Nedviga P. N. [Empirical methods for estimating the bearing capacity of thin-walled steel perforated beams and solid-wall beams]. *Inzhenerno-stroitelnyy zhurnal* = Engineering and Construction Journal. 2009; 8:27-30. Available at: http://engstroy.spbstu.ru/index_2009_08/index_2009_08.html (In Russ.)

9. Rybakov V. A., Morozov S. A. [Finite element analysis for the calculation of thin-walled rod systems]. *Inzhenerno-stroitelnyy zhurnal* = Engineering and Construction Journal. 2012; 1(27):53-73. Available at: http://engstroy.spbstu.ru/index_2012_01/index_2012_01.html (In Russ.)

10. Ayrumyan E. L., Belyy G. I. [Studies of the operation of a steel truss made from cold-formed profiles with considering their local and general stability*]. Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitelstvo* = Industrial and Civil Construction. 2010; 5:41-44. Available at: http://www.pgs1923.ru/russian/rindex.htm (In Russ.)

11. Vatin N. I., Rybakov V. A. [Calculation of metal structures: The seventh degree of freedom]. *Stroyprofil* = Building Profile. 2007; 2:60. Available at: http://www. stroikafedra.spb.ru/publikacii/2007/stroiprofil_N_3_2007.pdf (In Russ.)

12. Katalonskaya M. A. [Self-framing metal buildings – quick solution for affordable housing]. *Stroitelnyye materialy, oborudovaniye, tekhnologii XXI v.* = Building Materials, Equipment, Technologies of the 21st Century. 2008; 10:75-75. Available at: http://www.stroymat21.ru/00/arch.php?file_=./2009-07/newtxt.htm (In Russ.)

13. Orr H., Wang J., Fetsch D., Dumont R. Technical note: airtightness of older-generation energy-efficient houses in Saskatoon. Journal of Building Physics. 2013; 36:294-307. Available at: http://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/1744259112460748

14. Tenpieric M., Van der Spoel W., Cauberg H. An analytical model for calculating thermal bridge effects in high performance building enclosure. Journal of Building Physics. 2008; 31:361-387. Available at: http://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/1744259107088008

15. Nemova D. V. [Ventilation systems in residential buildings as a means of increasing energy efficiency]. *Stroitelstvo unikalnykh zdaniy i sooruzheniy* = Construction of Unique Buildings and Structures. 2012; 3. Available at: http://www.allbeton. ru/upload/mediawiki/2aa/energoeffektivnye-tekhnologii-v-ograzhdayushchikh-konstruktsiyakh-_nemova_.pdf (In Russ.)

16. Gubernskiy Yu. D., Shilkrot Ye. O. [How much air does a human need for comfort?]. *AVOK: Ventilyatsiya, otopleniye, konditsionirovaniye vozdukha, teplosnabzheniye i stroitelnaya teplofizika* = ABOK: Ventilation, Heating, Air Conditioning, Heat Supply and Construction Thermal Physics. 2008; 4:4-12. Available at: http://www.allbeton.ru/upload/iblock/45f/skolko-vozduha-nujno-cheloveku-dlya-komforta-ushilkrotn.pdf (In Russ.)

17. Dieckmann J. Improving humidity control with energy recovery. ASHRAE Journal. 2008; 38-45. Available at: http://www.airxchange. com/ Collateral/Documents/English-US/Dieckmann_Ashrae_Article.pdf

18. Shelekhov I. Yu., Shishelova T. I. [Increasing the efficiency of air-handling units in the building ventilation system]. *Fundamentalnyye issledovaniya* = Basic Research. 2011; 8(3):683-686. Available at: https://fundamental-research.ru/ru/issue/view?id=411 (In Russ.)

19. Ivanov O. P., Tikhomirov S. A. [Analysis of the payback period of the plate and rotary heat exchangers]. *Kholodilnaya tekhnika i konditsionirovaniye* = Refrigeration and Air Conditioning. 2007; 1:1-5. Available at: http://refrigeration.open-mechanics.com/articles/41.pdf (In Russ.)

20. Shelekhov I. Yu. [Analysis of the possibility of using thermoelectric generators in ventilation systems]. *Nauchnoye obozreniye* = Scientific Review. 2015; 8:67-75. Available at: http://engineering.science-review.ru/ru/issue/view?id=3 (In Russ.)

21. Shelekhov I. Yu., Smirnov Ye. I., Inozemtsev V. P. [Heating element with distributed heating layer for ventilation systems]. In: *Sbornik publikatsiy nauch. zhurnala "Globus" po materialam V Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. "Dostizheniya i problemy sovremennoy nauki"* [Collection of publications of The Globus scientific journal on the materials of the 5th International Scientific and Practical Conference "Achievements and Problems of Modern Science": Proceedings] 2016; 68-70. Available at: http://globus-science.ru/Archive/new/Globus_Multi_February_2016_part_III.pdf (In Russ.)

22. Shchelokov A. I., Filatova Ye. B. [Comparative analysis of the efficiency of heat supply for housing and utilities facilities]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta: tekhnicheskiye nauki* = Samara State Technical University Bulletin: Engineering. 2011; 2:206-212. Available at: http://vestnik-teh.samgtu.ru/sites/vestnik- teh.samgtu.ru/files/content/soderzanie_2011_2.doc (In Russ.)

23. Vatuzov D. N., Puring S. M., Filatova Ye. B. [Ways to increase the rational consumption and distribution of thermal energy in residential buildings]. *Inzhenerno-stroitelnyy vestnik Prikaspiya* = Engineering and Construction Bulletin of the Caspian. 2013; 2-3(6):33-35. Available at: http://journal.samgasu.ru/vestnik_sgasu/2014_04_ 13.pdf (In Russ.)

24. Chen J., Poon Ch. Photocatalytic construction and building materials: from fundamentals to applications. Building and Environment. 2009; 44:1899-1906. Available at: http://www.brimee.eu/documents/28616/28897/Photocatalytic+construction+and+building+materials+-+From+fundamentals+to+applications.pdf/8f626406-e272-40aa-bd6e-c0ea2abf4b55?version=1.0

25. Matsevityy Yu. M., Ganzha N. G., Khimenko A. V. Evaluation of energy efficiency of systems electric thermal storage heating of civil buildings. *Energosberezheniye. Energetika. Energoaudit* = Energy Saving. Power Engineering. Energy audit. 2011; 10:9-16. Available at: http://archive.kharkiv.org/View/35770 (In Russ.)

26. Karnitskiy V. Yu., Ushnikov V. S. Infrared heating as an economical and efficient type of heating. *Izvestiya Tulskogo gosudarstvennogo universiteta* = Tula State University Bulletin. 2016; 12-3:96-98. Available at: http://cyberleninka.ru/article/n/infrakrasnoe-otoplenie-kak-ekonomichnyy-i-effektivnyy-vid-otopleniya (In Russ.)

27. Shelekhov I. Yu., Smirnov Ye. I., Inozemtsev V. P. [Constructions of heating devices based on physical and mathematical modeling] *Nauchnoye obozreniye* = Scientific Review. 2016; 1:42-48. Available at: http://engineering.science-review.ru/ru/issue/view?id=4 (In Russ.)

28. Shelekhov I. Yu., Shishelova T. I., Dukhovnyy L. I. Features of use of the heating equipment in buildings with a variable thermal mode. *Fundamentalnyye issledovaniya* = Basic Research. 2012; 3(2):437-440 Available at: https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=29625 (In Russ.)

29. Shelekhov I. Yu., Shishelova T. I. The comparative analysis of use of electroheating devices in pre-mises. *Fundamentalnyye issledovaniya* = Basic Research. 2012; 9-2:421-424. Available at https://fundamental-research.ru/ru/issue/view?id=457 (In Russ.)

Submitted 21.03.2017; revised 26.04.2017; published online 14.06.2017

About the authors:

Igor Yu. Shelekhov, Associated Professor of Chair of Urban Construction and Economy, Institute of Architecture and Construction, National Research Irkutsk State Technical University (83 Lermontova St., Irkutsk 3664074, Russia), Ph.D. (Engineering), **ORCID: http://orcid.org/0000-0002-7677-3187**, promteplo@yandex.ru

Tamara I. Shishelova, Professor of Chair of Physics, Institute of Physics and Technics, National Research Irkutsk State Technical University (83 Lermontova St., Irkutsk 3664074, Russia), Dr.Sci. (Engineering), **ORCID: http://orcid.org/0000-0003-2372-8144**, tamara.shishelova@gmail.com

Yevgeniy I. Smirnov, Postgraduate Student of Chair of Engineering Communications and Life Support Systems, Institute of Architecture and Construction, National Research Irkutsk State Technical University (83 Lermontova St., Irkutsk 3664074, Russia), **ORCID: http://orcid.org/0000-0003-4999-7342**, jeka7.7.7@mail.ru

Viktor P. Inozemtsev, Postgraduate Student of Chair of Engineering Communications and Life Support Systems, Institute of Architecture and Construction, National Research Irkutsk State Technical University (83 Lermontova St., Irkutsk 3664074, Russia), **ORCID: http://orcid.org/0000-0002-5015-3553**, 06091989dhsotr@mail.ru

Contribution of the co-authors: I. Shelekhov: reviewing the literature, scientific supervision, developing the conceptual framework, data processing, writing the draft; T. Shishelova: analyzing the literature, writing and editing the text; Ye. Smirnov: analyzing the literature, preparation of samples, searching and analyzing the data; V. Inozemtsev: analyzing the literature, development of experimental techniques, computer processing the data.

All authors have read and approved the final version of the manuscript.