

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

УДК 621.1.016:697.1

DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-6-83-93

*А.Н. БЕЛОУС, Г.А. КОТОВ, Д.А. САПРОНОВ, Б.А. НОВИКОВ,
Донбасская национальная академия строительства и архитектуры*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ТЕПЛОПЕРЕДАЧЕ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОМ ТЕПЛОВОМ РЕЖИМЕ

Одним из основных нормируемых теплотехнических показателей ограждающих конструкций является сопротивление теплопередаче. На территории стран СНГ находится огромное количество объектов недвижимости, спроектированных и возведенных в соответствии с устаревшими нормами по расходу тепловой энергии на отопление и вентиляцию, требованиями к теплозащитной оболочке зданий, что ведет к перерасходу энергии. Все объекты недвижимости, введенные в эксплуатацию до ужесточения вышеупомянутых норм, требуют определения реальных теплотехнических характеристик ограждающих конструкций и приведения их в соответствие с действующим законодательством. В статье дан анализ существующих методов определения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций в натурных условиях, выявлены достоинства и недостатки данных методов. На основании фундаментальных исследований строительной теплофизики предложена математическая модель определения сопротивления теплопередаче в натурных условиях, учитывающая недостатки существующих методов.

Ключевые слова: сопротивление теплопередаче; математическая модель; теплотехнические показатели; натурные условия.

Для цитирования: Белоус А.Н., Котов Г.А., Сапронов Д.А., Новиков Б.А. Определение сопротивления теплопередаче при нестационарном тепловом режиме // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2020. Т. 22. № 6. С. 83–93.

DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-6-83-93

*A.N. BELOUS, G.A. KOTOV, D.A. SAPRONOV B.A. NOVIKOV,
Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture*

HEAT TRANSFER RESISTANCE IN NON-STATIONARY THERMAL CONDITIONS

One of the main normalizing heat engineering parameters of walling systems is the thermal resistance. On the territory of the CIS countries there are many real estate objects designed and built in compliance with outdated standards for the heat energy consumption in heating and ventilation, requirements for the thermal-protective shells of buildings, that lead to excess demand energy. All these objects are put into operation before stiffening the above-mentioned

standards and require determination of actual thermal characteristics of walling systems and bringing them into compliance with the current legislation. The article analyzes the methods of measuring the thermal resistance of the walling systems in full-scale conditions and identifies the advantages and disadvantages of these methods. Based on structural thermal physics the paper proposes a mathematical model of thermal resistance in full-scale conditions with regard to shortcomings of the existing methods.

Keywords: thermal resistance; mathematical model; heating performance; full-scale conditions.

For citation: Belous A.N., Kotov G.A., Sapronov D.A. Novikov B.A. Opredelenie soprotivleniya teploperedache pri nestatsionarnom teplovom rezhime [Heat transfer resistance in non-stationary thermal conditions]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2020. V. 22. No. 6. Pp. 83–93.
DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-6-83-93

В современном мире наблюдается стремление к более жесткой экономии энергетических ресурсов, связанных с отоплением и вентиляцией зданий и сооружений. В соответствии со ст. 11, п. 6 Федерального закона от 23.11.2009 № 261-ФЗ (ред. от 26.07.2019) «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации», не допускается ввод в эксплуатацию зданий, строений, сооружений, построенных, реконструированных, прошедших капитальный ремонт и не соответствующих требованиям энергетической эффективности. На территории стран Европейского союза в принятой директиве [1] утверждается, что на здания приходится порядка 41% всего энергопотребления. Постановлением [2] внесены изменения в отношении «Правил установления требований энергетической эффективности для зданий, касающиеся перечня показателей». В новых правилах внесены изменения в сроки исполнения и диапазона уменьшения требуемого удельного годового расхода энергетических ресурсов, потребляемых в зданиях: с 1 января 2018 года – не менее чем на 20 % по отношению к базовому уровню, с 1 января 2023 года – еще на 20 % и с 1 января 2028 года – еще на 10 %, а всего на 50 % по отношению к базовому уровню. Необходимость выполнения действующего законодательства приводит к потребности в контроле и выявлении реальных теплотехнических характеристик ограждающих конструкций (ОК) зданий не только на этапе проектирования, но и на этапе сдачи в эксплуатацию, реконструкции, при обследовании технического состояния строительных конструкций.

Одним из основных нормируемых теплотехнических показателей ограждающих конструкций является сопротивление теплопередаче R_0 . На данный момент на территории Российской Федерации действует нормативный документ ГОСТ Р 54853–2011 «Метод определения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций с помощью тепломера», регламентирующий порядок определения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций зданий в натурных условиях. Метод, предлагающийся в документе, основан на создании в толще конструкции условий теплопередаче, максимально близких к стационарным. При этом для получения достоверных данных с минимальным доверительным интервалом по результатам испыта-

ния измерения необходимо производить во временные периоды, когда температура наружного воздуха находится в пределах от минус 15 до минус 32 °С. Продолжительность измерений в натурных условиях определяют по результатам предварительной обработки данных измерений в ходе испытаний, при которой учитывают стабильность температуры наружного воздуха в период испытаний и предшествующие дни и тепловую инерцию ограждающей конструкции. Совершенно ясно, что в подавляющем большинстве случаев необходимости проведения испытаний установление требуемых погодных условий и стационарного режима теплопередаче маловероятно.

На территории Украины действует нормативный документ ДСТУ Б В.2.6-101:2010 «Метод определения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций», регламентирующий проведение тепловизионной съемки с последующей математической обработкой полученных результатов. В этом документе регламентируется показатель температурного напора при проведении испытаний не менее чем 15 К. Для получения результатов теплового испытания ограждающих конструкций, которые предназначены для применения при решении спорных (арбитражных) вопросов, – не менее 25 К. Скорость ветра на улице – не более чем 4 м/с при обследовании зданий с сопротивлением теплопередаче ограждающих конструкций на уровне $1,0 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ и не более 2,0 м/с при обследовании зданий с сопротивлением теплопередаче $2,0 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ и более. Необходимый уровень атмосферного давления – от 84 до 106,7 кПа. Для выявления реальных характеристик ограждающих конструкций исследуемых объектов необходимо проводить тепловизионные измерения в периоды, когда температура наружного воздуха ниже минус 20 °С. Однако, судя по метеорологическим наблюдениям последних 5 лет, на большинстве территорий стран СНГ соответствие с требованиями по температуре наружного воздуха наступало только в периоды наиболее холодной пятидневки.

Таким образом, можно сказать, что основная трудность, возникающая при тепловых обследованиях зданий, – длительное непостоянство погодных условий, нарушающее тепловой режим стены и вызывающее нестационарный тепловой поток в толще ОК. Предложенные и регламентируемые нормативными документами методы определения сопротивления теплопередаче ОК в натурных условиях возможно использовать только в зимний период с достаточно низкой температурой наружного воздуха без значимых колебаний температуры для установления стационарного режима. Однако на постсоветском пространстве существует острая необходимость в обследовании теплотехнических характеристик ОК зданий в весенне-осенний период. В связи с этим становится актуальной задача разработки метода по определению сопротивления теплопередаче в натурных условиях неразрушающим способом при нестационарном тепловом режиме, на результаты которого не должны влиять: тепловая инерция материала ограждающей конструкции, сезонность, погодные условия при проведении испытаний.

Задача по определению реальных теплотехнических показателей ограждающих конструкций по своей сути относится к обратным задачам вычислительной теплофизики. Обратные задачи – это задачи, в которых заданы следствия, а искомыми являются причины.

Первые постановки и попытки решения задач, которые называются обратными (в самом общем значении этого термина), сделаны еще в XIX в. О.М. Алифанов в своей работе [3] отмечает работы Фурье, Пуассона, Кельвина по оценке климата Земли в прошлом и распределения температур в почвенном слое. До 50-х гг. XX в. в теплотехнике те задачи, которые называются обратными, решались эпизодически [4]. Но уже Г. Штольц [5] называет обратными внешние обратные задачи теплопроводности по определению тепловых потоков, т. е. внешние обратные задачи II рода. На территории СНГ одним из первых начал решать обратные задачи Н.В. Шумаков [6], он предложил применять для определения граничных условий в задачах нестационарной теплопроводности метод последовательных интервалов, который назвал методом экспериментального изучения процесса нагрева твердых тел.

На современном этапе развития строительной теплотехники существует большое количество работ по натурному определению теплотехнических показателей ОК. К примеру, методы определения сопротивления теплопередаче наружных ограждающих конструкций для здания с наружными стенами из силикатного кирпича толщиной 640 мм рассматриваются в работе [7], однако одним из условий проведения исследований являлось установление амплитуды колебаний температуры наружного воздуха не более 2 °С, длительность которых должна быть не менее времени тепловой инерции стены. Для стены из силикатного кирпича время тепловой инерции составляет примерно 24 ч. Очевидно, что установление необходимых погодных условий наблюдается крайне редко, и вывод адекватных результатов при измерениях затруднителен.

Метод неразрушающего контроля теплофизических свойств ОК, основанный на обеспечении и реализации адиабатического режима нагрева, предлагается авторами В.Н. Чернышовым и А.В. Чернышовым [8]. Однако предложенный метод справедлив только для однослойных конструкций либо многослойных, у которых наружные слои являются достаточно толстыми по сравнению с общей толщиной (трехслойные стеновые панели, облегченная кирпичная кладка либо многослойная кирпичная кладка).

Н.В. Пилипенко и Н.В. Лазуренко в одной из своих работ дают разъяснения по использованию метода осреднения результатов измерений при определении сопротивления теплопередаче ОК [9] и перечисляют недостатки этого метода: длительный период проведения измерений, увеличение погрешности измерений за счет осреднения, трудоемкость расчета и анализа погрешности для конкретного частного случая натурных испытаний. Далее приводится описание метода определения сопротивления теплопередаче ОК путем параметрической идентификации тепловых потоков и теплофизических свойств. Параметрическая идентификация указанных величин сводится к решению прямой и обратной задач теплопроводности и использованию для получения оптимальных оценок параметров рекуррентного фильтра Калмана. В работе [10] поднимается вопрос уменьшения энергопотребления зданий за счет снижения теплотерь через наружную оболочку в результате термомодернизации зданий. Подход в интегрировании натурных измерений в процесс проектирования и эксплуатации зданий описан в работе [11]. Описание измерительной системы, за основу которой взят метод тепловизионной и инфракрасной оценки оболоч-

ки зданий, приведено в работе [12]. В работе [13] проведено исследование влияния изменения погодных условий на показатели энергоэффективности зданий.

Для разработки метода по определению сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций в натуральных условиях при нестационарном тепловом режиме необходимо произвести математическое моделирование тепловых процессов в толще ограждающей конструкции с отысканием неизвестных теплотехнических характеристик материалов по входящим и исходящим параметрам на поверхности ОК, которые возможно отследить и измерить неразрушающими способами. Основные требования при составлении и решении математической модели: учет нестационарности тепловых процессов от влияния тепловой инерции материалов вследствие непостоянства погодных условий, отсутствие влияния перепада температур между температурой воздуха внутри и снаружи помещения.

Поставленная задача по определению сопротивления теплопередаче ОК представляется в одномерном пространстве. Для ее решения и отыскания теплотехнических характеристик ОК на первом этапе предлагается рассматривать уравнение теплопроводности в следующем виде:

$$U_t = a^2 U_{xx}; \text{ при } x \in [0, l], t > 0.$$

Здесь U – распределение температур в толще конструкции; a – коэффициент температуропроводности, $a^2 = \frac{k}{c\rho}$, где k – коэффициент теплопроводности; c – теплоемкость материала; ρ – плотность материала.

Коэффициент a определяется эмпирически при условии, что все теплотехнические характеристики материалов, применяемые в ОК, известны. Для нашей задачи a неизвестно и требует определения.

При рассмотрении задачи принято решение воспользоваться законом Ньютона – Рихмана. В общей постановке вопроса закон выражается следующим уравнением:

$$k \frac{\partial u}{\partial \bar{n}} \Big|_{\partial \Omega} = \alpha (f(x) - U_{\partial \Omega}).$$

Здесь k – коэффициент теплопроводности; Ω – рассматриваемая область конструкции,

$$\Omega = \{(x, t): x \in (0, l), t > 0\},$$

где l – толщина ограждающей конструкции.

Выводим граничные условия.

Начальные условия:

$$U|_{t=0} = U_0(x).$$

Первое краевое условие:

$$-kU'_x \Big|_{x=0} = \alpha_1 (f_1(t) - U(t, 0)),$$

где $f_1(t)$ – температура наружной поверхности ОК; α_1 – коэффициент теплоотдачи наружной поверхности ОК.

Второе краевое условие:

$$kU_x' \Big|_{x=l} = \alpha_2 (f_2(t) - U(t, l)),$$

где $f_2(t)$ – температура внутренней поверхности ОК; α_2 – коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности ОК.

Выполняем дискретизацию по t и переходим к системе краевых задач для дифференциальных уравнений 2-го порядка. Делим $[0, T]$ на n отрезков $[t_{i-1}, t_i]$, $i = 1, \dots, n$ и приближаем:

$$U_t' = \frac{U_i - U_{i-1}}{\Delta t_i}, \quad \Delta t_i = t_i - t_{i-1},$$

где Δt_i – разность температур; t_i – температура в i -м сечении.

Переходим к системе рекуррентных уравнений

$$U_i = a^2 \Delta t_i \frac{\partial^2 U_i}{\partial x^2} + U_{i-1}, \quad i = 1, \dots, n$$

и пересчитываем краевые условия:

$$\begin{aligned} -k \frac{\partial U_i}{\partial x^2} \Big|_{x=0} &= \alpha_1 (t_i) (f_1(t_i) - U(t_i, 0)); \\ k \frac{\partial U_i}{\partial x^2} \Big|_{x=l} &= \alpha_2 (t_i) (f_2(t_i) - U(t_i, l)). \end{aligned}$$

Решение $U_i = U_i(x, k)$ на концах принимает известные значения.

$U_i(0, k) = U_i$ – фактические температуры поверхности стены внутри помещения; $U_i(l, k) = U_i$ – фактические температуры поверхности стены снаружи помещения.

Обе задачи решаются методом касательных (Ньютона), на i -м шаге определяем усреднённое k_i , подставляем значение k в $U_i(x, k)$ и переходим к $i+1$ -й краевой задаче.

Методы решения обратных задач теплофизики являются методами математического моделирования, но без экспериментального определения температур эти методы не позволяют получить достоверные искомые результаты с минимально допустимой погрешностью.

Для обоснования и подтверждения математической модели определения теплотехнических характеристик ограждающей конструкции в натурных условиях при нестационарном тепловом режиме необходимо проведение натурных исследований.

Принцип проведения испытания заключается в определении величины и степени влияния тепловой инерции испытуемого участка ограждающей

конструкции посредством периодического нагрева и остывания. В зависимости от интенсивности прогрева принимающей поверхности (поверхность ОК, которая подвергается нагреву) ограждающей конструкции нагревательным устройством и скорости отзыва на отдающей поверхности, можно судить о величине тепловой инерции участка ограждающей конструкции (рис. 1).



Рис. 1. График определения тепловой инерции испытуемого участка ограждающей конструкции:

t_1 – температура поверхностей ОК в момент начала испытания; t_2 – максимальная температура отклика отдающей поверхности ОК; T_1 – время начала отклика отдающей поверхности; T_2 – время работы (прогрева) принимающей поверхности; T_3 – время максимального отклика отдающей поверхности; T_4 – время работы (прогрева) принимающей поверхности

Как источник тепла рекомендуется использовать нагреватель с направленным инфракрасным излучателем, позволяющим мгновенно передавать тепловую энергию на принимающую поверхность. Мощность излучателя 2000 Вт позволяет пренебречь влиянием движения воздуха в помещении на передачу тепла в конструкцию.

При проведении натурного испытания необходимо осуществлять сбор и обработку входящих и исходящих параметров, для этого разрабатывается испытательная установка, которая будет производить измерения, обработку и хранение следующих необходимых характеристик и показателей:

- температуру воздуха в помещении на расстоянии 1 м от испытуемого участка ОК со стороны принимающей и отдающей поверхностей в четырех уровнях по высоте;

- температуру воздуха в помещении на расстоянии 10 см от испытуемого участка ОК со стороны принимающей и отдающей поверхностей в четырех уровнях по высоте;
- температуру поверхности ОК со стороны принимающей и отдающей поверхностей в зоне действия нагрева;
- скорость прироста температуры при нагреве принимающей поверхности ОК в зоне действия нагрева;
- скорость отзыва (повышения температуры) на отдающей поверхности ОК в зоне действия нагрева;
- скорость охлаждения принимающей поверхности ОК;
- скорость инерционного затухания отдающей поверхности ОК;
- влажность воздуха в помещениях со стороны принимающей и отдающей поверхностей ОК;
- влажность материала ОК (в случае испытания однослойной ОК);
- величину теплового потока, проходящего сквозь толщу ОК.

За основу рабочей модели измерительного теплотехнического комплекса принята установка, разработанная и описанная в работе [14]. В ней авторы приводят анализ существующего оборудования для определения тепловлажностных параметров, выделяют преимущества и недостатки различных контактных и безконтактных средств измерений. На основе проведенного анализа приборов и оборудования они выделяют комплект оборудования для разработки и построения лабораторной установки по соотношению «цена – качество», позволяющий контролировать необходимые теплотехнические параметры как при стационарном, так и нестационарном тепловом режиме наружных ограждающих конструкций и параметрах микроклимата помещений в натурных условиях, который удовлетворяет действующим требованиям по измерению теплотехнических параметров ограждающих конструкций.

Лабораторная установка выполнена:

- из датчика измерения температуры и влажности ДНТ-22, имеющего напряжение питания 3,3–5 В, диапазон измерения влажности 0–100 % с погрешностью ± 2 %, диапазон измерения температуры $-40 \dots +80$ °С с погрешностью $\pm 0,5$ °С;
- датчика теплового потока ДТП 0924, имеющего диапазон измеряемых плотностей теплового потока 10–1500 Вт/м², коэффициент преобразования 20–50 мВ/(Вт/м²), рабочий диапазон температур 10–200 °С, термическое сопротивление 0,004–0,03 м²К/Вт;
- считывающего аналого-цифрового преобразователя на основе платы формы АТmega2560, имеющего 54 цифровых пинов входа/выхода, 16 аналоговых входов, кварцевый генератор 16 МГц, разъем USB, силовой разъем и разъем ICSP.

Для проведения необходимого натурного испытания установка, предложенная в работе [14], подверглась усовершенствованию – текст программы мониторинга и сбора данных переработан, количество датчиков изменено в соответствии с необходимыми требованиями при проведения испытания.

На первом этапе натурных исследований будет проведен активный эксперимент в контролируемых и управляемых условиях (рис. 2).

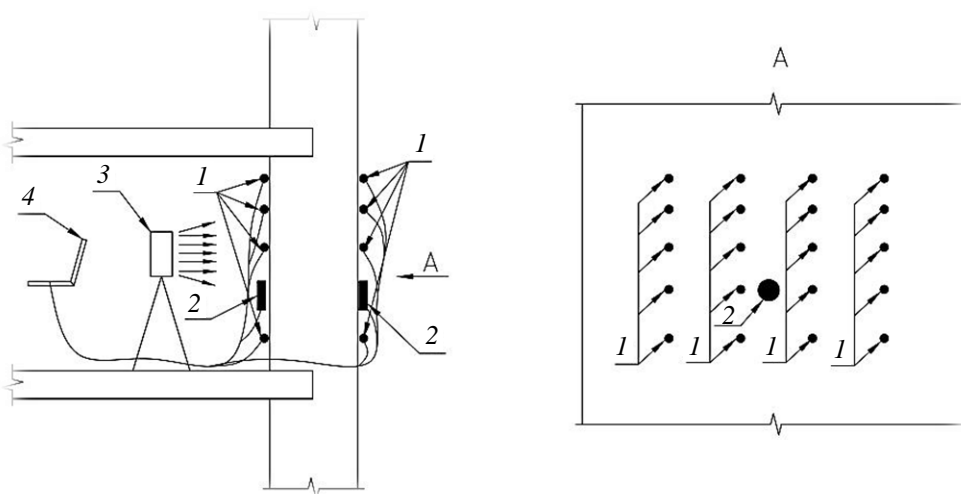


Рис. 2. Принципиальная схема проведения натурального эксперимента:

1 – датчики температуры/влажности; 2 – датчик теплового потока; 3 – нагревательное устройство; 4 – персональный компьютер с установленным ПО по обработке входящих данных

Испытанию подвергнется фрагмент однослойной изолированной от попадания солнечных лучей части внутренней ограждающей конструкции (межкомнатная стена) с одинаковыми величинами температуры, влажности в помещениях со стороны принимающей и отдающей поверхностей с отсутствием влияния перепадов температур от наружных ОК.

Заключение

Предложенное решение задачи определения сопротивления теплопередаче при нестационарном режиме основывается на законе Ньютона – Рихмана с заданными граничными условиями. Решение осуществляется методом касательных, но без экспериментального определения температур на поверхностях ограждающих конструкций этот метод не позволяет получить достоверные данные.

По результатам проведения натурных испытаний и полученному массиву данных измеряемых физических параметров с выявлением степени влияния тепловой инерции будет определена достоверность результатов математической модели и возможность дальнейшего развития предложенного метода.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings.
2. Постановление Правительства Российской Федерации № 603 от 20 мая 2017 года «О внесении изменений в Постановление Правительства Российской Федерации от 25 января 2011 г. № 18». URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId>
3. Алифанов О.М. О состоянии и перспективах развития обратных задач теплообмена в исследовании тепловых процессов и проектировании технических систем / АН БССР. Ин-т тепломассообмена. Минск : Препр., 1977. 14 с.

4. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел / под ред. А.А. Померанцева. Москва : Наука, 1964. 488 с.
5. Stolz G. Numerical Solutions to an inverse problem of heat conduction for simple shapes // Trans. ASME. Ser. C.J. Heat Transfer. 1960. 82. № 1. P. 20–26.
6. Шумаков Н.В. Метод экспериментального изучения процесса нагрева твердого тела // Журнал технической физики. 1957. 27. № 4. С. 844–855.
7. Макаров Р.А., Муреев П.Н., Макаров А.Н. Определение фактического сопротивления теплопередаче наружных стен, выполненных из кирпича, зданий постройки 60–80-х годов XX века // Фундаментальные исследования. 2015. № 2-18. С. 3960–3965.
8. Чернышов В.Н., Чернышов А.В. Метод неразрушающего контроля теплофизических характеристик строительных материалов многослойных конструкций // Вестник ТГТУ. 2002. Т. 8. № 1. С. 128–133.
9. Пулипенко Н.В., Лазуренко Н.В. Методика определения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций зданий различного назначения // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2006. Т. 6. № 8. С. 73–77.
10. D'Agostino D., Zangheri P., Castellazzi L. Towards Nearly Zero Energy Buildings in Europe: A Focus on Retrofit in Non-Residential Buildings // Energies. 2017. 10. 117.
11. Manfredi M., Aste N., Moshksar R., Calibration and uncertainty analysis for computer models – A meta-model based approach for integrated building energy simulation // Applied Energy. 2013. 103. P. 627–641.
12. Revel G.M., Sabbatini E., Arnesalo M. Development and Experimental Evaluation of a Thermography Measurement System for Real-Time Monitoring of Comfort and Heat Rate Exchange in the Built Environment // Measurement Science and Technology. 2012. V. 23. № 3.
13. Chari A., Xanthos S. Stochastic assessment of the energy performance of buildings // Energy Efficiency. 2017. July. 10 (8).
14. Белоус А.Н., Оверченко М.В., Белоус О.Е. Разработка теплотехнического измерительного комплекса // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2020. Т. 22. № 1. С. 140–151.

REFERENCES

1. Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings.
2. Postanovlenie Pravitel'stva Rossiiskoi Federatsii N 603 ot 20 maya 2017 goda "O vnesenii izmenenii v postanovlenie Pravitel'stva Rossiiskoi Federatsii ot 25 yanvarya 2011 g. N 18" [Regulation of the Russian Government No. 603 of May 20, 2017 "Amendments to regulation of the Russian Government", N 18, January 25, 2011]. Available: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId> (accessed August 20, 2020).
3. Alifanov O.M. O sostoyanii i perspektivakh razvitiya obratnykh zadach teploobmena v issledovanii teplovykh protsessov i proektirovanie tekhnicheskikh sistem [Development of inverse problems of heat transfer in thermal processes and design of engineering systems]. Minsk, 1977. 14 p. (rus)
4. Karstlou G., Eger D. Teploprovodnost' tverdykh tel [Thermal conductivity of solids]. A.A. Pomerantsev, Ed. Moscow: Nauka, 1964. 488 p. (rus)
5. Stolz G. Numerical solutions to an inverse problem of heat conduction for simple shapes. ASME Journal of Heat Transfer. 1960. V. 82. No. 1. Pp. 20–26.
6. Shumakov N.V. Metod eksperimental'nogo izucheniya protsessa nagreva tverdogo tela [Solid body heating process]. Zhurnal tekhnicheskoi fiziki. 1957. V. 27. No. 4. Pp. 844–855. (rus)
7. Makarov R.A., Mureev P.N., Makarov A.N. Opredelenie fakticheskogo soprotivleniya teploperedache naruzhnykh sten, vypolnennykh iz kirpicha, zdaniy postroiki 60–80-kh godov khkh veka [Determination of thermal resistance of external brick walls in buildings built in the 60–80s of the 20th century]. Fundamental'nye issledovaniya. 2015. V. 18. No. 2. Pp. 3960–3965. (rus)
8. Chernyshov V.N. Chernyshov A.V. Metod nerazrushayushchego kontrolya teplofizicheskikh kharakteristik stroitel'nykh materialov mnogoslloinykh konstruktssii [Non-destructive testing of thermophysical characteristics of building materials for multilayer structures]. Vestnik TGTU. 2002. V. 8. No. 1 Pp. 128–133. (rus)

9. Pilipenko N.V., Lazurenko N.V. Metodika opredeleniya soprotivleniya teploperedache ograzhdayushchikh konstruktssii zdaniy razlichnogo naznacheniya [Thermal resistance of walling systems of buildings for various purposes]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki*. 2006. V. 6. No. 8. Pp. 73–77. (rus)
10. D'Agostino D., Zangheri P., Castellazzi L. Towards nearly zero energy buildings in Europe: A focus on retrofit in non-residential buildings. *Energies*. 2017. V. 10. No. 117. Pp. 1–15.
11. Manfren M., Aste N., Moshksar R. Calibration and uncertainty analysis for computer models – A meta-model based approach for integrated building energy simulation. *Applied Energy*. 2013. V. 103. Pp. 627–641.
12. Revel G.M., Sabbatini E., Arnesalo M. Development and experimental evaluation of a thermography measurement system for real-time monitoring of comfort and heat rate exchange in the built environment. *Measurement Science and Technology*. 2012. V. 23. No. 3.
13. Chari A., Xanthos S. Stochastic assessment of the energy performance of buildings. *Energy Efficiency*. 2017. V. 8. No. 14.
14. Belous A.N., Overchenko M.V., Belous O.E. Perenosnoi teplotekhnicheskii izmeritel'nyi kompleks [Portable heat metering system design]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2020. V. 22. No. 1. Pp. 140–151.

Сведения об авторах

Белов Алексей Николаевич, канд. техн. наук, доцент, Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, 286123, Донецкая Народная Республика, г. Макеевка, ул. Державина, 2, us28@ya.ru

Котов Герман Александрович, канд. физ.-мат. наук, Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, 286123, Донецкая Народная Республика, г. Макеевка, ул. Державина, 2, g.a.kotov@donnasa.ru

Сапронов Дмитрий Александрович, ассистент, Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, 286123, Донецкая Народная Республика, г. Макеевка, ул. Державина, 2, d.a.sapronov@donnasa.ru

Новиков Богдан Александрович, аспирант, Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, 286123, Донецкая Народная Республика, г. Макеевка, ул. Державина, 2, bogdan.novikov2017@gmail.com

Authors Details

Aleksei N. Belous, PhD, A/Professor, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, 2, Derzhavin Str., 86123, Makiivka, Donetsk People's Republic, us28@ya.ru

German A. Kotov, PhD, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, 2, Derzhavin Str., 86123, Makiivka, Donetsk People's Republic, g.a.kotov@donnasa.ru

Dmitriy A. Sapronov, Assistant Lecturer, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, 2, Derzhavin Str., 86123, Makiivka, Donetsk People's Republic, d.a.sapronov@donnasa.ru

Bogdan A. Novikov, Research Assistant, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, 2, Derzhavin Str., 86123, Makiivka, Donetsk People's Republic, bogdan.novikov2017@gmail.com