

УДК 697.1:536.2

ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО НОРМИРОВАНИЮ СОПРОТИВЛЕНИЯ ТЕПЛОПЕРЕДАЧЕ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЙ

Грызлов В.С., Каптюшина А.Г.

ФГБОУ ВО «Череповецкий государственный университет», Череповец, e-mail: gryvs@mail.ru

Сопротивление теплопередаче ограждающих конструкций зданий является главной характеристикой при их проектировании, т.е. определении толщины сечения, выбора соответствующих теплоизоляционных материалов, их энергосберегающей и экономической обоснованности. Все мероприятия по утеплению наружных стен должны соотноситься с предельными значениями удельных единовременных затрат, при которых эти мероприятия окупаются. В статье изложены предложения по уточнению методики назначения нормативных величин сопротивления теплопередаче, рекомендованных СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий». Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003. В основу данных предложений положены нормативные региональные санитарно-гигиенические требования, являющиеся прямым следствием теории теплопередачи и характеристики тепловой инерционности ограждающих конструкций. Предложены формулы для расчета критерия окупаемости теплозащиты ограждающих конструкций здания. Полученные уравнения позволяют учитывать нестационарные условия теплопередачи и хорошо адаптируются к региональным климатическим параметрам. Приведены результаты длительных теплотехнических испытаний фрагментов однослойных и многослойных стен, которые проводились на специальном стенде в естественных микроклиматических условиях, в том числе из керамзитобетона, газобетона, пенобетона, трехслойной кирпичной стены, легких ограждений из ГВЛ Кнауф и пенополистирола. Получены уравнения для расчета требуемых значений сопротивления теплопередаче наружных стен. Представленные предложения способствуют уточнению экономических критериев и позволяют более объективно оценивать величину единовременных затрат на дополнительное утепление конструкций.

Ключевые слова: сопротивление теплопередаче, удельные единовременные затраты, окупаемость, тепловая инерционность

PROPOSALS FOR THE REGULATION OF THERMAL RESISTANCE OF ENCLOSING STRUCTURES OF BUILDINGS

Gryzlov V.S., Kartyushina A.G.

Cherepovets State University, Cherepovets, e-mail: gryvs@mail.ru

Resistance to heat transfer of building envelope is the main characteristic in their design, i.e. determining the thickness of the cross section, the choice of appropriate thermal insulation materials, their energy saving and economic feasibility. All arrangements for the insulation of exterior walls should relate to the limit values of specific non-recurring costs in which these activities pay off. The article presents suggestions for refinement of the methodology for the assignment of normative values of thermal resistance of recommended SP 50.13330.2012 «Thermal protection of buildings». Updated version of SNiP 23-02-2003. The basis of these proposals is the normative regional sanitary and hygienic requirements, which are a direct consequence of the theory of heat transfer and characteristics of thermal inertia of enclosing structures. Formulas for calculation of macroeconomic criterion of payback of increase of thermal protection of the protecting designs of the building are offered. The obtained equations allow to take into account non-stationary heat transfer conditions and adapt well to regional climatic parameters. The results of long-term thermal tests of fragments of single-layer and multi-layer walls which were carried out on a special stand in natural microclimatic conditions are presented, including from expanded clay concrete, aerated concrete, foam concrete, a three-layer brick wall, light protections from GVL Knauf and expanded polystyrene. Equations for calculation of required values of heat transfer resistance of external walls are received. The presented proposals contribute to the refinement of economic criteria and allow a more objective assessment of the value of one-time costs for additional insulation of structures.

Keywords: heat transfer resistance, specific one-time costs, payback, thermal inertia

Повышение энергоэффективности жилых зданий, продиктованное энергетическим кризисом, потребовало значительного увеличения нормативных требований к сопротивлению теплопередаче ограждающих конструкций этих зданий и разработки комплекса энергосберегающих мероприятий.

В работах [1, 2] и ряде других указывается на необходимость согласованного уточнения этих требований с инвестиционными затратами на создание и модификацию новых производств при условии окупаемости этих затрат. Серьезным аргументом такого уточнения является то, что зависимость теплопотерь от приведенного сопротивле-

ния теплопередаче имеет ярко выраженный убывающий экспоненциальный вид, при анализе которого можно сделать вывод, что увеличение сопротивления теплопередаче более определенного уровня (например, 2,3 м²·°С/Вт для центрального региона РФ) не приводит к заметному уменьшению тепловых потерь (рис. 1).

Цель исследования: разработать методы назначения региональных нормативных величин сопротивления теплопередаче, учитывающих условия нестационарной теплопередачи и критерии окупаемости повышения теплозащиты ограждающих конструкций здания.

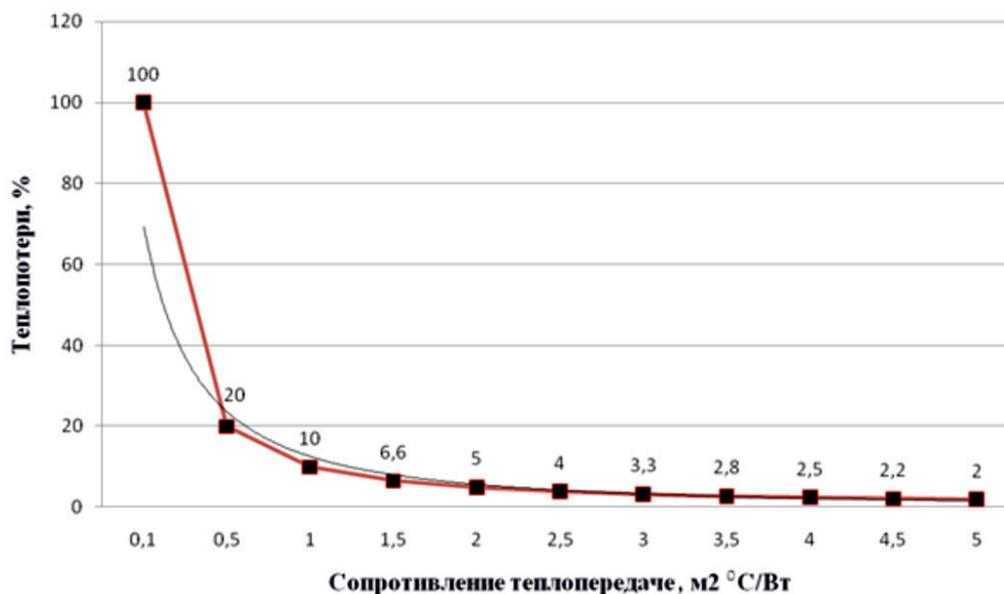


Рис. 1. Зависимость теплопотери от приведенного сопротивления теплопередаче

Материалы и методы исследования

В общем виде необходимое условие окупаемости, для оценочных расчетов энергомодификации ограждающих конструкций можно выразить неравенством

$$(\Delta K / \Delta k) < \omega = (0,024 \cdot D_d \cdot C_T) / p, \quad (1)$$

где ΔK – единовременные затраты на техническое решение, в частности дополнительное утепление конструкции; p – годовая процентная ставка за банковский кредит; D_d – градусо-сутки отопительного периода; Δk – снижение коэффициента теплопередачи при дополнительном утеплении ограждения; C_T – цена тепловой энергии.

В данном неравенстве ω (предельное значение удельных единовременных затрат) является макроэкономическим параметром и определяет предел технико-экономических возможностей повышения теплозащиты ограждающих конструкций в регионе:

$$\omega > C_{yt} \lambda (R^n)^2, \quad (2)$$

где C_{yt} – стоимость утеплителя, λ – коэффициент теплопроводности теплоизоляционного материала, R^n – нормируемое сопротивление теплопередаче.

Таким образом устанавливается связь параметров: конструкции (R^n) и утеплителя (λ) с учетом его стоимости на региональном рынке. В целом это позволяет назначать региональные ограничения на повышение теплозащиты ограждающих конструкций с учетом максимально допустимой цены теплоизоляционного материала, при которой затраты на утепление ограждающей конструкции до заданного уровня теплозащиты могут окупиться за счет экономии тепловой энергии.

В (2) наиболее сложной является физико-техническая объективность нормирования сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций.

Согласно СП 50.13330.2012 [3], нормируемые значения R^n предложено определять по формуле

$$R^n = aD_d + b, \quad (3)$$

где $D_d = (t_b - t_{ct})z_{on}$; t_b , t_{ct} , z_{on} – расчетная температура внутреннего воздуха, средняя температура наружного воздуха за отопительный период и его продолжительность в сутках; a , b – безразмерные эмпирические коэффициенты, назначаемые по виду конструкций и типу зданий.

Обязательным является требование

$$R_0^p \geq R^n. \quad (4)$$

R_0^p – расчетное (фактическое) сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции.

Проектирование тепловой защиты зданий начинается с анализа климатических условий района будущего строительства. В первом приближении теплопотери пропорциональны снижению температуры и длительности периода с низкими температурами. В СП 50.13330.2012 [3] суровость климата принято характеризовать числом градусо-суток отопительного периода. В других странах применяются иные схемы подсчета D_d , в том числе в них может использоваться более одного значения D_d [4, 5].

С другой стороны, суровость отопительного периода характеризуют пиковые низкие температуры (наиболее холодных суток, наиболее холодной пятидневки, абсолютной минимальной), которые создают наибольшую напряженность для теплозащитных способностей ограждающих конструкций. В некоторых работах введено понятие «эквивалентная температура», которая отражает степень суровости климата как совместное влияние температуры воздуха и ветра в зависимости от приспособленности объекта к каждому из факторов. Одновременно с этим в ряде работ предлагается использовать понятие «стандартные условия» и вводить индекс степе-

ни суровости климата, соответствующий максимальному отклонению от своего стандартного значения [6, 7]. В прежней редакции СНиП II-3-79 «Строительная теплотехника» расчетную зимнюю температуру наружного воздуха принимали с учетом тепловой инерции ограждающей конструкции, что в определенной степени дифференцировало влияние климатических условий на тепловой режим зданий.

В связи с вышеизложенным использование показателя D_a в теплотехнических расчетах вызывает сомнение и требует дополнительного обоснования. Данный показатель в большей степени влияет на экономическую оценку теплозащиты (формулы 2, 3) и в меньшей может рассматриваться как теплофизический фактор при ее проектировании. Более логичными и рациональными являются показатели температуры наружного воздуха за отопительный период, так как теплотехнические свойства материалов (теплопроводность) функционально зависят от температуры окружающей среды. Упрощение этого влияния, особенно в условиях нестационарной теплопередачи, приводит к нарушению теплового баланса и комфортного режима зданий. Поэтому предлагаемая для расчета R^n формула (3) не соответствует физической сущности процесса теплопередачи в конструкции и не обеспечивает размерность сопротивления теплопередаче: $m^2 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{Вт}$.

Ограждения зданий должны обладать требуемыми теплозащитными свойствами, которые определяются двумя показателями: величиной сопротивления теплопередаче R_0^p и теплоустойчивостью, которую оценивают по характеристике тепловой инерции ограждения D . Параметр R_0^p определяет сопротивление ограждения передаче тепла в стационарных условиях, а теплоустойчивость характеризует сопротивляемость ограждения передаче изменяющихся во времени периодических температурных колебаний, т.е. нестационарных условий теплопередачи. Очень важно, чтобы расчетное сопротивление теплопередаче R_0^p , определяемое как сумма термических сопротивлений отдельных слоев ограждения R_i и сопротивлений теплообмену на внутренней $R_{\text{в}}$ и наружной $R_{\text{н}}$ поверхностях ограждения, было больше минимально допустимого санитарно-гигиенического сопротивления теплопередаче R_0 , т.е.:

$$R_0^p \geq R_0, \quad (5)$$

где $R_0^p = R_{\text{в}} + \sum R_i + R_{\text{н}}$; $R_i = \delta / \lambda_c$; $R_0 \geq n(t_{\text{в}} - t_{\text{н}}) / \Delta t_n \alpha_{\text{в}}$, δ – толщина отдельного слоя в сечении ограждения, м; λ_c – коэффициент теплопроводности материала слоя, Вт/(м $^\circ\text{C}$); n – коэффициент, принимаемый в зависимости от положения наружной поверхности ограждающих конструкций по отношению к наружному воздуху; $t_{\text{в}}$ – расчетная температура внутреннего воздуха, принимаемая по нормам проектирования соответствующих зданий, $^\circ\text{C}$; $t_{\text{н}}$ – расчетная зимняя температура, $^\circ\text{C}$, равная средней температуре наиболее холодной пятидневки обеспеченностью 0,92; Δt_n – нормативный температурный перепад между температурой внутреннего воздуха и температурой внутренней поверхности ограждающей конструкции, $^\circ\text{C}$.

Значение R_0 следует принимать как нижний предел допустимых значений сопротивления теплопередаче для данного климатического района и как условие соблюдения санитарно-гигиенических требований, что является прямым следствием теории теплопередачи, вытекающим из равенства потоков

тепла, проходящих через любое сечение конструкции и через все ограждение в целом.

«В строительной теплотехнике большие значения имеют вопросы, связанные с периодическими колебаниями температур и тепловых потоков» [8]. В естественных условиях адаптационного периода режим теплопередачи через ограждения в большей степени является нестационарным, что отражается на их теплонакопительной способности. «Эта способность зависит от плотности материала ограждений, и у тяжелых стен она выше, чем у легких конструкций. Зимой помещения с большей теплонакопительной способностью при отключении отопления охлаждаются с меньшей скоростью, а летом избыточная энергия в дневное время может накапливаться для того, чтобы отдать ее в воздух помещения в прохладные ночные часы» [9]. Наиболее холодные и жаркие периоды года отмечены особенно резкими изменениями температуры и солнечной радиации. Эти периоды наибольшего охлаждения и наибольшего нагрева при проектировании ограждений и систем отопления являются экстремальными, поэтому основные теплотехнические расчеты должны выполняться с учетом нестационарности условий. Умение рассчитывать переменные процессы необходимо также для правильной замены сложного нестационарного явления простым стационарным. При этом надо находить такие условия замены, при которых точность упрощенного расчета не выйдет за пределы допустимых погрешностей [10].

В связи с этим для инженерных расчетов значения R^n предлагается следующее условие

$$R^n \geq R_0 + \varepsilon R_0, \quad (6)$$

где εR_0 – поправка, учитывающая нестационарность теплопередачи и инерционность конструкции.

Возникает задача: как определить значение ε в формуле (6)? Рассмотрим решение данной задачи с позиции теплоинерционности конструкций. В теплотехнических расчетах это связано с понятием массивности стен, характеризующихся величиной тепловой инерции (D), численно равной сумме произведений термических сопротивлений отдельных слоев ограждающей конструкции на коэффициенты теплоусвоения (s) материала этих слоев.

Тепловая инерция также характеризует степень затухания амплитуды колебаний температуры наружного воздуха и влияние ее на амплитуду колебаний температуры воздуха внутри помещения. Чем больше теплонакопительная способность ограждающей конструкции, тем менее influentialны колебания наружного воздуха. При медленном понижении температуры, до начала периода резкого похолодания, распределение температуры в ограждении в каждый момент времени практически соответствует стационарному. В период резкого похолодания в каждый момент времени распределение температуры заметно отличается от стационарного. Амплитуда изменения температуры на внутренней поверхности ограждения $A_{\text{тв}}$ будет отставать от изменений наружной амплитуды $A_{\text{н}}$. Для стационарного режима теплопередачи отношение между амплитудами соответствует

$$A_{\text{тв}} / A_{\text{н}} = R_{\text{в}} / R_0. \quad (7)$$

В условиях нестационарной теплопередачи периода резкого похолодания, для ограждения опреде-

ленной тепловой инерции выражение (7) записывается в виде

$$A_{\text{тв}} / A_{\text{тн}} = R_{\text{в}} / \psi R_0, \quad (8)$$

откуда

$$\psi = \nu R_{\text{в}} / R_0, \quad (9)$$

где ν – показатель сквозного затухания в ограждении разового отклонения $A_{\text{тн}}$ температурной волны, зависящей от тепловой инерции конструкции; $\nu = A_{\text{тн}} / A_{\text{тв}}$.

Из теории теплоустойчивости [10] известно, что коэффициент теплоинерционности ψ , учитывающий нестационарность теплопередачи, меняется в пределах $0 < \psi < 1$ и показывает, какую долю от R_0 нужно принять в расчет, чтобы, пользуясь формулой (7) стационарной теплопередачи, получить значение $A_{\text{тв}}$, которое будет соответствовать фактическому в условиях нестационарного процесса теплопередачи через ограждение, обладающее определенной теплоустойчивостью. Если принять значение ψ наиболее массивной конструкции за единицу, то менее массивные конструкции должны достигать такой инерционности за счет ее увеличения до единицы, т.е. $\varepsilon = 1 - \psi$. Подставляя это выражение в (6), получаем

$$R^{\text{н}} = R_0(2 - \psi). \quad (10)$$

Выражение (10) представляет рационально допустимые нормативные значения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций и может выступать основным аргументом при поэлементном проектировании этих конструкций, назначении толщины теплоизоляции и выборе материалов.

Результаты исследования и их обсуждение

Вопросы нестационарной теплопередачи непосредственно связаны с разработкой метода материаловедческого подхода по назначению и расположению температурозатухающих слоев в ограждающей конструкции и повышению ее теплоустойчивости. Поэтому развитие экспериментального проектирования и строительства должно предусматривать натурную апробацию эффективных материалов и технологий с предварительным изучением их теплозащитных свойств на экспериментальных стендах.

В научно-технической литературе предлагается ряд методик для расчета ψ , однако большинство из них связано с оценкой теплоустойчивости ограждающих конструкций в летний период и не в полной мере отражают реальные условия нестационарной теплопередачи в холодное время года. Коэффициент теплоинерционности ограждения можно оценить экспериментально по результатам длительных натуральных наблюдений, фиксирующих нестационарность теплопередачи с последующей статистической обработкой полученных данных по амплитудам колебаний температуры наружного воздуха и на внутренней поверхности ограждения.

Таблица 1

Характеристики фрагментов ограждающих конструкций

Слой материал (от наружной поверхности)		Фрагменты ограждающих конструкций						
		1	2	3	4	5	6	7
1	Материал	Керамзитобетон	Пенобетон	Газобетон	ГВЛ Кнауф	ГВЛ Кнауф	ISOPLAAT	ГВЛ Кнауф
	δ (м)	0,3	0,3	0,185	0,01	0,01	0,012	0,01
	λ (Вт/м °С)	0,24	0,22	0,088	0,29	0,29	0,05	0,29
	γ (кг/м ³)	900	600	400	1100	1100	250	1100
	s (Вт/м ² °С)	4,47	3,36	1,74	4,4	4,4	1,57	4,4
2	Материал	–	–	–	Полистиролбетон	Пенополистирол	ROCWOOL LIGHTBATTS	Пенополистирол
	δ (м)	–	–	–	0,21	0,05	0,196	0,05
	λ (Вт/м °С)	–	–	–	0,142	0,029	0,045	0,041
	γ (кг/м ³)	–	–	–	500	25	37	40
	s (Вт/м ² °С)	–	–	–	2,52	0,27	0,33	0,41
3	Материал	–	–	–	–	Кирпич керамический	ГВЛ Кнауф	ГВЛ Кнауф
	δ (м)	–	–	–	–	0,12	0,01	0,01
	λ (Вт/м °С)	–	–	–	–	0,35	0,29	0,29
	γ (кг/м ³)	–	–	–	–	1200	1100	1100
	s (Вт/м ² °С)	–	–	–	–	5,31	4,4	4,4
	D	5,6	4,6	3,6	3,9	2,4	2,0	0,86

Примечание: δ – толщина слоя; λ – коэффициент теплопроводности, определялся в натуральных условиях зондовым методом – прибором ИТП МГ4 «Зонд»; γ – плотность; s – коэффициент теплоусвоения.

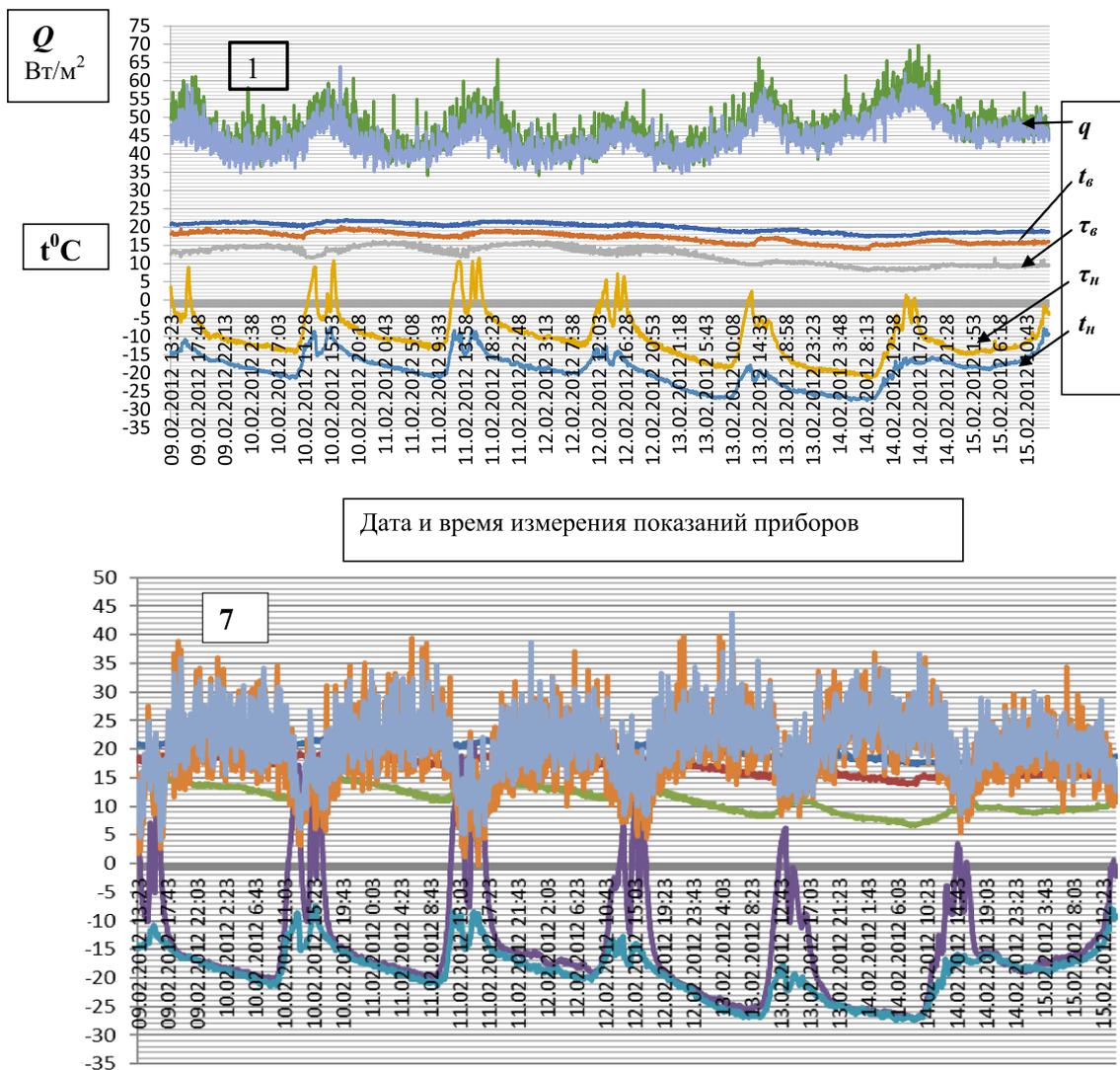


Рис. 2. Результаты испытаний фрагментов № 1 и 7

Данные эксперименты проводились на специальном стенде для длительных натуральных теплотехнических исследований в условиях микроклимата осенне-зимнего периода г. Череповца [11]. Стенд позволяет проводить длительные натурные испытания одновременно на четырех фрагментах, что дает возможность достоверного сравнения разных слоистых и однородных композитов в идентичных микроклиматических условиях. Измерения и анализ данных осуществляются посредством набора приборов, формирующих измерительно-вычислительный комплекс. Достоверность полученных результатов измерений достигается соблюдением граничных условий третьего рода за счет эффективной теплоизоляции фрагментов по периметру. Для теплотехнических испытаний был выбран ряд типовых фраг-

ментов наружных стен жилых зданий, характеристики которых приведены в табл. 1. Во время испытаний измерялась температура внутренней и наружной поверхности фрагментов и плотность удельного теплового потока q ($\text{Вт/м}^2 \text{ } ^{\circ}\text{C}$). Значения измерений фиксировались каждые пять минут. На графиках (рис. 2) представлены фактические результаты измерения тепловых потоков и температур для некоторых фрагментов. Подтверждено, что инерционность и теплопроводность фрагментов оказывают определенное влияние на временное смещение экстремумов тепловых потоков и температур на внутренней поверхности. Например, для фрагмента 1 такие смещения наблюдаются в интервале 8–12 ч, для фрагмента 7 смещений практически нет, для других фрагментов – в пределах 3–8 ч.

У фрагмента 7 практически отсутствует тепловая инерционность, что в свою очередь исключает теплоаккумулирующую способность и приводит к завышенному теплообмену на наружной поверхности, изменение теплового потока и температуры на внутренней поверхности фрагмента 7 происходит без сдвига во времени.

Результаты расчета коэффициента тепловой инерционности по формуле (10) с учетом экспериментально-статистических значений амплитуд колебания температур на наружной и внутренней поверхности фрагментов подтвердили пропорциональную зависимость ψ от D (табл. 2).

Таблица 2
Расчет показателей тепловой инерционности и R^n

Фрагмент №	D	ν $z = 12$	Ψ $z = 12$	R^n при $R_0 = 1,52 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$ г. Череповец по (11)
1	5,6	10,2	0,83	1,70
2	4,6	7,81	0,78	1,98
4	3,95	5,53	0,69	2,15
3	3,6	2,87	0,37	2,25
5	2,43	2,82	0,35	2,57
6	1,96	2,94	0,16	2,70
7	0,86	0,56	0,05	3,00

Примечание. z – период колебания теплового потока, час.

После аппроксимации получено уравнение, отражающее зависимость ψ от D $\psi = 0,18 D - 0,13$, позволяющее представить выражение (10) в виде

$$R^n = 0,18R_0 (11,8 - D). \quad (11)$$

Выражение [11] является удобной формой для инженерного расчета нормативного значения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций, соответствует физической сущности процесса теплопередачи, учитывает климатические условия и инвестиционные возможности региона строительства.

Заключение

Предложено экспериментально-методическое обоснование для назначения нормативных величин сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций с учетом их тепловой инерционности и региональных микроклиматических параметров. В целом это создает предпосылки для более объективного определения величин единовременных затрат на дополнительное утепление многослойных конструкций наружных стен и формирования региональной политики в вопросах энергоэффективности жилых зданий.

Список литературы

1. Грабовый П.Г. и др. Основы энергоресурсосбережения в жилищной и коммунальной сфере: монография / Под общ. ред. Л.Н. Чернышова. Иркутск: Байкальский фил. «Сосновгеология» ФГУП «Урангеологоразведка», 2008. 429 с.
2. Грызлов В.С. Техничко-экономическая оценка повышения теплозащиты ограждающих конструкций в регионе // Вестник ЧГУ. 2010. № 3 (26). С. 74–78.
3. СП 50.13330 «Тепловая защита зданий». Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003» Минрегион России, 2012. 95 с. [Электронный ресурс]. URL: www.normacs.ru (дата обращения: 17.11.2018).
4. W. Blasi. Bauphysik. Verlag Europa Lehrmittel. Nourney. Vollmer GmbH & Co. 2001. 480 p.
5. Ливчак В.И. Градусо-сутки отопительного периода как инструмент сравнения уровня энергоэффективности зданий в России и других странах // Энергосбережение 2015. № 6. С. 20–25.
6. Гагарин В.Г., Чжоу Чжибо. О нормировании тепловой защиты зданий в Китае // Жилищное строительство. 2015. № 7. С. 18–22.
7. Мастюков С.И., Червякова Н.В. Оценка степени суровости климата севера Евразии в зимний период // Навигация и гидрография. 2014. № 38. С. 66–714.
8. Курочкин С.Н. Оценка нестационарных тепловых воздействий на ограждающие конструкции в природных условиях // Череповецкие научные чтения 2012. Ч. 3. Естественные, экономические, технические науки и математика. ЧГУ, 2012. С. 143–146.
9. Халиманюк В.З. Проектирование теплового комфорта помещений: учебно-методическое пособие. Великий Новгород: НовГУ им. Ярослава Мудрого, 2005. 57с.
10. Богословский В.Н. Строительная теплофизика: учебник для вузов. М.: Высшая школа, 1982. 415 с.
11. Грызлов В.С., Курочкин С.Н. Оценка тепловой инерционности при теплотехническом расчете ограждающих конструкций // Строительные материалы. 2013. № 8. С. 73–78.