



ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ КЛАДОК ИЗ РАЗЛИЧНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Г. П. Васильев, доктор техн. наук, научный руководитель ГК «Инсолар»

Я. Я. Жолобецкий, инженер ОАО «Инсолар-Инвест»

В. А. Личман, канд. физ.-мат. наук, начальник отдела ОАО «Инсолар-Инвест»

Ключевые слова: термическое сопротивление теплопередаче, теплотехнические испытания, термограмма кладки, коэффициент условий работы, эксплуатационная влажность, инфильтрация воздуха, деградация теплозащитных свойств материалов

Оптимизация защитных функций внешней оболочки здания – одна из актуальных задач строительства, решение которой должно приводить к сокращению потерь тепловой энергии и уменьшению затрат на эксплуатацию здания. С целью определения эксплуатационной эффективности наружных стеновых конструкций в климатической камере проводились теплотехнические испытания кладок из крупноформатных пустотелых керамических блоков, полнотелого обычного кирпича, кладок из щелевых и полнотелых керамзитобетонных блоков. Предлагаем результаты данных испытаний и рекомендации, сформированные на их основе.

Задача оптимизации защитных функций наружных стеновых конструкций многогранна, поскольку необходимо повышение как их энергетической, так и эксплуатационной эффективности. Повышение уровня тепловой защиты наружных ограждающих конструкций реализуется путем:

- применения эффективных теплоизоляционных материалов;
- минимизации мостиков холода;
- минимизации накопления влаги;
- повышения герметичности здания.

Поскольку необходимо решать задачу сокращения как тепловых потерь, так и затрат на проведение последующих капитальных ремонтов зданий, необходимо знание о долговечности используемых материалов, физико-механические свойства которых

в эксплуатационных условиях могут значительно изменяться. Кроме того, зачастую широко рекламируемые новые материалы не соответствуют заявленному качеству, не в полной мере удовлетворяют спектру климатических параметров России.

В климатической камере были проведены теплотехнические испытания кладок из крупноформатных пустотелых керамических и керамзитобетонных блоков. Для сравнительного анализа одновременно испытывались кладки из крупноформатных пустотелых керамических блоков и полнотелого обычного кирпича; кладки из щелевых и полнотелых керамзитобетонных блоков. На следующем этапе испытаний эти кладки последовательно утеплялись плитами из каменной минеральной ваты, пенополистирола, пеностекла.

Подготовка к теплотехническим испытаниям

В климатической камере ОАО «НИИМосстрой» смонтированы четыре фрагмента наружных ограждающих конструкций размером 1500×1500 мм и толщиной кладок 380 мм каждая (рис. 1):

- кладка из пустотелых крупноформатных керамических блоков;
- кладка из полнотелого обыкновенного глиняного кирпича;
- кладка из щелевых керамзитобетонных блоков;
- кладка из полнотелых керамзитобетонных блоков.

После изготовления фрагментов кладок их наружная и внутренняя поверхности затирались штукатурным раствором толщиной не более 5 мм и плотностью 1200 кг/м³. Для проведения сравнительного анализа процедуры возведения кладок, измерений всех теплотехнических характеристик строго следовали рекомендациям соответствующих нормативных документов: ГОСТ 530, ГОСТ Р 54853, ГОСТ Р 54852¹.

На следующем этапе указанные выше кладки последовательно утеплялись плитами

из каменной минеральной ваты толщиной 90 мм, плитами из пенополистирола толщиной 100 мм, плитами из пеностекла толщиной 100 мм (рис. 1) и проводились их теплотехнические испытания.

Теплотехнические испытания

При проведении теплотехнических испытаний (согласно ГОСТ 530 и ГОСТ Р 54853) в качестве основных средств измерений использовались измерители плотности тепловых потоков и температуры ИТП-МГ4.03 «ПОТОК» с семью модулями по десять каналов каждый, многофункциональный прибор Testo-435, тепловизор Therma CAM P65 и другие вспомогательные измерительные приборы и оборудование. Все используемое в испытаниях оборудование и средства измерения аттестованы и прошли поверку в установленном порядке.

При проведении испытаний температура и относительная влажность воздуха в отсеках климатической камеры поддерживались автоматически с точностью ± 1 °С и ± 5 % соответственно.

Схема размещения датчиков температуры и тепловых потоков составлялась на основе предварительно проведенного термографирования поверхности кладок (согласно ГОСТ Р 54852). Температурное поле снималось с целью выявления теплопроводных включений и термически однородных зон, их конфигурации и размеров. Для определения теплотехнических характеристик ограждающей конструкции датчики температуры и тепловых потоков



Рис. 1. Процесс монтажа фрагментов ограждающих конструкций в климатической камере

¹ ГОСТ 530–2012 «Кирпич и камень керамические. Общие технические условия», ГОСТ Р 54853–2011 «Здания и сооружения. Метод определения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций с помощью тепломера», ГОСТ Р 54852–2011 «Здания и сооружения. Метод тепловизионного контроля качества теплоизоляции ограждающих конструкций».

устанавливались как в центре термически однородных зон, так и в местах с теплопроводными включениями, в зонах поверхности горизонтального и вертикального швов кладки.

Определялись² приведенное термическое сопротивление теплопередаче кладки как средневзвешенное значение $R_{\text{к}}^{\text{пр}}$ и приведенное сопротивление теплопередаче кладки $R_{\text{о}}^{\text{пр}}$.

После выхода климатической камеры в стационарный режим работы измерения проводились в течение пяти суток. Показания датчиков тепловых потоков и температуры автоматически регистрировались с интервалом 15 мин. Зарегистрированные данные использовались для анализа на компьютере. Данные, полученные за последние сутки измерений, усреднялись. Измерения проводились в несколько экспозиций, в каждой из которых изменялось расположение датчиков плотности тепловых потоков и температуры.

Фрагменты кладок испытывались в два этапа: на первом этапе кладки выдерживали и подсушивали в течение двух недель до влажности не более 6%; на втором этапе кладки дополнительно высушивали до влажности менее 1%.

Влажность изделий в кладке определялась методом взятия проб и приборами неразрушающего контроля (прибор GANN UNI-2 с датчиками MB 35 и B60) в соответствии с ГОСТ 21718³, а средняя плотность материалов кладок – с ГОСТ 7025⁴ (табл. 1).

Измерения теплотехнических характеристик кладок

Результаты измерений теплотехнических характеристик кладок на втором этапе испытаний приведены в табл. 2. Средние значения температуры воздуха в теплом $t_{\text{в}}^{\text{сп}}$ и холодном $t_{\text{н}}^{\text{сп}}$ отсеках климатической камеры измерялись на расстоянии 0,1 м от поверхностей кладок, равны соответственно 19,7 и –28,1 °С. Среднее значения коэффициента теплоотдачи с внутренней стороны кладок $\alpha_{\text{в}}^{\text{сп}}$ равно 8 Вт/(м²•К), с внешней стороны $\alpha_{\text{н}}^{\text{сп}}$ – 17,5 Вт/(м²•К).

По результатам полученного в испытаниях термического сопротивления теплопередаче кладки определяется² величина эквивалентного коэффициента теплопроводности кладки $\lambda_{\text{экв}}$.

Далее по данным, полученным на двух этапах теплотехнических испытаний, определяются (согласно ГОСТ 530):

- значение эквивалентного коэффициента теплопроводности кладки на один процент влажности $\Delta\lambda_{\text{экв}}$;

- коэффициент теплопроводности кладки в сухом состоянии $\lambda_{\text{о}}$ (результаты в табл. 3, где для сравнения приведены значения коэффициентов теплопроводности кладок и из других источников).

Результаты и анализ теплотехнических испытаний

Результаты теплотехнических испытаний кладок из обыкновенного глиняного кирпича достаточно хорошо согласуются с данными, приведенными в ГОСТ 530 и СП 50.13330⁵. Однако для ряда кладочных материалов характерно существенное расхождение значений теплотехнических характеристик, полученных в результате испытаний, с аналогичными значениями, предоставленными производителями материалов.

Например, для кладки из пустотелых крупноформатных керамических блоков плотностью 800 кг/м³ получено значение эквивалентного коэффициента теплопроводности в сухом состоянии 0,31 Вт/(м•°С), а в сертификатах производителей приводится значение 0,15 Вт/(м•°С); для кладки из полнотелых керамзитобетонных блоков плотностью 1400 кг/м³ получено значение 0,91 Вт/(м•°С), в сертификатах – 0,36 Вт/(м•°С).

Можно сделать вывод, что сегодня на рынке строительных материалов в основном представлены сертификаты, выданные по заказу либо самих производителей, либо ангажированных ими компаний, и практически отсутствуют реальные данные, полученные на базе независимых испытаний.

Таблица 1 Результаты измерений плотности материалов кладок

Материал	Средняя плотность ρ , кг/м ³
Керамические крупноформатные пустотелые блоки	773
Кирпич глиняный сплошной обыкновенный	1 772
Керамзитобетонные щелевые блоки	1 194
Керамзитобетонные полнотелые блоки	1 416

² Формулы см. в полной версии статьи на www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=6389.

³ ГОСТ 21718–84 «Материалы строительные. Дизелькометрический метод измерения влажности».

⁴ ГОСТ 7025–91 «Кирпич и камни керамические и силикатные. Методы определения водопоглощения, плотности и контроля морозостойкости».

⁵ СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02–2003».

Таблица 2 Результаты измерений теплотехнических характеристик кладок

Вид стеновой конструкции (кладка)	Средний тепловой поток $q_{ср}$, Вт/м ²	Средняя температура, °С		Термическое сопротивление теплопередаче R_k , м ² •°С/Вт
		на внутренней поверхности $t_{ср.в}$, °С	на наружной поверхности $t_{ср.н}$, °С	
из керамических пустотелых блоков	34,1	15,5	-26,3	1,23
из полнотелого кирпича	56,2	12,7	-25,0	0,67
из щелевых керамзитобетонных блоков	75,8	9,5	-23,8	0,44
из полнотелых керамзитобетонных блоков	78,5	9,1	-23,5	0,42

Таблица 3 Коэффициенты теплопроводности кладок

Вид стеновой конструкции (кладка)	Коэффициент теплопроводности λ_0 , Вт/(м ² •°С)		
	по результатам испытаний	по СП 50.13330 и ГОСТ 530	по данным сертификатов
из керамических пустотелых блоков	0,31	0,20	0,15–0,20
из полнотелого обыкновенного кирпича	0,57	0,56	0,50–0,60
из щелевых керамзитобетонных блоков	0,86	0,36	0,16–0,25
из полнотелых керамзитобетонных блоков	0,91	0,47	0,36–0,45

При проектировании наружных ограждающих конструкций рекомендуется разделять функциональные элементы конструкций на конструкционные (несущие) и теплозащитные. Наметившаяся тенденция совмещения этих двух функций в одном конструкционном элементе (два в одном), например в керамзитобетонных блоках, по-видимому, будущего не имеет. Более перспективными представляются конструкции с прочной несущей частью (например, кирпич или железобетон) и с эффективным слоем наружной теплоизоляции.

Как видно (табл. 4), значения величин приведенных термических сопротивлений теплопередаче $R_k^{пр}$ исследованных ограждающих конструкций в сухом состоянии при утеплении кладок плитами из минеральной ваты толщиной 90 мм, пенополистирола и пеностекла толщиной 100 мм близки по величине. Температурные поля кладок, утепленных слоем высокоэффективного теплоизолятора, характеризуются достаточной теплотехнической однородностью – на термограммах не наблюдается тепловых потерь, обусловленных кладочными швами.

Вычисленные по экспериментально полученным данным $R_k^{пр}$ средние значения эквивалентного коэффициента теплопроводности для слоя каменной минеральной ваты равны 0,045 Вт/(м•°С), плит из пенополистирола – 0,05 Вт/(м•°С), плит из пеностекла – 0,06 Вт/(м•°С).

Более высокое значение эквивалентного коэффициента теплопроводности для пенополистирольных плит 0,05 Вт/(м•°С), чем для плит из каменной минеральной ваты 0,045 Вт/(м•°С), обусловлено влиянием зазоров между пенополистирольными плитами, их худшим прижатием к поверхности кладки.

При проектировании и строительстве наружных ограждающих конструкций важную роль играют технические мероприятия по устранению мостиков холода, поэтому при монтаже плит важно избегать зазоров между плитами более 2 мм, еще лучше укладывать их с перехлестом 50–100 мм.

Несмотря на то, что эквивалентный коэффициент теплопроводности плит из пеностекла ниже, чем для плит из минеральной ваты, этот тип утеплителей благодаря их свойству не накапливать влагу и большей долговечности находит все более широкое применение в строительстве.

Влияние инфильтрации воздуха на теплотехнические характеристики фрагментов ограждающих конструкций

Инфильтрация воздуха играет существенную роль в формировании теплозащитных качеств наружных ограждающих конструкций. К примеру, кладка из крупноформатных блоков, вертикальные швы которой выложены по технологии «паз – гребень», характеризуется высокой

теплотехнической неоднородностью вдоль швов. Из термометров такой кладки (рис. 2), снятых со сторон теплового и холодного отсеков климатической камеры, видно, что вдоль вертикальных швов кладки, которая выложена по технологии «паз – гребень» без использования раствора, наблюдаются значительные тепловые потери: температурный перепад между гладью кладки и швами составляет полтора градуса.

Определение воздухопроницаемости исследуемой ограждающей конструкции проводилось в соответствии с ГОСТ 31167⁶. Климатическая камера ОАО «НИИМос-

строй» – герметичное помещение с высокой степенью теплоизоляции, оснащенное климатическим оборудованием для создания внутри отсеков (теплого и холодного) различных температурных режимов. Теплый и холодный отсеки климатической камеры разделены исследуемой ограждающей конструкцией, состоящей из различных типов кладок. При измерении воздухопроницаемости:

■ двух объединенных отсеков климатической камеры до монтажа исследуемых кладок получено среднее значение величины кратности воздухообмена, равное $n_{50} = 3,5 \text{ ч}^{-1}$;

Таблица 4 Приведенные термические сопротивления теплопередаче и коэффициенты условий работы

Наружная ограждающая конструкция (кладка)	Результаты испытаний							Рекомендуемое, $m_{рек}$	По данным производителей, $R_{к,сп}^{пр}$
	в сухом состоянии, $R_{к}^{пр}$	с учетом влажности		с учетом инфильтрации		с учетом долговечности*			
		$R_{к,влаж}^{пр}$	$m_{влаж}$	$R_{к,инф}^{пр}$	$m_{инф}$	$R_{к,долг}^{пр}$	$m_{долг}$		
из крупноформатных пустотелых керамических блоков	1,23	1,15	0,93	1,07	0,87	1,23	1,00	0,87	2,54
из сплошного обыкновенного глиняного кирпича	0,67	0,47	0,70	0,57	0,85	0,67	1,00	0,70	0,68
из щелевых керамзитобетонных блоков	0,44	0,33	0,73	0,41	0,93	0,44	1,00	0,73	2,38
из полнотелых керамзитобетонных блоков	0,42	0,31	0,74	0,39	0,93	0,42	1,00	0,74	1,06
из пустотелых керамических блоков, утепление минеральной ватой	3,23	3,03	0,94	2,90	0,90	2,91	0,90	0,90	4,20
из сплошного глиняного кирпича, утепление минеральной ватой	2,67	2,27	0,85	2,38	0,89	2,40	0,90	0,85	3,25
из щелевых керамзитобетонных блоков, утепление минеральной ватой	2,44	2,24	0,92	2,22	0,90	2,20	0,90	0,90	3,40
из полнотелых керамзитобетонных блоков, утепление минеральной ватой	2,42	2,23	0,92	2,18	0,90	2,18	0,90	0,90	3,20
из пустотелых керамических блоков, утепление пенополистиролом	3,24	2,83	0,87	3,02	0,93	2,93	0,90	0,87	4,00
из сплошного глиняного кирпича, утепление пенополистиролом	2,75	2,39	0,87	2,56	0,93	2,48	0,90	0,87	2,78
из щелевых керамзитобетонных блоков, утепление пенополистиролом	2,54	2,20	0,87	2,35	0,93	2,30	0,90	0,87	3,20
из полнотелых керамзитобетонных блоков, утепление пенополистиролом	2,50	2,18	0,87	2,33	0,93	2,25	0,90	0,87	3,20
из щелевых керамзитобетонных блоков, утепление пеностеклом	2,30	2,25	0,98	2,23	0,97	2,30	1,00	0,97	2,80
из полнотелых керамзитобетонных блоков, утепление пеностеклом	2,24	2,21	0,98	2,18	0,97	2,25	1,00	0,97	2,80

*При определении $m_{долг}$ некоторые данные приходилось принимать на основании экспертных оценок. Это связано с недостаточностью достоверных научных данных о долговечности и эксплуатационных параметрах наружных ограждающих конструкций. Например, для опубликованных экспериментальных данных о долговечности применяемых высокоэффективных теплоизоляционных материалов характерен большой разброс прогнозных оценок их долговечности: для одних и тех же материалов от 15 до 100 лет.

⁶ ГОСТ 31167–2009 «Здания и сооружения. Методы определения воздухопроницаемости ограждающих конструкций в натуральных условиях».

■ после монтажа исследуемых кладок и их сушки получены средние значения величины кратности воздухообмена для теплого отсека климатической камеры $n_{50} = 16,5 \text{ ч}^{-1}$, для холодного отсека – $n_{50} = 17,5 \text{ ч}^{-1}$. Разность полученных величин кратности воздухообмена $\Delta n_{50} = 16,5 - 3,5 = 13 \text{ ч}^{-1}$ и $\Delta n_{50} = 17,5 - 3,5 = 14 \text{ ч}^{-1}$ может быть отнесена к воздухопроницаемости испытываемых фрагментов кладок. Эти значения более чем в три раза превышают нормативные значения этой величины 4 ч^{-1} .

Полученные результаты в такой постановке измерений можно считать предварительными, они требуют дальнейших, более детальных исследований, в частности для каждого типа кладок в отдельности.

Проведена серия испытаний по изучению влияния ветрового воздействия на теплотехнические характеристики ограждающих конструкций, в которых использовался стенд, оснащенный четырьмя вентиляторами ВР 300–45–2.5/3. Так, в результате выполненных измерений при ветровом воздействии со средней скоростью $7,5 \text{ м/с}$ на поверхности кладок получено, что приведенное термическое сопротивление:

■ для кладки из щелевых керамзитобетонных блоков снизилось на 10% – от $0,44 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$ (табл. 2) до $0,40 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$;

■ для кладки из полнотелых керамзитобетонных блоков – на 17% – от $0,42$ до $0,36 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$.

Среднее значение коэффициента теплоотдачи на поверхности с холодной стороны поверхности кладок $\alpha_{\text{н}}$ равно $27,8 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°C)}$.

Отметим, что существенную роль в наблюдающемся в московском жилищном строительстве превышении фактического энергопотребления зданий над проектными значениями играет инфильтрация наружного воздуха через наружные ограждения [1]. Величина удельного расхода тепловой энергии на отопление здания может быть снижена посредством повышения герметичности ограждающих конструкций, стыков, кладочных швов, использования эффективных теплоизоляционных материалов и рационального расположения их в ограждающих конструкциях.

Кроме того, эксплуатационная надежность систем теплоизоляции напрямую зависит от количества мостиков холода теплоизоляционной оболочки, которые являются

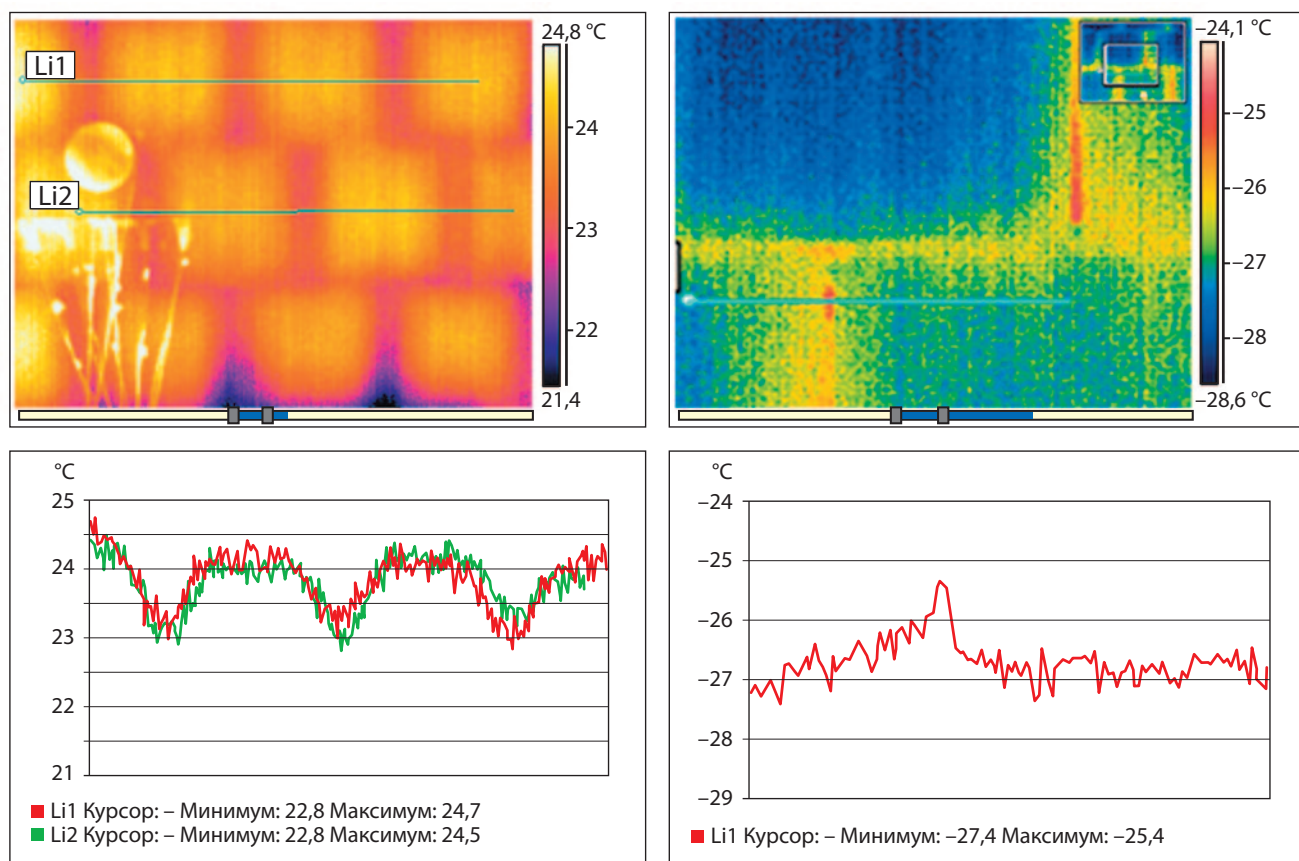


Рис. 2. Термограммы кладки из крупноформатных пустотелых керамических блоков со стороны теплого и холодного отсеков климатической камеры

очагами интенсивного старения слоя утеплителя и преждевременного разрушения системы. При проектировании теплозащиты зданий следует применять конструкции со сплошным контуром утепления и с минимумом теплопроводных включений и стыковых соединений.

Коэффициенты условий работы наружных ограждающих конструкций

Наиболее существенную роль в формировании теплозащитных качеств наружной ограждающей конструкции играют их эксплуатационная влажность, инфильтрация воздуха и изменение теплозащитных свойств конструкции, вызванное деградацией теплоизоляционных материалов.

В табл. 4 приведены результаты испытаний исследуемых ограждающих конструкций во влажном состоянии при условиях эксплуатации Б: $R_{К,влаг}^{пр}$ и отношение величин $R_{К,влаг}^{пр}/R_{К}^{пр}$, которое в дальнейшем назовем коэффициентом условий работы $m_{влаг}$, учитывающим снижение теплозащитных свойств конструкции за счет изменения влажности конструкции.

При проектировании и строительстве наружных ограждающих конструкций зданий особое внимание следует уделять их влажностному режиму. Накопление влаги в слое утеплителя значительно снижает теплотехнические качества наружных ограждающих конструкций зданий, приводит к преждевременному старению и износу. Взаимное расположение отдельных слоев ограждающих конструкций должно способствовать высыханию конструкций и исключать возможность накопления влаги в ограждении в процессе эксплуатации [2, 3].

Аналогично определяем, используя результаты испытаний для величин приведенных термических сопротивлений теплопередаче с учетом инфильтрации воздуха $R_{К,инф}^{пр}$ и с учетом изменения свойств теплоизоляционных материалов в процессе эксплуатации $R_{К,долг}^{пр}$, коэффициенты условий работы, учитывающие снижение теплозащитных свойств конструкции соответственно:

- за счет инфильтрации воздуха $m_{инф}$, равное отношению $R_{К,инф}^{пр}/R_{К}^{пр}$;

- за счет деградации теплозащитных свойств конструкции $m_{долг}$, равное $R_{К,долг}^{пр}/R_{К}^{пр}$.

Для сравнения указаны (табл. 4) величины термических сопротивлений теплопередаче $R_{К,СР}^{пр}$, полученные по данным производителей материалов.

Для учета данных трех аспектов, влияющих на теплозащитные свойства теплоизоляционных материалов, предлагаем ввести понятие обобщенного коэффициента условий работы наружной ограждающей конструкции m_p .

Данная величина равна наименьшему значению из коэффициентов условий работы, учитывающих снижение теплозащитных свойств конструкции за счет изменения влажности конструкции, инфильтрации воздуха и деградации теплозащитных свойств конструкции. Рекомендуемые значения обобщенного коэффициента условий работы для применения при проектировании наружных ограждающих конструкций приведены в табл. 4.

Резюме

На основании проведенных экспериментальных исследований сделаны следующие выводы.

- Для ряда кладочных материалов характерно существенное расхождение значений теплотехнических характеристик, полученных в результате испытаний, с аналогичными значениями, предоставляемыми производителями.

- Существенную роль в тепловых потерях зданий играет инфильтрация наружного воздуха через наружные ограждения. Прежде всего это связано с качеством монтажа и герметичностью ограждающих конструкций, стыков и кладочных швов.

- При проектировании наружных ограждающих конструкций рекомендуется разделять функциональные элементы конструкций на конструкционные (несущие) и теплозащитные. Наиболее перспективными представляются конструкции с прочной несущей частью и с эффективным слоем наружной теплоизоляции.

- Поскольку наиболее существенную роль в формировании теплозащитных качеств наружной ограждающей конструкции играют их эксплуатационная влажность, инфильтрация воздуха и изменение теплозащитных свойств конструкции, вызванное деградацией теплоизоляционных материалов, предлагается ввести понятие обобщенного коэффициента условий работы наружной ограждающей конструкции $m_p = \min(m_{влаг}, m_{инф}, m_{долг})$.

Литература

1. Васильев Г. П., Личман В. А., Песков Н. В. Методика инструментального определения энергопотребления вводимых в эксплуатацию зданий // Жилищное строительство. 2014. № 12.
2. Vasilyev G. P., Lichman V. A., Peskov N. V., Brodach M. M., Tabunshchikov Y. A., Kolesova M. V. Simulation of heat and moisture transfer in a multiplex structure // Energy and Buildings. 2015. Vol. 86.
3. Васильев Г. П., Личман В. А., Песков Н. В. Моделирование процесса сушки в ограждающих конструкциях зданий // Жилищное строительство. 2013. № 7. ■