

УДК 699.86

В.А. КУЗЬМИН, ведущий инженер (lte@zavodlit.ru)

ЗАО «Завод ЛИТ» (152020, Ярославская обл., г. Переславль-Залесский, ул. Советская, 1)

Исследование возможностей применения отражательной теплоизоляции в многослойных сэндвич-панелях с учетом многократного отражения

Исследованы возможности использования отражательной теплоизоляции в энергосберегающих многокамерных сэндвич-панелях с учетом многократного отражения. Приведены методика и результаты экспериментов по исследованию образцов многокамерных сэндвич-панелей. Представлены примеры расчетов многокамерных конструкций с замкнутыми воздушными прослойками и отражательной изоляцией по методикам ГОСТ 56734–2015 «Здания и сооружения. Расчет показателя теплозащиты ограждающих конструкций с отражательной теплоизоляцией».

Ключевые слова: энергосбережение, тепловая защита зданий, отражательная теплоизоляция, отражающая теплоизоляция, многократное отражение, сэндвич-панель, быстровозводимые здания, мобильные здания, утепление, отражающая способность.

Для цитирования: Кузьмин В.А. Исследование возможностей применения отражательной теплоизоляции в многослойных сэндвич-панелях с учетом многократного отражения // *Строительные материалы*. 2017. № 6. С. 35–40.

V.A. KUZMIN, Leading Engineer (lte@zavodlit.ru)

ZAO «Zavod LIT» (1 Sovetskaya Street, Pereslavl-Zalessky, Yaroslavskaia Oblast, 152020, Russian Federation)

Research in Possibilities to Use Reflective Heat Insulation in Multi-Layer Sandwich-Panels with Due Regard for Multiple Reflection

Possibilities to use the reflective heat insulation in energy-saving multi-chamber sandwich-panels with due regard for multiple reflection are studied. Methods and results of experiments on the study of samples of multi-chamber sandwich-panels are presented. Examples of the calculations of multi-chamber designs with dead air spaces and reflective insulation according to the methods GOST 56734–2015 “Buildings and facilities. Calculation of the indicator of heat protection of enclosing structures with reflective heat insulation” are also presented.

Keywords: energy saving, heat protection of buildings, reflective heat insulation, multiple reflection, sandwich-panel, prefabricated buildings, mobile buildings, weatherization, reflective capacity.

For citation: Kuzmin V.A. Research in possibilities to use reflective heat insulation in multi-layer sandwich-panels with due regard for multiple reflection. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2017. No. 6, pp. 35–40. (In Russian).

С возрастанием требований к тепловой защите зданий и сооружений становится очевидным, что применение конструкций с использованием массивной теплоизоляции при определенной толщине слоя становится не эффективным, так как расходы на теплоизоляцию, монтаж конструкций и доставку материалов на строительную площадку превышают экономию за счет уменьшения затрат тепла [1–5].

Существует более доступный и достаточно эффективный способ утепления зданий [6–9] с использованием теплоизоляции, отражающей поток инфракрасного излучения (отражательной теплоизоляции). Отражательную теплоизоляцию все шире применяют в конструкциях ограждений благодаря ее сравнительной доступности, возможности использования в комбинации с воздушными прослойками. Изучению свойств и преимуществ применения отражательной теплоизоляции в строительстве посвящено немало работ [10–13].

Как правило, отражательную теплоизоляцию применяют в различных вариантах конструкций.

1. В качестве дополнительного утепления изнутри ограждающей конструкции. В этом случае фольга не только препятствует потере теплоты за счет инфракрасного излучения, но и предотвращает влагоперенос, обеспечивая отсутствие внутренней конденсации влаги в ограждении.

Термическое сопротивление конструкции, показанной на рис. 1, возрастает на $1,7 \text{ м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт}^*$, при стоимости

такой системы утепления, составляющей приблизительно 500 р./м^2 .

2. Отражательную изоляцию можно использовать в качестве теплового экрана при покрытии внутренней поверхности ограждений. В этом случае роль воздушной прослойки играет объем помещения. Такое решение актуально для складов, ангаров, производственных цехов, зданий специального назначения и т. д., которые как правило изготавливают с применением в качестве ограждающих конструкций сэндвич-панелей. По совокупности затрат такое ограждение оказывается наиболее экономичным. Сопротивление теплопередаче конструкции ограждения из профилированного листа и отражающей теплоизоляции Пенофол Супер NET толщиной 15 мм составляет $0,7 \text{ м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт}$, при стоимости утепления 200 р./м^2 с монтажом (рис. 2).

В сэндвич-панелях в качестве утеплителя традиционно используют минеральную вату (базальтовое волокно); пенополиуретан PUR (полиизоцианурат PIR); пенополистирол; стекловолокно; полипропилен.

Однако во многих случаях целесообразно для теплоизоляции зданий модульного типа использовать сэндвич-панель, содержащую несколько воздушных прослоек с отражающими экранами, работающую по принципу многократного отражения. Отказ от применения в конструкции массивной теплоизоляции имеет ряд преимуществ:

- экономия средств за счет исключения из конструкции массивного теплоизоляционного слоя;

* Система внутреннего утепления включает облицовку из гипсокартона 12 мм, замкнутую воздушную прослойку 50 мм, отражающую теплоизоляцию Армофол 1 мм, плиты из пенополистирола 50 мм.

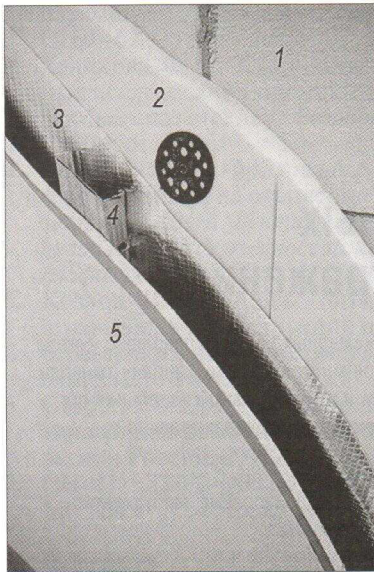


Рис. 1. Дополнительное утепление ограждающей конструкции изнутри помещения с применением отражательной теплоизоляции: 1 – внешнее ограждение; 2 – пенополистирол экструдированный; 3 – отражательная изоляция Армофол 1 мм; 4 – направляющий профиль; 5 – гипсокартон

- снижение массы конструкции;
- отсутствие влагонакопления в утеплителе за счет исключения утеплителя, впитывающего влагу;
- улучшение теплотехнических характеристик сэндвич-панели, за счет снижения теплопроводности изделия;
- пожаробезопасность и огнестойкость изделия;
- экологичность и безопасность для здоровья.

Испытания опытных образцов отражательных сэндвич-панелей

Результаты предварительных испытаний образцов различной конструкции размером 250×250 мм были опубликованы в [6]. Конструкции образцов приведены в табл. 1.

Измерения проводились под руководством Г.А. Потаповой в лаборатории НИИСФ РААСН в специальной климатической камере (рис. 4). Для панелей № 2, 3, 5, 7, 9, 11, 12, 13, результаты испытаний представлены в табл. 2 и 3.

В таблицах использованы следующие обозначения:

t_+^* – граничная положительная температура воздуха в камере, °С;

t_+ – положительная температура на поверхности сэндвич-панели, °С;

t_- – отрицательная температура на поверхности сэндвич-панели, °С;

t_-^* – граничная отрицательная температура воздуха в камере, °С;

$\Delta t = t_+ - t_-$ – разница температуры на поверхностях сэндвич-панели, °С;

q – тепловой поток, Вт/м²;

$R_x = q/\Delta t$ – термическое сопротивление конструкции, м²·°С/Вт.

При сравнении термического сопротивления панели с термическим сопротивлением сплошных материалов удобно воспользоваться эквивалентным термическим сопротивлением R_3 (м²·°С/Вт), равным отношению R_x к толщине панели.

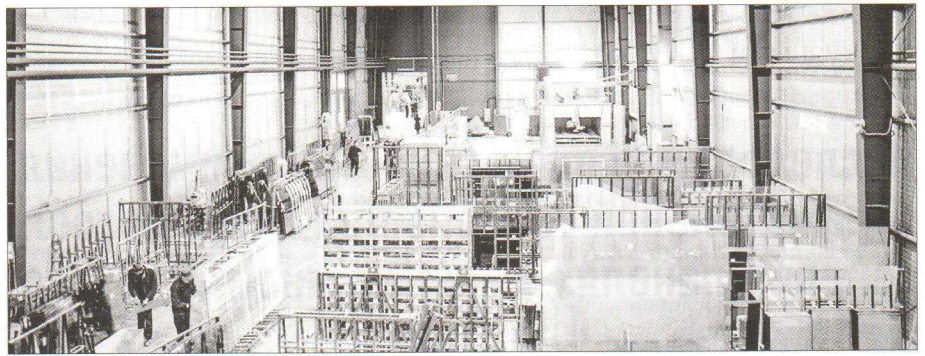


Рис. 2. Покрытие внутренней поверхности ограждения производственного комплекса отражательной теплоизоляцией

Структура образцов для проведения испытаний [6]

Таблица 1

№	Структура образца								
1	ПВХ	ЗВП20	ФФ	ЗВП20	ПВХ				
2	ПВХФ	ЗВП20	ФФ	ЗВП20	ФПВХ				
3	ПВХФ	ЗВП20	ПЭП	ЗВП20	ФПВХ				
4	ПВХ	ЗВП10	ФФ	ЗВП10	ПВХ				
5	ПВХФ	ЗВП10	ФФ	ЗВП10	ФПВХ				
6	ПВХФ	ЗВП10	ПЭП	ЗВП10	ФПВХ				
7	ПВХ	ЗВП10	ФФ	ЗВП10	ФФ	ЗВП10	ФФ	ЗВП10	ПВХ
8	ПВХФ	ЗВП10	ФФ	ЗВП10	ФФ	ЗВП10	ФФ	ЗВП10	ФПВХ
9	ПВХФ	ЗВП10	ПЭП	ЗВП10	ФФ	ЗВП10	ПЭП	ЗВП10	ФПВХ
10	ПВХ	ЗВП10	ПЭП	ЗВП10	ФФ	ЗВП10	ПЭП	ЗВП10	ПВХ
11	ПВХ	ЗВП10	ФФ	ЗВП10	ФФ	ЗВП10	ПВХ		
12	ПВХФ	ЗВП10	ФФ	ЗВП10	ФФ	ЗВП10	ФПВХ		
13	ПВХФ	ЗВП10	ПЭП	ЗВП10	ПЭП	ЗВП10	ФПВХ		

Обозначения: ПВХ – облицовка из поливинилхлорида толщиной 2 мм; ПВХФ, ФПВХ – облицовка из поливинилхлорида толщиной 2 мм, оклеенная отражающим слоем (фольгой) внутрь панели (Армофол тип С); ЗВП10 – замкнутая воздушная прослойка толщиной 10 мм; ЗВП20 – замкнутая воздушная прослойка толщиной 20 мм; ФФ – двусторонне-фольгированный материал Армофол тип В; ПЭП – полиэтиленовая пленка толщиной 50 мкм.

Результаты испытаний подтверждают эффективность применения отражательной теплоизоляции в комбинации с замкнутыми воздушными прослойками. Лучшими характеристиками обладают образцы № 7, 8 (для четырех камер), № 11, 12 (для трех камер), № 5, 6 (для двух камер). Термическое сопротивление панелей зависит от средней температуры воздуха и разности температур на границах прослойки. Например, для образца № 8 при толщине 48 мм, панель обладает термическим сопротивлением 1,37 м²·°С/Вт при средней температуре 25°С и термическим сопротивлением 2,2 м²·°С/Вт при средней температуре 15°С.

Для сэндвич-панели толщиной 150 мм можно достичь термического сопротивления 4,11 м²·°С/Вт для жилых зданий, и 6,6 м²·°С/Вт для промышленных зданий ввиду того, что температура внутри жилых помещений должна быть выше температуры внутри промышленных зданий. В суровых климатических условиях при отрицательной температуре замкнутые воздушные прослойки, находящиеся в зоне пониженной температуры, будут обладать повышенным термическим сопротивлением.

Сопротивление теплопередаче будет больше с учетом коэффициентов теплоотдачи стен.

Определение зависимости термического сопротивления сэндвич-панели от разности температуры на ее границах и средней температуры воздуха внутри

Найдем влияние температуры на границах и средней температуры воздушной прослойки на термическое сопротивление сэндвич-панели по результатам, полученным в ходе испытаний панелей на установке (см. [6]) и в тепловой камере. Зависимость термического сопротив-

Таблица 2

Результаты измерений характеристик сэндвич-панелей при внутренней температуре +20°C и наружной температуре -10°C

№	При температуре в холодной части камеры -10°C							
	t_+^*	t_+	t_-	t_-^*	Δt	q	$R_{1к}$	R_2
2	20,7	16,3	-12	-12,5	28,3	28,1	1,01	21,44
3	23,9	18,1	-8,1	-13,9	26,2	23,3	1,12	24,03
5	20,3	16,6	-11,5	-12,2	28,1	29,04	0,97	37,3
7	23,5	20,4	-8,9	-10,3	29,3	18,2	1,61	33,47
9	20,1	17,7	-11,8	-12,5	29,5	18,7	1,58	33,47
11	20,1	17	-11,4	-11,9	28,4	20,4	1,39	37,57
12	24,4	20,8	-8,6	-9,3	29,4	22,6	1,3	35,14
13	24,3	20,8	-8,2	-8,6	29	22,8	1,27	34,32

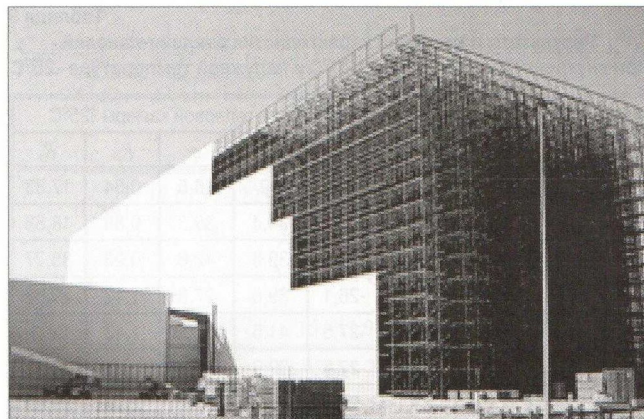


Рис. 3. Возведение промышленного здания с использованием сэндвич-панелей

ления сэндвич-панели от перечисленных факторов для вертикального расположения панели будем искать в форме линейной аппроксимации:

$$R_x = R_n - A t_{cp} - B \Delta t. \quad (1)$$

Для горизонтального расположения – в этом уравнении заменим B на B_1 .

Пусть R_n – номинальное термическое сопротивление панели при температуре $t_{cp} = 25^\circ\text{C}$ и без учета разницы температуры на ее границах; A – коэффициент влияния изменения средней температуры воздуха; B – коэффициент влияния разности температуры при вертикальном расположении панели; B_1 – коэффициент влияния разности температуры при горизонтальном расположении панели.

По результатам четырех экспериментов найдем A , B , B_1 , R_n .

Для решения этой задачи имеем систему их четырех уравнений:

$$\begin{cases} R_{1к} = R_n - A(t_{cp1к} - t_{cp2у}) - B \Delta t_{1к} \\ R_{2к} = R_n - A(t_{cp2к} - t_{cp2у}) - B \Delta t_{2к} \\ R_{1у} = R_n - A(t_{cp1у} - t_{cp2у}) - B_1 \Delta t_y \\ R_{2у} = R_n - A(t_{cp2у} - t_{cp2у}) - B_1 \Delta t_y, \end{cases} \quad (2)$$

где $R_{1к}$ – термическое сопротивление панели, полученное в ходе первого эксперимента в камере при вертикальном расположении сэндвич-панели, $\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$; $R_{2к}$ – термическое сопротивление панели, полученное в ходе второго эксперимента в камере при вертикальном

расположении сэндвич-панели, $\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$; $R_{1у}$ – термическое сопротивление панели, полученное в ходе первого эксперимента на установке при горизонтальном расположении сэндвич-панели, $\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$; $R_{2у}$ – термическое сопротивление панели, полученное в ходе второго эксперимента на установке при горизонтальном расположении сэндвич-панели, $\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$; $t_{cp1к} - t_{cp2у}$ – разность средней температуры первого эксперимента в камере и средней температуры второго эксперимента на установке, $^\circ\text{C}$; $t_{cp2к} - t_{cp2у}$ – разность средней температуры второго эксперимента в камере и средней температуры второго эксперимента на установке, $^\circ\text{C}$; $t_{cp1у} - t_{cp2у}$ – разность средней температуры первого эксперимента на установке и средней температуры второго эксперимента на установке, $^\circ\text{C}$; $t_{cp2у} - t_{cp2у}$ – разность средней температуры второго эксперимента на установке и средней температуры второго эксперимента на установке, $^\circ\text{C}$; $\Delta t_{1к}$ – разность температуры на границах сэндвич-панели в ходе первого эксперимента в тепловой камере, $^\circ\text{C}$; $\Delta t_{2к}$ – разность температуры на границах сэндвич-панели в ходе второго эксперимента в камере, $^\circ\text{C}$; Δt_y – разность температуры на границах сэндвич-панели при экспериментах на установке, $^\circ\text{C}$.

Пример расчета номинального термического сопротивления сэндвич-панели № 2 и коэффициентов влияния средней температуры и разности температуры на границах

После подстановки значений температуры и термических сопротивлений в систему уравнений (2) получим:



Рис. 4. Испытания опытных образцов сэндвич-панелей в климатической камере проводят главный метролог НИИСФ РААСН Г.А. Потапова и д-р техн. наук А.М. Цирлин ИПС им. А.К. Айламазяна РАН

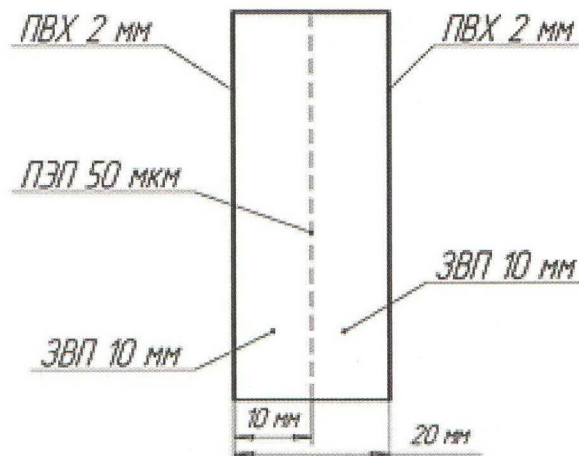


Рис. 5. Схема сэндвич-панели № 14 по слоям

Таблица 3

Результаты измерений характеристик сэндвич-панелей при внутренней температуре +20°C и наружной температуре -25°C

№	При температуре в холодной части тепловой камеры -25°C							
	t_+^*	t_+	t_-	t_-^*	Δt	q	$R_{2к}$	R_0
2	17	11,8	-27,2	-28	39	46,5	0,84	17,83
3	20,7	14,1	-20,3	-23,1	34,4	39,3	0,88	18,88
5	16,9	12,8	-27	-27,5	39,8	42,6	0,93	35,77
7	21	16,9	-22,7	-26,1	39,6	27,8	1,42	29,52
9	16,9	14,2	-27,3	-27,5	41,5	29,06	1,43	30,3
11	17,2	13,1	-26,8	-27,5	39,9	29,7	1,34	36,22
12	21,4	17,2	-23,1	-26,6	40,3	34,2	1,18	31,89
13	21	17,2	-24	-25,8	41,2	32,9	1,25	33,78

Таблица 4

Термические сопротивления сэндвич-панелей и коэффициенты влияния средней температуры и разницы температур на границах

№ панели	A	B	B_1	$R_{н}$
2	0,057	0,069	0,075	1,65
3	0,03	0,06	0,164	2,11
5	0,003	0,005	0,05	1,07
7	0,089	0,094	0,285	2,62
9	0,021	0,029	0,123	1,98
11	0,079	0,071	0,123	1,64
12	0,078	0,076	0,195	2,05
13	0,038	0,032	0,077	1,48

$$\begin{cases} 1,01 = R_{н} - A \cdot \left(\frac{16,3 - 12}{2} - 25 \right) - 1 \cdot B \cdot (28,3) \\ 0,84 = R_{н} - A \cdot \left(\frac{11,8 - 27,2}{2} - 25 \right) - 1 \cdot B \cdot (39) \\ 1,85 = R_{н} - A \cdot (15 - 25) - 1 \cdot B_1 \cdot (5) \\ 1,28 = R_{н} - A \cdot (25 - 25) - 1 \cdot B_1 \cdot (5) \end{cases}$$

После решения системы найдем: $R_{н} = 1,65 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$, $A = 0,057 \text{ м}^2/\text{Вт}$, $B = 0,069 \text{ м}^2/\text{Вт}$, $B_1 = 0,075 \text{ м}^2/\text{Вт}$.

Результаты расчетов номинальных термических сопротивлений панелей и коэффициентов влияния средней температуры и градиентов температуры представлены в табл. 4.

Тепловой расчет сэндвич-панели с учетом многократного отражения

Проведенные эксперименты позволяют оценить точность методики расчета термических сопротивлений конструкций, содержащих воздушные прослойки, согласно СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003», СП 230.1325800.2015 «Конструкции ограждающие зданий. Характеристики теплотехнических неоднородностей», в автоматическом режиме с помощью расчетной программы «LIT THERMO ENGINEER. Ограждающие конструкции» (свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2014617857).

1. Пример расчета сопротивления теплопередаче сэндвич-панели № 14 без отражательной изоляции (рис. 5) по методике ГОСТ Р 56734-2015 «Здания и сооружения. Расчет показателя теплозащиты ограждающих конструкций с отражательной теплоизоляцией».

Условия эксперимента на установке (табл. 1): $t_{ср} = 15^\circ\text{C}$ – средняя температура панели; $t_+ = 17,5^\circ\text{C}$ – температура

на поверхности сэндвич-панели со стороны нагревателя на установке; $t_+ = 12,5^\circ\text{C}$ – температура на поверхности сэндвич-панели со стороны измерителя на установке; $\Delta t = 5^\circ\text{C}$ – температурный перепад между наружными поверхностями сэндвич-панели; $\lambda_{пвх} = 0,075 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{°C})$ – коэффициент теплопроводности облицовки панели из ПВХ (по справочнику); $C_{пвх} = 4,5 \text{ Вт}/\text{м}^2\text{K}^4$ – коэффициент излучения облицовки из ПВХ.

Термическое сопротивление полиэтиленовой пленки можно не учитывать, поскольку ее толщина составляет 50 мкм, что ничтожно мало по отношению к толщине конструкции.

$C_{пэп} = 4,5 \text{ Вт}/\text{м}^2\text{K}^4$ – коэффициент излучения полиэтиленовой пленки; $C_0 = 5,67 \text{ Вт}/\text{м}^2\text{K}^4$ – коэффициент излучения (степень черноты) абсолютно черного тела.

Термическое сопротивление облицовки из ПВХ:

$$R_{пвх} = \frac{0,002 \text{ м}}{0,075 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{°C})} = 0,0266 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}.$$

Термические сопротивления замкнутых воздушных прослоек панели зависят от разности температуры на границах, средней температуры в прослойке и толщины самих прослоек:

$$R_{вп1}(\Delta T, T_{ср}, \delta) = R_{вп1}(2,5^\circ\text{C}, 13,75^\circ\text{C}, 0,01 \text{ м});$$

$$R_{вп2}(\Delta T, T_{ср}, \delta) = R_{вп2}(2,5^\circ\text{C}, 16,25^\circ\text{C}, 0,01 \text{ м}).$$

На первой итерации определим термическое сопротивление панели, несколькими способами.

а) По табл. 1 ГОСТ Р 56734-2015 «Здания и сооружения. Расчет показателя теплозащиты ограждающих конструкций с отражающей теплоизоляцией»:

$$R_{вп1} = 0,13 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}; R_{вп2} = 0,13 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт};$$

тогда,

$$R_{панели} = 2R_{пвх} + R_{вп1} + R_{вп2} = 2 \cdot 0,0266 + 0,13 + 0,13 = 0,312 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}.$$

б) По табл. 3 ГОСТ Р 56734-2015 «Здания и сооружения. Расчет показателя теплозащиты ограждающих конструкций с отражающей теплоизоляцией»:

$$\lambda_{вп1} = 0,024 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{°C}); \lambda_{вп2} = 0,024 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{°C});$$

$$R_{ан1} = \frac{0,01}{0,024} = 0,416 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт};$$

$$R_{ан2} = \frac{0,01}{0,024} = 0,416 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт};$$

$$R_{панели} = 2R_{пвх} + R_{вп1} + R_{вп2} = 2 \cdot 0,026 + 0,416 + 0,416 = 0,885 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}.$$

В следующих итерациях определяется термическое сопротивление панели с учетом коэффициентов излучения по ГОСТ Р 56734-2015 «Здания и сооружения. Расчет показателя теплозащиты ограждающих конструкций с отражающей теплоизоляцией».

Температура на границах воздушных прослоек.

1) Снижение температуры за счет влияния термического сопротивления облицовки из ПВХ:

$$dt_{пвх} = \frac{0,027 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт} \cdot 100\%}{0,31 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}} \cdot \frac{5^\circ\text{C}}{100\%} = 0,42^\circ\text{C};$$

2) Распределение температуры на границах воздушных прослоек:

$$t_{1вп1} = 17,5 - 0,4245 = 17,0755^\circ\text{C}; t_{2вп1} = 15; t_{1вп2} = 15;$$

$$t_{2вп2} = 12,5 + 0,4245 = 12,9245^\circ\text{C}.$$

Величину термического сопротивления воздушной прослойки в ограждающей конструкции находят по формуле [19]:

$$R_{в.п.} = \frac{t_{1в.п.} - t_{2в.п.}}{C_{в.п.} \left[\left(\frac{t_{1в.п.} + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_{2в.п.} + 273}{100} \right)^4 \right] + \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{\delta} (t_{1в.п.} - t_{2в.п.})}, \quad (3)$$

где λ_1 – коэффициент теплопроводности неподвижного воздуха при средней температуре воздушной прослойки, Вт/(м·°C); λ_2 – коэффициент теплопередачи конвекцией, зависящий от толщины воздушной прослойки, температуры воздуха в ней, разности температуры на поверхностях воздушной прослойки и расположении прослойки в ограждении, Вт/(м·°C); δ – толщина воздушной прослойки, м.

Между параллельными поверхностями воздушной прослойки происходит многократное отражение и поглощение потока излучения и передача теплоты теплопроводностью и конвекцией. При этом лучистый тепловой поток от первой поверхности отражается и поглощается второй поверхностью воздушной прослойки.

3) Приведенный коэффициент излучения для воздушных прослоек:

$$C_{в.п.} = \frac{1}{\frac{1}{C_{1в.п.}} + \frac{1}{C_{2в.п.}} - \frac{1}{C_0}} = \frac{1}{\frac{1}{4,5} + \frac{1}{4,5} - \frac{1}{5,67}} = 3731 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4). \quad (4)$$

Термическое сопротивление воздушных прослоек сэндвич-панели по формулам (3), (4):

$$R_{в.п.1} = \frac{17,0755 - 15}{3,731 \left[\left(\frac{17,0755 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{15 + 273}{100} \right)^4 \right] + \frac{0,023}{0,01} (17,0755 - 15)} = 0,1732 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт};$$

$$R_{в.п.2} = \frac{15 - 12,9245}{3,731 \left[\left(\frac{15 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{12,9245 + 273}{100} \right)^4 \right] + \frac{0,023}{0,01} (15 - 12,9245)} = 0,1356 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт};$$

Таким образом термическое сопротивление панели:

$$R_{панели} = 2R_{пвх} + R_{вп1} + R_{вп2} = 2 \cdot 0,027 + 0,173 + 0,136 = 0,362 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}.$$

2. Расчет термического сопротивления сэндвич-панели № 4 (с применением отражающего слоя вместо ПЭП).

Приведенный коэффициент излучения для воздушных прослоек:

Список литературы

1. Гагарин В.Г., Пастушков П.П. Об оценке энергетической эффективности энергосберегающих мероприятий // *Инженерные системы. АВОК–Северо-Запад*. 2014. № 2. С. 26–29.
2. Гагарин В.Г., Неклюдов А.Ю. Учет теплотехнических неоднородностей ограждений при определении тепловой нагрузки на систему отопления здания. // *Жилищное строительство*. 2014. № 6. С. 3–7.
3. Гагарин В.Г., Дмитриев К.А. Учет теплотехнических неоднородностей при оценке теплозащиты ограждающих конструкций в России и европейских странах // *Строительные материалы*. 2013. № 6. С. 14–16.

$$C_{в.п.} = \frac{1}{\frac{1}{C_{1в.п.}} + \frac{1}{C_{2в.п.}} - \frac{1}{C_0}} = \frac{1}{\frac{1}{0,3} + \frac{1}{4,5} - \frac{1}{5,67}} = 0,296 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4).$$

$$R_{в.п.1} = \frac{17,0755 - 15}{0,296 \left[\left(\frac{17,0755 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{15 + 273}{100} \right)^4 \right] + \frac{0,023}{0,01} (17,0755 - 15)} = 0,388 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт};$$

$$R_{в.п.2} = \frac{15 - 12,9245}{0,296 \left[\left(\frac{15 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{12,9245 + 273}{100} \right)^4 \right] + \frac{0,023}{0,01} (15 - 12,9245)} = 0,37 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт};$$

Термическое сопротивление панели № 4 с отражающей изоляцией:

$$R_{панели} = 2R_{пвх} + R_{вп1} + R_{вп2} = 2 \cdot 0,0266 + 0,388 + 0,37 = 0,811 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}.$$

Термическое сопротивление увеличилось более, чем вдвое, что соответствует результатам эксперимента.

Полученные значения – результат расчета в первом приближении. При последующих итерациях результат расчета уточняют. Как правило, подобные задачи решают при помощи ЭВМ. Результаты апробации математической модели и методик ГОСТ Р 56734–2015 «Здания и сооружения. Расчет показателя теплозащиты ограждающих конструкций с отражающей теплоизоляцией» позволяют разработать алгоритм расчета для пакета прикладных программ по теплотехнике «LIT THERMO ENGINEER. Ограждающие конструкции» (Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2014617857).

Выводы

Испытания сэндвич-панелей показали их высокое термическое сопротивление и возможности использования таких конструкций для внутреннего утепления существующих зданий, а также в качестве заполнения стен, перегородок и перекрытий при каркасном строительстве.

Термическое сопротивление сэндвич-панелей, содержащих отражающую изоляцию, существенно выше аналогичных конструкций без отражающей изоляции, оно сравнительно мало зависит от расположения панели (вертикального или горизонтального) и от расположения слоя отражающей изоляции внутри панели.

Работа была проведена совместно с коллегами из НИИСФ РААСН – заместителем директора по научной работе, канд. техн. наук Н.П. Умняковой и главным метрологом Г.А. Потаповой, которым автор выражает глубокую благодарность.

References

1. Gagarin V.G., Pastushkov P.P. On the evaluation of energy efficiency of energy saving measures. *Inzhenernyye sistemy. AVOK–Severo-Zapad*. 2014. No. 2, pp. 26–29. (In Russian).
2. Gagarin V.G., Neklyudov A.Yu. Accounting of thermal inhomogeneity fences when determining the heat load on the heating system of the building. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2014. No. 6, pp. 3–7. (In Russian).
3. Gagarin V.G., Dmitriev K.A. Accounting Heat engineering heterogeneities when assessing the thermal protection of enveloping structures in Russia and European coun-

4. Гагарин В.Г., Пастушков П.П. Количественная оценка энергоэффективности энергосберегающих мероприятий // *Строительные материалы*. 2013. № 6. С. 7–9.
5. Гагарин В.Г., Козлов В.В. Требования к теплозащите и энергетической эффективности в проекте актуализованного СНиП «Тепловая защита зданий» // *Жилищное строительство*. 2011. № 8. С. 2–6.
6. Кузьмин В.А., Умнякова Н.П. Применение отражательной теплоизоляции в многослойных панелях с эффектом многократного отражения теплового потока // *Жилищное строительство*. 2016. № 6. С. 21–24.
7. Кузьмин В.А., Шабанин Д.А., Цирлин А.М., Цыганков В.М., Ахременков Ан.А. Техно-экономическое сравнение методов экономии энергии за счет утепления зданий. // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2014. № 9–10. С. 82–90.
8. Кузьмин В.А., Шабанин Д.А., Цирлин А.М. Математическое и компьютерное моделирование температурного и влажностного режима ограждений в строительстве // *Сборник XVIII ежегодной молодежной научно-практической конференции «Наукоемкие информационные технологии» SIT-2014*. С. 43–59.
9. Кузьмин В.А., Ахременков А.А., Цирлин А.М., Цыганков В.М. Энергетическая эффективность покрытия внутренней поверхности помещений отражательной теплоизоляцией // *Строительные материалы*. 2013. № 12. С. 65–67.
10. Умняков П.Н. Применение алюминиевой фольги для теплоизоляции зданий. *Сборник статей НИИСФ «Исследования по строительной теплофизике»*. М.: Госстройиздат, 1959.
11. Умнякова Н.П. Теплозащита замкнутых воздушных прослоек с отражательной теплоизоляцией // *Жилищное строительство*. 2014. № 1–2. С. 16–20.
12. Умнякова Н.П. Теплопередача через ограждающие конструкции с учетом коэффициентов излучения внутренних поверхностей помещения // *Жилищное строительство*. 2014. № 6. С. 14–17.
13. Умнякова Н.П. Снижение теплопотерь поверхности радиаторной стенки // *Жилищное строительство*. 2015. № 2. С. 21–24.
14. Мананков В.М. Отражающая теплоизоляция в энергосберегающем строительстве // *Вестник МГСУ*. 2011. № 3. С. 319–326.
15. Мананков В.М. Отражающая теплоизоляция в энергосберегающем строительстве // *Все о ЖКХ*. 2011. № 2. С. 57–59.
16. Фокин К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий / Под редакцией Ю.А. Табунщикова и В.Г. Гагарина. 5-е издание. М.: АВОК-ПРЕСС, 2006. 256 с.
17. Андреев Д.А., Могутов В.А. Теплотехнические характеристики многослойных ограждающих конструкций со слоями отражающей изоляции. *Сборник трудов НИИСФ*. 2002. С. 139–146.
18. Андреев Д.А., Могутов В.А., Цирлин А.М. Выбор расположения слоев ограждающей конструкции с учетом предотвращения внутренней конденсации // *Строительные материалы*. 2001. № 12. С. 42–45.
19. Богословский В.Н. Строительная теплофизика. М.: Высшая школа, 1982. 415 с.
20. Арнольд Л.В., Михайловский Г.А., Селиверстов В.М. Техническая термодинамика и теплопередача. М.: Высшая школа, 1979. 466 с.
- tries. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2013. No. 6, pp. 14–16. (In Russian).
4. Gagarin V.G., Pastushkov P.P. Quantitative assessment of energy efficiency of energy saving measures. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2013. No. 6, pp. 7–9. (In Russian).
5. Gagarin V.G., Kozlov V.V. Requirements for thermal protection and energy efficiency in the draft of the updated SNiP “Thermal Protection of Buildings”. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2011. No. 8, pp. 2–6. (In Russian).
6. Umnyakova N.P., Kuzmin V.A. The use of reflective heat insulation in multilayer panels with effect of multiple reflection of a heat flow. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2016. No. 6, pp. 21–24. (In Russian).
7. Kuzmin V.A., Schabanin D.A., Tsirlin A.M., Tsyganov V.M., Achremenkov An.A. Techno-economic comparison of methods of energy saving by insulation of buildings. *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. Problemy jenergetiki*. 2014. No. 9–10, pp. 82–90. (In Russian).
8. Kuzmin V.A., Schabanin D.A., Tsirlin A.M. Mathematical and computer modeling of temperature and moisture mode of fencing in construction. *The collection of the XVIII annual youth scientific-practical conference “High-tech information technologies” SIT-2014*, pp. 43–59. (In Russian).
9. Achremenkov An.A., Kuzmin V.A., Tsirlin A.M., Tsyganov V.M. Energy efficiency of coating the inner surface of premises with reflective heat insulation. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2013. No. 12, pp. 65–67. (In Russian).
10. Umnyakov P.N. The use of aluminum foil for thermal insulation of buildings. *Collection of articles NIISF “Research in building physics”*. Moscow: Gosstroyizdat, 1959.
11. Umnyakova N.P. Heat protection of closed air spaces with reflective insulation. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2014. No. 1–2, pp. 16–20. (In Russian).
12. Umnyakova N.P. Heat transfer through enclosing structures with due regard for coefficients of radiation of inner surfaces of premises. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2014. No. 6, pp. 14–17. (In Russian).
13. Umnyakova N.P. Reduction in heat losses of a behind radiators wall surface. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2015. No. 2, pp. 21–24. (In Russian).
14. Manankov V.M. Reflective insulation in energy efficient construction. *Vestnik MGSU*. 2011. No. 3, pp. 319–326. (In Russian).
15. Manankov V.M. Reflective insulation in energy efficient construction. *Vse o zhilishhno-kommunal'nom hozjajstve*. 2011. No. 2, pp. 57–59. (In Russian).
16. Fokin K.F. *Stroitel'naya teplotekhnika ograzhdayushchikh chastei zdaniy / Pod redaktsiei Yu.A. Tabunshchikova i V.G. Gagarina. 5-e izdanie* [Building heat engineering of enclosing parts of buildings. Edited by J.A. Tabunshchikov and V.G. Gagarin. 5-th edition]. Moscow: AVOK-PRESS. 2006. 256 p.
17. Andreev D.A., Mogutov V. A. Thermal performance of multilayer enclosing structures with layers of reflective insulation. *Proceedings of NIISF*. 2002, pp. 139–146. (In Russian).
18. Andreev D. A., Mogutov V. A., Tsirlin, A. M., the Choice of layers enclosing structures subject to prevent internal condensation. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials] 2001. No. 12, pp. 42–45. (In Russian).
19. Bogoslovskiy V.N. *Stroitel'naya teplofizika* [Building thermal physics]. Moscow: Vysshaja shkola. 1982.
20. Arnold L., Mikhailovsky G.A., Seliverstov, V.M. *Tekhnicheskaya termodinamika i teploperedacha* [Engineering thermodynamics and heat transfer]. Moscow: Vysshaja shkola. 1979.