

УДК 69.01

ОЦЕНКА ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРЕХСЛОЙНЫХ СЭНДВИЧ-ПАНЕЛЕЙ СЕРИИ «АЛЮТЕРМ»

Канд. техн. наук Л.В.Гапонова, аспирант Е.А.Петрова

ОЦІНКА ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРИШАРОВИХ СЕНДВИЧ-ПАНЕЛЕЙ СЕРІЇ «АЛЮТЕРМ»

Канд. техн. наук Л.В.Гапонова, аспірант О.О.Петрова

THE EVALUATION OF THERMOPHYSICAL CHARACTERISTICS OF SANDWICH-PANELS OF «ALUTERM» SERIES

PhD, docent L.V. Gaponova, graduate student E.A. Petrova

В статье рассмотрены вопросы определения теплофизических показателей трехслойных сэндвич-панелей с двумя типами заполнителя. Обозначены особенности поведения ограждающих конструкций в виде сэндвич-панелей с армирующими элементами

из просечно-вытяжного листа при различных температурных режимах. Приведено конструктивное решение сэндвич-панели, позволяющее избежать появления зон локального промерзания панелей в местах примыкания армирующих элементов к наружной обшивке.

Ключевые слова. Трехслойная сэндвич-панель, армирующие элементы, термическое сопротивление, «мостик холода», конечно-элементное моделирование, просечно-вытяжной лист (ПВЛ).

У статті розглянуто питання визначення теплофізичних показників тришарових сендвіч-панелей з двома типами заповнювача. Позначено особливості поведінки огороджувальних конструкцій у вигляді сендвіч-панелей з армуючими елементами з просічно-витажного листа при різних температурних режимах. Наведено конструктивне рішення сендвіч-панелі, що дозволяє уникнути появи зон локального промерзання панелей в місцях примикання армуючих елементів до зовнішньої обшивки.

Ключові слова. Тришарова сендвіч-панель, армуючі елементи, термічний опір, «місток холоду», скінченно-елементне моделювання, просічно-витажний лист (ПВЛ).

The questions of determination of thermophysical characteristics of sandwich panels with two types of fillers – polystyrene and mineral wool fibre – are discussed in paper. The peculiarities of the behavior of enclosure structures in the form of sandwich panels with reinforcing elements made of expanded metal under the different temperature modes are highlighted. The results of the calculation of the considered designs of sandwich panels in the software package based on the finite element method are shown. The constructive solutions of sandwich panel allowing avoid the areas of local freezing of sandwich panel at the places of junction of reinforcing elements and outer face of the panel are given. The thermophysical analysis of the new constructive solution of sandwich panel with reinforced elements and polystyrene liner is also marked in the paper.

Keywords. Sandwich panels, reinforced elements, thermal resistance, "bridges of cold", finite element modeling, expanded metal.

Введение. В настоящее время в практике отечественного и мирового строительства большое распространение получили многослойные ограждающие конструкции [1]. К ним, в первую очередь, следует отнести трехслойные сэндвич-панели с металлическими наружными обшивками и средним слоем из минераловатных плит или пенополистирольного заполнителя. Панели типа сэндвич являются ярким примером современных облегченных конструкций [2], которые в сравнении с традиционными кирпичными или железобетонными стенами обладают существенно меньшим весом, обеспечивают высокий уровень звукоизоляции и эксплуатационной надежности, а трудозатраты на их изготовление, транспортировку и монтаж являются минимальными.

Кроме того, отличительной особенностью трехслойных панелей от однослойных является возможность обеспечения требуемого термического

сопротивления в результате применения легкого высокоэффективного утеплителя. Так, например, сэндвич-панель толщиной 100 мм способна обеспечить такой же уровень теплоизоляции как кирпичная стена толщиной 640 мм или стена из пенобетонных блоков толщиной 500 мм. Данное обстоятельство определяет широкое применение трехслойных сэндвич-панелей при строительстве складских и холодильных помещений, промышленных зданий и прочих быстромонтируемых зданий с определенным температурным режимом.

В настоящее время достаточное количество работ посвящены именно вопросам исследования работы трехслойных сэндвич-панелей с различными видами заполнителей [3, 4]. Авторами данной работы ранее были изучены особенности напряженно-деформированного состояния и деформирования как обычных сэндвич-панелей [5], так и конструкций, усиленных армирующими вставками из просечно-вытяжного листа (ПВЛ) [6]. Необходимость

исследования теплофизических характеристик указанных конструктивов предопределило теоретическое их исследование на базе метода конечно-элементного моделирования.

Конструктивные особенности. Рассматриваемая в работе трехслойная сэндвич-панель серии «Алютерм» представляет собой конструкцию, которая состоит из двух металлических обшивок (листовая оцинкованная сталь с полимерным покрытием) и легкого заполнителя – пенополистирола либо минеральной ваты на основе базальтового волокна. Модульная ширина панели составляет 1000 мм, а толщина внешних металлических обшивок 0,5 мм. Непрерывная технология изготовления сэндвич-панелей серии «Алютерм» позволяет выпускать панели любой заранее заданной длины, однако, в рамках данного исследования этот параметр носил второстепенный характер. Для оценки теплофизических особенностей рассматриваемых панелей «Алютерм» из существующей номенклатуры были выбраны

следующие параметры толщины сэндвич-панели: 100 мм, 120 мм, 150 мм, 200 мм.

В работе были рассмотрены три типа панелей с двумя видами заполнителя – минеральной ватой и пенополистиролом. При этом средний изоляционный слой состоит из отдельных ламелей – полос утеплителя шириной 100мм, высотой равной толщине панели и произвольной длины. Первый тип сэндвич-панели (рис. 1а) представляет собой обычную трехслойную панель с пенополистирольным или минераловатным заполнителем. Для второго и третьего типов характерно использование армирующих вставок из просечно-вытяжного листа толщиной 0,5мм, которые устанавливаются между ламелями утеплителя. Во втором типе сэндвич-панели (рис. 1б) армирующая вставка имеет вид плоской продольной полосы, тогда как в третьем типе (рис. 1в) – это объемный лонжерон, горизонтальные грани которого равны 100 мм, а вертикальные равны высоте панели. Поперечное сечение рассматриваемых трех типов конструкций приведены на рис. 1.

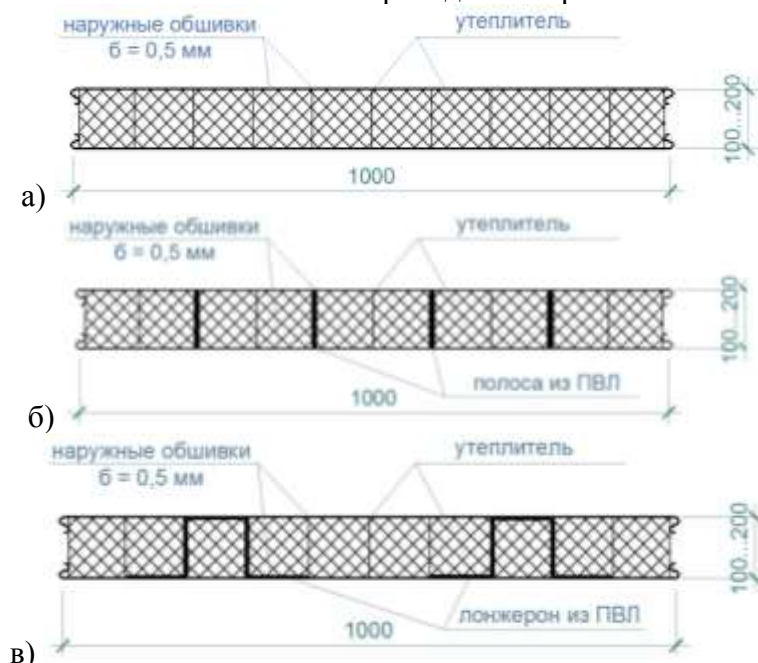


Рис. 1. Поперечное сечение рассматриваемых сэндвич-панелей: а) традиционной; б) с армирующей полосой из ПВЛ; в) с армирующим лонжероном из ПВЛ.

Основные определения.

Цель исследования: установление путем конечно-элементного моделирования

характера распределения температур по толщине сэндвич-панелей серии «Алютерм», их теплофизических характеристик, а также

оценка влияния на данные показатели наличия армирующих элементов.

Объект исследования: трехслойные сэндвич-панели серии «Алютерм» с минераловатным и пенополистирольным заполнителями, а также армирующими элементами из просечно-вытяжного листа.

Предмет исследования: характер распределения температур по толщине сэндвич-панели, а также оценка влияния армирующих вставок на теплофизические характеристики панели в целом.

Определение теплофизических характеристик сэндвич-панелей. Основным направлением повышения эффективности конструкций является разработка легких теплогидроизоляционных материалов. Этим определяется актуальность настоящей работы. На термическое сопротивление конструкции влияют следующие характеристики: геометрические, отражающие размеры и форму элементов

$$t_x = t_g - \frac{t_g - t_n}{R_0} (R_g + \sum R_x) \quad (1)$$

где t_g – температура внутреннего воздуха помещения, °C;

t_n – температура наружного воздуха, °C;

R_0 – термическое сопротивление ограждения, м² К/Вт;

R_g – термическое сопротивление теплоотдаче на внутренней поверхности ограждения, м² К/Вт;

где s_1 , s_3 – коэффициент теплоусвоения металлических наружных обшивок в расчетных условиях эксплуатации, [Вт/(м²К)]; s_2 – коэффициент теплоусвоения утеплителя из ламелей минеральной ваты или пенополистирола, [Вт/(м²К)].

конструкции; физические и механические характеристики материалов (теплопроводность, коэффициент теплопроводности); граничные условия, отражающие характер взаимодействия с окружающей средой. Климатические факторы также существенно влияют как на изменение температуры и влажности ограждающих конструкций, так и на температурно-влажностный режим помещения [7].

Для рассматриваемых конструкций трехслойных сэндвич-панелей различной толщины (без учета армирующих элементов) был проведен анализ теплофизических характеристик в плоской задаче.

Определение температур на границах слоев ограждения выполнялось согласно формуле (1):

$\sum R_x$ – сумма термических сопротивлений слоев от внутренней поверхности конструкции до рассматриваемого сечения, м² К/Вт.

Расчет тепловой инерции многослойной ограждающей конструкции выполнялся согласно формуле (2):

$$D = R_1 \cdot s_1 + R_2 \cdot s_2 + R_3 \cdot s_3 \quad (2)$$

Полученные значения термического сопротивления конструкции и ее тепловой инерции и графики распределения температур в поперечном сечении конструкции для панелей с минераловатным и пенополистирольным заполнителем различной толщины приведены в таблицах 1 и 2.

Будівельні матеріали, конструкції та споруди

Таблица 1. Теплофизические характеристики сэндвич-панелей с пенополистирольным средним слоем

№ п/п	Толщина панели, мм	R, м ² К/Вт	D	График распределения температуры по панели
1	$\delta=100$	2,66	0,9	
2	$\delta=120$	3,16	1,07	
3	$\delta=150$	3,91	1,33	
4	$\delta=200$	5,16	1,75	

Будівельні матеріали, конструкції та споруди

Таблица 2. Теплофизические характеристики сэндвич-панелей с минераловатным средним слоем

№ п/п	Толщина панели, мм	R, м ² К/Вт	D	График распределения температуры по панели
1	δ=100	2,16	1,03	
2	δ=120	2,56	1,23	
3	δ=150	3,16	1,52	
4	δ=200	4,16	1,99	

Анализируя полученное термическое сопротивление панелей, приведенное в таблицах 1 и 2, в соответствии с ДБН [8], можно сделать вывод о том, что в качестве внешних стен жилых и гражданских зданий могут использоваться следующие сэндвич-панели серии «Алютерм»:

- в I-й температурной зоне Украины: с пенополистирольным наполнителем – толщиной не

менее 150 мм, с минераловатным наполнителем – толщиной не менее 200 мм;

- во II-й температурной зоне Украины: с пенополистирольным наполнителем – толщиной не менее 120 мм, с минераловатным наполнителем – толщиной не менее 150 мм;

В качестве внешних стен промышленных зданий допустимо использование сэндвич-панелей серии «Алютерм» с минераловатным наполнителем толщиной не менее 120 мм или с пенополистирольным наполнителем толщиной не менее 100 мм.

Решение задачи теплофизики в конечно-элементной форме. Конструктивное армирование в виде плоских полос и объемных лонжеронов из просечно-вытяжного листа, применяемое в рассматриваемых сэндвич-панелях «Алютерм», образует так называемый «мостик холода», по которому осуществляется сток тепла, что следует обязательно учитывать при создании новых конструкций облегченного типа.

Для решения поставленной задачи использовался сертифицированный программный комплекс Autodesk Simulation Mechanical [9], базирующийся на методе конечных элементов (МКЭ). При имитационном моделировании сэндвич-панелей в конечно-элементной форме использованы физико-механические характеристики материалов и геометрические параметры панелей, которые полностью отвечают действительным параметрам изучаемых конструкций. Конечно-элементные модели рассматриваемых сэндвич-панелей и фрагментов армирования приведены на рис. 2.

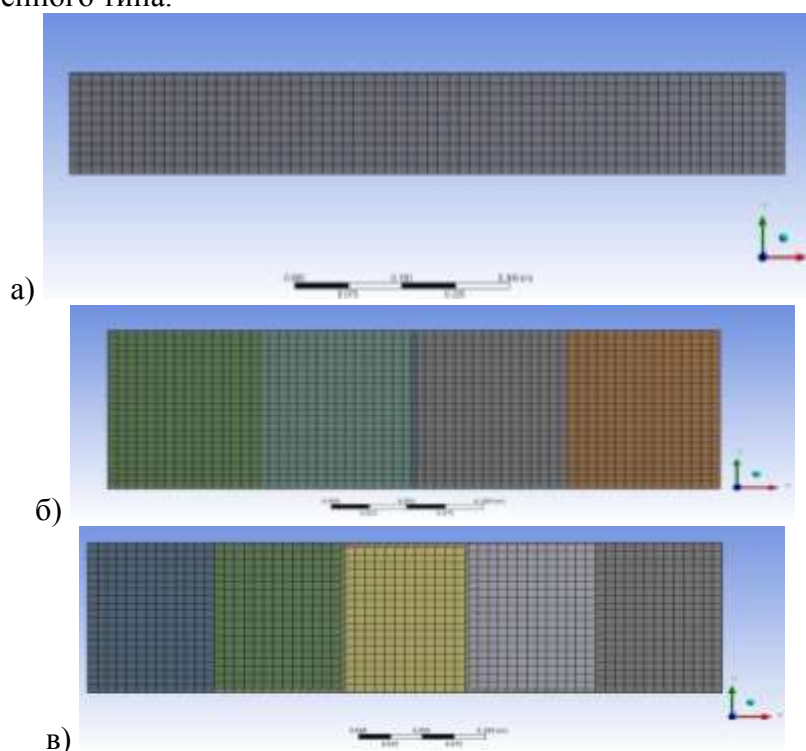


Рис. 2. Конечно-элементные модели: а) панели в целом; б) фрагмента панели с плоской полосой из ПВЛ, в) фрагмента панели с лонжероном из ПВЛ.

Граничные условия для расчета принимались в следующем виде. Расчетная температура внутреннего воздуха $t_{в}^p = 22^{\circ}\text{C}$; расчетная температура наружного воздуха $t_{н}^p = -23^{\circ}\text{C}$; расчетный коэффициент теплоотдачи на внутренней поверхности $\alpha_{в}^{cm} = 8,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$; расчетный коэффициент теплоотдачи на наружной поверхности $\alpha_{н} = 23,0 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$. Для поверхностей, ограничивающих расчетную область,

тепловой поток и коэффициенты теплоотдачи принимались равными нулю. Начальная температура всей конструкции принималась равной 20°C .

В общем случае для решения поставленной задачи необходима реализация нелинейной задачи нестационарной теплопроводности [10]. Тогда для какой-либо конкретной конфигурации области

объемом V необходимо решить уравнение нестационарной теплопроводности вида:

$$\frac{\Delta T}{\Delta \tau} = \operatorname{div}(a \cdot \operatorname{grad} T) + Q, \quad x \in V, \quad \tau > 0, \quad (3)$$

где $T(\bar{x}, \tau)$ – искомая функция теплопроводность; c – удельная температуры; \bar{x} – вектор координат; τ – теплоемкость; ρ – плотность; Q – время; $a = \lambda / (c\rho)$ – внутренний источник или сток тепла. Начальное условие задачи:

$$T(\bar{x}, 0) = T_0(\bar{x}), \quad (4)$$

где $T_0(\bar{x})$ – заданная функция.

Граничные условия задачи (3) в общем случае имеют вид:

$$\alpha^* \frac{\partial T}{\partial \bar{x}} + \beta^* T = f(\bar{x}, \tau), \quad \bar{x} \in \bar{x}_{cp}, \quad (5)$$

где α^* , β^* – константы; $f(\bar{x}, \tau)$ – различными для разных участков заданная функция; \bar{x}_{cp} – вектор, описывающий границу области.

Для тепловых задач условие (5) называется условием первого рода при $\alpha^*=0$, условием второго рода при $\beta^*=0$ и условием третьего рода при $\alpha^* \neq 0$ и $\beta^* \neq 0$. Константы α^* и β^* , а также функция $f(\bar{x}, \tau)$ могут быть

различными для разных участков поверхности, ограничивающей исследуемый объем. Конкретный вид выражения (5), если принять, что \bar{x}_{cp} образуется поверхностями S_1 , где заданы граничные условия первого рода, S_2 – второго, S_3 – третьего, можно записать так:

$$\begin{aligned} T(x, \tau) &= T(x, \tau), & (x, \tau) \in S_1, \\ -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} &= q(x, \tau), & (x, \tau) \in S_2, \\ \lambda \frac{\partial T}{\partial n} &= -\alpha(T - T_c), & (x, \tau) \in S_3. \end{aligned}$$

Здесь T и q – температура и тепловой поток, заданные соответственно на частях границы поверхности S_1 и S_2 тела; α – коэффициент теплоотдачи через поверхность тела S_3 от среды с температурой T_c ; n – внешняя нормаль к поверхности. Объединение участков S_1 , S_2 и S_3 образует полную границу S объема V . Частный случай $q=0$ второго условия отражает отсутствие переноса тепла – адиабатическую границу.

Граничных условий (5) и их комбинация охватывают весь класс встречающихся на практике задач, так как теплообмен излучением можно свести к задаче конвективного теплообмена – граничным условиям третьего рода.

С вариационной точки зрения, что очень удобно для практической реализации МКЭ, решение уравнения (3) с граничными условиями (5) эквивалентно отысканию минимума функционала вида:

$$I(T) = \int_V \frac{1}{2} \left\{ (\lambda \cdot \operatorname{div} \operatorname{grad} T) - 2 \left(Q - c\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} \right) T \right\} dv + \int_{S_2} q T dS + \int_{S_3} \frac{\alpha}{2} [T^2 - 2T \cdot T_c + T_c^2] dS \quad (6)$$

При этом полагается, что минимизация осуществляется для каждой точки временного интервала и перед каждой такой минимизацией теплофизические характеристики и другие величины,

зависящие от времени, должны быть пересчитаны заново. При минимизации функционала (6) также принимается, что граничные условия первого рода на поверхности S_1 – наложены на пробную

Будівельні матеріали, конструкції та споруди

функцию $\{\bar{T}\}$ – значения узловых температур в МКЭ.

Итоговое разрешающее уравнение МКЭ имеет вид:

$$\left([K] + \frac{2}{\Delta\tau} [C] \right) \{\bar{T}\}_1 = \left(\frac{2}{\Delta\tau} [C] - [K] \right) \{\bar{T}\}_0 - 2\{F\}^* \quad (7)$$

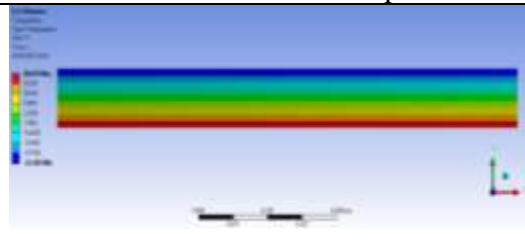
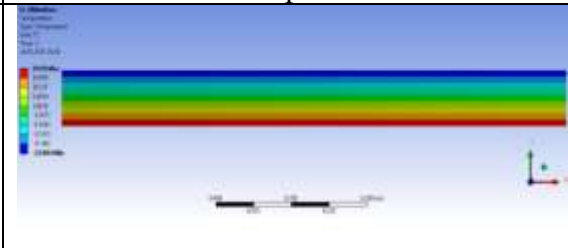
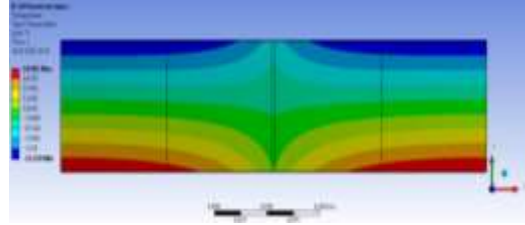
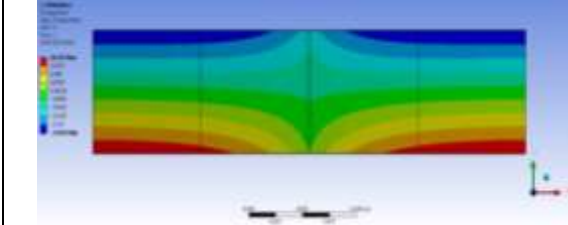
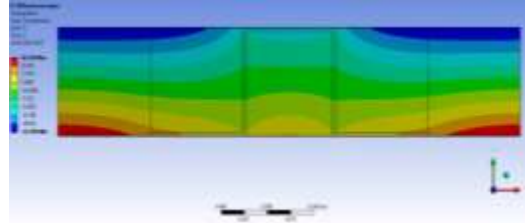
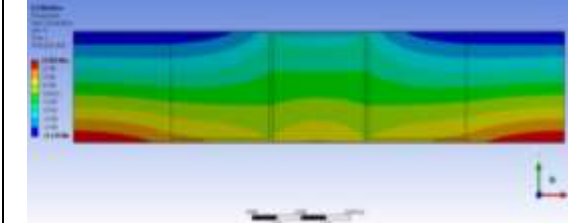
где $[K]$ – матрица теплопроводности конечных элементов; $[C]$ – матрица теплоемкости; $\Delta\tau$ – временной интервал; $\{\bar{T}\}^* = \frac{1}{2} (\{\bar{T}\}_1 + \{\bar{T}\}_0)$; $\{F\}^* = \frac{1}{2} (\{F\}_1 + \{F\}_0)$.

Здесь T_0 и T_1 – функции температуры для времени τ_0 и τ_1 соответственно. Аналогично для функции $\{F\}$ – термических сил. В расчетах используются расчетные значения температуры в узловых точках.

Сравнительный анализ изолиний температурных полей для рассматриваемых конструкций с утеплителем из

минераловатных плит и пенополистирольного заполнителя толщиной 100 мм приведен в таблице 3. Следует отметить, что в рамках работы были рассмотрены также панели толщиной 120, 150 и 200 мм, однако, характер распределения температур по панели, толщиной отменной от 100 мм, практически аналогичен и отличие температур на внешней и внутренней сторонах ограждающей конструкции для них указанных случаев также незначительно.

Таблица 3. Изолинии температурных полей для сэндвич-панели толщиной 100мм

Вид	Заполнитель - пенополистирол	Заполнитель - минеральная вата
Традиционная панель		
Панель с полосой из ПВЛ		
Панель с лонжероном из ПВЛ		

При рассмотрении структуры конструкции следует отметить её неоднородность с точки зрения теплозащитных свойств используемых конструкционных материалов. Анализ расположения армирующих элементов в трехслойных панелях с металлическими наружными обшивками и утеплителем из минераловатных плит и пенополистирольного заполнителя позволяет

сделать вывод о том, что они представляют собой эффективные теплопроводящие вставки, которые создают дополнительные тепловые потоки через конструкцию, снижая среднее термическое сопротивление ограждающей конструкции. Таким образом, вклад элементов арматуры в тепловой поток через ограждение значителен.

Как видно из табл. 3 температура в зоне арматуры практически на всю глубину

Будівельні матеріали, конструкції та споруди

плиты имеет отрицательную температуру, то есть на внутренней поверхности плиты образуется зона отрицательных температур, что недопустимо.

Анализ распределения температур по выделенным зонам термических сопротивлений приведен на рисунке 3.

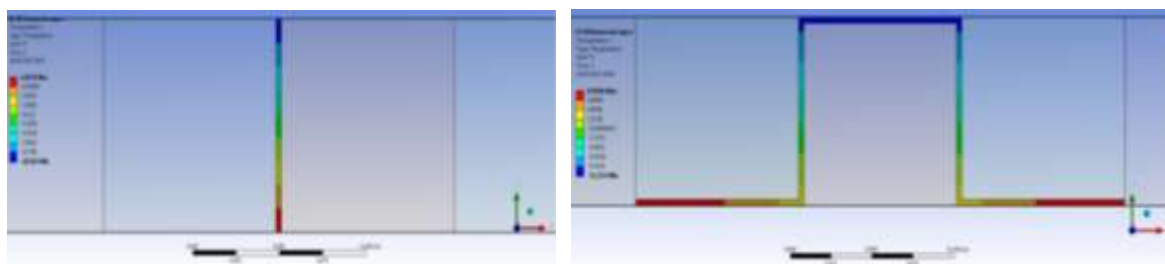


Рис. 3. Распределение температур по толщине армирующих элементов из ПВХ

Таким образом, армирующие элементы трехслойных панелей с металлическими наружными обшивками и утеплителем из минераловатных плит и пенополистирольного заполнителя образуют зоны повышенной тепловой проводимости и способствуют образованию областей

пониженных температур на внутренних поверхностях ограждения. В связи с чем, предложено следующее конструктивное решение: выполнение пенополистирольного вкладыша в зоне присоединения армирующего элемента к наружным обшивкам (рис.4).

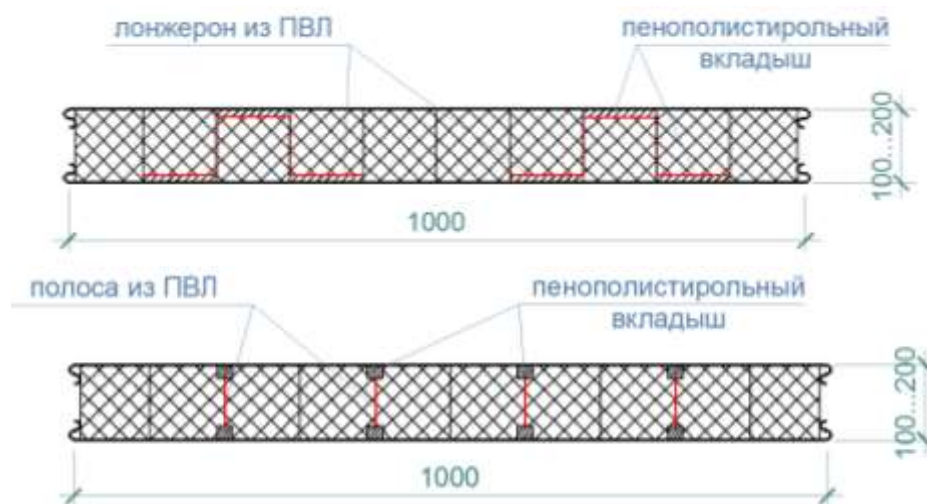


Рис. 4. Конструктивные мероприятия, направленные на устранение зон локального промерзания панелей.

Положительное влияние наличия пенополистирольного вкладыша демонстрируется температурными изополями, приведенными на рис. 5.

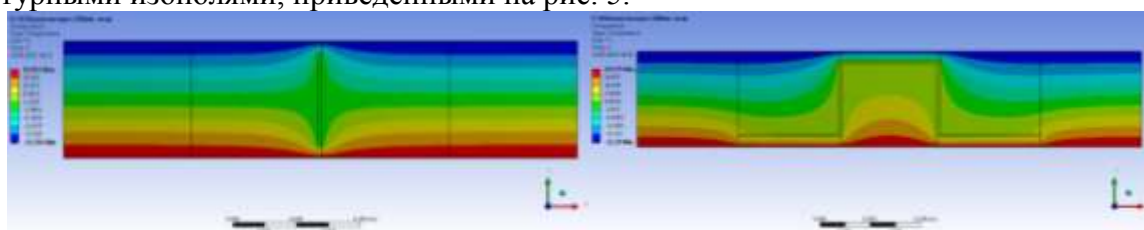


Рис. 5. Температурные изополя панели с армирующими элементами и вставками из пенополистирола

На рис. 6 и 7 приведены внутренней стороне ограждающей сравнительные диаграммы температур на конструкции в виде сэндвич-панели с

армирующими элементами до применения температуре наружного воздуха -23°C . пенополистирольного вкладыша и после при

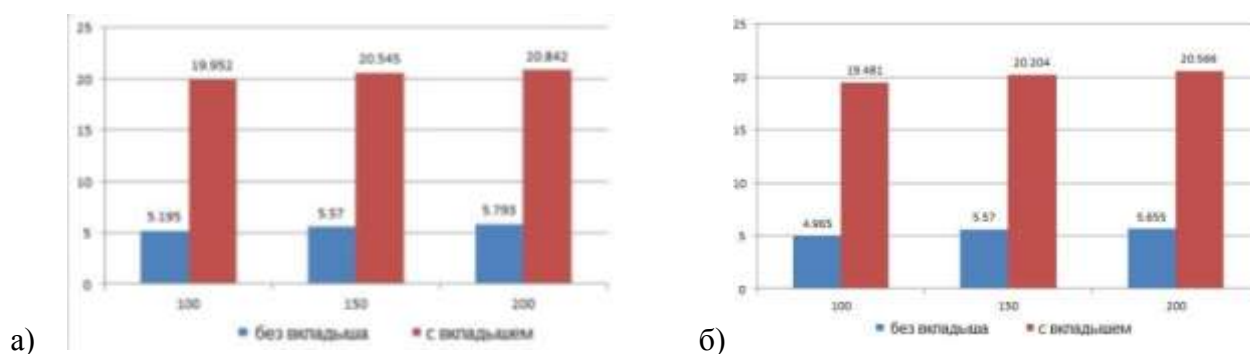


Рис. 6. Температура на внутренней стороне ограждающей конструкции для панели с плоским армирующим элементом из ПВХ: а) для пенополистирольного заполнителя; б) для минераловатного заполнителя.

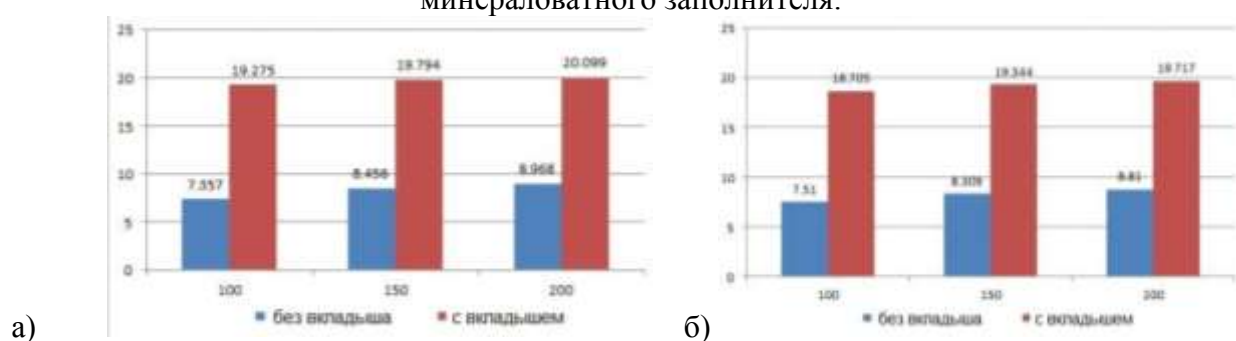


Рис. 7. Температура на внутренней стороне ограждающей конструкции для панели с объемным лонжероном из ПВХ: а) для пенополистирольного заполнителя; б) для минераловатного заполнителя.

Как видно из графиков, использование пенополистирольного вкладыша способствует равномерному распределению температуры по толщине сэндвич-панели, позволяя избежать появления зон локального промерзания, так называемых «мостиков холода».

Проведенный анализ свидетельствует о том, что рассматриваемые трехслойные сэндвич-панели с металлическими

наружными обшивками и утеплителем из минераловатных плит и пенополистирольного заполнителя позволяют создавать конструкции, сочетающие в себе функции несущей и теплоизолирующей конструкции и обладающие высокими эксплуатационными характеристиками в широком диапазоне изменения температурных параметров.

Список использованной литературы

1. Experimental Investigation of Precast Concrete Insulated Sandwich Panels with Glass Fiber-Reinforced Polymer Shear Connectors/Douglas Tomlinson, Amir Fam/ACI Structural Journal. Vol. 111 (2014). - p.- 595-606.
2. Шмуклер В.С. Каркасные системы облегченного типа / В.С. Шмуклер, Ю.А. Климов, Н.П. Бурак. – Х.: Золотые страницы, 2008.
3. Ильдияров Е.В. Несущая способность и деформативность кровельных сэндвич-панелей с минераловатным средним слоем на основе базальтового волокна: дис. канд. техн. наук: 05.23.01 / Ильдияров Евгений Викторович. – Самара, 2009. – 178 с. – Библиогр. : с. 163-168.
4. Хайруллин Л.Р. Несущая способность сэндвич-панелей с металлическими обшивками и технологическими стыками среднего слоя. : дис. канд. техн. наук: 05.23.01 / Хайруллин Ленар Равилевич. – Казань, 2012. –205 с. – Библиогр. : с. 186-199.
5. Experimental investigation of wall and roof sandwich panels of “Aluterm” series (Экспериментальное исследование стеновых и кровельных сэндвич-панелей серии

«Алюотерм»). / В.С. Шмуклер, Е.И. Лугченко, Е.А. Петрова. // Коммунальное хозяйство городов. – №118 (2014) – С. 11-20.

6. Анализ характера деформирования и разрушения трехслойных стеновых панелей серии «Алюотерм» / Е.А. Петрова. //Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту. – Випуск 151 (2015) – С. 26-43.

7. Э.Д. Чихладзе. Температурно-влажностный режим сталебетонных несущих и ограждающих конструкций промышленных зданий и сооружений/ Э.Д. Чихладзе, Л.В. Гапонова; Харьков. нац. акад. город. хоз-ва. – Х.:ХНАГХ, 2011. – 188с.

8. ДБН В.2.6-31:2006 «Теплова ізоляція будівель» зі Зміною №1 від 1 липня 2013 року. МінБуд України. – Київ, 2006. – 70с.

9. Autodesk Simulation Mechanical. Режим доступа: <http://www.autodesk.ru/products/simulation/features/simulation-mechanical/all/gallery-view> (дата обращения: 01.06.2015).

10.Елдашов Ю.А., Кашеварова Г.Г. Сравнительный анализ вариантов конструкции узла примыкания оконного блока к стеновому проему методом конечных элементов // Вестник ЮУрГУ. Серия: Строительство и архитектура . 2007. №22 (94).

Рецензент д-р техн. наук. профессор В.П.Кожушко

Петрова Елена Александровна, аспирантка кафедры строительных конструкций Харьковского национального университета городского хозяйства им. А.Н. Бекетова.

Гапонова Людмила Викторовна, к.т.н., доцент кафедры строительных конструкций Харьковского национального университета городского хозяйства им. А.Н. Бекетова.

Petrova Elena Aleksandrovna, graduate student of the Construction Department of O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv.

Gaponova Lyudmila Viktorovna, PhD, docent of the Construction Department of O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv.

Статья принята 05.05.2015р.