

doi: 10.5862/MCE.60.6

Теплотехнические свойства стеновых ограждающих конструкций из стальных тонкостенных профилей и полистиролбетона

Thermal characteristics of the external walling made of cold-formed steel studs and polystyrene concrete

Аспирант М.В. Лещенко,
канд. техн. наук, докторант В.А. Семко,
Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка,
г. Полтава, Украина

M.V. Leshchenko,
V. Semko,
Poltava National Technical Yuri Kondratiuk
University, Poltava, Ukraine

Ключевые слова: энергоэффективность; строительство; здания; конструкция; тонкостенный профиль; ЛСТК; полистиролбетон; теплопроводность; прочность.

Key words: buildings; construction; energy efficiency; light-gauge steel stud, cold-formed steel; polystyrene concrete; thermal conductivity; strength.

Аннотация. В статье рассматриваются стеновые панели на основе легких стальных тонкостенных конструкций с использованием в качестве утеплителя полистиролбетона. Использование данного материала позволит решить проблему «мостиков холода» в панели, максимально изолировать несущий профиль, минимизировать теплопотери конструкции и повысить энергоэффективность здания в целом. Были определены прочность и коэффициент теплопроводности для полистиролбетонных плотностью 300...1300 кг/м³. Результаты показали, что при увеличении плотности полистиролбетона в 4.1 раза коэффициент теплопроводности повышается в 3.7 раза, что составляет практически линейную зависимость. Для образцов разной плотности был зафиксирован разброс значений деформаций при сжатии; показано, что для полистиролбетонных низких плотностей характерна большая деформативность. Были изготовлены экспериментальные образцы стеновых панелей и в лабораторных условиях определено их сопротивление теплопередаче. Установлено, что наличие в стеновой конструкции теплопроводного включения приводит к снижению сопротивления теплопередаче до 50 %. Предложено использовать в качестве внешней облицовки стеновой профилированный настил. При этом необходимо конструировать стену таким образом, чтобы волна профнастила была расположена напротив теплопроводного включения. Промежуток, который образуется между профилем и настилом, заполняется полистиролбетоном и служит в роли термопрокладки. Такой метод повышения энергоэффективности стеновых конструкций из ЛСТК и полистиролбетона не требует дополнительных затрат и является исключительно конструктивным. При увеличении высоты волны профилированного настила влияние теплопроводного включения уменьшается прямо пропорционально. Экспериментально и теоретически доказана эффективность предложенного метода.

Abstract. The paper proposes to use polystyrene concrete as an insulating material in wall panels made of light gauge studs. It should solve the problem of thermal bridges in such panels. The strength and the heat conductivity factor for polystyrene concrete with the density of 300-1300 kg/m³ were determined. Results showed that by increasing the density of polystyrene concrete by 4.1 times the thermal conductivity is increased by 3.7 times, which is an almost linear relationship. For instance, the strength at a density of 300 kg/m³ is 0.25 MPa, while at a density of 1300 kg/m³ it is already 8.2 MPa, which is 30 times more. For samples of different density, a scattering of deformations under compression was recorded. A full deformability of PSC cubes of 1292 kg/m³ density was on average 1 mm, while for 309 kg/m³ cubes it was 10 mm, indicating a larger deformability of low-density polystyrene concrete. The experimental samples of wall panels were assembled and their heat-transfer resistance was measured in the laboratory. It was found that the presence of thermally conductive inclusions in the wall structure reduces heat resistance up to 50 %. It was proposed to use profiled sheeting as an external wall

Лещенко М.В., Семко В.А. Теплотехнические свойства стеновых ограждающих конструкций из стальных тонкостенных профилей и полистиролбетона

covering. Besides, it is necessary to design the wall so that the external flange of the sheeting is placed across the heat-conducting inclusions. The gap between the profile and the sheeting is filled with polystyrene concrete and serves as thermal pad. This method of increasing energy efficiency of cold-formed steel and polystyrene concrete wall structures is purely structural and does not require additional costs. By increasing the web height of the profiled sheeting, the effect of heat conducting inclusions is reduced in direct proportion – by 40% at 20 mm, by 20% at 40 mm and by 10% at 50 mm. The proposed method is theoretically and experimentally proven.

Введение

Ограждающие конструкции на основе стальных тонкостенных профилей приобретают все большую популярность в строительной отрасли на территории Украины, России, Беларуси, Казахстана. Зарубежный опыт позволяет говорить о значительной экономической целесообразности использования таких элементов в качестве несущих и ограждающих конструкций [1, 2]. Областью применения легких стальных тонкостенных конструкций является возведение несущих стен малоэтажных зданий, каркасы зданий средней этажности, панели многоэтажных зданий, модульные конструкции, бескрановые конструкции павильонного типа, надстройки и другие элементы реконструкции зданий, системы прогонов и т.п. Данная каркасная технология предполагает использование в качестве несущих конструкций стальных тонкостенных холодноформованных профилей толщиной до 4 мм, а в качестве утеплителя – минераловатных плит. Наличие в стеновых панелях теплопроводных включений в виде несущих профилей – так называемых «мостиков холода» – ставит под сомнение их теплоизоляционные характеристики. Решением данной проблемы может быть использование в качестве утеплителя полистиролбетона (ПСБ), который позволит максимально изолировать несущий профиль, при этом минимизировать теплопотери данной конструкции и повысить энергоэффективность здания в целом. Стеновая панель может изготавливаться как на месте строительства, так и в заводских условиях (рис. 1).

В данной работе изучается влияние одного типа теплопроводного включения, а именно несущего профиля. Полистиролбетон рассматривается как теплоизоляционно-конструкционный материал. Он обладает как теплоизоляционными свойствами, так и несущей способностью, которые исследуются в данной работе.

В российском стандарте ГОСТ Р 51263–2012 [3] нормируются следующие термины с соответствующими определениями для полистиролбетона.

1. Полистиролбетон теплоизоляционный – бетон марок по средней плотности D150...D225 и прочности на сжатие не ниже M2, применяемый для утепления несущих конструкций зданий. Теплоизоляционный полистиролбетон используется для теплоизоляции теплопроводных систем, тепловых агрегатов, а также наружных стен и покрытий, конструкция и условия эксплуатации которых исключает возможность увлажнения и частичного промерзания теплоизоляционных слоев в процессе длительной эксплуатации.

2. Теплоизоляционно-конструкционный полистиролбетон – бетон марок по средней плотности D250...D350 и класса по прочности на сжатие не ниже B0.5, применяется для теплоизоляции несущих и самонесущих стен, рассчитанных на длительную эксплуатацию (не менее 50 лет) с учетом возможного увлажнения и замораживания – оттаивания при изменении температуры и влажности окружающей среды. Используется также в надпроемных перемычках.

3. Конструкционно-теплоизоляционный полистиролбетон – бетон марок по средней плотности D400...D600 (и выше) и класса прочности на сжатие не ниже B1.5, который применяют для кладки из мелких блоков или заливки в опалубку, в том числе несъемных внешних самонесущих и несущих стен малоэтажных (до 3 этажей) зданий и несущих внешних стен среднеэтажных (5–7 этажей) и многоэтажных зданий, в том числе в армированных и длинномерных надпроемных перемычках. Используется для изготовления армированных плит перекрытий и других сборных изделий.

Обзор иностранной и отечественной литературы

С 2009 г. в Полтавском национальном техническом университете под руководством д.т.н. А.В. Семко проводятся исследования совместной работы комплексных конструкций из легких стальных тонкостенных (ЛСТ) профилей и полистиролбетона [4, 5]. В этих работах внимание сконцентрировано в большей мере на прочностных характеристиках и совместной работе полистиролбетона с каркасом из ЛСТ профилей, при этом тепловые характеристики полистиролбетона и конструкции в целом остались не исследованы [6]. Вопросом исследования прочностных и тепловых характеристик полистиролбетона в совместной работе с Leshchenko M.V., Semko V. Thermal characteristics of the external walling made of cold-formed steel studs and polystyrene concrete

железобетонными панелями занимались такие ученые, как Н.В. Савицкий, В.И. Большаков, А.М. Сопильняк [7, 8]. В работах [9–11] рассматривались физико-механические свойства полистиролбетона, а в [12–15] – численное моделирование теплообмена и хранение тепловой энергии в легких бетонах, поскольку полистиролбетон имеет высокую теплосберегающую способность.

Тепловая защита ограждающих конструкций и зданий была рассмотрена в работах [16–18]. Исследования энергоэффективных стеновых конструкций из ЛСТ профилей и параметров микроклимата для различных конструктивных параметров отражены в работах авторов как стран СНГ [19–23], так и других [24–27]. Стоит отметить, что в конструкциях данного типа самым уязвимым местом с точки зрения теплопотерь является сам профиль. Он представляет собой теплопроводное включение, так называемый «мостик холода», исследованию влияния которого посвящены работы [28–30]. Также исследования термической однородности ограждающих конструкций представлены в работах ученых А.С. Горшкова, Н.И. Ватина и других [31, 32].

Обзор литературных данных показал, что одним из основных критериев энергоэффективного проектирования стен из легких стальных конструкций является выбор эффективного утеплителя и ликвидация теплопроводных включений. Поэтому эти вопросы рассматриваются в данной работе.

В ранее опубликованных работах авторов [33–36] были проведены исследования теплотехнических свойств ограждающих конструкций на основе ЛСТ профилей с утеплителем минеральная вата и получены их характеристики в зависимости от их конструктивных параметров.

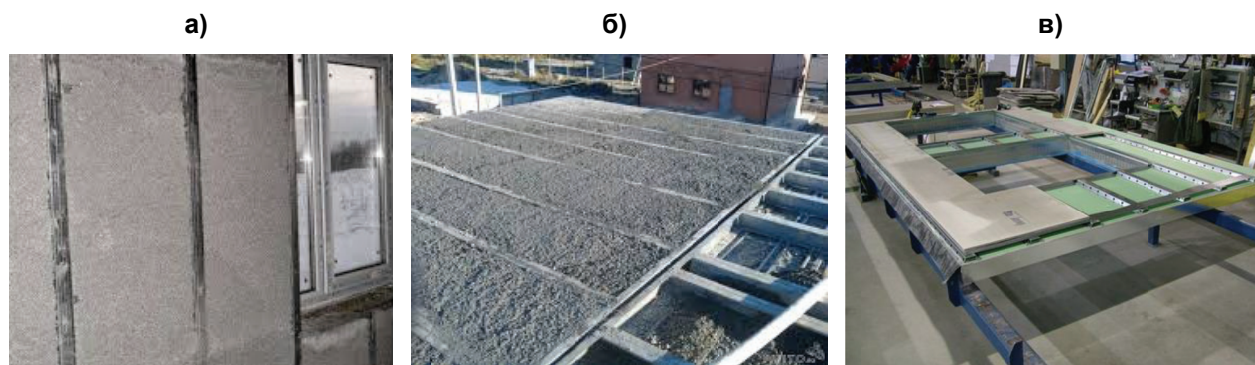


Рисунок 1. Каркасы ограждающих конструкций:
а) стена; б) перекрытие; в) изготовление в заводских условиях

Постановка задачи

Исходя из представленной проблемы и выше перечисленных научных трудов можно говорить, что теплотехнические свойства стеновых панелей из ЛСТК мало изучены, поэтому их исследование актуально. В работе были поставлены следующие задачи:

- исследовать физико-механические характеристики полистиролбетона;
- изготовить экспериментальные образцы панелей и в лабораторных условиях определить их теплопроводность;
- численно в программном комплексе выполнить тепловое моделирование экспериментальных образцов;
- предложить энергоэффективную стеновую конструкцию из ЛСТ профилей и полистиролбетона.

Физико-механические характеристики полистиролбетона

Для решения первой задачи по определению физико-механических свойств полистиролбетона были изготовлены образцы бетонных кубиков ($100 \times 100 \times 100$ мм) шести серий: 200 кг/м^3 , 400 кг/м^3 , 600 кг/м^3 , 800 кг/м^3 , 1000 кг/м^3 и 1200 кг/м^3 . Из этих же серий бетона были сформированы пластины ($150 \times 150 \times 25$ мм) для определения коэффициента теплопроводности (рис. 2).

Изготовление бетона выполнялось в лаборатории на кафедре строительных материалов Полтавского национального технического университета имени Юрия Кондратюка. Полистиролбетон – разновидность легких бетонов, он представляет собой композиционный материал, в состав которого входит портландцемент, пористый заполнитель, а также модифицирующие добавки. Именно вспененные гранулы полистирола играют особую роль в формировании полистиролбетона. При их применении в полистиролбетонной смеси значительно улучшается прочность на растяжение и на изгиб. Вследствие этого полистиролбетон не имеет трещин, в отличие от пенобетона и газобетона.

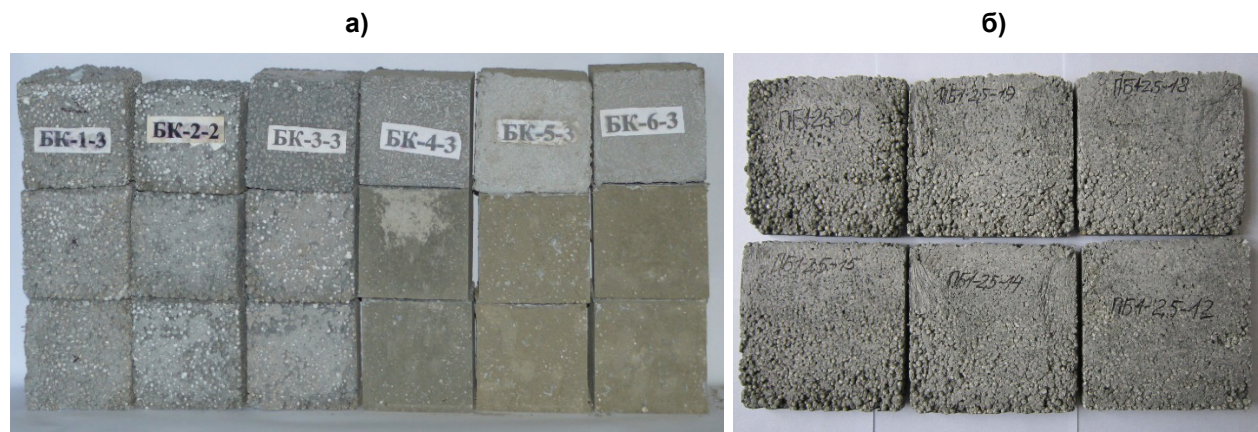


Рисунок 2. Экспериментальные образцы каждой серии

Образцы кубиков испытывались при достижении проектной прочности бетона на приборе УИМ–5 и гидравлическом прессе ПММ–500. Загрузка происходила постепенно и приводила к разрушению каждого из образцов (рис. 3). Образцы пластин испытывались для определения коэффициента теплопроводности на приборе ИТС–1 (рис. 4). Принцип действия прибора основан на создании проходящего через исследуемый плоский образец стационарного теплового потока. По величине этого потока, температуре противоположных граней образца и его толщине вычисляется теплопроводность образца по формуле:

$$\lambda = \frac{d \cdot q}{\Delta T}, \quad (1)$$

где d – толщина образца;

q – плотность теплового потока, проходящего через образец;

ΔT – разность температур между противоположными гранями образца.



Рисунок 3. Испытание бетонных образцов на прочностные характеристики



Рисунок 4. Испытание бетонных образцов на теплотехнические характеристики

Плотность полученного полистиролбетона составляла 309...1292 кг/м³, что в полной мере отвечает конструктивно-изоляционному назначению выбранного материала.

Leshchenko M.V., Semko V. Thermal characteristics of the external walling made of cold-formed steel studs and polystyrene concrete

Для образцов разной плотности был зафиксирован разброс деформаций при сжатии. Так, для кубиков из ПСБ плотностью 1292 кг/м^3 полная деформативность составила в среднем 1 мм, а для ПСБ плотностью 309 кг/м^3 – 10 мм, что говорит о большой деформативности полистиролбетона низких плотностей. При этом предельная кубиковая прочность ПСБ отличается более чем в 30 раз (таблица 1).

Таблица 1. Физико-механические свойства образцов ПСБ по результатам испытаний

Состав бетона	Серия образцов	Плотность, кг/м^3	Среднее значение удельного веса, кг/м^3	Кубиковая прочность образца, МПа	Деформации, мм	Предельная кубиковая прочность ПСБ в партии, МПа	Прочность ПСБ при деформации и 1 мм, МПа
Б1	БК-1-1	312	309	0.22	11	0.25	0.025
	БК-1-2	312		0.27	10		
	БК-1-3	302		0.26	9		
Б2	БК-2-1	625	605	1.01	5	0.91	0.195
	БК-2-2	602		0.89	5		
	БК-2-3	587		0.84	4		
Б3	БК-3-1	798	808	1.60	7	1.96	0.453
	БК-3-2	806		2.07	2.5		
	БК-3-3	819		2.22	3.5		
Б4	БК-4-1	876	875	3.43	2.5	3.17	1.268
	БК-4-2	849		3.04	4.5		
	БК-4-3	899		3.03	0.5		
Б5	БК-5-1	1091	1107	3.19	3	3.61	2.161
	БК-5-2	1111		4.46	1		
	БК-5-3	1118		3.17	1		
Б6	БК-6-1	1311	1292	7.86	2	8.20	8.20
	БК-6-2	1298		8.71	0.5		
	БК-6-3	1280		8.04	0.5		

По результатам расчетов была установлена предельная прочность полистиролбетонных образцов, получены деформации, а также прочность ПСБ при деформации кубика 1 мм. Построен график зависимости прочности ПСБ от плотности (рис. 5), который показывает криволинейную зависимость: с повышением плотности полистиролбетона его прочность увеличивается.

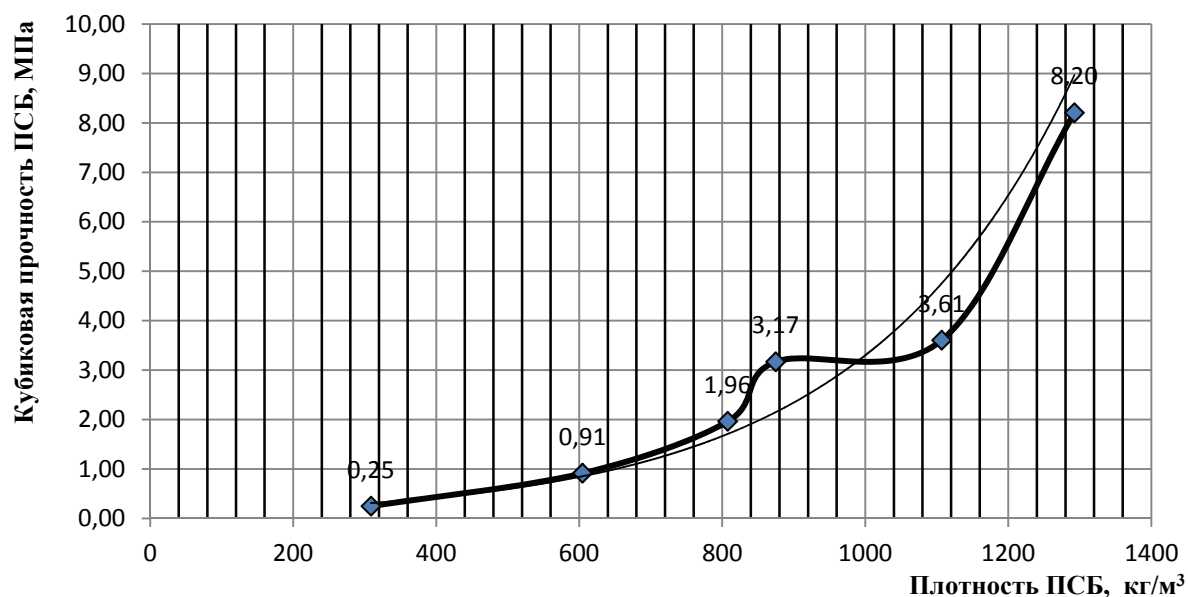


Рисунок 5. Зависимость прочности полистиролбетона от его плотности

Лещенко М.В., Семко В.А. Теплотехнические свойства стеновых ограждающих конструкций из стальных тонкостенных профилей и полистиролбетона

После испытаний ПСБ кубиков на прочность были испытаны ПСБ пластины на теплопроводность. Грани образцов, контактирующие с рабочими поверхностями плит прибора, должны быть плоскими и параллельными. Отклонение лицевых граней жесткого образца от параллельности составляло не более 0.5 мм. Жёсткие образцы, имеющие разнотолщинность и отклонения от плоскостности, шлифовались. Толщина образцов измерялась штангенциркулем с погрешностью не более 0.1 мм в четырёх углах на расстоянии (50.0 ± 5.0) мм от вершины угла и в середине каждой стороны. За толщину образца принимали среднеарифметическое значение результатов всех измерений. При проведении измерений образец вставлялся в измерительную ячейку прибора ИТС–1 между холодильником и нагревателем и прижимался с требуемым усилием фиксирующим винтом. Прибор делает три основных замера, после чего фиксируется результат. Основные полученные результаты теплотехнических характеристик ПСБ образцов сведены в таблицу 2. По этим результатам были получены зависимости коэффициента теплопроводности полистиролбетона от его плотности и прочности (рис. 6, рис 7).

Таблица 2. Теплотехнические характеристики ПСБ образцов по результатам испытаний

Состав бетона	Серия образцов	Среднее значение удельного веса, кг/м^3	Коэффициент теплопроводности, $\text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$	Среднее значение коэффициента теплопроводности, $\text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$
Б1	ПБ1–2,5–1	309	0.0993	0.100
	ПБ1–2,5–2		0.1013	
	ПБ1–2,5–3		0.099	
	ПБ1–2,5–4		0.0984	
	ПБ1–2,5–5		0.1032	
Б2	ПБ2–2,5–1	605	0.1584	0.1563
	ПБ2–2,5–2		0.1587	
	ПБ2–2,5–3		0.1594	
	ПБ2–2,5–4		0.1594	
	ПБ2–2,5–5		0.1458	
Б3	ПБ3–2,5–1	808	0.1994	0.1980
	ПБ3–2,5–2		0.1898	
	ПБ3–2,5–3		0.1946	
	ПБ3–2,5–4		0.1955	
	ПБ3–2,5–5		0.2109	
Б4	ПБ4–2,5–1	875	0.2897	0.2701
	ПБ4–2,5–2		0.2797	
	ПБ4–2,5–3		0.2035	
	ПБ4–2,5–4		0.2952	
	ПБ4–2,5–5		0.2824	
Б5	ПБ5–2,5–1	1107	0.2704	0.3324
	ПБ5–2,5–2		0.3707	
	ПБ5–2,5–3		0.3433	
	ПБ5–2,5–4		0.3206	
	ПБ5–2,5–5		0.357	
Б6	ПБ6–2,5–1	1292	0.3659	0.3764
	ПБ6–2,5–2		0.3848	
	ПБ6–2,5–3		0.3735	
	ПБ6–2,5–4		0.3754	
	ПБ6–2,5–5		0.3824	

Анализируя полученные значения, можно сделать выводы о том, что при увеличении плотности полистиролбетона в 4.1 раза коэффициент теплопроводности повышается в 3.7 раза, что составляет практически линейную зависимость.

График на рисунке 6 показал билинейную зависимость коэффициента теплопроводности от кубиковой прочности ПСБ. Можно выделить два участка. Первый – от 0,25 МПа до 3,6 МПа. В этих границах коэффициент теплопроводности ПСБ изменяется наиболее значительно – от 0,1 до 0,333 Вт/(м·К). При дальнейшем увеличении прочности ПСБ коэффициент теплопроводности увеличивается в пределах 10...20 %.

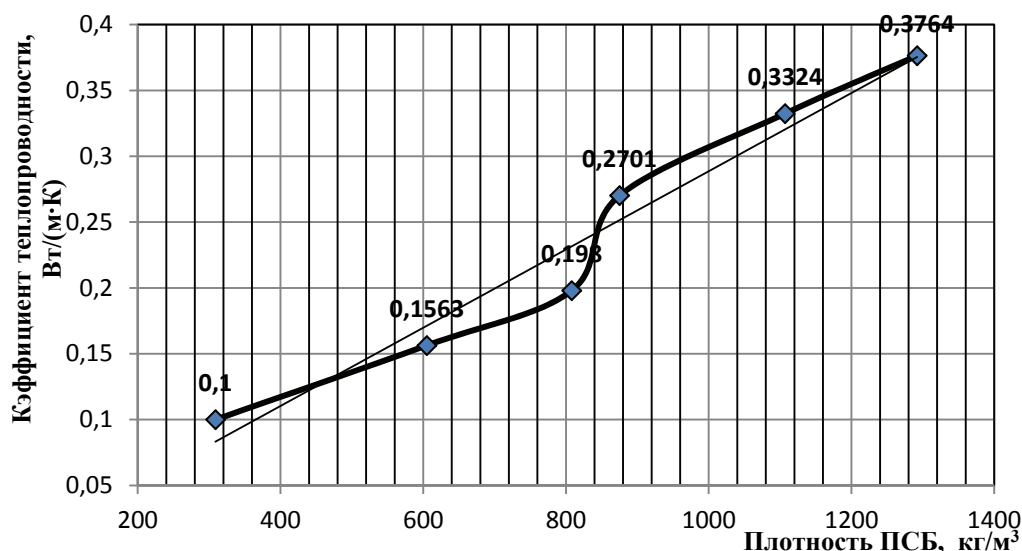


Рисунок 6. Зависимость коэффициента теплопроводности от плотности бетона

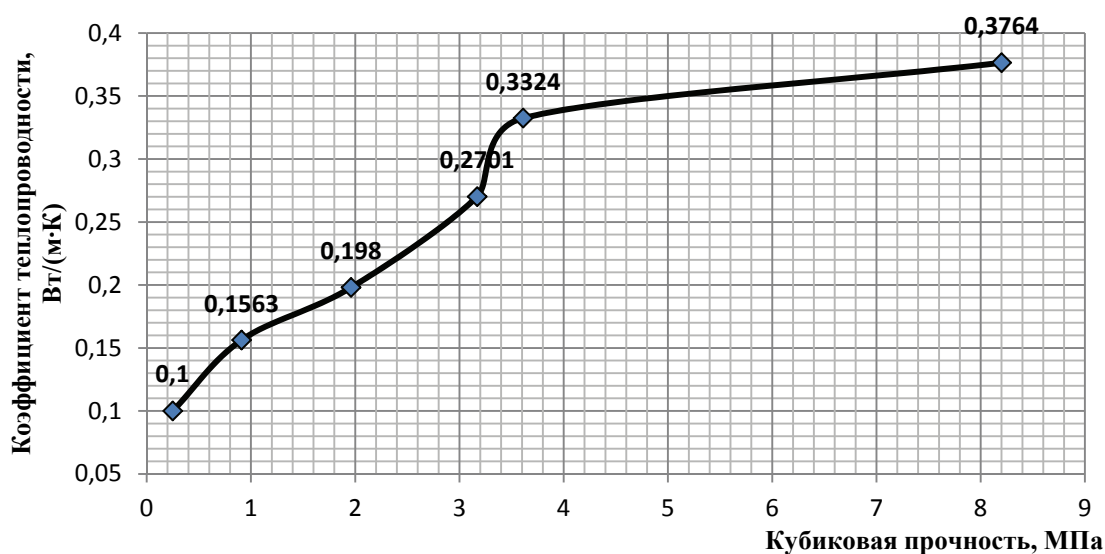


Рисунок 7. Зависимость коэффициента теплопроводности от прочности бетона

Теплопроводность стеновых панелей

Для лабораторных теплотехнических испытаний стеновых конструкций были изготовлены два образца толщиной 150 мм. Они сконструированы с использованием U-образных стальных профилей, соединенных между собой с помощью саморезов, в результате чего обеспечивается целостность конструкции. Каркасы данных стеновых панелей заполняются полистиролбетоном, который выполняет функцию утеплителя. В середине одной из конструкций устанавливается вертикальная стойка – это стальной тонкостенный профиль С-образного сечения, который является теплопроводным включением данной ограждающей конструкции (рис. 8). Вторая конструкция была изготовлена термически однородной (эталонной), для того чтобы оценить влияние «мостика холода» (рис. 9). Внутренняя облицовка представляет собой гипсокартонный лист толщиной 12,5 мм. Для уменьшения влияния температурного включения предложено использовать стеновой профилированный настил как внешнюю облицовку. При этом необходимо конструировать стену таким образом, чтобы волна профнастила была расположена напротив теплопроводного включения. Промежуток, который образуется между профилем и настилом, Лещенко М.В., Семко В.А. Теплотехнические свойства стеновых ограждающих конструкций из стальных тонкостенных профилей и полистиролбетона

заполняется полистиролбетоном и служит в роли термопрокладки. Такой метод повышения энергоэффективности стеновых конструкций из ЛСТК и полистиролбетона не требует дополнительных затрат и является исключительно конструктивным.

Экспериментальные образцы, представленные на рисунках 8 и 9, испытывались в климатической камере согласно ДСТУ Б В.2.6–101: 2010 [37] методом тепловых испытаний в лабораторных условиях. После того как установка выходила в стационарный режим, проводились замеры. По обе стороны образца создавался температурный перепад: в климатической камере температура составляла $-22\text{ }^{\circ}\text{C}$, а в помещении $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Контактными средствами измерялась температура воздуха, поверхностей конструкций, температура в различных сечениях и теплопроводных включениях, а также определялась поверхностная плотность теплового потока через ограждающую конструкцию.

При расчете приведенного сопротивления теплопередаче стеновой ограждающей конструкции с теплопроводными включениями учитывается линейный коэффициент теплопередачи [38], который для данной конструкции определяется экспериментальным путем: чем меньше значение коэффициента, тем выше значение приведенного сопротивления теплопередаче. Уменьшение влияния теплопроводного включения путем его теплоизоляции приводит к снижению линейного коэффициента теплопередачи и, как результат, к более высокому значению приведенного сопротивления теплопередаче термически неоднородной непрозрачной ограждающей конструкции.

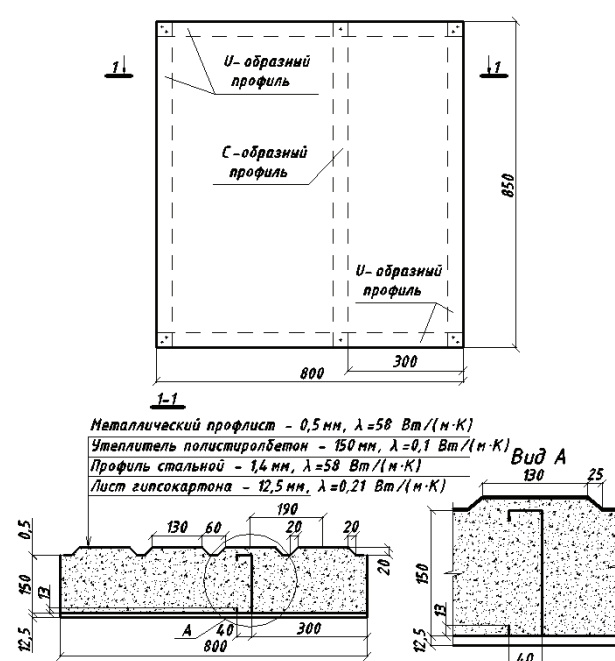


Рисунок 8. Конструктивная схема стеновой панели с теплопроводным включением

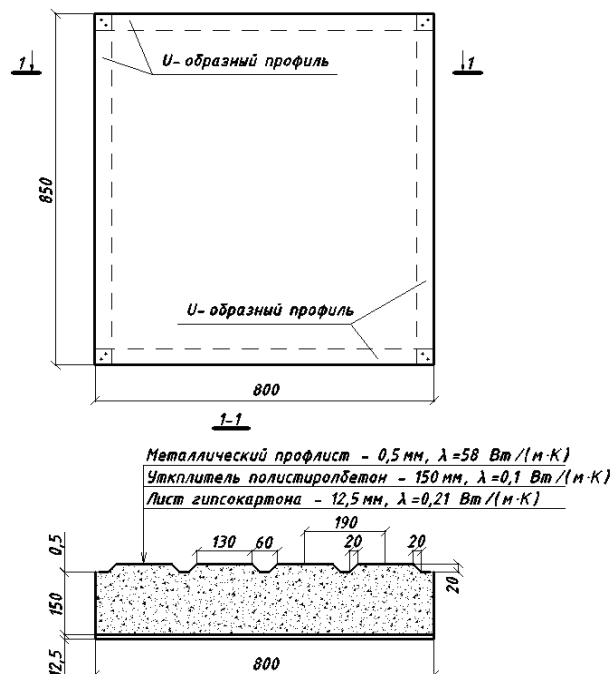


Рисунок 9. Конструктивная схема термически однородной стеновой панели

Также был проведен численный эксперимент в программном комплексе Femar, где были смоделированы данные конструкции стеновых панелей (рис. 10, рис. 11). Рассматривалась плоская задача при стационарном режиме теплопередачи. Условия эксплуатации задавались равными тем, что применялись при лабораторных исследованиях.

Результаты моделирования показали, что наличие теплопроводного включения в ограждающей конструкции снижает сопротивление теплопередаче до 50 %, а при теплоизоляции стального профиля полистиролбетоном – на 40 %.

Была численно исследована рассмотренная ранее стеновая панель (рис. 10), где варьировалась высота волны профилированного настила 20 мм, 40 мм и 50 мм. Результаты проведенных экспериментов показали, что изменением конструктивных параметров можно значительно влиять на сопротивление теплопередаче ограждающих конструкций. При увеличении высоты волны профилированного настила влияние теплопроводного включения уменьшается прямо пропорционально: при 20 мм на 40 %, при 40 мм – на 20 % и при 50 мм – на 10%.

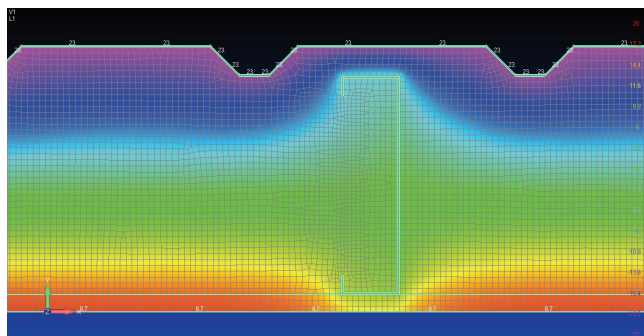


Рисунок 10. Температурное поле для образца с теплопроводным включением

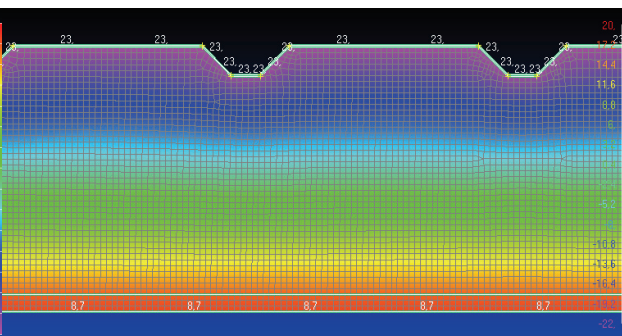


Рисунок 11. Температурное поле для эталонного образца

Внедрением данного конструктивного решения стало получение патента на полезную модель [33].

Заключение

В результате проведенных исследований были определены прочность и коэффициент теплопроводности для полистиролбетонов плотностью 300...1300 кг/м³. Увеличение плотности полистиролбетона в 4.1 раза приводит к повышению коэффициента теплопроводности в 3.7 раза, в то же время при увеличении плотности полистиролбетона наблюдается и увеличение прочности. Так прочность при плотности 300 кг/м³ составляет 0.25 МПа, а при плотности 1300 кг/м³ уже 8.2 МПа, что в 30 раз больше, чем при плотности 300 кг/м³.

Полученные результаты дают возможность говорить о целесообразности применения полистиролбетонов в качестве заполнителя для комплексных несущих и ограждающих конструкций из стальных холодноформованных профилей.

Предложена стеновая панель, состоящая из холодноформованных профилей, профилированного настила и полистиролбетона. Для данной конструкции реализован авторский способ снижения влияния теплопроводного включения в виде несущего профиля. Экспериментально и теоретически доказана эффективность предложенного способа.

Литература

1. AISI-S100. North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members. American Iron and Steel Institute. Washington, 2001. 149 p.
2. EN 1993-1-3:2006. Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1-3: General rules. Supplementary rules for cold-formed members and sheeting. Brussels: CEN, 2006. 134 p.
3. ГОСТ Р 51263-2012. Полистиролбетон. Технические условия. М.: Госстрой России, 2012. 27 с.
4. Авраменко Ю.О. Місцева стійкість сталевих елементів сталезалізобетонних конструкцій. Автореф. дис. канд. техн. наук. Полтава: ПолтНТУ, 2012. 22 с.
5. Семко О.В., Лазарев Д.М., Авраменко Ю.О. Легкий бетон для заполнения порожнин стальных тонкостенных конструкций // 36. наук. Праць. Київ: ДП НДІБК, 2011. №74. С. 659–666.
6. Semko V., Voskobiinyk O., Prokhorenko D., Skyba A., Shumeiko K. Complex experimental investigation into light steel and steel-concrete composite structures made of Z-shaped sections under compound stress // Metal constructions. 2014. № 20(1). Pp. 65–76.
7. Savitskiy N.V., Sopilnyak A.M. Strength and Crack Resistance of Three-Layer Concrete Beams // Строительство, материаловедение, машиностроение. Сб. научн. трудов. Днепропетровск: ПГАСА, 2013. №68. С. 363–367.
8. Большаков В.И., Сопильняк А.М., Юрченко Е.Л., Панченко Н.В. Сопротивление теплопередаче трехслойных железобетонных панелей //

References

1. AISI-S100. North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members. American Iron and Steel Institute. Washington. 2001. 149 p.
2. EN 1993-1-3:2006. Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1-3: General rules. Supplementary rules for cold-formed members and sheeting. Brussels. CEN. 2006. 134 p.
3. GOST R 51263-99. Polistirolobeton. Tehnicheskie uslovia. [State standard specification. Concrete with polystyrene aggregates]. Moscow. Gosstroy of Russia Publ. 2012. 27 p. (rus)
4. Avramenko Yu.O. Mistseva stiykist stalevyh elementiv stalezalizobetonnyh konstruktsii. Avtoreferat Diss. [Local Stability of Steel Elements of Composite Steel and Concrete Structures]. Poltava. 2012. 22 p. (ukr)
5. Semko O.V., Lazarev D.M., Avramenko Yu.O. Lehky beton dlia zapovnennia porozhnyn stalevyh tonkostinnyh konstruktsiy [Lightweight Concrete to Fill the Cavities of Steel Thin-Walled Structures]. Academic journal. Industrial Machine Building, Civil Engineering. No. 74. Dnipropetrovsk. PSAES. 2011. Pp. 659–666. (ukr)
6. Semko V., Voskobiinyk O., Prokhorenko D., Skyba A., Shumeiko K. Complex experimental investigation into light steel and steel-concrete composite structures made of Z-shaped sections under compound stress. Metal constructions. 2014. No. 20(1). Pp. 65–76.
7. Savitskiy N.V., Sopilnyak A.M. Strength and Crack Resistance of Three-Layer Concrete Beams. Stroitel'stvo, materialovedenie, mashinostroenie. Sb. nauchn. trudov.

Лещенко М.В., Семко В.А. Теплотехнические свойства стеновых ограждающих конструкций из стальных тонкостенных профилей и полистиролбетона

- Строительство, материаловедение, машиностроение. Сб. научн. трудов. Днепрпетровск: ПГАСА, 2015. №82. С. 50–54.
9. Беляков В.А., Носков А.С. Перспективы развития исследований конструкционных и теплотехнических свойств полистиролбетона // Материалы докладов Всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации». Новосибирск, 2003. Ч. 2. С. 74–75.
 10. Vogdt F., Schlaich M., Hillemeir B. Conceptual and structural design of building made of lightweight and infra-lightweight concrete. Berlin, 2010. 105 p.
 11. Lecompte T., Le Bideau P., Glouannec P., Nordershauser D., Le Masson S. Mechanical and thermo-physical behaviour of concretes and mortars containing phase change material // *Energy and buildings*, 2015. №94. Pp. 52–60.
 12. Kočí J., Maděra J., Jerman M., Černý R. Computational assessment of thermal performance of contemporary ceramic blocks with complex internal geometry in building envelopes // *Energy and buildings*, 2015. №99. Pp. 61–66.
 13. Hongzhi Cui, Shazim Ali Memon, Ran Liu Development, mechanical properties and numerical simulation of macro encapsulated thermal energy storage concrete // *Energy and buildings*, 2015. №96. Pp. 162–174.
 14. Горшков А.С., Рымкевич П.П., Ватин Н.И. Моделирование процессов нестационарного переноса тепла в стеновых конструкциях из газобетонных блоков // *Инженерно-строительный журнал*. 2014. №8(52). С. 38–48.
 15. Gorshkov A., Vatin N., Nemova D., Tarasova D. The brickwork joints effect on the thermotechnical uniformity of the Exterior Walls From Gas-concrete Blocks // *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Vols. 725–726. Pp. 3–8.
 16. Кривошеин А.Д., Федоров С.В. К вопросу о расчете приведенного сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций // *Инженерно-строительный журнал*. 2010. №8(18). С. 21–27.
 17. Ватин Н.И., Немова Д.В., Рымкевич П.П., Горшков А.С. Влияние уровня тепловой защиты ограждающих конструкций на величину потерь тепловой энергии в здании // *Инженерно-строительный журнал*. 2012. №8(34). С. 4–14.
 18. Gorshkov A., Ivanova E. Reduced thermal resistance of two-layer walls construction // *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Vols. 725–726. Pp. 49–56.
 19. Савицкий Н.В., Никифорова Т.Д., Несин А.А., Сопильняк А.М., Береза И.В. Рациональное проектирование ограждающих панелей для жилых зданий с применением каркаса из гнутых оцинкованных профилей // *Строительство, материаловедение, машиностроение. Сб. научн. трудов. Днепрпетровск: ПГАСА*, 2013. №69. С. 418–422.
 20. Шалагин И.Ю. Аспекты теплотехнического расчета легких ограждающих конструкций [Электронный ресурс]. *Инженерный вестник Дона*. 2015. №2. Ч. 2. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n2p2y20элект15/2994 (дата обращения 10.11.2015).
 21. Ватин Н.И., Попова Е.Н. Термопрофиль в легких стальных строительных конструкциях. [Электронный ресурс]. СПб.: СПбГПУ, 2006. 63 с. URL: <http://elib.spbstu.ru/dl/1307.pdf/view> (дата обращения 10.11.2015).
 22. Журина Н., Кузьмичев Р. Энергоэффективные легкие ограждающие конструкции // *Архитектура и строительство*. 2008. №2. С. 93–97.
 23. Петросова Д.В., Кузьменко Н.М., Петросов Д.В. Экспериментальное исследование теплового режима легкой ограждающей конструкции в натуральных условиях // *Инженерно-строительный журнал*, 2013. №8(43). С. 31–37.
 - No. 68. Dnipropetrovsk: PSAES, 2013. Pp. 363–367.
 8. Bolshakov V.Y., Sopilniak A.M., Yurchenko E.L., Panchenko N.V. Soprotivleniye teploperedache trekhslonnykh zhelezobetonnykh paneley [Thermal Resistance of Three-Layer Concrete Panels]. *Stroitel'stvo, materialovedenie, mashinostroenie. Sb. nauchn. trudov*. No. 82. Dnipropetrovsk: PSAES, 2015. Pp. 50–54. (rus)
 9. Belyakov V.A., Noskov A.S. Perspektivy razvitiya issledovaniy konstruktivnykh i teplotekhnicheskikh svoystv polistirolbetona [Prospects for the development of studies of structural and thermal properties of polystyrene]. *Vserossiyskaya nauchnaya konferentsiya molodykh uchenykh «Nauka. Tekhnologii. Innovatsii»: materialy dokladov*. Novosibirsk. 2003. Part 2. Pp. 74–75. (rus)
 10. Vogdt F., Schlaich M., Hillemeir B. *Conceptual and structural design of building made of lightweight and infra-lightweight concrete*. Berlin. 2010. 105 p.
 11. Lecompte T., Le Bideau P., Glouannec P., Nordershauser D., Le Masson S. Mechanical and thermo-physical behaviour of concretes and mortars containing phase change material. *Energy and buildings*. 2015. No. 94. Pp. 52–60.
 12. Kočí J., Maděra J., Jerman M., Černý R. Computational assessment of thermal performance of contemporary ceramic blocks with complex internal geometry in building envelopes. *Energy and buildings*. 2015. No. 99. Pp. 61–66.
 13. Cui H., Ali Memon S., Liu R. Development, mechanical properties and numerical simulation of macro encapsulated thermal energy storage concrete. *Energy and buildings*. 2015. No. 96. Pp. 162–174.
 14. Gorshkov A.S., Rymkevich P.P., Vatin N.I. Modelirovaniye protsessov nestatsionarnogo perenosa tepla v stenovykh konstruktsiyakh iz gazobetonnykh blokov [Modelling of non-stationary processes of heat transfer in the wall structures of concrete blocks]. *Magazine of Civil Engineering*. 2014. No. 8. Pp. 38–48. (rus)
 15. Gorshkov A., Vatin N., Nemova D., Tarasova D. The brickwork joints effect on the thermotechnical uniformity of the Exterior Walls From Gas-concrete Blocks. *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Vols. 725–726. Pp. 3–8.
 16. Krivoshein A.D., Fedorov S.V. K voprosu o raschete privedenogo soprotivleniya teploperedache ograzhdayushchikh konstruktсий [On the question of the calculation of the reduced R-value]. *Magazine of Civil Engineering*. 2010. No. 8. Pp. 21–27. (rus)
 17. Vatin N.I., Nemova D.P., Rymkevich P.P., Gorshkov A.S. Influence of level of thermal protection of protecting designs on the value of the loss of thermal energy in the building [Influence of building envelope thermal protection on heat loss value in the building]. *Magazine of Civil Engineering*. 2012. No. 8. Pp. 4–14. (rus)
 18. Gorshkov A., Ivanova E. Reduced thermal resistance of two-layer walls construction. *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Vols. 725–726. Pp. 49–56.
 19. Savitskiy N.V., Nikiforova T.D., Nesen A.A., Sopilnyak A.M., Bereza I.V. Ratsionalnoye proyektirovaniye ograzhdayushchikh paneley dlya zhilykh zdaniy s primeneniym karkasa iz gnutyykh otsinkovannykh profiley [Rational Design of Enclosing Panels for Residential Buildings with a Frame Made of Bent Galvanized Profiles]. *Stroitel'stvo, materialovedenie, mashinostroenie. Sb. nauchn. trudov*. No. 69. Dnipropetrovsk: PSAES, 2013. Pp. 418–422. (rus)
 20. Shalagin I.Yu. Aspekty teplotekhnicheskogo rascheta legkikh ograzhdayushchikh konstruktсий [Aspects of Heat Engineering Calculation of Light Frame Structures] [online]. *Engineering journal of Don*. No. 2. Part 2. Rostov-on-Don. 2015. Available at: ivdon.ru/magazine/archive/n2p2y20элект15/2994. (accessed: November 10, 2015) (rus)
 21. Vatin N.I., Popova Ye.N. *Termoprofil v legkikh stalnykh*

Leshchenko M.V., Semko V. Thermal characteristics of the external walling made of cold-formed steel studs and polystyrene concrete

24. Soares N., Gaspar A.R., Santos P., Costa J.J. Multi-dimensional optimization of the incorporation of PCM-drywalls in lightweight steel-framed residential buildings in different climates // *Energy and buildings*, 2014. №70. Pp. 411–421.
25. Santos P., Martins C., Simo es da Silva L. Thermal performance of lightweight steel framed wall: the importance of flanking thermal losses // *Journal of Building Physics*. 2014. №38(1). Pp. 81–98.
26. Naji S., Çelik O.C., Alengaram U. J., Jumaat M.Z., Shamshirband S. Structure, energy and cost efficiency evaluation of three different lightweight construction systems used in low-rise residential buildings // *Energy and buildings*, 2014. №84. Pp. 727–739.
27. Sprengard C., Holm A.H. Numerical examination of thermal bridging effects at the edges of vacuum-insulation-panels (VIP) in various constructions // *Energy and buildings*. 2014. №86. Pp. 638–643.
28. Протасевич А. М., Крутилин А. Б. Классификация вентилируемых фасадных систем. Влияние теплопроводных включений на их теплозащитные характеристики // *Инженерно-строительный журнал*. 2011. №8(26). С. 57–62.
29. Tenpierik M.J., Van der Spoel W.H., Cauber J.M. Analytical Model for Computing Thermal Bridge Effects in High Performance Building Panels [Электронный ресурс]. URL: http://www.researchgate.net/publication/242269808_Analytical_Model_for_Computing_Thermal_Bridge_Effects_in_High_Performance_Building_Panels (дата обращения 10.11.2015).
30. Garay R., Uriarte A., Apraiz I. Performance assessment of thermal bridge elements into a full scale experimental study of a building façade // *Energy and buildings*, 2014. №85. Pp. 579–591.
31. Горшков А.С., Гладких А.А. Влияние растворных швов кладки на параметры теплотехнической однородности стен из газобетона // *Инженерно-строительный журнал*. 2010. № 3 (13). С. 39–42.
32. Горшков А.С., Рымкевич П.П., Ватин Н.И. О теплотехнической однородности двухслойной стеновой конструкции // *Энергосбережение*. 2014. №7. С. 58–63.
33. Чернявський В.В., Семко В.О., Юрін О.І., Прохоренко Д.А. Вплив перфорації легких сталевих тонкостінних профілів на теплофізичні характеристики огорожувальних конструкцій // *Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво)*. Полтава: ПолтНТУ, 2011. №1(29). С.194–199. URL: http://lib.pntu.edu.ua/?module=elbib*nid*7879
34. Семко В.О., Лещенко М.В., Котью Н.О. Дослідження впливу конструктивних параметрів на теплопровідність легких сталевих огорожувальних конструкцій // *Строительство, материаловедение, машиностроение. Сб. научн. трудов. Днепрпетровск: ПГАСА, 2012. №65. С. 567–571.*
35. Семко В.О., Лещенко М.В., Філіпович Л.М., Резніков А.А. Експериментальні дослідження теплопровідності огорожувальних конструкцій із сталевих тонкостінних профілів // *Ресурсоекономічні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Збірник наукових праць. Рівне, 2013. №25. С. 606–611.*
36. Семко В.О., Лещенко М.В., Криворотко І.С. Дослідження теплових показників огорожувальних конструкцій зі сталевих тонкостінних профілів багатопверхових цивільних будівель // *Ресурсоекономічні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Збірник наукових праць. Рівне, 2014. №29. С. 491–498.*
22. Zhurina N., Kuzmichev R. Energoeffektivnyye legkiye ograzhdayushchiye konstruksii [Energy-Efficient Light Building Envelope]. *Arkhitectura i stroitel'stvo*. No. 2. Minsk, 2008. Pp. 93–97. (rus)
23. Petrosova D.V., Kuzmenko N.M., Petrosov D.V. Eksperimentalnoye issledovaniye teplovogo rezhima legkoy ograzhdayushchey konstruksii v naturnykh usloviyakh [A Field Experimental Investigation of the Thermal Regime of Lightweight Building Envelope Construction]. *Magazine of Civil Engineering*. 2013. No. 8. Pp. 31–37. (rus)
24. N. Soares, A.R. Gaspar, P. Santos, J.J. Costa Multi-dimensional optimization of the incorporation of PCM-drywalls in lightweight steel-framed residential buildings in different climates. *Energy and buildings*. 2014. No. 70. Pp. 411–421.
25. Santos P., Martins C., Simo es da Silva L. Thermal performance of lightweight steel framed wall: the importance of flanking thermal losses. *Journal of Building Physics*. 2014. No. 38 (1). Pp. 81–98.
26. Naji S., Çelik O.C., Alengaram U. J., Jumaat M.Z., Shamshirband S. Structure, energy and cost efficiency evaluation of three different lightweight construction systems used in low-rise residential buildings. *Energy and buildings*. 2014. No. 84. Pp. 727–739.
27. Sprengard C., Holm A.H. Numerical examination of thermal bridging effects at the edges of vacuum-insulation-panels (VIP) in various constructions. *Energy and buildings*. 2014. No. 86. Pp. 638–643.
28. Protasevich A.M., Krutinin A.B. Klassifikatsiya ventiliruyemykh fasadnykh sistem. Vliyanie teploprovodnykh vklyucheni na ikh teplozashchitnyye kharakteristiki [Ventilated façade systems classification. Influence of “Thermal bridges” on their heat-resistant characteristics]. *Magazine of Civil Engineering*. 2011. No. 8. Pp. 57–62. (rus)
29. Tenpierik M.J., Van der Spoel W.H., Cauber J.M. Analytical Model for Computing Thermal Bridge Effects in High Performance Building Panels [Online]. Available at: http://www.researchgate.net/publication/242269808_Analytical_Model_for_Computing_Thermal_Bridge_Effects_in_High_Performance_Building_Panels (accessed: November 10, 2015)
30. Garay R., Uriarte A., Apraiz I. Performance assessment of thermal bridge elements into a full scale experimental study of a building façade. *Energy and buildings*. 2014. No. 85. Pp. 579–591.
31. Gorshkov A.S., Gladkikh A.A. Vliyanie rastvornykh shvov kladki na parametry teplotekhnicheskoy odnorodnosti sten iz gazobetona [Influence of mortar joints in the masonry wall uniformity of heat engineering parameters of aerated concrete]. *Magazine of Civil Engineering*. 2010. No. 3. Pp. 39–42. (rus)
32. Gorshkov A.S., Rymkevich P.P., Vatin N.I. O teplotekhnicheskoy odnorodnosti dvukhsloynoy stenovoy konstruksii [About thermotechnical homogeneity of two-layer wall construction]. *Energoberezeniye*. 2014. No. 7. Pp. 58–63. (rus)
33. Cherniavsky V.V., Semko V.O., Yurin O.I., Prokhorenko D.A. Vplyv perforatsii legkykh stalevykh tonkostinnykh profiliv na teplofizychni harakterystyky ogorodzhuvalnykh konstruksiy [The Influence of Light Gauge Steel Constructions Perforation Type on Its Thermal Characteristics]. *Academic journal. Industrial Machine Building, Civil Engineering*. No. 1(29). Poltava, PNTU, 2011. Pp. 194–199. (ukr)

37. Державний стандарт України ДСТУ Б В.2.6-101:2010 Методи визначення опору теплопередачі огорожувальних конструкцій. К.: Мінбуд. України, 2010. 84 с.
38. ДБН В.2.6-31:2006 Теплова ізоляція будівель. (Зі зміною №1, 2013 р.). К.: Мінбуд. України, 2006. 73 с.
39. Семко В.О., Лещенко М.В. Пат. 102289 Україна, МПК (2015.01) E04B1/76. Енергоефективна стінова огорожувальна конструкція із сталевих холодноформованих елементів. Власник Полтав. нац. техн. ун-т ім. Юрія Кондратюка. № у 2015, 03613; заявл. 17.04.15; опубл. 26.10.15, Бюл. № 20/2015.
40. Бронзова М.К., Ватин Н.И., Гарифуллин М.Р. Конструкция каркасных зданий с применением монолитного пенобетона // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2015. № 1(28). С. 74–90.
34. Semko V.O., Leshchenko M.V., Kotko N.O. Doslidzhennya vplyvu konstruktyvnykh parametriv na teploprovodnist lehkyykh stalevykh ohorodzhuvalnykh konstruktсий [The influence of design parameters on thermal conductivity of lightweight steel enclosing structures]. *Stroitel'stvo, materialovedenie, mashinostroenie. Sb. nauchn. trudov.* No. 65. Dnipropetrovsk: PSAES, 2012. Pp. 567–571. (ukr)
35. Semko V.O., Leshchenko M.V., Filipovych L.M., Reznikov A.A. Eksperymental'ni doslidzhennya teploprovodnosti ohorodzhuvalnykh konstruktсий iz stalevykh tonkostinnykh profiliv [Experimental investigation of thermal conductivity of enclosure from thin-walled sections]. *Resursoekonomni materialy, konstruktсий, budivli ta sporudi. Zbirnik naukovikh prats'.* No. 25. Rivne, 2013. Pp. 606–611. (ukr)
36. Semko V.O., Leshchenko M.V., Kryvorotko I.S. Doslidzhennya teplovykh pokaznykiv ohorodzhuvalnykh konstruktсий zi stalevykh tonkostinnykh profiliv bahatopoverkhovykh tsyvilnykh budivel [Investigation of thermal performance of enclosure to steel thin-walled profiles rize civil buildings]. *Resursoekonomni materialy, konstruktсий, budivli ta sporudi. Zbirnik naukovikh prats'.* No. 29. Rivne, 2014. Pp. 491–498. (ukr)
37. DSTU B V.2.6–101:2010 Metody vyznachennia oporu teploperedachi ohorodzhuvalnykh konstruktсий [State standard specification. Methods for determining the resistance to heat transfer of building envelopes]. Kiev. Ministry of Construction of Ukraine Publ. 2010. 84 p. (ukr)
38. DBN V. 2.6–31:2006 Teplova izoliatsia budivel: Zmina 1 [Thermal insulation of buildings: State Building Codes]. Kyev, Ministry of Construction of Ukraine Publ. 2006. 73 p. (ukr)
39. Semko V.O., Leshchenko M.V. Enerhoefektyvna stinova ohorodzhuvalna konstruktсийa iz stalevykh kholodnodeformovanykh elementiv [Energy efficient wall enclosing design of cold-steel items]. Patent UA, no. u 2015 03613, 2015. (ukr)
40. Bronzova M.K., Vatin N.I., Garifullin M.R. Konstruktсийa karkasnykh zdaniy s primeneniym monolitnogo penobetonu [Frame buildings construction using monolithic foamed concrete]. *Construction of unique buildings and structures.* 2015. No. 1(28). Pp. 74–90. (rus)

Марина Валентиновна Лещенко,
+3(8066)9321782; эл. почта:
leshchen_m@mail.ru

Владимир Александрович Семко,
+3(8050)3043051; эл. почта: syom@mail.ru

Maryna Leshchenko,
+3(8066)9321782; leshchen_m@mail.ru

Volodymyr Semko,
+3(8050)3043051; syom@mail.ru

© Лещенко М.В., Семко В.А., 2015