ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

УДК 692.23:693.54

DOI: 10.22227/1997-0935.2019.3.367-375

Особенности расчета стеновых панелей с монолитной связью слоев на стадиях монтажа, транспортирования и эксплуатации

Е.А. Король, М.Н. Берлинова

*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет
(НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26*

АННОТАЦИЯ

Введение. При возведении жилых или общественных зданий различных пространственных конструктивных систем (монолитных, сборно-монолитных, сборных и т.п.) принято проектировать самонесущие наружные стены в пределах этажа. Разработка и применение в современном строительстве новых конструктивно-технологических решений многослойных стеновых панелей индустриального изготовления актуализирует вопрос совершенствования методов их расчета на различных стадиях работы и при различных видах и сочетаниях нагрузок и воздействий. Однако на практике возможно бесконечное разнообразие уровней нагружения и, значит, потребовалось бы такое же многообразие упомянутых подходов к проектированию. Очевидно, что для инженерных расчетов это неприемлемо, в связи с этим возникает необходимость обеспечения монолитной матричной связи слоев как технологически, так и конструктивно, что может обеспечить обобщенный подход к расчету многослойных ограждающих конструкций в соответствии с действующими нормами проектирования.

Материалы и методы. Приводится описание конструктивных особенностей многослойной стеновой панели из конструкционного бетона со средним слоем из бетона низкой теплопроводности и монолитной связью слоев, влияющих на построение расчетной модели и методики расчета на стадиях транспортирования, монтажа и эксплуатации.

Результаты. Проанализированы расчетные параметры таких конструкций, обеспечивающие их конкурентные преимущества по прочностным и эксплуатационным показателям по сравнению с традиционными ограждающими конструкциями массового применения.

Выводы. Как показали исследования, при сочетаниях нагрузок силового и не силового характера, напряжения в рассматриваемой конструкции на всех стадиях работы не превышают допустимых значений, что подтверждает перспективы использования многослойных панелей с монолитной связью слоев при возведении каркасно-панельных зданий различного назначения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: многослойные конструкции, прочность железобетона, полистиролбетон, конструкционный бетон, стеновые панели, ограждающие конструкции, каркасно-панельные здания

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Король Е.А., Берлинова М.Н. Особенности расчета стеновых панелей с монолитной связью слоев на стадиях монтажа, транспортирования и эксплуатации // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. Вып. 3. С. 367–375. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.3.367-375

Calculation features of wall panels with monolithic cement bond of layers in the stages of installation, transportation and maintenance

Elena A. Korol', Marina N. Berlinova

*Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU),
26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation*

ABSTRACT

Introduction. When building residential, public and administrative buildings of various spatial structural designs (monolithic, precast-monolithic, precast, etc.), it is common practice to design self-sustaining (non-structural) outer walls within a storey. Developing and using new design and fabrication solutions of multilayer industrial-made wall panels in modern construction practice makes actual the issue of improving methods of their calculation in different stages of maintenance and under various sorts and combinations of loads and effects. However, there is an infinite variety of possible loading levels in practice and, therefore, the same variety of design approaches would be required. This is obviously unacceptable for engineering calculations, hence it is necessary to provide a monolithic matrix bond of layers, both technologically and structurally, which can provide a generalized approach to the calculation of multilayer enclosing structures in accordance with current design standards.

Materials and methods. The article describes structural features of a multilayer wall panel made of structural concrete with the middle layer of concrete with low thermal conductivity and monolithic bond of layers. These features have an influence on creation of a design model and a calculation procedure in the stages of transportation, installation and maintenance.

Results. The article has examined the structures described above in the sense of design parameters that provide their competitive advantages in strength and maintenance as compared with conventional mass-built enclosures.

Conclusions. The studies demonstrate that when combining loads of force and non-force character, stresses in the considered structure do not exceed allowable values in all the stages what proves the prospects of using the multilayer panels with monolithic bond of layers for erection of various-purpose frame-panel buildings.

KEYWORDS: multilayer structures, strength of reinforced concrete, polystyrene concrete, structural concrete, wall panels, enclosures, frame-panel building

FOR CITATION: Korol' E.A., Berlinova M.N. Calculation features of wall panels with monolithic cement bond of layers in the stages of installation, transportation and maintenance. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2019; 14:3:367-375. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.3.367-375

ВВЕДЕНИЕ

Современная нормативно-правовая и нормативно-техническая база России в строительстве предписывает обеспечивать безопасные условия временного или постоянного пребывания людей в зданиях или сооружениях. Вместе с тем проводится активная научно-техническая политика по проектированию и внедрению в практику капитального строительства и реконструкции зданий и сооружений инновационных технических решений, технологий, материалов и конструкций, не имеющих проверенных опытом и временем безопасных показателей работы на всех этапах жизненного цикла.

Главным принципом проектирования и строительства является отсутствие вредного воздействия на человека в процессе эксплуатации. Этот процесс сопровождается гармонизацией с рациональным расходом энергетических ресурсов, что предусматривает и разработку более долговечных и надежных строительных конструкций с увеличенным сроком службы для снижения затрат на воспроизводство их в течении жизненного цикла.

Теория прочности и долговечности железобетонных конструкций сегодня — наиболее изученное направление в науке. Особое внимание заслуживают многослойные конструкции со средним слоем из теплоизоляционного бетона низкой теплопроводности — полистиролбетона [1]. В российских и зарубежных исследованиях этого бетона известно два основных направления — это изучение технических характеристик [2] (теплопроводность [3], оптимальная структура [4], технология изготовления [5]) и развитие расчетных методов прочности [6] и долговечности [7] при различных эксплуатационных нагрузках [8]. Существуют различные методы расчета ограждающих конструкций с применением теплоизоляционного бетона [9], они выполняются в соответствии с практическими рекомендациями по расчету и проектированию таких

конструкций¹, а также с учетом физико-механических свойств используемых бетонов [10] и климатических воздействий [11]. Известные расчетные модели (в том числе расчетные схемы и основные предпосылки расчета) строительных конструкций достаточно точно отражают действительные условия работы здания или сооружения, отвечающие рассматриваемой расчетной ситуации [12]. При этом, как правило, должны быть учтены факторы, определяющие напряженно-деформированное состояние [13], особенности взаимодействия элементов строительных конструкций, пространственная работа строительных конструкций [14], геометрическая и физическая нелинейность [15], пластические и реологические свойства используемых материалов [16], возможность образования трещин, вероятность отклонения геометрических параметров от их номинальных значений [17].

Влиянию нелинейных свойств бетонов на деформативные характеристики многослойных ограждающих конструкций посвящена работа [18]. Также систематизация имеющихся исследований, как опытных и теоретических, представлена в труде [19]. Известно, что наиболее значимые теоретические и практические исследования применимы на практике при высокой сходимости результатов. Так, например, в работе [20] представлены результаты многочисленных проектных экспериментов, проведенных для стеновых панелей с использованием в качестве утеплителя легких бетонов низкой теплопроводности, которые подтверждают, что предложенные в данной статье принципы их конструирования предотвращают образование трещин от сочетания действующих на них нагрузок как на стадиях транспортирования и монтажа, так и эксплуатации.

¹ Рекомендации по расчету и проектированию ограждающих конструкций с применением монолитного теплоизоляционного полистиролбетона с высокопоризованной и пластифицированной матрицей. М. : Москомархитектура, 2006.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Основным направлением технической политики при возведении общественных зданий, наряду с задачами уменьшения энергоемкости и трудоемкости, является снижение их стоимости при обеспечении долговечности и надежности зданий, повышение технологичности как отдельных элементов, так и сооружений в целом.

Наибольшее распространение в гражданском строительстве получили каркасные и бескаркасные полносборные многоэтажные схемы строительства. Известно, что наиболее выгодно применение каркасной конструктивной схемы строительства крупнопанельных общественных зданий, при этом железобетон является основным материалом.

В данной научной статье рассмотрены стеновые панели, представляющие собой монолитную многослойную плоскую железобетонную конструкцию, со средним слоем из полистиролбетона с низкой теплопроводностью. Технология изготовления таких конструкций практически не отличается от однослойных панелей, что в отличие от современных панелей с эффективными утеплителями, приводит к уменьшению использования арматуры, и, несомненно удешевит конструкцию. Это обосновано единым технологическим циклом, когда последовательная укладка слоев обеспечивает монолитность сечения трехслойных конструкций, за счет надежного сцепления слоев нет необходимости установки связей между ними.

Поперечное сечение многослойных конструкций выполняется, как правило, из материалов различной прочности, и при условии обеспечения совместной работы между его составными частями, элемент может считаться монолитным и рассчитываться по действующим нормам.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Построена методика расчета на основе проектного эксперимента. В качестве объекта-представителя выбрано здание с несущим каркасом, самонесущими наружными стенами и высотой этажа 3,3 м. На уровне перекрытий устанавливаются панели-перемычки высотой 1,5 м и длиной 6,0 м, опирающиеся на простенки шириной 1,2 м, расположенные напротив колонн и в середине пролета. Ширина оконных проемов составляет 1,8 м.

Наружные слои толщиной 10 и 5 см (соответственно с наружной и внутренней стороны помещения) представленных стеновых панелей запроектированы из керамзитобетона класса В12,5, средний теплоизоляционный — из полистиролбетона класса В0,75, толщиной 30 см. Общая толщина панели — 45 см.

Для определения климатических параметров и теплотехнического расчета панелей

выбраны: район строительства — г. Москва и назначение зданий — лечебно-профилактические и детские учреждения, школы и интернаты ($t = 20^\circ\text{C}$, $R_0 = 3,16 \text{ м}^2\text{C/Вт}$).

Определение собственного веса панели определяется суммированием веса наружных, внутренних слоев и арматуры по формуле:

$$q_n = q_{ext} + q_{int} + q_s, \quad (1)$$

где q_{ext} — суммарный вес наружных слоев; q_{int} — вес внутреннего слоя; q_s — вес арматуры.

Поскольку панель сконструирована из бетонов различной прочности, вес каждого ее слоя вычисляется с учетом соответствующей плотности бетона:

$$q_{ext} = \rho_{ext} (\delta_{ext1} + \delta_{ext2}) \gamma_f = 1450 \cdot 0,15 \cdot 1,2 = 261\,000 \text{ Н/м}^2; \quad (2)$$

$$q_{int} = \rho_{int} \delta_{int} \gamma_f = 400 \cdot 0,30 \cdot 1,2 = 144\,000 \text{ Н/м}^2, \quad (3)$$

где ρ_{ext} , ρ_{int} — соответственно плотность бетона наружных и внутреннего слоев; δ_{ext1} и δ_{ext2} — толщины наружных слоев; δ_{int} — толщина внутреннего слоя; γ_f — коэффициент надежности по нагрузке для конструкций из бетонов со средней плотностью 1600 кг/м^3 и менее, выполняемых в заводских условиях (определяем по табл. 7.1 (СП 20.13330.2011 «Нагрузки и воздействия», $\gamma_f = 1,2$).

Вес арматуры и закладных деталей предварительно назначаем $q_s = 7000 \text{ Н/м}^2$.

Вес панели определяем с учетом веса бетона и арматуры по формуле (1):

$$q_n = 261\,000 + 144\,000 + 7000 = 412\,000 \text{ Н/м}^2.$$

Определение веса конструкции в стадии изготовления и транспортирования определяется в соответствии с требованиями СП 63.13330.2012 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения» с учетом коэффициента динамичности по формуле:

$$Q = c \cdot q_n \cdot S = 1,6 \cdot 412\,000 \cdot 4,53 = 2\,986\,176 \text{ Н}, \quad (4)$$

где $c = 1,60$ — коэффициент динамичности; S — площадь стеновой панели, м^2 .

Поскольку на одну монтажную петлю приходится половина массы панели, т.е. $2\,986\,176/2 = 1\,493\,088 \text{ Н} = 1493 \text{ кг}$, диаметр петли может быть выбран 18 мм из стали класса А240. При этом требуемая длина запуска петли в бетон составляет 30 диаметров, что соответствует 48 см.

Расчет многослойной стеновой панели при подъеме и монтаже рассчитываем на собственный вес с коэффициентом динамичности лобового сопротивления. Изгибающий момент в сечении с петлей составит:

$$M = c_x \frac{q \cdot a^2}{2} = 361\,014 \text{ Н/м}^2 \approx 0,36 \text{ МПа}, \quad (5)$$

где $c_x = 1,4$ — коэффициент динамичности лобового сопротивления, определяемый по табл. Д.1 (СП 20.13330.2011); $a = 98$ см — расстояние от торцов панели до монтажных петель.

Расчет по образованию трещин, нормальных к продольной оси, допускается производить с учетом только наружных слоев из керамзитобетона класса В12,5. Предельный изгибающий момент, воспринимаемый сечением определяется по формуле:

$$M_{ult} = R_{bt,n} \cdot W = 5\,476\,000 \text{ Н/м}^2 \approx 5,5 \text{ МПа}, \quad (6)$$

что в 15,3 раз больше, чем момент от собственного веса, вычисленный по формуле (6).

Здесь $W = \frac{bh^2}{6} = \frac{0,15 \cdot 1,48^2}{6} = 0,055 \text{ м}^3$ — момент сопротивления сечения элемента для крайнего растянутого волокна для элементов прямоугольного сечения. Величина изгибающего момента в середине пролета панели составит:

$$M = c_x \left[\frac{ql^2}{8} - R \left(\frac{l}{2} - a \right) \right] = c_x \left[\frac{ql^2}{8} - \frac{ql}{2} \left(\frac{l}{2} - a \right) \right] = 1\,157\,659 \text{ Н/м}^2 \approx 1,2 \text{ МПа}, \quad (7)$$

что в 4,5 раза меньше момента при образовании трещин, вычисленного по формуле (6).

Если при транспортировании опирание панели будет производиться в сечениях с петлями, то величина изгибающих моментов увеличится на 13,3 % и при этом трещины образовываться не будут.

Расчет на монтажный случай при возведении здания многослойные стеновые панели рассчитываются на одновременное действие собственного веса и ветровую нагрузку (в соответствии с СП 20.13330.2011).

Определяется собственный вес 1-го погонного метра панели:

$$q = \frac{Q}{6} = \frac{2986}{6} = 497,7 \text{ кг} = 4977 \text{ Н}. \quad (8)$$

Затем последовательно вычисляются изгибающий момент от собственного веса и момент сопротивления:

$$M_b = \frac{ql^2}{8} = \frac{4977 \cdot 5,98^2}{8} = 3720,3 \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (9)$$

$$W_b = \frac{bh^2}{6} = \frac{0,15 \cdot 1,48^2}{6} = 0,055 \text{ м}^3 \quad (10)$$

и напряжения в поперечном сечении, которые сравниваются с предельным сопротивлением растяжению наружного слоя панели:

$$\sigma_b = M_b / W_b = 3720,3 / 0,055 = 676\,410 \text{ Н} \approx 0,68 \text{ МПа} < R_{bt} = 1 \text{ МПа}. \quad (11)$$

Ветровая нагрузка определяется по формуле:

$$q_w = c_x \cdot \gamma_f \cdot 0,8 \cdot \gamma_n \cdot \gamma_l \cdot w_0 \cdot b = 1,4 \cdot 1,2 \cdot 0,8 \cdot 0,95 \cdot 0,95 \cdot 0,23 \cdot 1,5 \approx 400\,000 \text{ Н/м}, \quad (12)$$

где c_x — аэродинамический коэффициент, равный 1,4; γ_f — коэффициент надежности по нагрузке, равный 1,2; 0,8 — коэффициент для всех кратковременных нагрузок; γ_n — коэффициент надежности по назначению, равный 0,95; γ_l — коэффициент понижения γ_n для сборных конструкций, равный 0,95; w_0 — нормативный скоростной напор ветра, для Москвы — 0,23 кПа; b — ширина панели, равная 1,5 м.

Момент от ветровой нагрузки при длине панели 5,98 м составит:

$$M_w = \frac{q_w \cdot l^2}{8} = 1\,682\,000 \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (13)$$

а напряжения

$$\sigma_w = M_w / W_w = 1\,682\,000 / 0,055 = 0,30 \text{ МПа}. \quad (14)$$

Соответственно в наиболее растянутом углу панели напряжения определяются суммированием полученных ранее значений по формулам (11) и (14):

$$\sigma = \sigma_b + \sigma_w = 0,68 + 0,30 = 0,98 \text{ МПа} < R_{bt,n} = 1 \text{ МПа}.$$

Таким образом, трещины, нормальные к продольной оси элемента, при монтаже стеновых панелей не образуются. Приведенный выше анализ показывает, что наклонные к продольной оси трещины в среднем слое панели также образовываться не будут.

Испытание строповочных петель на выдергивание проводилось для исследования надежности анкеровки петель, устанавливаемых в наружных слоях трехслойных панелей (рис. 1, 2). При исследовании фрагментов стеновых панелей принималась во внимание максимальная масса односерийных панелей. Всего испытано 10 петель. При испытании нагрузку увеличивали этапами, измеряя смещение петли относительно бетона с помощью индикаторов и наблюдая за появлением трещин раскола в наружных слоях панели в местах установки петель (табл. 1).

Характерным разрушением являлось значительное смещение петель (более 1 см) относительно бетона, а также выкалывание бетона наружного слоя (толщиной 5 см). В связи с тем, что разрушение произошло после достижения ветвями петель текучести арматуры при длине заделки согласно проекту, но с увеличением диаметра арматуры с 18 до 20 мм, то причиной этого могла быть недостаточная длина заделки петли.

Численный анализ подтверждает, что при проектном диаметре петель 18 мм и имевшей место прочности бетона наружных слоев, подобного разрушения от нарушения анкеровки не произойдет ранее достижения сталью предела текучести.

Рис. 1. Общий вид испытания строповочной петли на выдергивание (*a, b*) и разрушение фрагментов панелей при испытании петель диаметром 20 мм (*c*): *a* — панель горизонтальной разрезки; *b, c* — фрагмент стеновой панели
Fig. 1. General view of stropovochnoj test hinges on pulling (*a, b*) and destruction of the fragments of the panels when tested loops with a diameter of 20 mm (*c*): *a* — horizontal panel cutting; *b, c* — fragment of the wall panel

Рис. 2. Общий вид фрагмента панели, загрузочной системы и приборов при испытании петель для снятия панелей из формы и подъема при их складировании и перевозке и разрушении
Fig. 2. General view panel fragment, boot and system devices when testing loops for removing panels out of shape and lift their warehousing and transportation and destruction

Табл. 1. Результаты испытаний петель на выдергивание

Table 1. Results of the tests on the pulling

Маркировка (шифр образца) / Marking (cipher of sample)	Диаметр, мм, и класс арматуры / Diameter, mm, and class of reinforcement	Нагрузка, кН, % / Load, kN, %			Напряжения в арматуре, МПа / Stresses in reinforcement, MPa			$\frac{\sigma_{\max}}{\sigma_y}$	Причина разрушения / Cause of destruction
		разрушающая / destructive		$\frac{P_{\max}}{P}$	нормативная собственного веса, P / regula- tory of dead weight, P	При максимальной нагрузке $\frac{\sigma_{\max}}{\sigma_y}$ / At maximum load $\sigma_{\max}$			
		фактическая, $\frac{P_{\max}}{P_{\text{factual}}}$	теоретическая $P_t = A_b 0,8R_{bt}$ / theoretical $P_t = A_b 0,8R_{bt}$						
Монтажные петли / Mounting hinges									
ПМ-1 (ПСЛГ-1) / PM-1 (PSLG-1)	Ø20A240	210	—	21	10	334,4	250	1,34	Текущая арматура / Yielding of reinforcement
ПМ-2 (ПСЛГ-1) / PM-2 (PSLG-1)	Ø20A240	250	—	21	12	398,1	250	1,59	
ПМ-3 (ПСЛГ-2) / PM-3 (PSLG-2)	Ø20 A240	250	—	21	12	398,1	250	1,59	
ПМ-4 (ПСЛГ-2) / PM-4 (PSLG-2)	Ø20A240	250	—	21	12	398,1	250	1,59	
ПМ-5 (Ф-1) / PM-5 (F-1)	Ø12 A240	88	—	11	8	389	248	1,57	Нарушение анкеровки / Anchorage failure
ПМ-6 (Ф-2) / PM-6 (F-2)	Ø12 A240	88	—	11	8	389	248	1,57	
ПМ-7 (Ф-3) / PM-7 (F-3)	Ø20 A240	180	—	20	9	287	244	1Д7	
ПМ-8 (Ф-4) / PM-8 (F-4)	Ø20A240	183	—	20	9	292	244	1,19	
ПМ-9 / PM-9	Ø18 A240	180	—	60	3	354	245	1,44	Текущая арматура / Yielding of reinforcement
ПМ-10 / PM-10	Ø18 A240	250	—	60	4	354	245	1,44	
Петли для подъема из формы / Loopes for lifting out of shape									
ПП-1 (Ф-1) / PP-1 (F-1)	Ø12 A240	56/100	66/118	11	5	248			Выкалывание бетона наружного слоя со смещением петли / Gouging concrete of outer layer with offset loop

Петли для снятия панелей из формы, а также подъема при их складировании и перевозке испытаны на фрагментах стеновых панелей размером $1,20 \times 1,17 \times 0,3$ м при сохранении проектного армирования и расстояния от края панели до петли, равного 25 см. Петли выполнены из стали класса А240 диаметром 12 мм вместо 10 мм по проекту. Всего испытано четыре петли (см. рис. 2).

Разрушение всех фрагментов происходило из-за выкалывания бетона наружного слоя, в котором петли заанкеривались с помощью приваренных к ним пластин. При достижении разрушающей нагрузки напряжения в ветвях петли превышали предел текучести стали. Таким образом, прочность заделки петель диаметром 12 мм при принятом способе их анкеровки в наружном слое с помощью приваренных пластин обеспечивается с достаточным запасом.

Расчет в эксплуатационной стадии трехслойной панели производился на нагрузку от собственного веса панели ($412\,000 \text{ Н/м}^2$) с учетом веса стеклопакетов вместе с рамой (200 Н/м^2) при ширине оконных проемов 1,8 м и простенка шириной 1,2 м напротив колонн. Максимальные моменты определены от каждой нагрузки отдельно. Суммарный момент равен

$$M = M_b + M_o + M_p \approx 1,74 \text{ МПа.} \quad (15)$$

Трещины не образуются, так как растягивающие напряжения

$$\sigma = M / W \approx 0,32 \text{ МПа} < R_{bt,n} = 1 \text{ МПа.} \quad (16)$$

С учетом вычисленной ранее горизонтальной ветровой нагрузки, определяем напряжения $\sigma = 1,7/4,49 \approx 0,23 \text{ МПа}$. Суммируя полученные значения напряжений определяем $\sigma_{bt} 0,32 + 0,23 \approx 0,55 \text{ МПа}$, что также меньше $R_{bt,n} = 1 \text{ МПа}$

Армирование стеновой панели производится конструктивно — устанавливается 12 стержней диаметром 6 мм из арматуры класса А400.

Тогда

$$M_{ult} = N_s \cdot Z = 4,86 \text{ МПа.} \quad (17)$$

Здесь усилие в арматуре $N_s = A_s \cdot R_s$, где $R_s = 350 \text{ МПа}$ и $Z = h - \frac{x}{2} - c$, где $x = 3,74$ — высота сжатой зоны бетона, см; $c = 7$ — расстояние от нижней грани подъема до центра тяжести арматуры, см.

По прочности на изгиб устанавливаемой арматуры достаточно, например, только при учете армирования снизу панели $M_{ult} = 4,86 \text{ МПа}$, что больше суммарного момента от нагрузки, равного 1,74 МПа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

С целью совершенствования традиционных и разработки новых конструктивно-технологических решений железобетонных конструкций заводского изготовления, испытывающих различные напряженно-деформированные состояния на стадиях транспортирования, монтажа и эксплуатации, необходимо проводить расчеты на соответствующие нагрузки и воздействия для обеспечения их конструктивной безопасности.

На основе разработанной методики при дальнейших исследованиях возможно установить граничные значения конструктивных параметров и диапазон конструктивной безопасности трехслойных панелей наружных стен из бетонов различной прочности, связь слоев которых обеспечивается единой цементной структурой, на всех этапах жизненного цикла и определить рациональные области их применения в зданиях и сооружениях различного назначения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рахманов В.А. Полистиролбетон системы «Юникон» — энергоэффективный материал XXI века. М., 2017. URL: <https://vniizhbeton.ru/>
2. Fediuk R.S., Smoliakov A.K., Timokhin R.A., Stoyushko N.Y., Gladkova N.A. Fibrous concrete with reduced permeability to protect the home against the fumes of expanded polystyrene // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2017. Vol. 66. P. 012026. DOI: 10.1088/1755-1315/66/1/012026
3. Sayadi A.A., Tapia J.U., Neitzert T.R., Clifton G.C. Effects of expanded polystyrene (EPS) particles on fire resistance, thermal conductivity and compressive strength of foamed concrete // Construction and Building Materials. 2016. Vol. 112. Pp. 716–724. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.218
4. Babu K.G., Babu D.S. Behaviour of lightweight expanded polystyrene concrete containing silica fume // Cement and Concrete Research. 2003. Vol. 33. Issue 5. Pp. 755–762. DOI: 10.1016/s0008-8846(02)01055-4
5. Рахманов В.А. Расчетный метод определения состава полистиролбетона с требуемой прочностью и минимальной плотностью // Промышленное и гражданское строительство. 2009. № 7. С. 45–47.
6. Kovács K. Polisztirol betonok tartóssága // Durability of concrete structures — Proceedings. Budapest, 2008. Pp. 257–278.
7. Lander V.Ph., Shauman Z. Microstructure research of contact zone aggregate-hardened cement binder in filtering concretes // The 111 International Symposium on Silicate Chemistry. Brno, 2005.

8. Могушков Р.Т., Бойков И.В., Скориков Р.Е. Применение полистиролбетона в строительстве // Развитие технических наук в современном мире : сб. науч. тр. по итогам Междунар. науч.-практ. конф. Воронеж, 8 декабря 2015. 2015. № 2. С. 135–138. URL: http://izron.ru/conference/atr_year-2019/atr_month-mart/

9. Korol E., Berlinov M., Berlinova M. The long term stability of multilayer walling structures // MATEC Web of Conferences. 2017. Vol. 106. P. 04006. DOI: 10.1051/mateconf/201710604006

10. Король Е.А., Берлинова М.Н. Оценка прочности многослойных плит покрытий и перекрытий общественных зданий // Интеграция, партнерство и инновации в строительной науке и образовании : сб. мат. Междунар. науч. конф. М. : НИУ МГСУ, 2017. С. 839–842.

11. Король Е.А., Харькин Ю.А., Быков Е.Н. Экспериментальные исследования влияния климатических воздействий на монолитную связь бетонных слоев различной прочности в многослойных конструкциях // Вестник МГСУ. 2010. № 3. С. 164–169.

12. Баженов Ю.М., Король Е.А., Ерофеев В.Т., Митина Е.А. Ограждающие конструкции с использованием бетонов низкой теплопроводности (основы теории, методы расчета и технологическое проектирование). М. : Изд-во АСВ, 2008. 320 с.

13. Король Е.А., Харькин Ю.А. К вопросу о выборе программного комплекса для моделирования напряженно-деформированного состояния трехслойных железобетонных элементов и конструкций с монолитной связью слоев // Вестник МГСУ. 2010. № 3. С. 156–163.

14. Korol E.A., Berlinov M.V., Berlinova M.N. Kinetics of the strength of concrete in constructions // Procedia Engineering. 2016. Vol. 153. Pp. 292–297. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.118

15. Trussoni M., Hays C.D., Zollo R.F. Fracture properties of concrete containing expanded polystyrene aggregate replacement // ACI Materials Journal. 2013. Vol. 110. Issue 5. Pp. 549–558. DOI: 10.14359/51685906

16. Chen B., Liu J. Properties of lightweight expanded polystyrene concrete reinforced with steel fiber // Cement and Concrete Research. 2004. Vol. 34. Issue 7. Pp. 1259–1263. DOI: 10.1016/j.cemconres.2003.12.014

17. Yue Z., Xiao H. Generalized Kelvin solution based boundary element method for crack problems in multilayered solids // Engineering Analysis with Boundary Elements. 2002. Vol. 26. Issue 8. Pp. 691–705. DOI: 10.1016/S0955-7997(02)00038-3

18. Korol E., Berlinova M. Calculation of multilayer enclosing structures with middle layer of polystyrene concrete // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 193. P. 3020. DOI: 10.1051/mateconf/201819303020

19. Cherednikov V., Voskobiinyk O., Cherednikova O. Evaluation of the warping model for analysis of polystyrene concrete slabs with profiled steel sheeting // Periodica Polytechnica Civil Engineering. 2017. Vol. 61. No. 3. Pp. 483–490. DOI: 10.3311/PPci.8717

20. Пугач Е.М., Король О.А. Экспериментальные исследования работы трехслойных конструкций со средним слоем из бетона низкой теплопроводности в нестационарном тепловлажностном режиме // Вестник МГСУ. 2011. № 3–2. С. 154.

Поступила в редакцию 7 ноября 2018 г.

Принята в доработанном виде 12 декабря 2019 г.

Одобрена для публикации 28 февраля 2019 г.

О Б АВТОРАХ: **Король Елена Анатольевна** — доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой жилищно-коммунального комплекса, **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, professorkorol@mail.ru;

Берлинова Марина Николаевна — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры жилищно-коммунального комплекса, **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, marina.tvor@mail.ru.

REFERENCES

1. Rakhmanov V.A. Polystyrene concrete “Unicon” — energy-efficient material of the XXI century. Moscow, 2017. URL: <https://vniizhbeton.ru/> (rus.).
2. Fediuk R.S., Smoliakov A.K., Timokhin R.A., Stoyushko N.Y., Gladkova N.A. Fibrous concrete with reduced permeability to protect the home against the

- fumes of expanded polystyrene. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2017; 66:012026. DOI: 10.1088/1755-1315/66/1/012026
3. Sayadi A.A., Tapia J.U., Neitzert T.R., Clifton G.C. Effects of expanded polystyrene (EPS) particles on fire resistance, thermal conductivity and com-

pressive strength of foamed concrete. *Construction and Building Materials*. 2016; 112:716-724. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.218

4. Babu K.G., Babu D.S. Behaviour of lightweight expanded polystyrene concrete containing silica fume. *Cement and Concrete Research*. 2003; 33(5):755-762. DOI: 10.1016/s0008-8846(02)01055-4

5. Rakhmanov V.A. Calculation method of determination of polystyrene concrete composition with required strength and minimal density. *Industrial and Civil Engineering*. 2009; 7:45-47. (rus.).

6. Kovács K. *Polisztirol betonok tartóssága. Durability of concrete structures — Proceedings*. Budapest, 2008; 257-278.

7. Lander V.Ph., Shauman Z. Microstructure research of contact zone aggregate-hardened cement binder in filtering concretes. *The 111 International Symposium on Silicate Chemistry*. Brno, 2005.

8. Mogushkov R.T., Boykov I.V., Skorikov R.E. The use of polystyrene concrete in construction. *The development of technical Sciences in the modern world : collection of scientific works. Tr. according to the results mezhdunar. science.-prakt. Conf. Voronezh, December 8, 2015*. 2015; 2:135-138/ (rus.).

9. Korol E., Berlinov M., Berlinova M. The long term stability of multilayer walling structures. *MATEC Web of Conferences*. 2017; 106:4006. DOI: 10.1051/mateconf/201710604006

10. Korol E.A., Berlinova M.N. Evaluation of strength of multilayered plates coverings and ceilings of public buildings. Miscellany: integration, partnership and innovation in building science and education: the collection of materials of the international scientific conference. *Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering*. 2017; 839-842. (rus.).

11. Korol E.A., Kharkin Y.A., Bykov E.N. Experimental research of the effect of climatic influences on the solid joint of concrete layers with different strength in sandwich structures. *Vestnik MGSU* [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2010; 3:164-169. (rus.).

12. Bazhenov Y.M., Korol E.A., Erofeev V.T., Mitina E.A. *Protecting designs using concrete of low thermal conductivity. Theory, methods of calculation and technological design*. Moscow. 2008; 320. (rus.).

13. Korol E.A., Kharkin Y.A. On the choice of software for simulation of stress-strained state of sandwich concrete elements and structures with solid coupling layers. *Vestnik MGSU* [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2010; 3:156-163. (rus.).

14. Korol E.A., Berlinov M.V., Berlinova M.N. Kinetics of the strength of concrete in constructions. *Procedia Engineering*. 2016; 153: 292-297. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.118

15. Trussoni M., Hays C.D., Zollo R.F. Fracture properties of concrete containing expanded polystyrene aggregate replacement. *ACI Materials Journal*. 2013; 110(5):549-558. DOI: 10.14359/51685906

16. Chen B., Liu J. Properties of lightweight expanded polystyrene concrete reinforced with steel fiber. *Cement and Concrete Research*. 2004; 34(7):1259-1263. DOI: 10.1016/j.cemconres.2003.12.014

17. Yue Z., Xiao H. Generalized Kelvin solution based boundary element method for crack problems in multilayered solids. *Engineering Analysis with Boundary Elements*. 2002; 26(8):691-705. DOI: 10.1016/s0955-7997(02)00038-3

18. Korol E., Berlinova M. Calculation of multilayer enclosing structures with middle layer of polystyrene concrete. *MATEC Web of Conferences*. 2018; 193:3020. DOI: 10.1051/mateconf/201819303020

19. Cherednikov V., Voskobiinyk O., Cherednikova O. Evaluation of the warping model for analysis of polystyrene concrete slabs with profiled steel sheeting. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. 2017; 61(3):483-490. DOI: <https://doi.org/10.3311/PPci.8717>.

20. Pugach E.M., Korol O.A. Experimental research of three-layer structure with middle layer of concrete with low thermal conductivity in nonstationary heat and humidity mode. *Vestnik MGSU*. [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2011; 3-2:154. (rus.).

Received November 7, 2018.

Adopted in a modified form December 12, 2019.

Approved for publication February 28, 2019.

ABOUT THE AUTHORS: **Elena A. Korol'** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of housing-and-municipal complex, **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation, professorkorol@mail.ru;

Marina N. Berlinova — Candidate of Technical Sciences, Associated Professor of the Department of housing-and-municipal complex, **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation, marina.tvor@mail.ru.