

ПРОЧНОСТЬ И ДЕФОРМАЦИИ ТРЕХСЛОЙНЫХ СТЕНОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ СО СРЕДНИМ СЛОЕМ ИЗ ДРЕВЕСНО-ЦЕМЕНТНОГО КОМПОЗИТА

В.И. Запруднов✉, Г.А. Горбачева

ФГАОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (Мытищинский филиал), Россия, 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1

zaprudnovvi@bmstu.ru

Приведены результаты теоретических исследований прочности и деформаций, возникающих под действием внецентренно приложенных нагрузок на трехслойные стеновые конструкции с монолитной связью внешних слоев из бетона со средним слоем из древесно-цементного композита. Выявлена возможность получения напряженно-деформированного состояния элементов трехслойной стеновой панели при внецентренно приложенной нагрузке при исследовании сжато-изогнутой пластинки, если внецентренно приложенную вертикальную нагрузку разложить на два компонента — сжимающую центральную нагрузку и изгибающий момент, создающий изгиб пластинки из своей плоскости. Установлены принципы построения теории расчета пластин на основе представления об однородном напряженно-деформированном состоянии тонкостенного элемента руководствуясь трехмерными уравнениями теории упругости. Указано, что трехслойные конструкции из различных видов бетона, непрерывно связанные между собой по всей поверхности соприкосновения, следует изготавливать несущими, самонесущими и осуществлять армирование каркасом, располагая рабочую арматуру в несущих бетонных слоях. Получены аналитические выражения, позволяющие определить распределение тангенциальных напряжений вдоль оси x_1 по толщине панели и прогиб панели от внецентренно приложенной продольной нагрузки без особых затруднений при вычислениях. Рекомендуется использовать результаты исследований в расчетах для определения несущей способности и прогибов трехслойных стеновых панелей при продольном сжатии со средним теплоизоляционно-конструкционным слоем из древесно-цементного материала. Разработаны методы расчета прочностных и деформационных свойств эффективных трехслойных стеновых конструкций с монолитной связью слоев. Показано хорошее согласование построенной теории расчета конструкций с монолитной связью слоев с инженерными расчетами, приведенными в нормативной литературе, подтвержденное испытаниями опытных натурных конструкций при продольном сжатии и поперечном изгибе.

Ключевые слова: прочность и деформации, монолитные стеновые конструкции, бетон, древесно-цементный композит

Ссылка для цитирования: Запруднов В.И., Горбачева Г.А. Прочность и деформации трехслойных стеновых конструкций со средним слоем из древесно-цементного композита // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2026. Т. 30. № 5. С. 74–82. DOI: 10.17816/2542-1468-2026-5-74-82

Идея создания многослойных конструкций из бетонов различной прочности, формируемых в едином технологическом цикле, относится к периоду появления бетонов на пористых заполнителях [1–5]. Такие бетоны использовались в среднем слое трехслойных конструкций с наружными слоями из тяжелого бетона в целях снижения массы, а также повышения теплозащитных характеристик.

Несмотря на то что большинство таких конструкций в настоящее время не в полной мере удовлетворяет возросшим требованиям по теплозащите зданий, их разработка и при-

менение послужили основой для дальнейшего совершенствования нового класса многослойных железобетонных несущих и ограждающих конструкций с монолитной связью слоев, таким образом открыв перспективное направление.

Исследования по изучению работы древесно-цементных материалов в конструкциях слоистого и ребристого типов [6–10] подтверждают, что при действии кратковременной и длительной нагрузок древесно-цементный материал среднего слоя участвует в восприятии сжимающих и растягивающих усилий совместно с наружными бетонными слоями и арматурой. Принятая в нормативных документах [6, 11–17] методика расчета внецентренно сжатых стеновых панелей базируется на расчете

упруго защемленного на опорах стержня, который моделирует простенок панели. При наличии сложных закреплений стеновую панель следует рассматривать как пластинку, которая может иметь различные способы закрепления.

В зависимости от того, какая из гипотез о характере напряженно-деформированного состояния тонкостенного элемента принимается за основу, при поиске решения исходят из тех или иных уравнений теории пластин [18–24]. Наиболее распространенным подходом к построению теории расчета пластин является принятие гипотез кинематического характера [7]. Однако данный подход имеет некоторые недостатки — отсутствие четкого обоснования и противоречивость некоторых положений, с точки зрения как математической корректности, так и физического содержания.

Анализ методов расчета ограждающих конструкций показывает, что в силу конструктивных особенностей и условий работы расчетные положения, изложенные в нормативных документах [11, 12] и СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции», не дают возможности достаточно точно определить несущую способность внецентренно сжатых трехслойных стеновых панелей со средним теплоизоляционно-конструкционным слоем из легкого бетона на основе древесно-цементного композита и наружными слоями из тяжелого бетона.

В соответствии с этой методикой при расчете учитывается работа только бетонных элементов и арматуры. Учет работы древесно-цементного слоя в составных сечениях не предусматривается, в результате чего несущая способность такого рода конструкций занижается. Такой подход является приближенным, поскольку не учитывает различия значений прочностей бетонов и представляется правомерным лишь для случаев, когда эта величина близка величине отношения их начальных модулей упругости.

Все известные методики расчета железобетонных слоистых ограждающих конструкций, применяемых в малоэтажном домостроении, не учитывают взаимодействия и совместной работы конструктивных слоев панелей. Предполагается, что все нагрузки воспринимаются только несущими слоями из тяжелого бетона, а влияние остальных слоев конструкции при расчете не учитывается. Таким образом, работа при внецентренном и одновременном сжатии всех слоев трехслойной стеновой конструкции с внешними железобетонными слоями и средним слоем из легкого бетона на основе древесно-цементной композиции остается мало изученной.

Для получения достоверных данных о работе трехслойных стеновых конструкций с монолитной связью наружных слоев со средним теплоизоляционным слоем из древесно-цементного материала необходимы дальнейшие экспериментальные исследования и разработка аналитической методики расчета их напряженно-деформированного состояния.

Трехслойные конструкции с монолитной связью слоев применяют в качестве стеновых панелей в малоэтажном домостроении. Наиболее характерными силовыми воздействиями при этом являются нагрузка от перекрытий, ветровая и снеговая нагрузки, а также собственный вес.

Цель работы

Цель работы — разработка аналитической методики расчета напряженно-деформированного состояния многослойных конструкций из бетонов различной прочности.

Материалы и методы

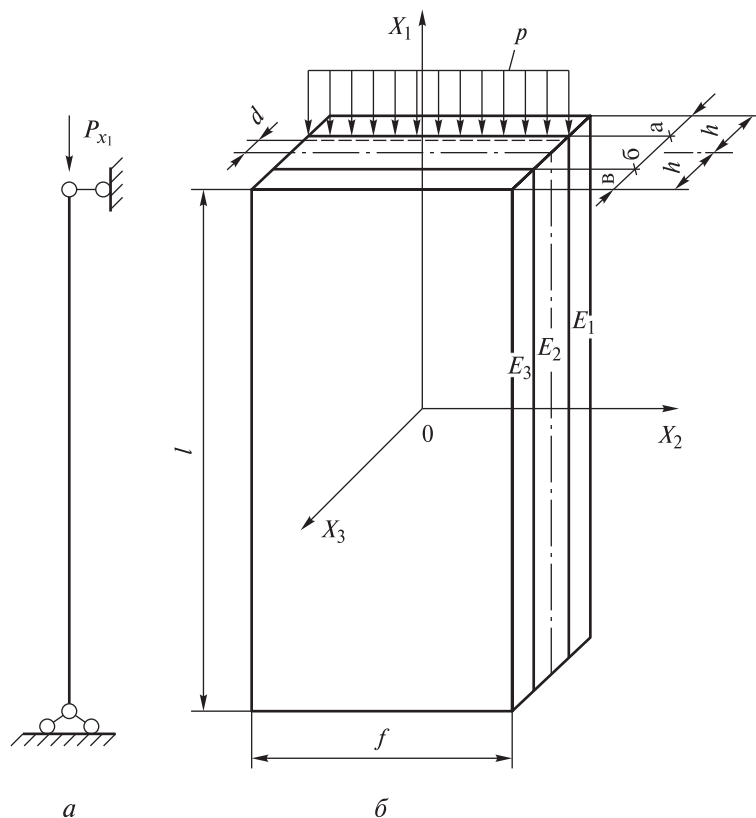
Расчет напряженно-деформированного состояния сжатых трехслойных конструкций (рисунок) выполнен с учетом рекомендаций методики, изложенной в работах [11, 12], которая использует принятую в СНиП 2.03.01–84* и СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции» расчетную модель.

Аналитические исследования монолитных трехслойных конструкций проведены с использованием методов линейной теории упругости, приведенных в работе [25–28].

Уравнения статики тонкостенных неоднородных по толщине пластин можно получить без принятия гипотез кинематического характера. Наиболее полный анализ напряженно-деформированного состояния, возникающего в трехслойных конструкциях при статических воздействиях, может быть дан с привлечением законов теории упругости и пластичности, описывающих работу конструкций вплоть до разрушения [3].

Построение теории расчета пластин исходя из трехмерных уравнений теории упругости ведется в этом случае на основе представления об однородном напряженно-деформированном состоянии тонкостенного элемента. Однако решение этих уравнений ввиду сложного характера напряженного состояния и, как правило, неизвестных функций перемещений вызывает определенные математические трудности [29, 30].

В настоящей работе приводится достаточно точный и относительно простой для практиче-



Расчетная схема трехслойной конструкции стены при внецентренном сжатии: *a* — схема действия нагрузки; *б* — расчетная схема конструкции

Design diagram of a three-layer wall structure under eccentric compression: *a* — load application diagram; *б* — structural design diagram

ского применения аналитический метод расчета внецентренно сжатых трехслойных стеновых конструкций. При разработке методики расчета были использованы некоторые результаты ранее выполненных исследований в области линейной теории расчета многослойных пластин [25, 31–35].

Рассмотрим трехслойную стеновую панель, находящуюся под воздействием равномерно распределенной продольной статической погонной нагрузки P , внецентренно приложенной к одной грани панели (см. рисунок). Другая грань покоится на основании, реакция которого определяется из условий статики и представляет собой погонную нагрузку P и погонный момент $M = Pd$, где d — эксцентриситет.

Требуется определить аналитические зависимости между деформациями и напряжениями, заданными усилиями и моментами в каждом слое панели. Для описания линейного напряженного состояния расположим оси декартовых координат x_1 и x_2 в срединной плоскости панели, а ось x_3 направим по нормали к ней (см. рисунок).

Будем считать, что слои изотропные и что их главные оси совпадают с осями координат. Примем также допущение, что поперечные касательные напряжения σ_{13} , σ_{23} и нормальное напряжение σ_{33} для данного вида однородного нагружения равны нулю. Остальные параметры, характеризующие напряженное состояние панели, являются некоторыми неизвестными функциями координаты x_3 , которые нужно определить.

Для решения задачи воспользуемся уравнениями, описывающими связь между тангенциальными напряжениями, изгибающими моментами, деформациями и прогибом, приведенными в работе [31]. Тогда выражения для тангенциальных напряжений будут иметь следующий вид:

$$\sigma_{11} = \frac{E}{1-\nu^2} \left(e_{11} + \nu e_{22} - \nu x_3 \frac{d^2 w}{dx_2^2} - x_3 \frac{d^2 w}{dx_1^2} \right); \quad (1)$$

$$\sigma_{22} = \frac{E}{1-\nu^2} \left(\nu e_{11} + e_{22} - x_3 \frac{d^2 w}{dx_2^2} - \nu x_3 \frac{d^2 w}{dx_1^2} \right); \quad (2)$$

$$\sigma_{12} = 2\nu e_{12} - 2\nu x_3 \frac{d^2 w}{dx_1 dx_2}, \quad (3)$$

где σ_{ij} — тензор напряжений, МПа;

E — модуль упругости слоя конструкции, МПа;

ν — коэффициент Пуассона;

e_{ij} — тензор деформаций;

x_i — координата оси;

w — прогиб, см.

Если размер стороны панели, вдоль которой приложена нагрузка P , намного меньше длины панели ($f \ll l$), то можно принять деформации $e_{22} = e_{11} = 0$, а изгиб панели будет происходить вдоль оси x_1 . С учетом этих замечаний имеем:

$$\sigma_{11} = \frac{E}{1-\nu^2} \left(e_{11} - x_3 \frac{d^2 w}{dx_1^2} \right); \quad (4)$$

$$\sigma_{22} = \frac{\nu E}{1-\nu^2} \left(e_{11} - x_3 \frac{d^2 w}{dx_1^2} \right) = \nu \sigma_{11}. \quad (5)$$

Интегрируя зависимость (4) по координате x_3 в пределах $(-h, h)$, а затем, умножив ее на x_3 и интегрируя в тех же пределах, получаем выражения для тангенциальных усилий (T) и моментов (M)

$$T = C e_{11} - K \frac{d^2 w}{dx_1^2}, \quad (6)$$

$$M = K e_{11} - D \frac{d^2 w}{dx_1^2}, \quad (7)$$

где

$$C = \int_{-h}^h \frac{E(x_3) dx_3}{1-\nu^2(x_3)}; \quad (8)$$

$$K = \int_{-h}^h \frac{x_3 E(x_3) dx_3}{1-\nu^2(x_3)}; \quad (9)$$

$$D = \int_{-h}^h \frac{x_3^2 E(x_3) dx_3}{1-\nu^2(x_3)}; \quad (10)$$

$$T = \int_{-h}^h \sigma_{11} dx_3; \quad (11)$$

$$M = \int_{-h}^h x_3 \sigma_{11} dx_3. \quad (12)$$

При условии $f \ll l$ принимаем $\sigma_{22} = 0$. Тогда из уравнений (1), (2) находим:

$$e_{22} = -\nu \left(e_{11} - x_3 \frac{d^2 w}{dx_1^2} \right); \quad (13)$$

$$\sigma_{11} = E \left(e_{11} - x_3 \frac{d^2 w}{dx_1^2} \right). \quad (14)$$

Проведя для зависимости (14) такие же вычисления, как были проведены выше для зависимости (4), получим выражения

$$T = C \cdot e_{11} - K \frac{d^2 w}{dx_1^2}; \quad (15)$$

$$M = K \cdot e_{11} - D \frac{d^2 w}{dx_1^2}, \quad (16)$$

где

$$C = \int_{-h}^h E(x_3) dx_3; \quad (17)$$

$$K = \int_{-h}^h x_3 E(x_3) dx_3; \quad (18)$$

$$D = \int_{-h}^h x_3^2 E(x_3) dx_3; \quad (19)$$

$$T = \int_{-h}^h \sigma_{11} dx_3; \quad (20)$$

$$M = \int_{-h}^h x_3 \sigma_{11} dx_3. \quad (21)$$

Обозначив упругие постоянные материалов слоев панели через $E_1, E_2, E_3, \nu_1, \nu_2, \nu_3$ и проведя вычисления по формулам (8)–(10), получим значения постоянных C, D и K :

$$C = \int_{-h}^{-h+a} \frac{E_1}{1-\nu_1^2} dx_3 + \int_{-h+a}^{-h+b} \frac{E_2}{1-\nu_2^2} dx_3 + \int_{-h+b}^h \frac{E_3}{1-\nu_3^2} dx_3 = \quad (22)$$

$$= \frac{aE_1}{1-\nu_1^2} + \frac{(2h-a-b)E_2}{1-\nu_2^2} + \frac{bE_3}{1-\nu_3^2};$$

$$K = \int_{-h}^{-h+a} \frac{E_1 x_3}{1-\nu_1^2} dx_3 + \int_{-h+a}^{-h+b} \frac{E_2 x_3}{1-\nu_2^2} dx_3 + \int_{-h+b}^h \frac{E_3 x_3}{1-\nu_3^2} dx_3 = \frac{a(a-2h)E_1}{2(1-\nu_1^2)} + \quad (23)$$

$$+ \frac{[b^2 - a^2 + 2h(a-b)]E_2}{2(1-\nu_2^2)} + \frac{b(2h-b)E_3}{2(1-\nu_3^2)};$$

$$D = \int_{-h}^{-h+a} \frac{E_1 x_3^2}{1-\nu_1^2} dx_3 + \int_{-h+a}^{-h+b} \frac{E_2 x_3^2}{1-\nu_2^2} dx_3 + \int_{-h+b}^h \frac{E_3 x_3^2}{1-\nu_3^2} dx_3 = \frac{a(a^2 - 3ah + 3h^2)E_1}{3(1-\nu_1^2)} + \quad (24)$$

$$+ \frac{[2h^3 - 3h^2(a+b) + 3h(a^2 + b^2) - a^3 - b^3]E_2}{3(1-\nu_2^2)} +$$

$$+ \frac{b(b^2 - 3hb + 3h^2)E_3}{3(1-\nu_3^2)},$$

где $2h$ — толщина стеновой панели, м;
 a и b — толщина бетонных слоев, м;
 E_1 и E_3 — модули упругости бетонных слоев, МПа;
 E_2 — модуль упругости древесно-цементного слоя, МПа;
 δ — толщина утеплителя из древесно-цементного материала, м.

Приняв в выражениях (22)–(24) $v_1 = v_2 = v_3 = 0$, получим значения постоянных C , D и K для случая $f \ll l$. Уравнения равновесия относительно тангенциального нормального усилия и изгибающего момента имеют вид

$$\frac{dM}{dx_1} = 0; \quad (25)$$

$$\frac{dT}{dx_2} = 0, \quad (26)$$

откуда следует, что

$$T = B; \quad (27)$$

$$M = A, \quad (28)$$

где A и B — постоянные, определяемые из граничных условий, т. е. имеем

$$T = P; \quad (29)$$

$$M = Pd, \quad (30)$$

где P — равномерно распределенная продольная статическая нагрузка, Н/м;

d — эксцентриситет, м.

Подставляя (29) и (30) в соотношения (6), (7), получаем равенства

$$P = Ce_{11} - K \frac{d^2 w}{dx_1^2}; \quad (31)$$

$$Pd = Ke_{11} - D \frac{d^2 w}{dx_1^2} \quad (32)$$

Решение системы уравнений (31), (32) имеет вид

$$e_{11} = P \frac{D - dk}{K^2 - CD}; \quad (33)$$

$$\frac{d^2 w}{dx_1^2} = P \frac{K - dC}{K^2 - CD}. \quad (34)$$

Из соотношений (4), (5), используя зависимости (33) и (34), находим распределение напряжений вдоль осей x_1 и x_2

$$\sigma_{11}(x_3) = \frac{E(x_3)P}{[1 - v^2(x_3)](K^2 - CD)} \times [D - dK - x_3(K - dC)]; \quad (35)$$

$$\sigma_{22}(x_3) = v\sigma_{11}(x_3). \quad (36)$$

Результаты и обсуждение

Формула (35) позволяет определить распределение тангенциальных напряжений вдоль оси x_1 по толщине панели.

Наиболее близки к реальным условиям эксплуатации несущих стеновых панелей внецентренно приложенные продольные нагрузки. При наличии эксцентриситета продольная сжимающая сила создает внецентренное сжатие, которое приводит к осевому сжатию и изгибу. В связи с этим рассмотрим асимметричный случай работы конструкций.

Для определения прогиба панели от внецентренно приложенной продольной нагрузки с учетом влияния начального эксцентриситета d и продольной сжимающей силы P используем общеизвестное выражение [4]

$$w = w_0 C, \quad (37)$$

где w — прогиб панели, см;

w_0 — прогиб от изгиба, вызываемый моментом $M_0 = Pd$ и определяемый из выражения

$$w_0 = \frac{M_0 l^2}{8D} = \frac{Pdl^2}{8D}; \quad (38)$$

C — коэффициент, учитывающий влияние продольных сил на величину прогиба и определяемый по формуле

$$C = \frac{1}{1 - \frac{P}{P_k}} = \frac{P_k}{P_k - P}, \quad (39)$$

где P_k — критическая сила, Н/м.

Запишем значение величины критической силы для случая шарнирно закрепленных концов панели (см. рисунок, а), используя данные работы [4], в следующем виде

$$P_k = \frac{\pi^2 \bar{D}}{(\mu l)^2}, \quad (40)$$

где μ — коэффициент длины, равный 0,725 для случая шарнирно закрепленных концов панели.

Величина средней изгибной жесткости $\bar{D}$, используемая в выражениях (38) и (40), определяется в зависимости от рассчитываемой схемы конструктивного решения стеновой панели из выражения

$$\bar{D} = D - \frac{K^2}{C}. \quad (41)$$

Подставляя выражения (38) и (39) в зависимость (37), получаем окончательное выражение для определения прогиба панели от внецентренно приложенной продольной нагрузки

$$w = \frac{Pdl^2}{8\bar{D}} \frac{P_{\kappa}}{P_{\kappa} - P}. \quad (42)$$

Полученные выражения (35) позволяют определить распределение тангенциальных напряжений вдоль оси x_1 по толщине панели и (42) для определения прогиба панели от внецентренно приложенной продольной нагрузки без особых затруднений при вычислениях могут быть использованы в расчетах для определения несущей способности и прогибов трехслойных стеновых панелей при продольном сжатии со средним теплоизоляционно-конструкционным слоем из древесно-цементного материала.

Выводы

Получены аналитические выражения для расчета напряженно-деформированного состояния трехслойные стеновые конструкции с монолитной связью слоев из бетонов различной прочности. Методика расчета конструкций с монолитной связью слоев хорошо согласуется с инженерными расчетами, приведенными в нормативной литературе, и подтверждается испытаниями опытных натурных конструкции при продольном сжатии и поперечном изгибе.

Список литературы

- [1] Аккерман И.С., Кац Ю.М. Об эффективности многослойных стеновых панелей // Бетон и железобетон, 1986. № 8. С. 44–45.
- [2] Альтмюллер Е.М., Глина Ю.В. Монолитный бетон в сельском домостроении // Жилищное строительство, 1985. № 10. С. 9–11.
- [3] Безухов Н.М. Основы теории упругости, пластичности и ползучести. М.: Высшая школа, 1968. 254 с.
- [4] Блажко В.П., Граник М.Ю. Гибкие базальтопластиковые связи для применения в трехслойных панелях наружных стен // Строительные материалы, 2015. № 5. С. 56–57.
- [5] Вольмир А.С. Устойчивость деформированных систем. М.: Наука, 1967. 984 с.
- [6] Данель В.В. Стык наружных стеновых панелей с монолитным железобетонным поясом // Жилищное строительство, 2013. № 7. С. 12–13.
- [7] Инструкция по проектированию конструкций панельных жилых зданий. ВСН 32 – 77. М.: Стройиздат, 1978. 180 с.
- [8] Gara F., Ragni L., Roia D., Dezi L. Experimental tests and numerical modelling of wall sandwich panels // Eng. Struct., 2012, v. 37, pp. 193–204.
- [9] Andreev V.I., Turusov R.A., Tsybin N.Y. Application of the Contact Layer in the Solution of the Problem of Bending the Multilayer Beam // Procedia Engineering, 2016, v. 153, pp. 59–65.
- [10] Zaprudnov V.I., Sanaev V.G., Karpachev S.P., Levushkin D.M., Gorbacheva G.A. The influence of chemical additives on strength of wood-cement composite: materials Science Forum, 2019, t. 972, pp. 69–76.
- [11] Гамалий Е.А., Костина С.А. Оптимизация технологии трехслойных железобетонных наружных стеновых панелей на ООО «Бетотек» г. Челябинска // Наука ЮУрГУ: Материалы 63-й науч. конф. / отв. за вып. С.Д. Ваулин, Челябинск, 10–13 апреля 2011 г. Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2011. Т. 1. С. 109–113.
- [12] Грановский А.В., Чупанов М.Р., Ковригин А.Г., Маслов А.В. Экспериментальные исследования трехслойных стеновых панелей на действие динамической нагрузки // Жилищное строительство, 2018. № 3. С. 18–23.
- [13] Ищук М.К. Особенности расчета многослойных стен с жесткими связями // Строительная механика и расчет сооружений, 2018. № 4 (279). С. 69–76.
- [14] Запруднов В.И. Трехслойные конструкции с древесно-цементными теплоизоляционными слоями. М.: МГУЛ, 2006. 322 с.
- [15] Тхо В.Д., Король Е.А. Влияние контактных слоев на трещиностойкость изгибаемых трехслойных конструкций // Вестник МГСУ, 2020. Т. 15. С. 988–998.
- [16] Тамразян А.Г. Методология анализа и оценки надежности состояния и прогнозирование срока службы железобетонных конструкций // Железобетонные конструкции, 2023. № 1(1). С. 5–18.
- [17] Филатов Е.Ф. Конструктивные особенности трехслойных наружных стеновых панелей с дискретными связями // Жилищное строительство, 2017. № 10. С. 35–40.
- [18] Король Е.А., Пугач Е.М., Николаев А.Е. Экспериментальные исследования сцепления бетонов различной прочности в многослойных железобетонных элементах // Технологии бетонов, 2006. № 4. С. 54–55.
- [19] Луговой А.Н. Повышение энергоэффективности ограждающих конструкций // Строительные материалы, 2011. № 3. С. 32–33.
- [20] Луговой А.Н., Ковригин А.Г. Композитные гибкие связи для трехслойных панелей // Строительные материалы, 2014. № 5. С. 22–24.
- [21] Пособие по проектированию жилых зданий. Конструкции жилых зданий. М.: Стройиздат, 1989. Вып. 3. 303 с.
- [22] Рекомендации по расчету и изготовлению изделий из поризованного арболита. М.: НИИЖБ, 1982. 63 с.
- [23] Сапачева Л.В., Юмашева Е.И. Крупнопанельное домостроение остается самым быстрым и экономичным // Жилищное строительство, 2014. № 10. С. 3–10.
- [24] Староста Н.А. Обоснование применения облегченных монолитных железобетонных перекрытий // Молодой ученый, 2019. № 6 (244). С. 22–28.
- [25] Колосов Г.Е., Кудрявцев А.А. Результаты испытаний крупногабаритных стеновых панелей и плит покрытия из арболита // Развитие производства и применение в строительстве эффективных конструкций и изделий из арболита. М.: Госстройиздат, 1981. С. 33–36.
- [26] Kustikova Y. Model of stressed-strained state of multilayered reinforced concrete structure with the use of composite reinforcement // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2017, v. 365, iss. 5, p. 11.
- [27] Korol E.A., Berlinova M. Calculation of multilayer enclosing structures with middle layer of polystyrene concrete // MATEC Web Conf, 2018, v. 193, p. 7.

- [28] Korol E.A., Kharkin Y.A. To the question of choosing a software package for modeling the stress-strain state of three-layer reinforced concrete elements and structures with a monolithic bond of layers // Scientific And Technical J. On Construction And Architecture (The Bulletin), 2010, v. 3, pp. 156–166.
- [29] Lam T.V., Vu D.T., Dien V.K., Bulgakov B.I., Korol E.A. Properties and thermal insulation performance of lightweight concrete // Magazine of Civil Engineering, 2018, v. 84, iss. 8, pp. 173–191.
- [30] Sanaev V. G., Zaprudnov V. I., Gorbaheva G. A., Oblivin A. N. Factors affecting the quality of wood-cement composites // Bulletin of the Transilvania University of Braşov Series II: Forestry Wood Industry Agricultural Food Engineering, 2016, v. 9 (58), no. 2, pp. 63–71.
- [31] Инструкция по проектированию, изготовлению и применению конструкций и изделий из арболита. СН 549–82. М.: Стройиздат, 1983. 44 с.
- [32] Хорошун Л.П., Щербаков А.С. Прочность и деформативность арболита. Киев: Наукова думка, 1979. 192 с.
- [33] Щербаков А.С. Основы повышения качества арболита на древесных заполнителях: дис. ... д-ра техн. наук. М., 1981. 494 с.
- [34] Щербаков А.С., Запруднов В.И., Разумовский А.В. Однородное напряженно-деформированное состояние плит перекрытий из древесно-цементных материалов // Научн. тр. МГУЛ, 1998. Вып. 296. С. 32–35.
- [35] Тихонов И.Н., Мешков В.З., Звездов А.И., Саврасов И.П. Эффективная арматура для железобетонных конструкций зданий, проектируемых с учетом воздействия особых нагрузок // Строительные материалы, 2017. № 3. С. 39–45.

Сведения об авторах

Запруднов Вячеслав Ильич  — д-р техн. наук, профессор, ФГАОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (Мытищинский филиал), zaprudnovvi@bmstu.ru

Горбачева Галина Александровна — канд. техн. наук, доцент, ФГАОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (Мытищинский филиал), gorbacheva@bmstu.ru

Поступила в редакцию 19.01.2026.

Одобрено после рецензирования 14.05.2026.

Принята к публикации 20.08.2026.

STRENGTH AND DEFORMATION OF THREE-LAYER WALL CONSTRUCTIONS WITH MIDDLE LAYER OF WOOD-CEMENT COMPOSITE

V.I. Zaprudnov[✉], G.A. Gorbacheva

BMSTU (Mytishchi branch), 1, 1st Institutskaya st., 141005, Mytishchi, Moscow reg., Russia

zaprudnovvi@bmstu.ru

The results of theoretical studies of the strength and deformations arising under the action of eccentrically applied loads on three-layer wall structures with a monolithic connection of the outer layers of concrete with the middle layer of wood-cement composite are presented. It has been revealed that the stress-strain state of the elements of a three-layer wall panel under an eccentrically applied load can be obtained by studying a compressed-bent plate if the eccentrically applied vertical load is decomposed into two components – a compressive central load and a bending moment that creates a bending of the plate from its plane. It has been established that the plate calculation theory, based on the three-dimensional equations of the theory of elasticity, is carried out in this case on the basis of the concept of a homogeneous stress-strain state of a thin-walled element. However, the answer to these equations, due to the complex nature of the stress state and the unknown, as a rule, displacement functions, causes certain mathematical difficulties. It has been established that three-layer structures made of different types of concrete, which are continuously connected to each other along the entire surface of contact, should be made load-bearing, self-supporting, and reinforced with a frame, with the working reinforcement located in the load-bearing concrete layers. Analytical expressions have been obtained to determine the distribution of tangential stresses along the x1 axis across the thickness of the panel and to determine the deflection of the panel from an eccentrically applied longitudinal load without any particular difficulties in calculations. It has been established that the results of the research can be used in calculations to determine the bearing capacity and deflections of three-layer wall panels under longitudinal compression with an average thermal insulation and structural layer made of wood-cement material. Methods have been developed for calculating the strength and deformation properties of effective three-layer wall structures with monolithic bonding of the layers. It has been established that the proposed theory of calculating structures with monolithic layer connections is in good agreement with the engineering calculations presented in the regulatory literature and is confirmed by tests of experimental full-scale structures under longitudinal compression and transverse bending.

Keywords: strength and deformation, monolithic wall structures, concrete, wood-cement composite

Suggested citation: Zaprudnov V.I., Gorbacheva G.A. *Prochnost' i deformatsii trekhslonnykh stenovykh konstruksiy so srednim sloym iz drevesno-tsementnogo kompozita* [Strength and deformation of three-layer wall constructions with middle layer of wood-cement composite]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2026, vol. 30, no. 5, pp. 74–82. DOI: 10.17816/2542-1468-2026-5-74-82

References

- [1] Akkerman I.S., Kats YU.M. *Ob effektivnosti mnogoslonykh stenovykh paneley* [On the Efficiency of Multilayer Wall Panels]. *Beton i zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete], 1986, no. 8, pp. 44–45.
- [2] Al'tmuller Ye.M., Glina YU.V. *Monolitnyy beton v sel'skom domostroyenii* [Monolithic Concrete in Rural Housing Construction]. *Zhilishchnoye stroitel'stvo* [Housing Construction], 1985, no. 10, pp. 9–11.
- [3] Bezukhov N.M. *Osnovy teorii uprugosti, plastichnosti i polzuchesti* [Fundamentals of the Theory of Elasticity, Plasticity, and Creep]. Moscow: Vysshaya shkola [Vysshaya Shkola], 1968, 254 p.
- [4] Blazhko V.P., Granik M.YU. *Gibkiye bazal'toplastikovyye svyazi dlya primeneniya v trekhslonnykh panelyakh naruzhnykh sten* [Flexible Basalt-Plastic Ties for Use in Three-Layer External Wall Panels]. *Stroitel'nyye materialy* [Construction Materials], 2015, no. 5, pp. 56–57.
- [5] Vol'mir A.S. *Ustoychivost' deformirovannykh sistem* [Stability of deformed systems]. Moscow: Nauka, 1967, 984 p.
- [6] Danel' V.V. *Styk naruzhnykh stenovykh paneley s monolitnym zhelezobetonnyim poyasom* [Joint of external wall panels with a monolithic reinforced concrete belt]. *Zhilishchnoye stroitel'stvo* [Housing construction], 2013, no. 7, pp. 12–13.
- [7] *Instruktsiya po proyektirovaniyu konstruksiy panel'nykh zhilykh zdaniy. VSN 32 – 77* [Instructions for the design of panel residential building structures VSN 32–77]. Moscow: Stroyizdat, 1978, 180 p.
- [8] Gara F., Ragni L., Roia D., Dezi L. Experimental tests and numerical modelling of wall sandwich panels. *Eng. Struct.*, 2012, v. 37, pp. 193–204.
- [9] Andreev V.I., Turusov R.A., Tsybin N.Y. Application of the Contact Layer in the Solution of the Problem of Bending the Multilayer Beam. *Procedia Engineering*, 2016, v. 153, pp. 59–65.
- [10] Zaprudnov V.I., Sanaev V.G., Karpachev S.P., Levushkin D.M., Gorbacheva G.A. The influence of chemical additives on strength of wood-cement composite: materials Science Forum, 2019, t. 972, pp. 69–76.
- [11] Gamaliy Ye.A., Kostina S.A. *Optimizatsiya tekhnologii trekhslonnykh zhelezobetonnykh naruzhnykh stenovykh paneley na OOO «Betotek» g. Chelyabinsk* [Optimization of the technology of three-layer reinforced concrete external wall panels at Betotek LLC, Chelyabinsk]. Nauka YUUrGU: mater. 63-y nauch. konf. [Science SUSU: Proc. of the 63rd scientific conf.]. Chelyabinsk, April 10–13, 2011. Chelyabinsk: SUSU Publishing Center, 2011, v. 1, pp. 109–113.
- [12] Granovskiy A.V., Chupanov M.R., Kovrigin A.G., Maslov A.V. *Eksperimental'nyye issledovaniya trekhslonnykh stenovykh paneley na deystviye dinamicheskoy nagruzki* [Experimental Studies of Three-Layer Wall Panels Under Dynamic Load]. *Zhilishchnoye stroitel'stvo* [Housing Construction], 2018, no. 3, pp. 18–23.

- [13] Ishchuk M.K. *Osobennosti rascheta mnogosloynnykh sten s zhestkimi svyazyami* [Features of Calculation of Multi-Layer Walls with Rigid Ties]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy* [Structural Mechanics and Analysis of Structures], 2018, no. 4 (279), pp. 69–76.
- [14] Zaprudnov V.I. *Trekhslonnyye konstruksii s drevsno-tsementnymi teploizolyatsionnymi sloyami* [Three-Layer Structures with Wood-Cement Thermal Insulation Layers]. Moscow: MGUL, 2006, 322 p.
- [15] Tkho V.D., Kopol' E.A. *Vliyaniye kontaktnykh sloev na treshchinostoykost' izgibayemykh trekhslonnykh konstruksiy* [Influence of Contact Layers on the Crack Resistance of Bendable Three-Layer Structures]. *Vestnik MGSU* [Bulletin of MGSU], 2020, v. 15, pp. 988–998.
- [16] Tamrazyan A.G. *Metodologiya analiza i otsenki nadezhnosti sostoyaniya i prognozirovaniye sroka sluzhby zhelezobetonnykh konstruksiy* [Methodology for Analysis and Assessment of the Reliability of the State and Forecasting the Service Life of Reinforced Concrete Structures]. *Zhelezobetonnyye konstruksii* [Reinforced Concrete Structures], 2023, no. 1(1), pp. 5–18.
- [17] Filatov Ye.F. *Konstruktivnyye osobennosti trekhslonnykh naruzhnykh stenovykh paneley s diskretnymi svyazyami* [Structural Features of Three-Layer External Wall Panels with Discrete Ties]. *Zhilishchnoye stroitel'stvo* [Housing Construction], 2017, no. 10, pp. 35–40.
- [18] Korol' Ye.A., Pugach Ye.M., Nikolayev A.Ye. *Eksperimental'nyye issledovaniya stsepleniya betonov razlichnoy prochnosti v mnogosloynnykh zhelezobetonnykh elementakh* [Experimental Studies of the Adhesion of Concretes of Different Strengths in Multilayer Reinforced Concrete Elements]. *Tekhnologii betonov* [Concrete Technologies], 2006, no. 4, pp. 54–55.
- [19] Lugovoy A.N. *Povysheniye energoeffektivnosti ograzhdayushchikh konstruksiy* [Improving the Energy Efficiency of Enclosing Concrete Structures]. *Stroitel'nyye materialy* [Construction Materials], 2011, no. 3, pp. 32–33.
- [20] Lugovoy A.N., Kovrigin A.G. *Kompozitnyye gibkiye svyazi dlya trekhslonnykh paneley* [Composite Flexible Ties for Three-Layer Panels]. *Stroitel'nyye materialy* [Construction Materials], 2014, no. 5, pp. 22–24.
- [21] *Posobiye po proyektirovaniyu zhilykh zdaniy. Konstruksii zhilykh zdaniy* [Handbook of Designing Residential Buildings. Constructions of Residential Buildings]. Moscow: Stroyizdat, 1989, iss. 3, 303 p.
- [22] *Rekomendatsii po raschetu i izgotovleniyu izdeliy iz porizovannogo arbolita* [Recommendations for the Calculation and Manufacture of Products from Porous Arbolite]. Moscow: NIIZHB, 1982, 63 p.
- [23] Sapacheva L.V., Yumasheva Ye.I. *Krupnanel'noye domostroyeniye ostayetsya samym bystrym i ekonomichnym* [Large-panel housing construction remains the fastest and most economical]. *Zhilishchnoye stroitel'stvo* [Housing Construction], 2014, no. 10, pp. 3–10.
- [24] Starosta N.A. *Obosnovaniye primeneniya oblegchennykh monolitnykh zhelezobetonnykh perekrytiy* [Justification for the use of lightweight monolithic reinforced concrete floors]. *Molodoy uchenyy* [Young Scientist], 2019, no. 6 (244), pp. 22–28.
- [25] Kolosov G.Ye., Kudryavtsev A.A. *Rezultaty ispytaniy krupnorazmernykh stenovykh paneley i plit pokrytiya iz arbolita* [Test results of large-size wall panels and roof slabs made of arbolite]. *Razvitiye proizvodstva i primeneniye v stroitel'stve effektivnykh konstruksiy i izdeliy iz arbolita* [Development of production and application in construction of efficient arbolite structures and products]. Moscow: Gosstroyizdat, 1981, pp. 33–36.
- [26] Kustikova Y. Model of stressed-strained state of multi-layered reinforced concrete structure with the use of composite reinforcement. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, v. 365, iss. 5, p. 11.
- [27] Korol' E.A., Berlinova M. Calculation of multilayer enclosing structures with middle layer of polystyrene concrete. *MATEC Web Conf*, 2018, v. 193, p. 7.
- [28] Korol' E.A., Kharkin Y.A. To the question of choosing a software package for modeling the stress-strain state of three-layer reinforced concrete elements and structures with a monolithic bond of layers. *Scientific And Technical J. On Construction And Architecture (The Bulletin)*, 2010, v. 3, pp. 156–166.
- [29] Lam T.V., Vu D.T., Dien V.K., Bulgakov B.I., Korol' E.A. Properties and thermal insulation performance of lightweight concrete. *Magazine of Civil Engineering*, 2018, v. 84, iss. 8, pp. 173–191.
- [30] Sanaev V.G., Zaprudnov V.I., Gorbacheva G.A., Oblivin A.N. Factors affecting the quality of wood-cement composites. *Bulletin of the Transilvania University of Braşov Series II: Forestry Wood Industry Agricultural Food Engineering*, 2016, v. 9 (58), no. 2, pp. 63–71.
- [31] *Instruktsiya po proyektirovaniyu, izgotovleniyu i primeneniyu konstruksiy i izdeliy iz arbolita SN 549–82* [Instructions for the design, manufacture, and use of arbolite structures and products SN 549–82]. Moscow: Stroyizdat, 1983, 44 p.
- [32] Khoroshun L.P., Shcherbakov A.S. *Prochnost' i deformativnost' arbolita* [Strength and Deformability of Arbolite]. Kyiv: Naukova Dumka, 1979, 192 p.
- [33] Shcherbakov A.S. *Osnovy povysheniya kachestva arbolita na drevsnykh zapolnitelyakh* [Fundamentals of Improving the Quality of Arbolite on Wood Fillers]. Diss. Dr. Sci. (Tech.). Moscow, 1981, 494 p.
- [34] Shcherbakov A.S., Zaprudnov V.I., Razumovskiy A.V. *Odnorodnoye napryazhenno-deformirovannoye sostoyaniye plit perekrytiy iz drevsno-tsementnykh materialov* [Homogeneous Stress-Strain State of Floor Slabs Made of Wood-Cement Materials]. *Nauchn. tr. MGUL* [Scientific Transactions of Moscow State University of Forestry], 1998, iss. 296, pp. 32–35.
- [35] Tikhonov I.N., Meshkov V.Z., Zvezdov A.I., Savrasov I.P. *Effektivnaya armatura dlya zhelezobetonnykh konstruksiy zdaniy, proyektiruyemykh s uchetom vozdeystviya osobykh nagruzok* [Effective reinforcement for reinforced concrete structures of buildings designed taking into account the impact of special loads]. *Stroitel'nyye materialy* [Construction Materials], 2017, no. 3, pp. 39–45.

Authors' information

Zaprudnov Vyacheslav Il'ich ✉ — Dr. Sci. (Tech.), Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), zaprudnovvi@bmstu.ru

Gorbacheva Galina Aleksandrovna — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), gorbacheva@bmstu.ru

Received 19.01.2026.

Approved after review 14.05.2026.

Accepted for publication 20.08.2026.

Вклад авторов: все авторы в равной доле участвовали в написании статьи
 Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
 Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article
 The authors declare that there is no conflict of interest