

## Механика разрушения трехслойной стеновой панели на основе каркасного бетона

А.О. Сыромясов<sup>1</sup>✉, Ю.А. Макаров<sup>1</sup>✉, Т.Ф. Ельчищева<sup>2</sup>✉, В.Т. Ерофеев<sup>3</sup>✉, Д.А. Кожанов<sup>4</sup>✉

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, Саранск, Российская Федерация

<sup>2</sup> Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Российская Федерация

<sup>3</sup> Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Российская Федерация

<sup>4</sup> Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, Нижний Новгород, Российская Федерация

✉ syall@yandex.ru

Поступила в редакцию: 17 июля 2025 г.

Доработана: 10 сентября 2025 г.

Принята к публикации: 19 сентября 2025 г.

**Аннотация.** Моделируется распределение напряжений в трехслойной каркасной стеновой панели с жестким контактом между слоями. Для расчета использован конечно-элементный пакет ANSYS Workbench. Значения критериев разрушения (главного и эквивалентного напряжений) вычислены вблизи концентраторов напряжений, т.е. ребер, разделяющих нагруженные и закрепленные грани панели. Получено, что разрушение начинается на границе нагруженного и ненагруженного слоев изделия. Показано, что теплоизоляционный слой из крупнопористого бетона, расположенный в центре панели, способен участвовать в восприятии части нагрузки, приходящейся на несущий слой. В связи с этим несущая способность конструкций, изготовленных по каркасной технологии, существенно повышается за счет частичного нагружения теплоизолирующего слоя. Поэтому каркасная панель может выдерживать большие нагрузки по сравнению с панелями, имеющими гибкие связи. Кроме того, показано, что термическое сопротивление трехслойной каркасной панели вдвое выше, чем у однослойной панели такой же толщины. Тем самым использование каркасных панелей является эффективным средством сохранения тепла в зданиях.

**Ключевые слова:** компьютерное моделирование, многослойные ограждающие конструкции, прочность, крупнопористый бетон, теплоизоляционные свойства, конечно-элементный анализ

**Заявление о конфликте интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Вклад авторов:** Сыромясов А.О. — математическая модель, проведение расчетов, создание иллюстраций, написание текста; Макаров Ю.А. — математическая модель, создание иллюстраций, написание текста; Ельчищева Т.Ф., Кожанов Д.А. — сбор материала, проверка результатов расчета; Ерофеев В.Т. — научное руководство, постановка задачи, литературный обзор. Все авторы ознакомлены с окончательной версией статьи и одобрили ее.

**Для цитирования:** Сыромясов А.О., Макаров Ю.А., Ельчищева Т.Ф., Ерофеев В.Т., Кожанов Д.А. Механика разрушения трехслойной стеновой панели на основе каркасного бетона // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2025. Т. 21. № 5. С. 432–440. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2025-21-5-432-440> EDN: EDACPF

**Сыромясов Алексей Олегович**, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры прикладной математики, Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, Российская Федерация, 430005, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68/1; eLIBRARY SPIN-код: 7617-8578, ORCID: 0000-0001-6520-0204; e-mail: syall@yandex.ru

**Макаров Юрий Алексеевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной математики, Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, Российская Федерация, 430005, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68/1; eLIBRARY SPIN-код: 4679-9363, ORCID: 0000-0002-6242-4138; e-mail: makarov.yura75@mail.ru

**Ельчищева Татьяна Федоровна**, кандидат технических наук, заведующий кафедрой архитектуры и градостроительства, Тамбовский государственный технический университет, Российская Федерация, 392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106/5; eLIBRARY SPIN-код: 9764-3898, ORCID: 0000-0002-0241-3808; e-mail: elschevat@mail.ru

**Ерофеев Владимир Трофимович**, доктор технических наук, профессор кафедры строительного материаловедения, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Российская Федерация, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; eLIBRARY SPIN-код: 4425-5045, ORCID: 0000-0001-8407-8144; e-mail: erofeevvt@bk.ru

**Кожанов Дмитрий Александрович**, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры теории сооружений и технической механики, Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, Российская Федерация, 603000, г. Нижний Новгород, ул. Ильинская, д. 65; eLIBRARY SPIN-код: 8722-2173, ORCID: 0000-0002-8443-1291; e-mail: pbk996@mail.ru

© Сыромясов А.О., Макаров Ю.А., Ельчищева Т.Ф., Ерофеев В.Т., Кожанов Д.А., 2025



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

# Fracture Mechanics of a Three-Layer Wall Panel Based on Two-Stage Concrete

Alexey O. Syromyasov<sup>1</sup>✉, Yuri A. Makarov<sup>1</sup>, Tatiana F. Elchishcheva<sup>2</sup>,  
Vladimir T. Erofeev<sup>3</sup>, Dmitry A. Kozhanov<sup>4</sup>

<sup>1</sup> National Research Mordovian State University named after N.P. Ogarev, Saransk, Russian Federation

<sup>2</sup> Tambov State Technical University, Tambov, Russian Federation

<sup>3</sup> National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation

<sup>4</sup> Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, Nizhny Novgorod, Russian Federation

✉ syal1@yandex.ru

Received: July 17, 2025

Revised: September 10, 2025

Accepted: September 19, 2025

**Abstract.** Stress distribution in a three-layer wall panel based on two-stage concrete with rigid contact between the layers is modelled. The calculation is performed in ANSYS Workbench finite-element software. Values of failure criteria (principal stress and equivalent stress) are calculated near stress concentrators, i.e. edges separating the loaded and fixed faces of the panel. It is obtained that fracture begins at the boundary between the loaded and non-loaded layers of the structure. It is shown that the thermal insulation layer made of porous concrete in the center of the panel can carry part of the load acting on the bearing layer. So, structures made using the two-stage technology may withstand loads that are higher compared to that of panels with flexible ties. Moreover, it is shown that thermal resistance of the three-layer two-stage concrete panel is twice as high as for a single-layer panel of the same width. Therefore, the use of two-stage concrete panels is an effective measure for heat conservation in buildings.

**Keywords:** computer modeling, multilayer enclosing structures, strength, porous concrete, thermal insulation properties, finite-element analysis

**Conflicts of interest.** The authors declare that there is no conflict of interest.

**Authors' contribution:** Syromyasov A.O. — mathematical model, numerical calculations, text and illustrations; Makarov Yu.A. — mathematical model, text and illustrations; Elchishcheva T.F., Kozhanov D.A. — data collection, verification of numerical results; Erofeev V.T. — supervision, problem statement, literature review. All authors read and approved the final version of the article.

**For citation:** Syromyasov A.O., Makarov Yu.A., Elchishcheva T.F., Erofeev V.T., Kozhanov D.A. Fracture mechanics of a three-layer wall panel based on two-stage concrete. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2025;21(5): 432–440. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2025-21-5-432-440> EDN: EDACPF

## 1. Введение

Стены здания являются одним из основных конструктивных элементов, обеспечивающих восприятие нагрузок, а также пространственную жесткость и устойчивость всего сооружения [1]. Наружные стены помимо несущей функции выполняют также и функцию ограждающую, создавая в помещениях здания благоприятный для человека микроклимат. Поэтому для их изготовления все чаще используются эффективные материалы и технологии, обеспечивающие прочность и устойчивость изделий к агрессивным средам и внешним нагрузкам [2], достаточные теплозащитные и звукоизоляционные свойства [3].

Требуемые значения несущей способности и термического сопротивления конструкций зданий определяются исходя из различных критериев, включая экономические [4]. Известно, что наиболее экономичными по расходу материала и по технологии возведения являются стены из сборных однослойных и многослойных железобетонных панелей.

Однослойные панели достаточно прочны и технологичны, однако их теплозащитные свойства недостаточны для жилых зданий в регионах с холодными климатическими условиями. Поэтому в настоящее время такие стены применяются в регионах с теплым климатом или при строительстве производственных и сельскохозяйственных зданий.

По сравнению с однослойными, многослойные панели значительно более эффективны с тепло-технической точки зрения. Такая панель представляет собой вкладыш (утеплитель) из материала с низкими теплопроводностью, плотностью и прочностью [5], например, из минеральной ваты или стекловаты, заключенный между наружным и внутренним слоями. Наружный слой, изготовленный

из конструкционного бетона, защищает утеплитель от внешних воздействий. Внутренний слой является несущим и предназначен для восприятия нагрузки от перекрытий; к нему же посредством гибких связей, железобетонных ребер или шпонок крепятся слой утеплителя и наружный фактурный слой.

Однако наряду с преимуществами слоистые панели обладают существенными недостатками [6; 7]:

- недолговечность утеплителя и гибких связей, требующих антикоррозионной защиты;
- отсутствие надежного соединения вкладыша с бетонными слоями, обусловленное дискретностью расположения гибких связей;
- образование мостиков холода между наружным и внутренним слоями за счет высокой теплопроводности гибких металлических связей;
- неравномерное распределение теплоты в ограждении и образование конденсата в межслойном пространстве вследствие различия в теплотехнических характеристиках слоев.

Следствиями этих недостатков служат исключение совместной работы бетонных слоев при восприятии внешних нагрузок, склонность к значительным сдвиговым деформациям за счет деформирования среднего слоя и недолговечность подобных панелей.

Альтернативой слоистым панелям являются трехслойные стеновые панели на основе каркасных бетонов с монолитной связью между слоями, изготавливаемые по специальной технологии [8]. Такие изделия состоят из двух слоев плотного керамзитобетона, между которыми расположен средний слой крупнопористого керамзитобетона. Использование последнего из упомянутых бетонов в качестве утеплителя позволяет создавать материалы с повышенными показателями прочности и жесткости и пониженной теплопроводностью, а также устраняет конструктивные недостатки, присущие трехслойным панелям с вкладышами. Например, слой из крупнопористого бетона способен эффективно отводить сконденсированную влагу [9]. В эксплуатационных условиях с биологически активными средами панели на основе каркасных бетонов в меньшей степени подвержены биодegradации [10; 11]. В свою очередь, биостойкость способствует сохранению физико-механических свойств строительных изделий [12].

Крупнопористый бетон имеет надежное сцепление с внешними бетонными слоями и способен оказывать сопротивление сдвигу. Жесткий контакт слоев позволяет рассматривать панель как монолитную, в то время как панели с вкладышами являются составными объектами. Совместная работа бетонов различных видов, образующих единое сплошное сечение, исследована, например, в работах [13; 14].

Известны методы расчета и дополнительные гипотезы, учитывающие особенности деформирования трехслойных конструкций [15]; в России они также регламентируются с помощью государственных стандартов. Тем не менее поведение этих конструкций при разных режимах деформирования все еще недостаточно изучено, что сдерживает их внедрение в строительство.

Широкие возможности в изучении подобного рода конструкций предоставляет компьютерное моделирование с использованием САЕ-систем. В данной статье такому моделированию подвергается поведение под нагрузкой трехслойной стеновой панели, изготовленной на основе каркасного композита по технологии, описанной в [8] и реализованной на ОАО «ЖБК-1» в г. Саранск (Российская Федерация).

*Цель исследования* — проверка гипотезы о том, что внутренний слой крупнопористого бетона выступает не только как эффективный утеплитель, но и способен участвовать в восприятии части нагрузки, приходящейся на наружный несущий слой.

## 2. Методы

### 2.1. Геометрия и физико-механические характеристики панели

Панель моделируется прямоугольным параллелепипедом длиной  $l = 6$  м, высотой  $h = 1,2$  м и суммарной толщиной всех слоев  $b = 0,4$  м.

Слои выполняют следующие функции:

- внутренний слой 1 является несущим и предназначен для восприятия силовых воздействий от опирающихся конструкций перекрытия здания; толщина этого слоя равна  $\delta_1 = 80$  мм;

■ средний слой 2 является теплоизоляционным, предназначенным для эффективной теплозащиты здания; его толщина рассчитывается исходя из теплотехнических свойств применяемых материалов и требований теплоизоляции к конструкциям зданий различных типов; в настоящем исследовании она принята равной  $\delta_2 = 240$  мм;

■ наружный слой 3 является защитно-декоративным; он защищает утеплитель от внешних климатических воздействий и создает архитектурную выразительность конструкции; толщина этого слоя  $\delta_3$  также равна 80 мм.

Физико-механические характеристики слоев различны и приведены в табл. 1, схема поперечного сечения панели показана на рис. 1.

Коэффициент Пуассона для всех конструктивных слоев одинаков и составляет  $\nu = 0,18$ , теплопроводность указана при условиях эксплуатации ограждающих конструкций А согласно действующим в России нормативным документам — сводам правил<sup>1</sup>.

Применение таких технологий, как дисперсное армирование и т.п., позволяет получать бетоны, у которых прочность на срез  $R_s$  близка к призменной прочности  $R_b$ . Поэтому далее принято допущение, что для слоев изучаемой панели  $R_s = R_b$ .

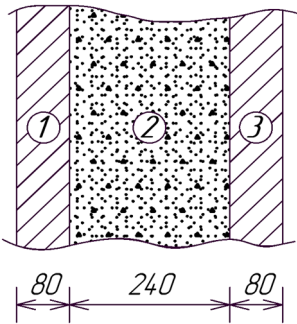


Рис. 1. Фрагмент сечения трехслойной стеновой панели  
Источники: выполнено Ю.А. Макаровым.

Таблица 1

Физико-механические характеристики слоев стеновой панели

Номер и наименование конструктивного слоя	Материал слоя	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Призменная прочность $R_b$ , МПа	Начальный модуль упругости $E$ , МПа	Теплопроводность $\lambda$ , Вт/(м·°C)
1 — внутренний (несущий) слой	Плотный бетон	1800	40	10000	0.483
2 — средний (теплоизоляционный) слой	Крупнопористый бетон	700	10	3500	0.206
3 — наружный (декоративный) слой	Плотный бетон	1800	40	10000	0.483

Источники: данные по механическим свойствам В.Т. Ерофеева.

## 2.2. Проверка теплоизоляционных свойств панели

Сначала была проверена гипотеза о том, что изучаемая трехслойная панель является эффективным теплоизолятором. Для этого ее термическое сопротивление сравнивалось с аналогичной характеристикой однородной панели стандартной однослойной конструкции той же толщины.

Сопротивление теплопередаче многослойной ограждающей конструкции определяется по формуле

$$R_0 = 1/\alpha_B + \sum(\delta_i/\lambda_i) + 1/\alpha_H, \tag{1}$$

где  $\alpha_B = 8,7$  Вт/(м<sup>2</sup>·°C) и  $\alpha_H = 23$  Вт/(м<sup>2</sup>·°C) — коэффициенты теплоотдачи внутренней и наружной поверхностей ограждающей конструкции соответственно, а  $\delta_i$  и  $\lambda_i$  — толщина и теплопроводность  $i$ -го слоя ограждения.

При данном расчете характеристики слоев многослойной панели были взяты из табл. 1; толщина и теплопроводность однослойной панели были приняты равными  $\delta = 400$  мм и  $\lambda = 0,58$  Вт/(м·°C) соответственно.

<sup>1</sup> СП 50.13330.2024. Тепловая защита зданий. Введ. 2024–06–16. Москва : Российский институт стандартизации, 2024. 70 с.

### 2.3. Моделирование нагружения панели

В рамках исследования рассмотрено несколько вариантов нагружения панели из каркасного бетона и из них был выбран тот, который обеспечивает максимальную погонную нагрузку, воспринимаемую панелью без разрушения.

При моделировании считалось, что нижняя и обе боковые грани панели жестко закреплены, причем ширина полосы закрепления  $b_0 \geq \delta_1$ ; иными словами, жестко заделанными являются несущий и (частично) теплоизоляционный слой. Сверху к выделенному таким образом участку панели приложено нормальное усилие (давление)  $P$ ; кроме того, на конструкцию действует сила тяжести  $G$  (рис. 2).

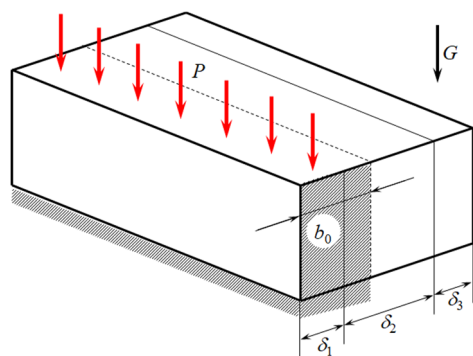


Рис. 2. Схема нагружения панели

И с т о ч н и к: выполнено А.О. Сыромьясовым.

Описанные способы заделки и нагружения моделируют взаимодействие панели с ее соседями снизу и сбоку (через слой цементного раствора), а также опирание на панель межэтажного перекрытия.

Методика компьютерного моделирования трехслойных панелей из каркасного бетона под действием такого рода нагрузок подробно описана в [16]. В связи с тем, что в настоящем исследовании нагруженным является не только несущий, но и теплоизоляционный слой, в нее потребовалось внести незначительные уточнения. Методика учитывает тот факт, что вследствие нагружения панели только по части площади поперечного сечения ее материал находится в сложном напряженном состоянии, и описать критериальные параметры прочности моделью одноосного напряженного состояния нельзя. Поэтому при оценке несущей способности панели используются несколько критериев прочности, значения которых проверяются в нескольких разных точках.

При расчетах применялся конечно-элементный пакет ANSYS Workbench, установленный по лицензии на вычислительном кластере Мордовского государственного университета. На рис. 3 приведен один из результатов расчета — общая картина распределения эквивалентных напряжений (по Мизесу) на наружной поверхности панели при нагрузке  $P = 4,55$  МПа и ширине нагруженного слоя  $b_0 = 200$  мм.

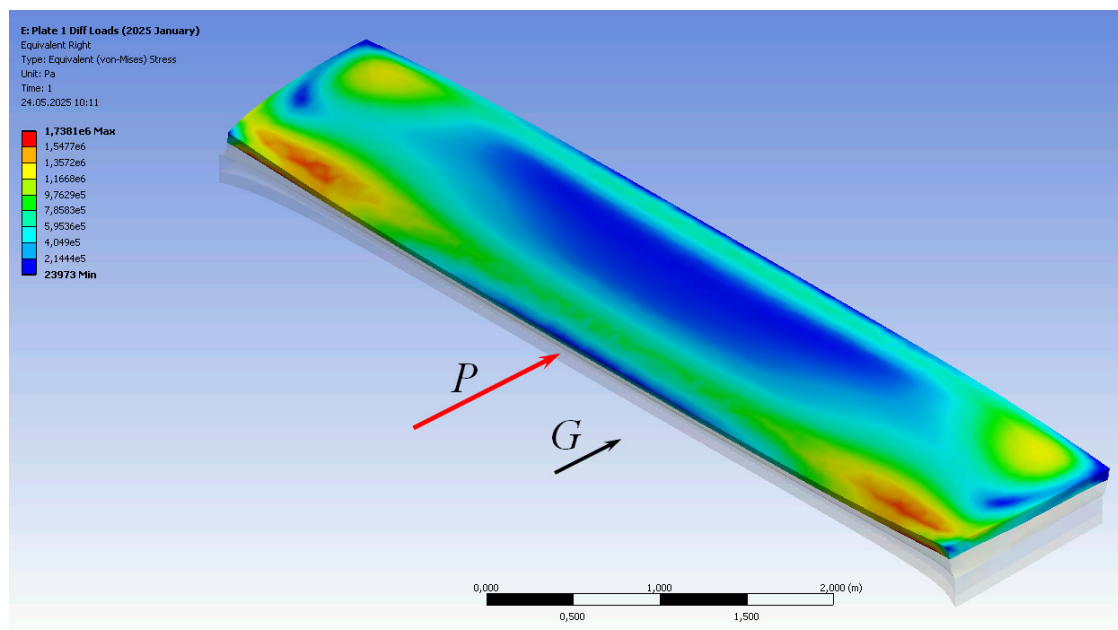


Рис. 3. Распределение эквивалентных напряжений по поверхности панели

И с т о ч н и к: выполнено А.О. Сыромьясовым в пакете ANSYS Workbench.



Разрушение панели наиболее вероятно в области концентрации напряжений, то есть вблизи двух симметрично расположенных ребер  $e$  и  $e'$ , по которым боковые закрепленные грани соприкасаются с верхней нагруженной. Поэтому внутренние напряжения в панели следует рассчитывать вдоль отрезка контрольной прямой  $L$ , проходящей на расстоянии 1 см от боковой и 1 см от верхней грани параллельно ребру  $e$ . Если говорить более конкретно, вычислялись главное нормальное напряжение  $\sigma_1$  и эквивалентное напряжение  $\sigma_{eq}$  в соответствии с четвертой теории прочности (Хубера — Мизеса).

### 3. Результаты и обсуждение

При расчете теплоизоляционных свойств панели из (1) было получено, что термическое сопротивление однослойной конструкции  $R_0 = 0,848 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$ , а для предлагаемой трехслойной  $R_0 = 1,655 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$ . Таким образом, использование многослойных ограждений на основе каркасных бетонов взамен стандартных однослойных панелей такой же толщины позволяет существенно снизить потери тепла в зданиях.

Общее представление о распределении напряжений внутри панели дают графики величин  $\sigma_1$  и  $\sigma_{eq}$  вдоль отрезка  $L$ . Так, на рис. 4 приведен график  $\sigma_{eq}$  при  $b_0 = 200 \text{ мм}$  и  $P = 4,55 \text{ МПа}$ . Значение  $x = 0$  соответствует внутренней границе несущего слоя, а  $x = 400 \text{ мм}$  – внешней грани панели. При других величинах  $b_0$  и  $P$  графики  $\sigma_1$  и  $\sigma_{eq}$  выглядят аналогичным образом.



Рис. 4. Распределение эквивалентных напряжений (по Мизесу) вдоль контрольной прямой

И с т о ч н и к: выполнено А.О. Сыромясовым.

Два пиковых значения критерия разрушения достигаются при  $x = \delta_1$  и  $x = b_0$ , т.е. на границах несущего и теплоизоляционного, а также нагруженного и ненагруженного слоев.

Судя по результатам расчетов, напряжения, возникающие в наружном слое, многократно меньше, чем во внутреннем. Отсюда следует, что нагрузки в наружном слое можно не принимать во внимание. Действительно, механические характеристики двух указанных слоев одинаковы, а значит, разрушение быстрее начнется в более интенсивно нагруженном внутреннем слое.

Исходя из вышесказанного, критерием разрушения панели в рамках данного исследования считается выполнение хотя бы одного из условий:

- на границе несущего и теплоизоляционного слоев (со стороны *несущего* слоя) главное нормальное напряжение  $\sigma_1$  превышает призматическую прочность  $R_b$  несущего слоя *или* эквивалентное напряжение  $\sigma_{eq}$  превышает значение  $1,15R_b$ ;
- на границе несущего и теплоизоляционного слоев (теперь со стороны *теплоизоляционного* слоя) напряжение  $\sigma_1$  превосходит величину  $R_b$  теплоизоляционного слоя *или* эквивалентное напряжение  $\sigma_{eq}$  превосходит величину  $1,15R_b$  этого же слоя;
- на границе нагруженной и ненагруженной областей (внутри теплоизоляционного слоя)  $\sigma_1 > R_b$  *или*  $\sigma_{eq} > 1.15R_b$ , при этом вновь рассматривается призматическая прочность теплоизоляционного слоя.

Тем самым значения  $\sigma_1$  и  $\sigma_{eq}$  проверяются в трех точках  $P_1$ ,  $P_1'$  и  $P_1^*$ , лежащих на пересечении прямой  $L$  и границ указанных выше слоев.

Чтобы исследовать влияние вклада теплоизолирующего слоя на величину разрушающих напряжений и несущую способность конструкции, панель нагружалась с увеличением общей ширины нагруженной полосы  $b_0$  от 80 до 200 мм с шагом 40 мм. Результаты расчета приведены в табл. 2.

Таблица 2

Зависимость разрушающего напряжения от ширины нагруженного слоя

Тип критерия	Критическое значение, МПа	Значение, МПа ( $b_0 = 80$ мм)	Значение, МПа ( $b_0 = 120$ мм)	Значение, МПа ( $b_0 = 160$ мм)	Значение, МПа ( $b_0 = 200$ )
		$P = 9,04$ МПа	$P = 5,78$ МПа	$P = 5,15$ МПа	$P = 4,55$ МПа
$\sigma_1(P_1)$	30	<b>30,77</b>	22,99	22,47	21,22
$\sigma_{eq}(P_1)$	34,5	34,17	27,50	26,37	24,62
$\sigma_1(P_1')$	10	9,92	8,23	8,01	7,62
$\sigma_{eq}(P_1')$	11,5	12,10	10,16	9,53	8,80
$\sigma_1(P_1^*)$	10	–	9,55	9,85	<b>10,01</b>
$\sigma_{eq}(P_1^*)$	11,5	–	<b>11,49</b>	<b>11,47</b>	11,36
$\tau_{xz}(P_1)$	–	7,03	8,86	8,69	8,14
$\tau_{xz}(P_1^*)$	–	–	2,65	2,72	2,57

И с т о ч н и к: получено А.О. Сыромясовым с помощью пакета ANSYS Workbench.

В качестве  $P$  указаны давления, при которых происходит разрушение панели. При каждом  $b_0$  значения критериев, близкие к максимально допустимым или превысившие их, выделены шрифтом. Для справки приведены также сдвиговые напряжения  $\tau_{xz}$  на границах слоев; как видно, их значения находятся достаточно далеко от критической величины  $R_b$ .

Данные табл. 2 показывают, что разрушение всегда происходит на границе нагруженного и не-нагруженного слоев – в точке  $P_1^*$  (при  $b_0 = 80$  мм она совпадает с  $P_1$ ).

С увеличением ширины  $b_0$  значение разрушающего давления  $P$  падает. Однако ключевую роль играет не величина  $P$  сама по себе, а максимально допустимая воспринимаемая панелью погонная нагрузка  $f = Pb_0$ . Значение  $f$  в зависимости от ширины нагруженного слоя приведено в табл. 3.

Таблица 3

Зависимость погонной нагрузки от ширины нагруженного слоя

$b_0$ , мм	$P$ , МПа	$f = Pb_0$ , кН/м
80	9,04	723,2
120	5,78	693,6
160	5,15	824,0
200	4,55	910,0

И с т о ч н и к: получено А.О. Сыромясовым с помощью пакета ANSYS Workbench.

Тем самым опирание межэтажных перекрытий на полосу шириной 200 мм вместо стандартных 80 мм способно увеличить максимально допустимую нагрузку более чем на 25 % – с 723,2 кН/м до 910,0 кН/м.

Многослойные панели с вкладышами подобного свойства не имеют, поскольку их теплоизоляционные слои выполнены из материалов, которые не могут быть несущими. Вся нагрузка в таких панелях воспринимается исключительно узким внутренним несущим слоем.

Дальнейшее повышение несущей способности изделий на основе каркасных бетонов может быть достигнуто, например, путем модификации цементного вяжущего полимерными соединениями [17; 18], тонкодисперсными наполнителями [19; 20] и наночастицами [21; 22].

#### 4. Заключение

Исучено поведение нагруженной трехслойной панели, изготовленной по каркасной технологии. Взаимодействие панели с соседними моделировалось путем жесткого закрепления трех ее граней, приложенное к верхней грани давление отражало воспринимаемую панелью нагрузку. В ходе исследования проверялось предположение, что внутренний (теплоизоляционный) слой каркасного изделия способен частично участвовать в восприятии внешних усилий. Требовалось выяснить, при каких нагрузках изделие начнет разрушаться и где именно это разрушение начнется.

Для вычислений применялся программный комплекс ANSYS Workbench, в котором реализован метод конечных элементов. Особое внимание уделялось расчету критериев разрушения вблизи ребер, вдоль которых нагруженная грань «стыкуется» с закрепленными. В качестве таких критериев были выбраны главное и эквивалентное (по Мизесу) напряжения; предполагалось, что разрушение начнется, если хотя бы один из них превысит «опасное» значение. Величина приложенного давления и ширина нагруженной части в расчетах варьировались.

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. Разрушение панели происходит на границе нагруженного и ненагруженного слоев вблизи ребра — концентратора напряжений.

2. При увеличении ширины нагруженной части величина разрушающего давления может падать за счет того, что нагружению подвергается менее прочный теплоизоляционный слой. Однако разрушающая погонная нагрузка при этом растет за счет увеличения площади участка, эту нагрузку воспринимающего.

3. Из предыдущего вывода следует, что путем частичного нагружения теплоизоляционного слоя несущая способность панелей, изготовленных по каркасной технологии, может быть существенно повышена по сравнению с панелями, содержащими вкладыш из минеральной ваты или иного теплоизолятора, поскольку такие вкладыши нагружать нельзя.

Кроме того, в исследовании показано, что трехслойные панели на основе каркасного бетона по сравнению со стандартными однослойными панелями той же толщины обладают вдвое большим термическим сопротивлением, что делает использование каркасных изделий эффективным методом сохранения тепла.

#### Список литературы

1. Шеина С.Г., Умнякова Н.П., Федяева П.В., Миненко Е.Н. Лучший европейский опыт внедрения энергосберегающих технологий в жилищном фонде Российской Федерации // Жилищное строительство. 2020. № 6. С. 29–34. <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2020-6-29-34> EDN: GQLQGC
2. Mayhoub O.A., Nasr E.S.A.R., Ali Y.A., Kohail M. The influence of ingredients on the properties of reactive powder concrete: A review // Ain Shams Engineering Journal. 2021. Vol. 12. Issue 1. P. 145–158. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.07.016> EDN: QFSFAB
3. Корнилов Т.А., Эверстова В.Н. Оценка теплозащитных свойств наружных стен из полистиролбетонных блоков каркасно-монолитного здания // Academia. Архитектура и строительство. 2024. № 3. С. 137–144. <https://doi.org/10.22337/2077-9038-2024-3-137-144> EDN: AISSKC
4. Малявина Е.Г., Фролова А.А. Выбор экономически целесообразной теплозащиты зданий на Севере РФ // Жилищное строительство. 2022. № 12. С. 72–78. <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2022-12-72-78> EDN: NMLVMK
5. Сизов В.Д., Павловская А.В. Эффективная многослойная стеновая панель // Наука и техника. 2022. Т. 21. № 5. С. 410–418. EDN: PXHEGF
6. Федосов С.В., Ибрагимов А.М., Гнедина Л.Ю. Проблемы трехслойных ограждающих конструкций // Жилищное строительство. 2012. № 7. С. 9–12. EDN: NRMGFG
7. House M.W., Weiss W.J. Review of microbially induced corrosion and comments on needs related to testing procedures // Proceedings of the 4th International Conference on the Durability of Concrete Structures. ICDCS, 24–26 July 2014. P. 94–103. <https://doi.org/10.5703/1288284315388>



8. *Ерофеев В.Т.* Основы теории технологии получения, расчета физико-механических свойств и показателей химико-биологического сопротивления каркасных строительных композитов // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2022. Т. 18. № 4. С. 283–296. EDN: EOPEXD
9. *Chromkova I., Cechmanek R., Kotlanova M.K.* Effect of silages on concrete and process of its corrosion in the course of time // *Journal of Physics: Conference Series Czechia*, 2024. Vol. 2792. Article no. 012013. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2792/1/012013> EDN: VGGANI
10. *Marquez-Peñaranda J.F., Sanchez-Silva M., Husserl J., Bastidas-Arteaga E.* Effects of biodeterioration on the mechanical properties of concrete // *Materials and Structures*. 2016. Vol. 49. P. 4085–4099. <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0774-4> EDN: UKSSWN
11. *Ерофеев В., Stepina I., Badamshin R., Afonin V., Smirnov V., Samchenko S., Kozlova I.* Effect of wooden fillers on strength and biodegradation of caustic magnesite // *BioResources*. 2025. No. 20 (3). P. 5790–5800. <https://doi.org/10.15376/biores.20.3.5790-5800>
12. *Ерофеев В., Rodin A.I., Karpushin S.N., Klyuev S.V., Sabitov L.S.* Biological and climatic resol. 307 LNCE. P. 168–179. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-20459-3\\_22](https://doi.org/10.1007/978-3-031-20459-3_22)
13. *Устарханов О.М., Муселемов Х.М., Устарханов Т.О., Гаппаров Х.М.* Влияние сближения слоев трехслойной конструкции на ее напряженно-деформированное состояние // *Вестник машиностроения*. 2020. № 12. С. 34–37. EDN: STEQPQ
14. *Зотов А.А., Волков А.Н., Бойков А.А.* Проектирование и изготовление по технологии 3D-печати трехслойной сферической оболочки с дискретным наполнителем // *Вестник машиностроения*. 2020. № 8. С. 41–44. EDN: IBBBEF
15. *Zhu P., Lei Z.X., Liew K.M.* Static and free vibration analyses of carbon nanotube-reinforced composite plates using finite element method with first order shear deformation plate theory // *Composite Structures*. 2012. Vol. 94. No. 4. P. 1450–1460. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2011.11.010>
16. *Сыромясов А.О., Макаров Ю.А., Ерофеев В.Т.* Моделирование разрушения внецентренно нагруженной стеновой панели, изготовленной по каркасной технологии // *Журнал Средневолжского математического общества*. 2024. Т. 26. № 3. С. 313–325. <https://doi.org/10.15507/2079-6900.26.202403.313-325> EDN: OVZIIR
17. *Kujawa W., Olewnik-Kruszkowska E., Nowaczyk J.* Concrete strengthening by introducing polymer-based additives into the cement matrix — A mini review // *Materials*. 2021. Vol. 14. No. 20. Article no. 6071. <https://doi.org/10.3390/ma14206071> EDN: RSGPHH
18. *Salazar B., Aghdasi P., Williams I.D. et al.* Polymer lattice-reinforcement for enhancing ductility of concrete // *Materials and Design*. 2020. Vol. 196. Article no. 109184. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.109184> EDN: DOYCNX
19. *Vishwakarma V., Sudha U., Ramachandran D. et al.* Enhancing antimicrobial properties of fly ash mortars specimens through nanophase modification // *Materials Today Proceedings*. 2016. Vol. 3. No. 6. P. 1389–1397. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2016.04.020>
20. *Senhadji Y., Escadeillas G., Mouli M. et al.* Influence of natural pozzolan, silica fume and limestone fine on strength, acid resistance and microstructure of mortar // *Powder Technology*. 2014. Vol. 254. P. 314–323. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.01.046>
21. *Fan Y., Zhang S., Wang Q., Shah P.S.* The effects of nano-calcined kaolinite clay on cement mortar exposed to acid deposits // *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 102. P. 486–495. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.11.016>
22. *Hendi A., Rahmani H., Mostofinejad D., Tavakolinia A., Khosravi M.* Simultaneous effects of microsilica and nanosilica on self consolidating concrete in a sulfuric acid medium // *Construction and Building Materials*. 2017. Vol. 152. P. 192–205. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.165>