

УДК 69:69.07:692:699.86:699.88

Анализ напряженно-деформированного состояния узловых соединений высотных зданий при учете климатических воздействий

Т. А. Белаш¹, А. В. Кузнецов², Д. Г. Володченко²

¹ АО «Научно-исследовательский центр «Строительство», 109428, Россия, Москва, 2-я Институтская ул., 6

² Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: *Белаш Т. А., Кузнецов А. В., Володченко Д. Г. Анализ напряженно-деформированного состояния узловых соединений высотных зданий при учете климатических воздействий // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 1. С. 85–102. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-01-85-102*

Аннотация

Цель: проанализировать конструктивные решения узлов сопряжения перекрытий с наружными стенами в зданиях, возводимых по монолитной технологии. Выявить дефекты и повреждения, возникающие на фасадах и дисках перекрытий с перфорацией под термовкладыши в процессе возведения и эксплуатации. Исследовать численными методами напряженно-деформированное состояние диска перекрытия на участке узлов сопряжения с наружной стеной с учетом температурных воздействий. **Материалы и методы:** рассмотрен стандартный вариант узлового соединения монолитного здания различной этажности. Фрагмент узла сопряжения диска перекрытия со стеной моделировался в программных комплексах Ansys и SCAD. Модель состояла из анизотропного материала — бетона и включенными в нее арматурными стержнями. Исследовалось поведение напряженно-деформированного состояния при различных температурных воздействиях. **Результаты:** численным способом, с учетом геометрических параметров и температурных нагрузок, выявлены закономерности, влияющие на характер изменений величин нормальных напряжений в характерных сечениях перфорированной плиты. Дана оценка существующим типам конструктивных решений. Определены места зон концентрации напряжений и их влияние на эксплуатационные качества. **Практическая значимость:** показано, что наиболее опасное сечение в перфорированных дисках перекрытиях под термовкладыши проходит в местах шпоночных соединений. Определено, что уязвимость в таких соединениях вызвана влиянием знакопеременных циклических температур. Установлены закономерности, приводящие к росту нормальных напряжений в местах концентрации напряжений. Предложены принципиально новые конструктивные решения, защищенные патентами на полезные модели, позволяющие снизить значения напряжений и тем самым обеспечить более высокие эксплуатационные качества в монолитных зданиях, включая и высотные.

Ключевые слова: метод конечных элементов, напряженно-деформированное состояние, железобетонные монолитные перекрытия, численные методы расчета, температурно-климатические воздействия, конструктивные решения.

Введение

В урбанизированной среде Российской Федерации монолитное домостроение является наиболее распространенным типом гражданского строительства [1]. Высокие темпы возведения монолитных зданий [4] способствуют решению социальных задач, связанных с приоритетными направлениями государственной жилищной политики. Массовое возведение таких многоэтажных комплексов характеризуется перекрестно-стеновой конструктивной схемой. Конструктивные решения наружных стен представляют собой чаще всего трехслойные стеновые конструкции (внутренний слой – утеплитель – лицевой слой), опирающиеся на консольную часть монолитного диска перекрытия.

Исследования показали, что для зданий, выполненных по монолитной конструктивной системе, характерны различные варианты устройств узлов сопряжений дисков перекрытий с наружными стеновыми конструкциями [2, 3]. В практике строительства наибольшее распространение получили конструктивные решения, выполненные по типу, представленному на рис. 1. Этот тип

узла отличается наличием участков перфорации в консольной части плиты, заполняемых вкладышами из пенополистирола, или иного теплоизолирующего материала. Шаг перфорации регулярный, ширина перфорации (термовставки) обычно соответствует толщине теплоизоляционного слоя стены и расположена в его створе. Данное решение соответствует рекомендациям, изложенным в СП 230.1325800.2015.

Очевидно, что и стена, и перекрытие в области соединения представляют собой тепло-технически неоднородные элементы. Однако на практике, из-за ускоренного процесса проектирования, несколько важных эксплуатационных характеристик монолитных зданий на стадии разработки проектной и рабочей документации полностью не учитываются. Среди таких параметров можно выделить тепловлажностный режим помещений, воздействие температурно-климатических условий на напряженно-деформированное состояние узловых соединений монолитных зданий [4], а также вопросы безопасности и долговечности [5, 6, 7]. Также в связи со сжатыми

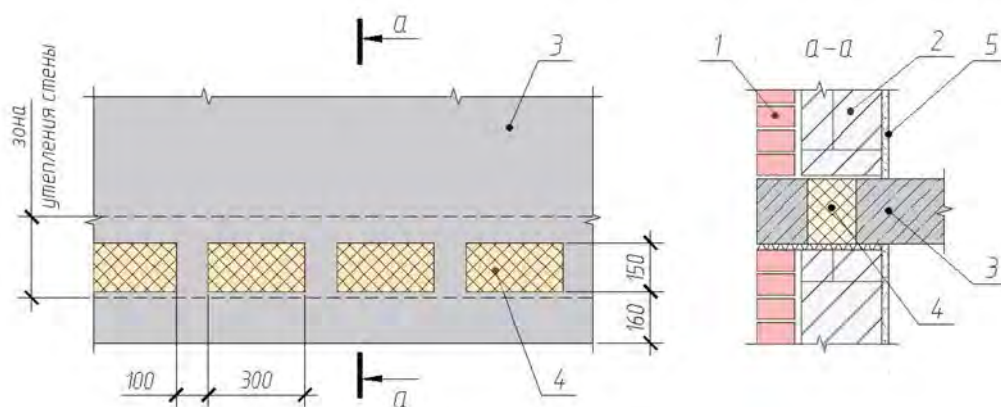


Рис. 1. Стандартный узел сопряжения диска перекрытий с наружной стеной:

- 1) наружный (лицевой) слой — лицевой кирпич; 2) внутренний слой — газобетон;
- 3) диск перекрытия; 4) теплоизоляция (термовкладыш); 5) отделочный слой

сроками строительства наблюдаются отступления от рабочей документации, приводящие к дефектам конструкции, возникающим при производстве работ [5].

Недооценка важности учета климатических воздействий, недостаточная информированность инженеров о сложных микропроцессах, протекающих в нагруженных конструкциях, работающих в условиях переменной температуры и влажности и отсутствие однозначной методики учета указанных воздействий, на стадии проектирования и строительства монолитных зданий приводит к различным дефектам и повреждениям как ограждающих, так и несущих элементов конструкций [9–11].

Проведенные натурные исследования узлов вышеуказанной конструкции выявили их недостаточные эксплуатационные качества, такие как: теплотехнические дефекты и повреждения в виде трещин, деструкции материала в местах сопряжения узловых соединений железобетонных перекрытий с наружными стеновыми конструкциями из штучного материала [12, 13]. Причиной выявленных дефектов могут быть ошибки и недоработки в проектной документации, отступления от проекта на стадии возведения зданий, а также отсутствие удобной методики учета данных механизмов воздействия на конструкции. Совокупность указанных факторов может спровоцировать аварийные ситуации [14, 15, 16, 17], а в перспективе привести к значительным технико-экономическим затратам, связанных с ремонтом и восстановлением эксплуатационных качеств.

Методы исследования

В соответствии с Приложением Г.3, СП 230.1325800.2015 вариативность шага перфорации a/b принимается в диапазоне от 1/1 до

1/5 с последующим устройством термовкладышей в торцевой части плиты перекрытия. Однако наиболее широкое распространение получило соотношение 3/1, так как меньшая доля утеплителя в конструкции плиты увеличивает значения удельных тепловых потерь и может привести к промерзанию перфорированного участка диска перекрытия, а при больших соотношениях возникает необходимость проверки прочности несущей конструкции. Нужно отметить, что большинство проектировщиков принимают шаг перфорации 3/1, по умолчанию, без учета конструкции стены. И если в случае балконного вылета обычно производится минимальный комплекс расчетов по предельным состояниям, то со стороны торцов плит перекрытий несущая способность шпонок и торцевого бруса считается обеспеченной по умолчанию. Общая схема перфорации диска перекрытия представлена на рис. 2, на котором обозначены основные геометрические параметры, длина термовкладыша — a , длина шпонки — b , ширина термовкладыша — dt , толщина плиты — t .

С целью снижения влияния мостиков холода на микроклимат помещений применяется перфорация плиты для установки термовкладышей из пенополистирола или другого материала, обладающего хорошими теплоизолирующими свойствами. Важно геометрически совмещать размещение термовкладыша в перфорации с утеплителем в стене, что предусмотрено, например СП 230.1325800, однако в условиях стройплощадки это требование не всегда выполняется [30].

При разработке конструктивных решений узловых соединений с наружной ненесущей многослойной стеной для обеспечения требуемых показателей энергоэффективности монолитных зданий принято руководствоваться

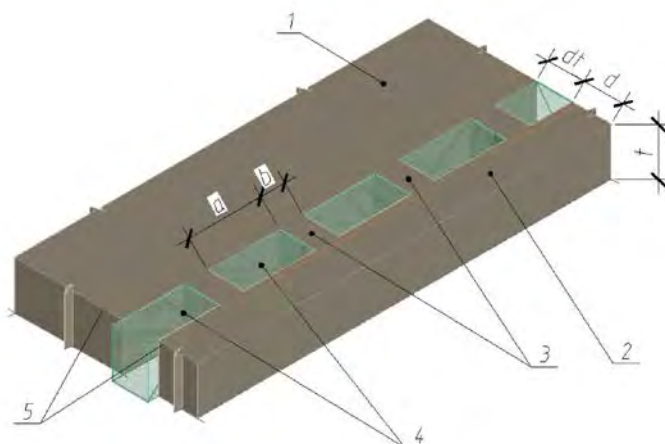


Рис. 2. Схема расположения торца диска перекрытия с перфорацией: 1 — перекрытие; 2 — торцевой брус; 3 — шпонки; 4 — перфорация, заполненная утеплителем; 5 — зона утеплителя стены

Приложением Г.3, СП 230.1325800, в котором представлены значения удельной потери теплоты ψ , Вт/(м·°С) для различных вариантов конструкции наружных стен. Однако в литературных источниках сведения о влиянии отношения a/b на напряженно-деформированное состояние (далее — НДС) плиты перекрытия в зоне перфорации при температурных воздействиях отсутствуют [18, 19, 20]. Несмотря на большой объем выполненных ранее исследований, анализ совместного действия внешних нагрузок от веса наружной стены и от температурных перепадов на НДС торцевого бруса и бетона между участками перфорации также в достаточном объеме в литературе практически не рассматривался. Обычно этими напряжениями пренебрегают в силу их предполагаемой малости, тем не менее для того, чтобы убедиться в справедливости данного допущения следует произвести соответствующий анализ.

Рассмотрим монолитное здание с перекрестно-стеновой конструктивной схемой, с узлом примыкания наружных стен, выполненным с устройством перфорации в торце

плиты. Выделим типовой фрагмент диска перекрытия с перфорацией — на прямом участке фасада между поперечными несущими стенами. Ниже, на рис. 3 приведен вариант армирования торцевого участка плиты при наличии перфорации.

Оценка и анализ НДС трехмерной расчетной модели перфорированного диска перекрытия от температурно-климатических воздействий проводился численными методами в программном комплексе ANSYS. В качестве граничных условий принимался наиболее неблагоприятный вариант температурного воздействия для Санкт-Петербурга: нормативные значения изменений средних температур по сечению элемента в теплом и холодное время года: $\Delta t_w = 20,1$ °С и $\Delta t_c = -25,96$ °С.

Для учета усилий и напряжений, возникающих в торцевом бруске и шпонках от собственного веса плиты перекрытия и веса стеновых конструкций, была создана модель в расчетном комплексе SCAD. Класс бетона принят В20, класс арматуры А500. В каждой шпонке предусмотрено размещение 4 стержней

диаметром 12 мм из арматуры А500. Эти данные аналогичны ранее созданной модели ANSYS для анализа температурных напряжений.

Модель выстроена при помощи объемных элементов (тип 36–8-узловой изопараметрический конечный элемент) с размером стороны 1 см. Эскиз расчетной модели представлен на рис. 3. Расчет выполнен в линейной постановке. Нагрузка от собственного веса перекрытия задается автоматически по объемному весу материала $24,525 \text{ кН/м}^3$. Нагрузка от ограждающей конструкции задается в виде равномерно распределенной по полосам, представляющим собой проек-

ции каждого из слоев наружной стены. При использовании усредненного по площади значения нагрузки, значения напряжений уменьшились примерно на 18%, данное упрощение неприемлемо, для дальнейших расчетов нагрузка от слоев стены прикладывается дифференцированно.

Номера сечений 2–2 и 6–6 соответствуют сечениям, в которых наблюдались наибольшие усилия от воздействия перепада температур. Сечение 8–8 (по внутренней, ближайшей к зданию плоскости шпонки, принято для рассмотрения, так как согласно температурному расчету, температура в этом сечении может достигать отрицательных величин).

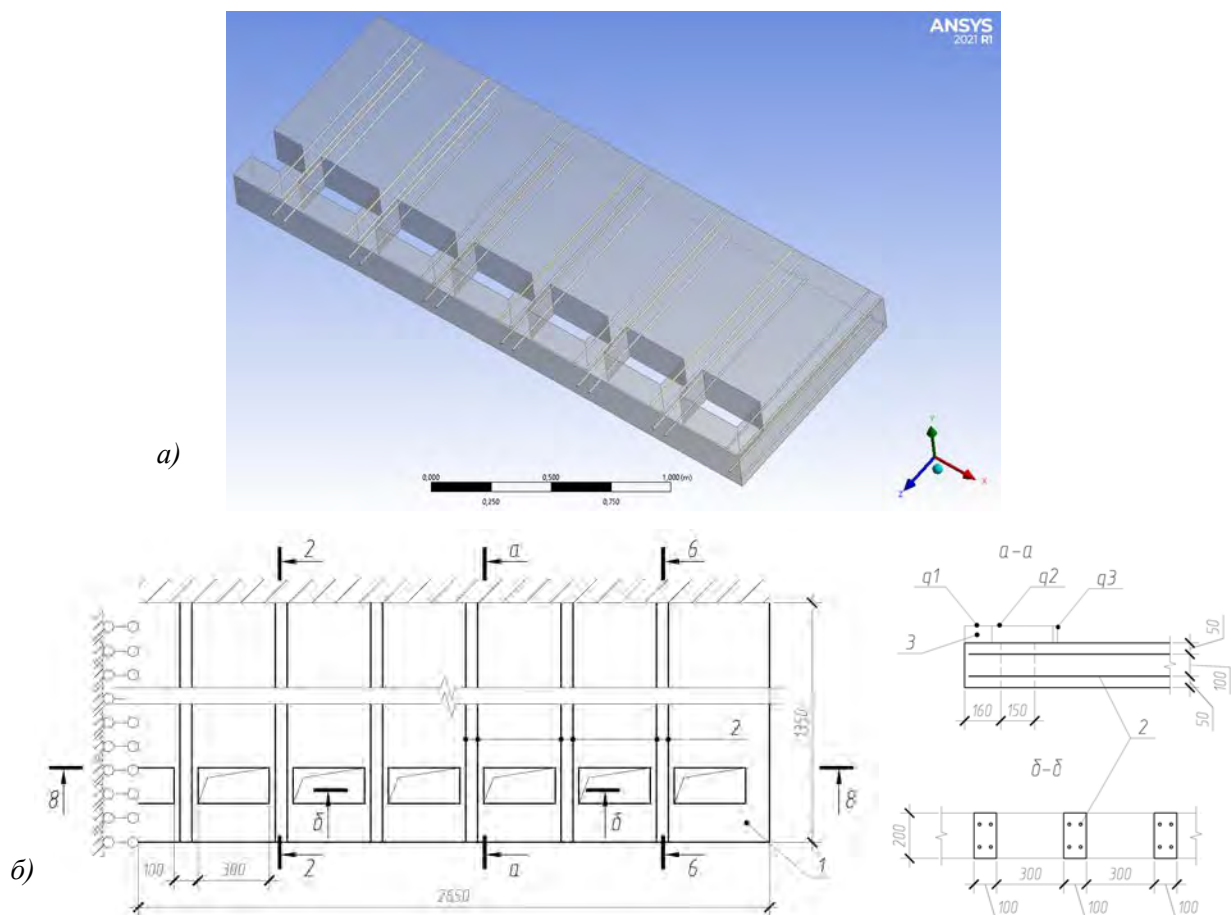


Рис. 3. Расчетная схема фрагмента плиты в зоне устройства перфорации:

а) общий вид расчетной модели; б) геометрические параметры расчетной модели.

1 — железобетонное перекрытие; 2 — арматура; 3 — нагрузки от наружной стены

Дальнейшая оценка напряженно-деформированного состояния узла может быть произведена с учетом физической нелинейности деформирования железобетона, приводящей к неоднородности прочностных и деформационных свойств бетона и арматуры, а также с учетом образования и раскрытия трещин [21]. Перераспределение напряжений между бетоном и арматурой внутри элемента приведет к уменьшению их наибольших величин. Данный подход позволит построить модель, соответствующую реальной работе материала.

Расчетные модели, адекватно отражающие сложное напряженное состояние, возникающее при температурно-влажностных и силовых воздействиях на несущие конструкции, помогут получить обоснование более эффективных проектных решений в строительстве.

При объединении результатов температурного и статического расчетов выяснилось, что комплексы имеют разные системы ориентации осей (рис. 4), поэтому было принято решение все дальнейшие вычисления производить в системе отсчета SCAD (правая декартова система координат).

Результаты и обсуждения

Перепады температуры и влажности наружного воздуха, а также солнечной радиации оказывают влияние на напряженно-деформированное состояние (НДС) элементов несущих конструкций, расположенных в зоне непосредственного воздействия климатических факторов. Стеновые ограждающие конструкции зданий, а также диски перекрытий в зонах устройства перфорации испытывают существенные усилия, которые в ряде случаев являются причиной возникновения различного рода повреждений [22]–[27].

С целью определения характера НДС от температурных воздействий для исследуемой расчетной модели задавались граничные условия в виде температурных нагрузок, приложенных к торцу перфорированного диска перекрытия с наружной стороны и со стороны помещения. Перепады температуры внешней среды задавались в диапазоне от 0 до -40 °С, температура конструкции внутри помещения принималась 20 °С. В результате анализа результатов было определено, что наибольшие напряжения возникали при температуре замыкания $-25,96$ °С. Таким

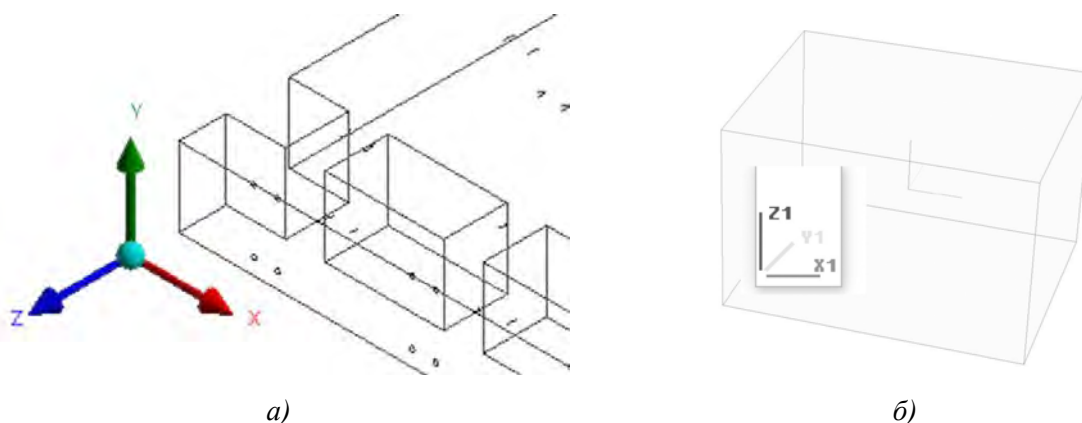


Рис. 4. Системы координат и направление выдачи усилий в расчетных комплексах ANSYS и SCAD: а) общая система координат ANSYS; б) общая система координат SCAD

образом, расчетная разница температур составила $45,96\text{ }^{\circ}\text{C}$.

При построении послойных срезов температурных полей конструкции заданными температурами, в диапазоне от 20 до $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$, было показано появление отрицательных значений температуры конструкции, в зоне расположения шпоночных соединений, со стороны помещения.

При этих же значениях температурных нагрузок определены деформации удлинения (укорочения) торцевого бруса, максимальные значения которых составили $0,75\text{ мм}$ при длине торцевого бруса 2650 мм и соотношении $a/b = 3/1$. Относительные деформации растяжения при этом составили: $\varepsilon = 0,75/2650 = 0,000283$, что не превышает значения предельных относительных деформаций при сжатии $\varepsilon_{b,0} = 0,0034$ и при растяжении $\varepsilon_{b,0} = 0,0025$.

На рис. 5 показан фрагмент диска перекрытия на участке с перфорацией. Сечения, для которых численными исследованиями определялись нормальные напряжения σ_y , приняты в соответствии с рис. 5, а. Зелеными линиями помечены сечения, в которых возникают концентрации напряжений.

Полученные значения сравнивались с расчетным сопротивлением растяжению

$R_{bt} = 0,81\text{ МПа}$ для бетона класса В20 в соответствии с СП 63.13330.2018. Как видно из табл. 1, в расчетных сечениях возникают нормальные напряжения, превышающие расчетное сопротивление растяжению. Изополя напряжений в плите (рис. 6) указывают, что углы прямоугольных отверстий перфорации являются концентраторами напряжений, то есть именно с них будет начинаться процесс разрушения.

Фрагмент узла сопряжения диска перекрытия со стеной исследовался для периода с отрицательными температурами наружного воздуха, что для условий С.-Петербурга соответствует температуре замыкания конструкции, равной $-25,96$ и $20,13\text{ }^{\circ}\text{C}$ при эксплуатации в зимнее время. Рассмотрены нормальные напряжения σ_y с учетом температурных воздействий на конструкцию в холодный период года при соотношении a/b равном $3/1$. Отдельные результаты представлены на рис. 7 в виде эпюр нормальных напряжений σ_y для сечений 2–2/8–8, 6–6/8–8, проходящих по толщине перекрытия через шпонки в поперечном и продольном направлениях.

Для участка, расположенного в зоне сечения 8–8, характер изменений нормальных σ_y напряжений является знакопеременным и находится в диапазоне от $-8,276$ до

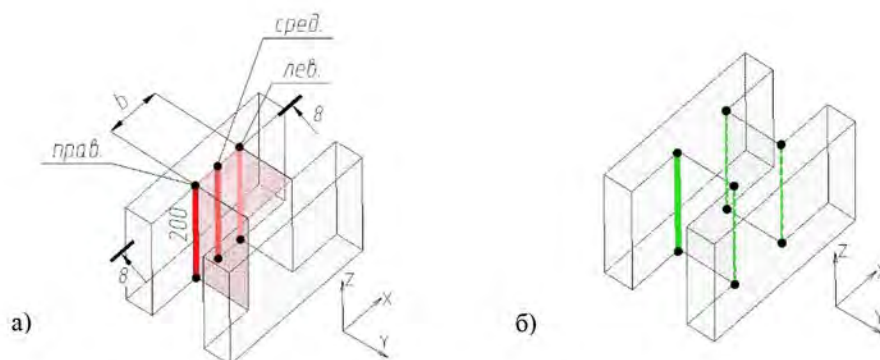


Рис. 5. Схема перемычки между участками перфорации на торце диска перекрытия:
а) характерные сечения для анализа напряжений; б) сечения концентрации напряжений

ТАБЛИЦА 1. Максимальные и минимальные значения напряжений в сечениях 2–2/8–8, 6–6/8–8 от постоянных и температурных нагрузок

Положение	Сечение	Напряжения от перепада температуры $\Delta t = 45,96 \text{ }^\circ\text{C}$		Напряжения от постоянных нагрузок		Суммарные напряжения	
		$\sigma_{y,t}$		$\sigma_{y,g}$		$\sigma_{y,s}$	
		σ_{\min} , МПа	σ_{\max} , МПа	σ_{\min} , МПа	σ_{\max} , МПа	σ_{\min} , МПа	σ_{\max} , МПа
Правое ребро	2–2/8–8	-1,554	-0,184	-1,009	1,009	-1,881	0,807
Центр шпонки		-0,083	0,088	-0,249	0,228	-0,284	0,272
Левое ребро		0,618	2,684	-0,403	0,391	0,464	2,676
Правое ребро	6–6/8–8	-8,276	-1,437	-1,023	0,939	-8,276	-0,498
Центр шпонки		-0,011	0,088	-0,618	0,560	-0,629	0,572
Левое ребро		1,651	7,820	-0,863	0,774	0,788	7,883

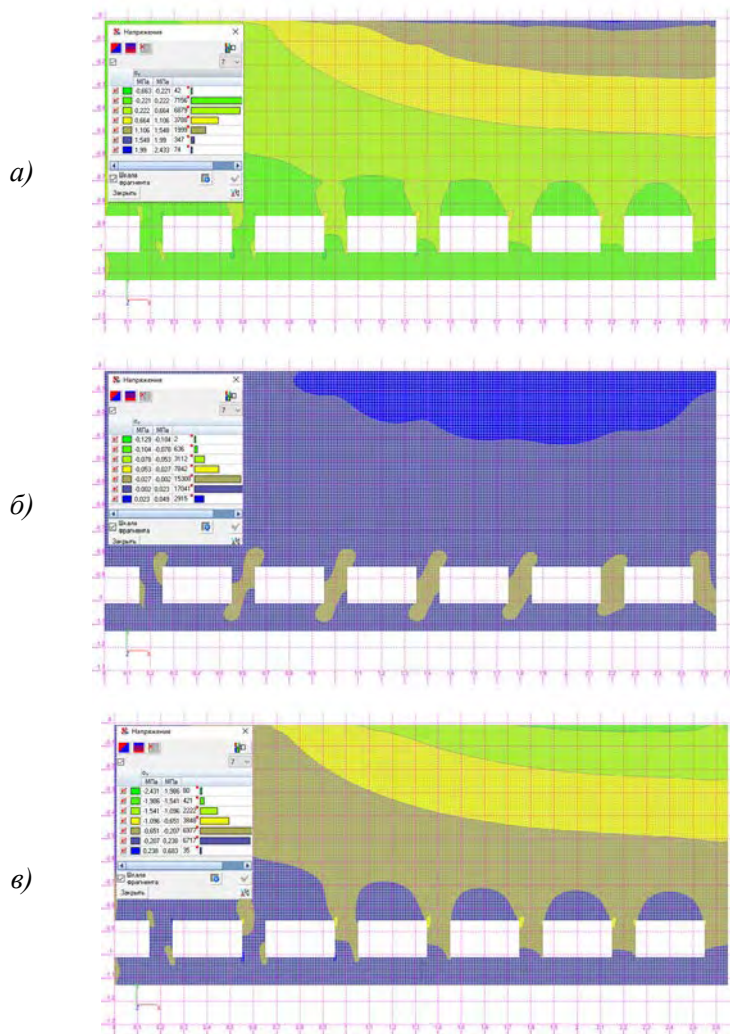


Рис. 6. Изополя нормальных напряжений σ_y от постоянных нагрузок: а) по верхней плоскости плиты; б) по средней плоскости плиты; в) по нижней плоскости плиты

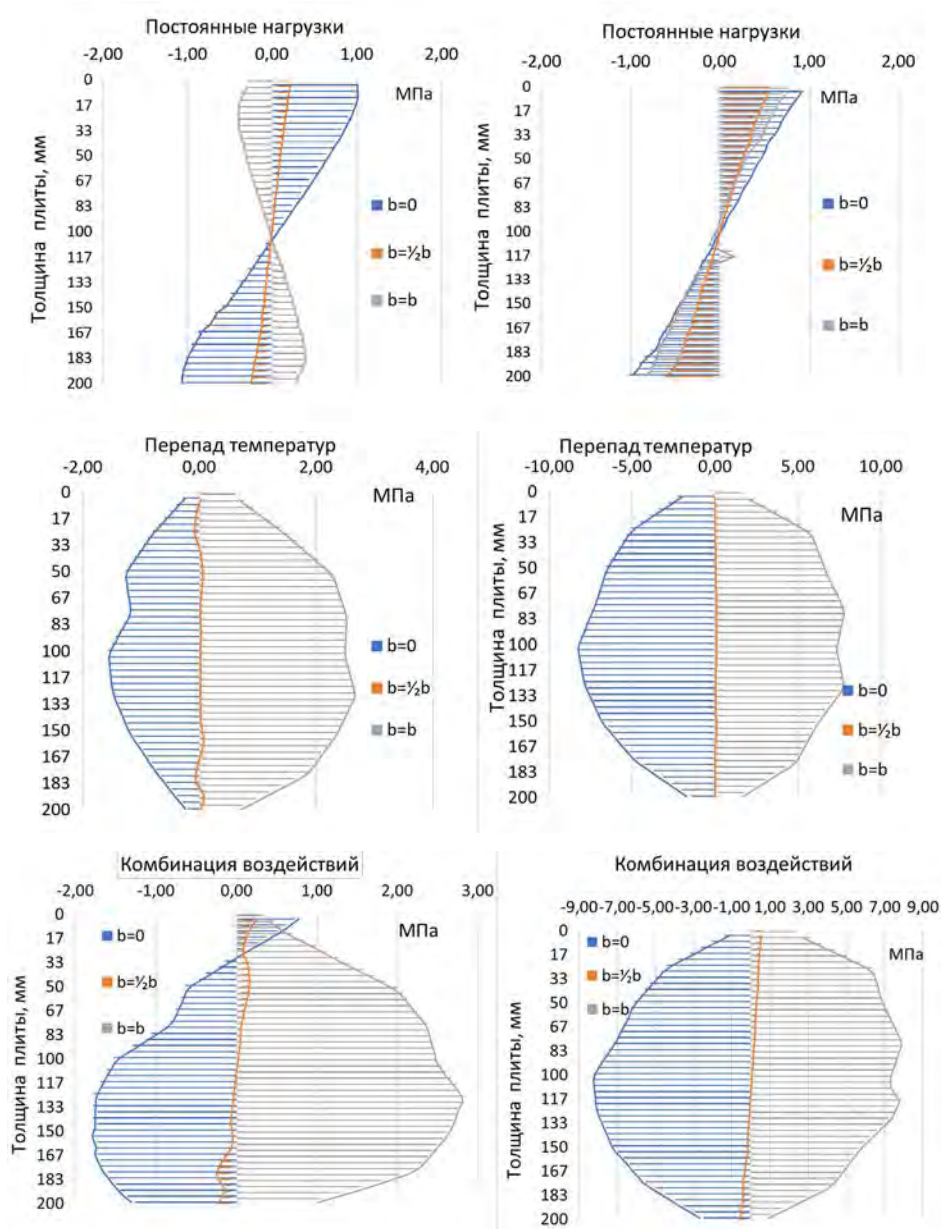


Рис. 7. Нормальные напряжения σ_y для сечений в поперечном направлении при температуре замыкания в холодный период года $\Delta t_c = -25,96 \text{ }^\circ\text{C}$, $\Delta t_w = 20,13 \text{ }^\circ\text{C}$ для соотношения $a/b = 300/100$

+7,883 МПа. Комбинированное воздействие оказывается наиболее неблагоприятным в левом ребре сечения б–б.

Длительная эксплуатация при суровых климатических условиях становится основным фактором нестабильности, выявляя уязвимость шпонок и торцевого бруса дис-

ка перекрытия. При многократных воздействиях низких температур на обогреваемые здания происходит усадка бетона в стенах и перекрытиях. Изменения температуры и влажности по вертикальным поверхностям шпонок имеют неравномерный характер. Торцы диска перекрытия, находящиеся под

воздействием атмосферных осадков из-за открытого расположения, становятся критическими точками, что приводит к проникновению влаги в бетон и объемным деформациям торцевого бруса под нагрузкой, что в итоге приводит к разрушению бетона и коррозии арматурных стержней.

На начальном этапе исследований расчетное сопротивление бетона сжатию R_{bt} принималось по I группе предельных состояний. Модуль деформации бетона принимался начальным, без учета ползучести и трещинообразования. В процессе численного моделирования отмечалось превышение нормальных напряжений в сечениях шпонок и торцевого бруса, относительно расчетного сопротивления бетона растяжению, что свидетельствует о возможности трещинообразования.

Численный анализ показал, что наибольшие напряжения возникают в местах соединения перфорации шпонками и могут превышать нормативные значения расчетного напряжения в 9,7 раз.

Из-за высокой инерционности железобетонного диска перекрытия при негативных температурах торец плиты многократно проходит зону перехода через $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ в сечениях шпонок. Наблюдаемые процессы образования льда в структуре бетона ускоряют разрушение из-за особенностей агрегатного состояния воды. В связи с этим, необходимо ставить вопрос об опасности применения подобного рода конструктивного решения в жилищном строительстве без дополнительного исследования и уточнения методов расчета и конструирования.

Предлагаются способы, позволяющие снизить степень влияния температурно-климатических воздействий в узле сопряжения диска перекрытия со стеной и в целом

повысить эксплуатационные качества в монолитных зданиях. Некоторые из таких разработок могут быть реализованы по одному из предложенных вариантов, рассмотренных на рис. 8. Причем предлагаемые инновационные конструктивные решения могут быть выполнены с использованием двух способов — пассивного (рис. 8, а) или активного (рис. 8, б). Оба способа позволяют повысить уровень теплозащиты монолитных зданий, за счет утепления торца диска перекрытия со стороны фасада.

Дополнительным способом, повышающим точность анализа НДС железобетона, может быть учет продольного армирования торцевого бруса и поперечного армирования шпонки. Нелинейная постановка расчета и учет ползучести [21] также позволит более детально проанализировать процессы, происходящие в материале под воздействием комбинированных нагрузок. Опуская промежуточные расчеты, связанные с определением температурных полей для рассматриваемых на рис. 8 технических решений, выявим степень их влияния на напряженно-деформированное состояние.

При выполнении термального расчета в ANSYS значения осредненных температур со стороны торца диска перекрытия для каждого из вариантов, рассмотренных на рис. 8, составили: $t = -12,246\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 8, а) и $t = -1,2936\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 8, б).

На основании приведенных результатов можно сделать выводы, что применение предлагаемых методов утепления торцов перекрытия позволяет снизить значения нормальных напряжений практически в два раза, что положительно сказывается на общем напряженно-деформированном состоянии конструкции рассматриваемого узла.

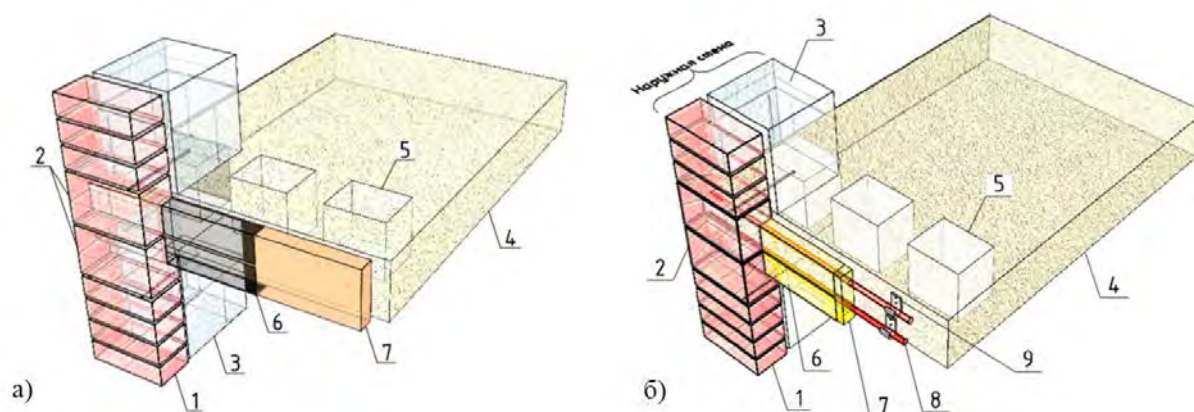


Рис. 8. Устройство для утепления наружной стены здания: а) Г-образные элементы со слоем отражательной изоляции и теплоизоляционного материала;

б) Г-образные элементы, включающие слой отражательной изоляции, теплоизоляционный материал и саморегулируемые электронагревательные кабели.

1 — наружный слой стены; 2 — слой стены, содержащий Г-образные (П-образные) элементы;

3 — слой из ячеистого бетона; 4 — железобетонный диск перекрытия; 5 — перфорация под термовкладыши;

6 — отражательный слой изоляции; 7 — теплоизоляционный материал;

8 — саморегулируемый электронагревательный кабель; 9 — элемент крепления

ТАБЛИЦА 2. Максимальные и минимальные значения напряжений в сечениях 2-2/8-8, 6-6/8-8 от постоянных и температурных нагрузок

Положение	Сечение	Напряжения от перепада температуры $t = -12,246\text{ }^{\circ}\text{C}$		Напряжения от действия температуры $t = 1,2936\text{ }^{\circ}\text{C}$		Суммарные напряжения $t = -12,246\text{ }^{\circ}\text{C}$		Суммарные напряжения $t = 1,2936\text{ }^{\circ}\text{C}$	
		$\sigma_{y,t}$		$\sigma_{y,t}$		$\sigma_{y,s}$		$\sigma_{y,s}$	
		σ_{\min}' МПа	σ_{\max}' МПа	σ_{\min}' МПа	σ_{\max}' МПа	σ_{\min}' МПа	σ_{\max}' МПа	σ_{\min}' МПа	σ_{\max}' МПа
Правое ребро	2-2/8-8	-1,109	-0,131	-0,671	-0,079	-1,509	0,878	-5,909	-0,087
Центр шпонки		-0,059	0,063	-0,036	0,038	-0,248	0,291	-0,61	0,623
Левое ребро		0,391	1,916	0,236	1,159	0,149	2,307	-0,026	6,358
Правое ребро	6-6/8-8	-5,909	-1,026	-3,573	-0,620	-1,274	-0,087	-3,62	0,319
Центр шпонки		-0,008	0,063	-0,005	0,038	-0,248	0,623	-0,613	0,598
Левое ребро		0,837	5,584	0,506	3,376	-0,026	6,358	-0,357	4,150

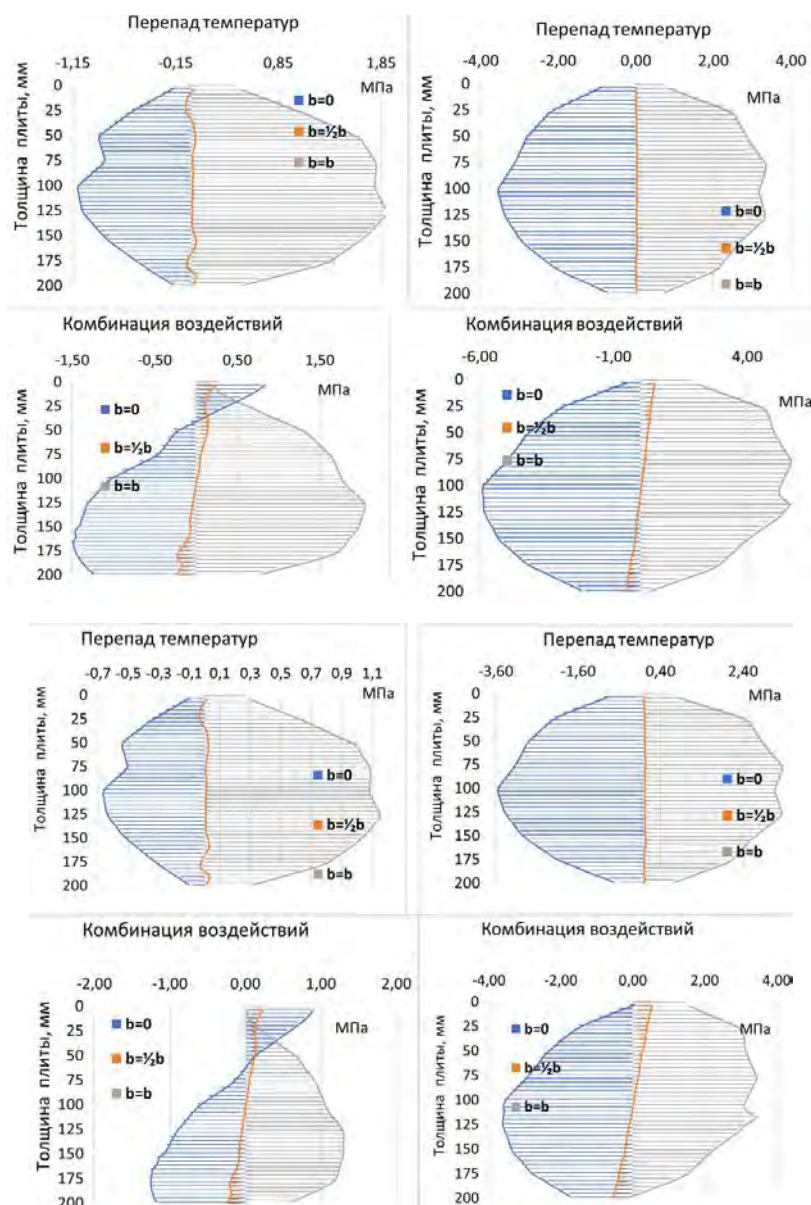


Рис. 9. Нормальные напряжения σ_y для сечений 2–2/8–8 и 6–6/8–8 по высоте элемента в поперечном направлении с учетом температурных нагрузок $-12,246\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $-1,2936\text{ }^{\circ}\text{C}$

Заключение

Результаты моделирования температурно-климатических воздействий на напряженно-деформированное состояние участка диска перекрытия с перфорацией при соединении его с наружными стенами подчеркнули опасность применения существующих типов конструктивных решений. Исследование

выявило наиболее уязвимые участки перфорированных плит, которыми являются шпонки, т.к. они находятся в зоне влияния циклических температур. Установлено, что при комбинированном воздействии нагрузок, напряжения, определенные в линейной постановке в сечении железобетонной плиты, превышают нормативные значения.

Разницу в напряжениях предлагается компенсировать при помощи конструктивных мероприятий, описание которых приводится в ряде публикаций [2, 28–30].

Разработка рациональных конструктивных решений диска перекрытий с перфорацией позволит снизить концентрацию напряжений в зоне шпоночных соединений.

Подробное моделирование железобетонных элементов с учетом армирования, трещинообразования и нелинейной работы позволит еще более приблизить результаты расчетов к реальной работе конструкции.

Данные предложения позволяют решить принципиальные вопросы, связанные с повышением эксплуатационных качеств гражданских зданий, в том числе высотных и повышенной этажности.

Библиографический список

1. Волкова О. Е. Монолитное домостроение в современном строительстве / О. Е. Волкова, К. А. Сидоренко // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2021. Т. 1. С. 146–149.
2. Kuznetsov A. V. Energy Efficient Design Solution for the Interface Node Between the Floor Slab and the Wall / A. V. Kuznetsov, A. M. Demin // International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia — 2021, Novosibirsk, 11–14 мая 2021 года. Switzerland: Springer Nature Switzerland AG, 2022. P. 799–807. DOI: 10.1007/978-3-030-96380-4-87.
3. Kuznetsov A. V., Zimin S. S. Temperature stresses in the perforated overlap disc / A. V. Kuznetsov, S. S. Zimin // Construction of Unique Buildings and Structures. 2022. No. 3 (101). P. 10103. DOI: 10.4123.
4. Сидоров В. Н., Примкулов А. М. Численно-аналитическое решение нестационарной задачи теплопроводности с переменными теплофизическими параметрами среды / В. Н. Сидоров // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18, № 5. С. 685–696. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.5.685-696.
5. Лебедева А. В. Влияние температурно-климатических воздействий на напряженно-деформированное состояние монолитного железобетонного каркаса здания / А. В. Лебедева, С. А. Тумаков // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. 2019. № 4 (11). С. 9–14.
6. Сотникова О. А., Целярицкая М. И., Пашенко Ю. О. Анализ «мостиков холода» с целью выявления недостатков монолитного домостроения в г. Воронеже. Известия Юго-Западного государственного университета. 2022. № 26 (3). С. 21–34. DOI: 10.21869/2223-1560-2022-26-3-21-34.
7. Merita G., Flogerta K., Klodjan Xh. Study of thermal performance of prefabricate large panel buildings // Proceedings of the 2nd Croatian Conference on Earthquake Engineering — 2CroCEE. DOI: 10.5592/CO/2CroCEE.2023.63.
8. Ищук М. К., Ищук Е. М., Айзятуллин Х. А. и др. Дефекты наружных стен с лицевым слоем из пустотелого кирпича // Промышленное и гражданское строительство. 2022. № 4. С. 29–35. DOI: 10.33622/0869-7019.2022.04.29-35.
9. Зимин С. С. Напряженно-деформированное состояние кирпичной облицовки в области сопряжения с плитами перекрытия при отсутствии деформационного шва / С. С. Зимин, А. Ю. Сударь, Е. И. Васильева // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2018. № 8 (71). С. 13–21. DOI: 10.18720/CUBS.71.2. EDN CXJFDV.
10. Орлович Р. Б. Повреждение каменного лицевого слоя в зоне сопряжения с железобетонными перекрытиями / Р. Б. Орлович, В. Н. Деркач, С. С. Зимин // Инженерно-строительный журнал. 2015. № 8 (60). С. 30–37. DOI 10.5862/MCE.60.4.
11. Деркач В. Н., Горшков А. С., Орлович Р. Б. Проблемы трещиностойкости стенового заполнения каркасных зданий из ячеисто-бетонных блоков / В. Н. Деркач, А. С. Горшков, Р. Б. Орлович // Строительные материалы. 2019. № 3. С. 52–56. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-768-3-52-56. EDN TBACNL.
12. Luigi Coppola, Beretta Silvia, Bignozzi Chiara Maria, et al. The Improvement of Durability of Reinforced Concretes for Sustainable Structures :

A Review on Different Approaches. April 2022 — Materials 15 (8): 2728. DOI: 10.3390/ma15082728.

13. Tamrazyan A. G. The influence of depth of tensile concrete deterioration on the load bearing strength and deflections of corrosion-damaged floor slabs / A. G. Tamrazyan, A. A. Minasyan // VI integration, partnership and innovation in construction science and education. Matec. 2018. Vol. 251, 02012. 6 p.

14. Желдаков Д. Ю., Пономарев О. И., Минасян А. А. и др. Оценка долговечности кирпичных и каменных конструкций при проведении инженерных изысканий // Вестник НИЦ Строительство. 2023. № 1 (36). С. 27–40. DOI: 10.37538/2224-9494-2023-1(36)-27-40.

15. Kramarchuk A., Pnytskyu B., Kopyika N. Ensuring the Load-Bearing Capacity of Monolithic Reinforced Concrete Slab Damaged by Cracks in the Compressed Zone // Proceedings of EcoComfort 2022/ January 2023. DOI: 10.1007/978-3-031-14141-6-21.

16. Сотникова О. А. Анализ «мостиков холода» с целью выявления недостатков монолитного домостроения в г. Воронеже / О. А. Сотникова, М. И. Целярицкая, Ю. О. Пашенко // Известия Юго-Западного государственного университета. 2022. Т. 26, № 3. С. 21–34. DOI: 10.21869/2223-1560-2022-26-3-21-35.

17. Томаков В. И., Томаков М. В., Пахомова Е. Г. и др. Анализ причин обрушения опалубочных систем в строящихся зданиях при устройстве монолитных перекрытий // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2018. Т. 8, № 4 (29). С. 79–92. EDN PNTULV.

18. Тихонов И. Н., Козелков М. М. Расчет и проектирование железобетонных монолитных перекрытий зданий с учетом защиты от прогрессирующего обрушения // Бетон и железобетон. 2009. № 3. С. 2–8.

19. Колчунов В. И. Напряженно-деформированное состояние нагруженного и коррозионно-поврежденного железобетона в зоне наклонных трещин / В. И. Колчунов, М. С. Губанова // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. 2016. № 2 (42). С. 11–22.

20. Яров В. А. Исследования напряженно-деформированного состояния монолитных перекрытий, выполненных с теплоизолирующими вставками / В. А. Яров, А. А. Коянкин, К. В. Скрипальщиков // Вестник МГСУ. 2010. № 1. С. 107–112.

21. Корсун В. И. Напряженно-деформированное состояние железобетонных конструкций в условиях температурных воздействий. Макеевка: ДонГАСА, 2003. 153 с.

22. Довженко О. А. Эффективные шпоночные соединения многпустотных плит перекрытий со стенами в современном крупнопанельном домостроении / О. А. Довженко, В. В. Погребной, Л. В. Карабаш // Наука и техника. 2018. Т. 17, № 2. С. 146–156. DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-2-146-156. EDN YNQSHZ.

23. Колчунов В. И., Московцева В. С., Бушова О. Б. и др. Расчетный анализ способов защиты монолитных каркасов многоэтажных зданий с плоскими перекрытиями от прогрессирующего обрушения // Строительство и реконструкция. 2021. № 4 (96). С. 35–44. DOI: 10.33979/2073-7416-2021-96-4-35-44.

24. Альхименко А. И. Влияние температуры замыкания при возведении на напряжения в несущих конструкциях / А. И. Альхименко, А. И. Снегирев // Инженерно-строительный журнал. 2008. № 2 (2). С. 8–16.

25. Ерофеев В. Т., Ельчищева Т. Ф., Левцев А. П. и др. Термическое сопротивление наружных ограждающих конструкций при переменном тепловом потоке // Промышленное и гражданское строительство. 2022. № 10. С. 4–13. DOI: 10.33622/0869-7019.2022.10.04-13.

26. Варламов А. А., Шишлонов Е. А., Ткач Е. Н. и др. Закономерности связи напряжений и деформаций в бетоне // Academy. 2016. № 2 (5). С. 7–16.

27. Barabanshchikov Iu. G. The Influence of Concrete Composition on the Ratio of Strength to Elastic Modulus as a Criterion of Crack Resistance / Iu. G. Barabanshchikov, T. H. Pham // Construction of Unique Buildings and Structures. 2021. No 4 (97). P. 9704. DOI: 10.4123/CUBS.97.4.

28. Кузнецов А. В. Патент на полезную модель № 199000 U1 Российская Федерация, МПК E04B 1/78. Устройство для повышения теплозащитных качеств наружной стены здания: № 2020111631: заявл. 19.03.2020; опубл. 06.08.2020 / А. В. Кузнецов; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I».

29. Кузнецов А. В. Патент на полезную модель № 199001 U1 Российская Федерация, МПК E04B 1/78. Устройство для утепления наружной стены здания: № 2020111623: заявл. 19.03.2020; опубл. 06.08.2020 / А. В. Кузнецов, М. В. Калущин, А. М. Демин; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I».

30. Кузнецов А. В. Узлы сопряжения диска перекрытия с ограждающими стеновыми конструк-

циями в монолитном домостроении: дис. ... канд. техн. наук: 2.1.1 / Кузнецов Анатолий Всеволодович [Место защиты: ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет»]; Диссовет 24.2.380.01 (Д 212.223.03)]. Санкт-Петербург, 2022. 206 с.

Дата поступления: 21.01.2024

Решение о публикации: 24.02.2024

Контактная информация:

БЕЛАШ Татьяна Александровна — докт. техн. наук, профессор кафедры «Строительные сооружения, конструкции и материалы», советник РААСН; belashta@mail.ru

КУЗНЕЦОВ Анатолий Всеволодович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Строительные конструкции, здания и сооружения»; akuznetsov@pgups.ru

ВОЛОДЧЕНКО Дина Геннадьевна — аспирант кафедры «Строительные конструкции, здания и сооружения»; dina.volod@yandex.ru

Analysis of the stress-strain state of nodal joints of high-rise buildings taking into account climatic influences

T. A. Belash¹, A. V. Kuznetsov², D. G. Volodchenko²

¹ JSC Research Center of Construction, 6, 2nd Institutskaya st., Moscow, 109428, Russia

² Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russia

For citation: *Belash T. A., Kuznetsov A. V., Volodchenko D. G. Analysis of the stress-strain state of nodal joints of high-rise buildings taking into account climatic influences // Proceedings of Petersburg Transport University, 2024. Vol. 21, iss. 1. P. 85–102. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2024-01-85-102*

Abstract

Purpose: to analyze the design solutions of the junctions of floors with external walls in buildings erected using monolithic technology. To identify defects and damages that occur on facades and overlaps with perforations for thermal pads during construction and operation. To investigate by numerical methods the stress-strain state of the overlap disk at the junction with the outer wall, taking into account temperature influences. **Materials and methods:** the standard version of the nodal connection of a monolithic building of various storeys is considered. The fragment of the junction joint of the overlap disk with the wall was modeled in the Ansys and SCAD software complexes. The model consisted of an anisotropic material — concrete and reinforcement rods included in it. The behavior of the stress-strain state under various temperature influences was studied. **Results:** numerically, taking into account geometric parameters

and temperature loads, the patterns affecting the nature of changes in the values of normal stresses in the characteristic sections of the perforated plate are revealed and the existing types of design solutions are evaluated. The locations of stress concentration zones and their impact on performance are determined. **Practical significance:** it is shown that the most dangerous cross-section in perforated discs of overlaps takes place at the key joints. It is determined that vulnerability in such compounds is caused by the influence of alternating cyclic temperatures. Patterns leading to an increase in normal stresses at stress concentration sites have been established. Fundamentally new design solutions have been proposed, protected by utility model patents, which allow to reduce stress values and thereby ensure higher performance in monolithic buildings, including high-rise ones.

Keywords: finite element method, reinforced concrete monolithic slabs, numerical calculation methods, temperature and climatic effects.

References

1. Volkova O. E. Monolitnoe domostroenie v sovremennom stroitel'stve / O. E. Volkova, K. A. Sidorenko // Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Estestvennye i inzhenernye nauki. 2021. T. 1. S. 146–149. (In Russian)
2. Kuznetsov A. V. Energy Efficient Design Solution for the Interface Node Between the Floor Slab and the Wall / A. V. Kuznetsov, A. M. Demin // International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia — 2021, Novosibirsk, May 11–14, 2021. Switzerland: Springer Nature Switzerland AG, 2022. P. 799–807. DOI: 10.1007/978-3-030-96380-4-87. (In Russian)
3. Kuznetsov A. V., Zimin S. S. Temperature stresses in the perforated overlap disc // Construction of Unique Buildings and Structures. 2022. No. 3 (101). P. 10103. DOI: 10.4123.
4. Sidorov V. N., Primkulov A. M. Chislennno-analiticheskoe reshenie nestacionarnoj zadachi teploprovodnosti s peremennymi teplofizicheskimi parametrami sredi // Vestnik MGSU. 2023. T. 18, № 5. S. 685–696. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.5.685–696. (In Russian)
5. Lebedeva A. V. Vlijanie temperaturno-klimaticheskikh vozdeystvij na naprjazhenno-deformirovannoe sostojanie monolitnogo zhelezobetonno karkasa zdanija / A. V. Lebedeva, S. A. Tumakov // Zhilishhnoe hozjajstvo i kommunal'naja infrastruktura. 2019. № 4 (11). S. 9–14. (In Russian)
6. Sotnikova O. A., Celjarickaja M. I., Pashhenko Ju. O. Analiz "mostikov holoda" s cel'ju vyjavlenija nedostatkov monolitnogo domostroenija v g. Voronezhe. Izvestija Jugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. 2022. T. 26, № 3. S. 21–34. DOI: 10.21869/2223-1560-2022-26-3-21-34. (In Russian)
7. Merita G., Flogerta K., Klodjan Xh. Study of thermal performance of prefabricate large panel buildings // Proceedings of the 2nd Croatian Conference on Earthquake Engineering — 2CroCEE. DOI: 10.5592/CO/2CroCEE.2023.63.
8. Ishhuk M. K., Ishhuk E. M., Ajzjatullin H. A. i dr. Defekty naruzhnyh sten s licevym sloem iz pustotelogo kirpicha // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. 2022. № 4. S. 29–35. DOI: 10.33622/0869-7019.2022.04.29-35. (In Russian)
9. Zimin S. S. Naprjazhenno-deformirovannoe sostojanie kirpichnoj oblicovki v oblasti soprjazhenija s plitami perekrytija pri otsutstvii deformacionnogo shva / S. S. Zimin, A. Ju. Sudar', E. I. Vasil'eva // Stroitel'stvo unikal'nyh zdaniy i sooruzhenij. 2018. № 8 (71). S. 13–21. DOI: 10.18720/CUBS.71.2. EDN CXJFDV. (In Russian)
10. Orlovich R. B. Povrezhdenie kamennogo licevogo sloja v zone soprjazhenija s zhelezobetonnyimi perekrytijami / R. B. Orlovich, V. N. Derkach, S. S. Zimin // Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal. 2015. № 8 (60). S. 30–37. DOI 10.5862/MCE.60.4. (In Russian)
11. Derkach V. N., Gorshkov A. S., Orlovich R. B. Problemy treshhinostjokosti stenovogo zapolnenija karkasnyh zdaniy iz jacheisto-betonnyh blokov // Stroitel'nye materialy. 2019. № 3. S. 52–56. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-768-3-52-56. EDN TBACNL. (In Russian)
12. Luigi Coppola, Beretta Silvia, Bignozzi Chiara Maria, et al. The Improvement of Durability of Rein-

forced Concretes for Sustainable Structures: A Review on Different Approaches. April 2022—Materials 15(8): 2728. DOI: 10.3390/ma15082728.

13. Tamrazyan A. G. The influence of depth of tensile concrete deterioration on the load bearing strength and deflections of corrosion-damaged floor slabs /A.G. Tamrazyan, A. A. Minasyan // VI Integration, partnership and innovation in construction science and education. Matec. 2018. Vol. 251, 02012. 6 p.

14. Zheldakov D. Ju., Ponomarev O. I., Minasjan A. A. i dr. Ocenka dolgovechnosti kirpichnyh i kamennyh konstrukcij pri provedenii inzhenernyh izyskanij // Vestnik NIC Stroitel'stvo. 2023. № 1 (36). S. 27–40. DOI: 10.37538/2224-9494-2023-1(36)-27-40. (In Russian)

15. Kramarchuk A., Ilnytsky B., Kopiaika N. Ensuring the Load-Bearing Capacity of Monolithic Reinforced Concrete Slab Damaged by Cracks in the Compressed Zone // Proceedings of EcoComfort 2022/ January 2023. DOI: 10.1007/978-3-031-14141-6-21.

16. Sotnikova O. A. Analiz "mostikov holoda" s cel'ju vyjavlenija nedostatkov monolitnogo domostroenija v g. Voronezhe / O. A. Sotnikova, M. I. Celjarickaja, Ju. O. Pashhenko // Izvestija Jugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. 2022. T. 26, № 3. S. 21–34. DOI: 10.21869/2223-1560-2022-26-3-21-35. (In Russian)

17. Tomakov V. I., Tomakov M. V., Pahomova E. G. i dr. Analiz prichin obrushenija opalubochnyh sistem v strojshhihsja zdaniyah pri ustrojstve monolitnyh perekrytij // Izvestija Jugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Tehnika i tehnologii. 2018. T. 8, № 4 (29). S. 79–92. EDN PNTULV. (In Russian)

18. Tihonov I. N., Kozelkov M. M. Raschet i konstruirovanie zhelezobetonnyh monolitnyh perekrytij zdaniy s uchetom zashhity ot progressirujushhego obrushenija / I. N. Tihonov, M. M. Kozelkov // Beton i zhelezobeton. 2009. № 3. S. 2–8. (In Russian)

19. Kolchunov V. I. Naprjazhenno-deformirovanoe sostojanie nagruzhennogo i korrozionno-povrezhdennogo zhelezobetona v zone naklonnyh treshhin / V. I. Kolchunov, M. S. Gubanova // Nauchnyj vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Stroitel'stvo i arhitektura. 2016. № 2 (42). S. 11–22. (In Russian)

20. Jarov V. A. Issledovanija naprjazhenno-deformirovannogo sostojanija monolitnyh perekrytij, vypolnennyh s teploizolirujushhimi vstavkami / V. A. Jarov, A. A. Kojankin, K. V. Skripal'shhikov // Vestnik MGSU. 2010. № 1. S. 107–112. (In Russian)

21. Korsun V. I. Naprjazhenno-deformirovanoe sostojanie zhelezobetonnyh konstrukcij v uslovijah temperaturnyh vozdeystvij. Makeevka: DonGASA, 2003. 153 s. (In Russian)

22. Dovzhenko O. A. Jeffektivnye shponochnye soedinenija mnogopustotnyh plit perekrytij so stenami v sovremennom krupnopanel'nom domostroenii / O. A. Dovzhenko, V. V. Pogrebnoj, L. V. Karabash // Nauka i tehnika. 2018. T. 17, № 2. S. 146–156. DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-2-146-156. EDN YN-QSHZ. (In Russian)

23. Kolchunov V. I., Moskovceva V. S., Bushova O. B. i dr. Raschetnyj analiz sposobov zashhity monolitnyh karkasov mnogojetaznyh zdaniy s ploskimi perekrytijami ot progressirujushhego obrushenija // Stroitel'stvo i rekonstrukcija. 2021. № 4 (96). S. 35–44. DOI: 10.33979/2073-7416-2021-96-4-35-44. (In Russian)

24. Al'himenko A. I. Vlijanie temperatury zamykanija pri vozvedenii na naprjazhenija v nesushhih konstrukcijah / A. I. Al'himenko, A. I. Snegirev // Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal. 2008. № 2 (2). S. 8–16. (In Russian)

25. Erofeev V. T., El'chishheva T. F., Levcev A. P. i dr. Termicheskoe soprotivlenie naruzhnyh ograzhdajushhih konstrukcij pri peremennom teplovom potoke // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. 2022. № 10. S. 4–13. DOI: 10.33622/0869-7019.2022.10.04-13. (In Russian)

26. Varlamov A. A., Shishlonov E. A., Tkach E. N. i dr. Zakonomernosti svjazi naprjazhenij i deformacij v betone // Academy. 2016. № 2 (5). S. 7–16. (In Russian)

27. Barabanshchikov Iu. G. The Influence of Concrete Composition on the Ratio of Strength to Elastic Modulus as a Criterion of Crack Resistance / Iu. G. Barabanshchikov, T. H. Pham // Construction of Unique Buildings and Structures. 2021. No. 4 (97). P. 9704. DOI: 10.4123/CUBS.97.4.

28. Kuznecov A. V. Patent na poleznuju model' № 199000 U1 Rossijskaja Federacija, MPK E04B 1/78. Ustrojstvo dlja povyshenija teplozashhitnyh kachestv naruzhnoj steny zdanija: № 2020111631: zajavl. 19.03.2020: opubl. 06.08.2020 / A. V. Kuznecov; zajavitel' Federal'noe gosudarstvennoe bjudzhetnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovanija "Peterburgskij gosudarstvennyj universitet putej soobshhenija Imperatora Aleksandra I". (In Russian)

29. Kuznecov A. V. Patent na poleznuju model' № 199001 U1 Rossijskaja Federacija, MPK E04B 1/78. Ustrojstvo dlja uteplenija naruzhnoj steny zdanija: № 2020111623: zajavl. 19.03.2020: opubl. 06.08.2020 / A. V. Kuznecov, M. V. Kalushin, A. M. Demin; zajavitel' Federal'noe gosudarstvennoe bjudzhetnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovanija "Peterburgskij gosudarstvennyj universitet putej soobshhenija Imperatora Aleksandra I". (In Russian)

30. Kuznecov A. V. Uzly soprjazhenija diska perekrytija s ograzhdajushhimi stenovymi konstrukcijami v monolitnom domostroenii: dis. ... kand. tehn. nauk: 2.1.1 / Kuznecov Anatolij Vsevolodovich [Mesto zashhity: FGBOU VO "Sankt-Peterburgskij gosudarst-

vennyj arhitekturno-stroitel'nyj universitet"; Dissovet 24.2.380.01 (D 212.223.03)]. Sankt-Peterburg, 2022. 206 s. (In Russian)

Received: 21.01.2024

Accepted: 24.02.2024

Author's information:

Tatyana A. BELASH — Dr. Sci. in Engineering, Professor of the Department of Building Structures, Structures and Materials, Advisor to the RAASN; Scopus 7801647643, WoS ResearcherID: B-7819-2018, ORCID: 0000-0002-4577-8794, SPIN: 5217-7177, AuthorID: 66498; belashta@mail.ru

Anatoly V. KUZNETSOV — PhD in Engineering, Associate Professor of the Department of Building Structures, Buildings and Structures; Scopus 57205441909, WoS ResearcherID: HPH-1274-2023, ORCID: 0000-0002-3809-399X, SPIN: 8756-5314, AuthorID: 659654; akuznetsov@pgups.ru

Dina G. VOLODCHENKO — Postgraduate Student of the Department of Building Structures, Buildings and Structures; dina.volod@yandex.ru