

УДК 624.012.45

DOI 10.52928/2070-1683-2025-42-3-8-19

**ПРАКТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ НА УСТОЙЧИВОСТЬ К ПРОГРЕССИРУЮЩЕМУ
ОБРУШЕНИЮ ЗДАНИЯ 10-ЭТАЖНОГО ПАНЕЛЬНОГО ЖИЛОГО ДОМА
С УВЕЛИЧЕННЫМ ШАГОМ ПОПЕРЕЧНЫХ НЕСУЩИХ СТЕН**

*д-р техн. наук, проф. Д.Н. ЛАЗОВСКИЙ¹⁾,
канд. техн. наук, доц. А.М. ХАТКЕВИЧ²⁾, А.Л. МАТЛАХОВ³⁾
(^{1), 2)} Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой,
³⁾ УП «Институт Витебскгражданпроект»)
¹⁾ d.lazovski@psu.by, ²⁾ a.khatkevich@psu.by, ³⁾ vit@vgp.by*

Представлены результаты практического применения метода «локальной» прочности при линейном статическом расчете внутренних усилий конструктивных элементов при измененной расчетной схеме и нелинейном анализе поперечных сечений конструктивных элементов панельного здания жилого дома с увеличенным шагом поперечных стен и петлевыми соединениями смежных плит перекрытий в местах платформенных стыков.

Проведенное исследование конструктивной системы здания 10-этажного 2-секционного многоквартирного жилого дома с шагом несущих стен 6,4 м показывает соответствие требованиям нормативных документов по прочности и устойчивости в обычной расчетной ситуации и против прогрессирующего обрушения в особой расчетной ситуации.

Ключевые слова: прогрессирующее обрушение, линейный статический расчет внутренних усилий, нелинейный анализ поперечных сечений, исходная расчетная схема, модифицированная расчетная схема.

Введение. Термин «прогрессирующее обрушение» впервые появился и стал широко использоваться в инженерной и строительной практике после 1968 года. Это было связано с расследованием причин обрушения 22-этажного жилого здания Ронан Пойнт (Ronan Point) в Лондоне. Взрыв бытового газа на 18-м этаже этого панельного дома привел к разрушению несущих стеновых панелей и плит перекрытия. Это вызвало цепную реакцию, в результате которой обрушилась вся угловая часть здания – с 18-го по 4-й этажи. Последующее официальное расследование этой катастрофы и ввело в обиход термин «прогрессирующее обрушение» для описания механизма последовательного разрушения, когда выход из строя одного элемента приводит к лавинообразному разрушению других [1–3].

Прогрессирующее обрушение жилых зданий может быть вызвано многими факторами:

- взрывы бытового газа или взрывчатки;
- удары транспортных средств или летающих аппаратов;
- землетрясения;
- ошибки проектирования или строительства.

При дальнейшем рассмотрении этой проблематики в части определения критериев нормирования уровня устойчивости зданий и сооружений при возникновении подобных ситуаций был введен термин «непропорциональное разрушение» (disproportionate collapse) и его характеристика – объем сооружения или площадь здания, которые могут разрушиться при разрушении или выходе из строя (любого) каждого отдельного несущего элемента. В настоящее время именно величина непропорционального разрушения в виде допустимой суммарной площади участков этажей рядом с местом локального разрушения элемента нормируется в европейских странах – в Еврокоде и соответствующих ему национальных стандартах, строительных законах и строительных нормах¹.

¹ BS EN 1990:2002 Eurocode. Basis of structural design. (Еврокод. Общие положения проектирования конструкций).

СТБ ЕН 1990-2007. Еврокод. Основы проектирования несущих конструкций.

BS EN 1991-1-7:2006. Eurocode 1. Actions on structures. General actions. Accidental actions. (Еврокод 1. Нагрузки на конструкции. Основные нагрузки. Случайные воздействия).

DIN 1055-100. Einwirkungen auf Tragwerke. Teil 100: Grundlagen der Tragwerkspannung Sicherheitskonzept und Bemessungsregeln. (Воздействия на несущие конструкции. Часть 100: Основы расчета, концепции безопасности и правила определения размеров). – DIN, 2001.

Building regulations 2000 (England and Wales). Approved document A. Structure. (Строительные нормы Англии и Уэльса. Свод правил А. Конструкции).

International Code Council Performance Code for Buildings and Facilities. (Функциональные нормы для зданий и сооружений Совета по международным нормам). – ICC, 2009.

В российской и белорусской практике в нормативной и методической литературе в основном используется только термин «защита от прогрессирующего обрушения» и не приводятся другие возможные подходы к обеспечению надежности зданий и сооружений^{2,3,4,5,6,7}.

Конструктивная система жилых панельных зданий должна быть защищена от прогрессирующего обрушения в случае локального разрушения ее несущих конструктивных элементов при аварийных воздействиях, не предусмотренных условиями нормальной эксплуатации зданий, с целью обеспечения безопасности людей и сохранности их имущества⁸. Это требование означает, что в случае аварийных воздействий для панельных зданий полное или частичное разрушение отдельных стен в пределах одного этажа и двух смежных осей здания не должно приводить к обрушению или к разрушению конструкций, на которые передается нагрузка, ранее воспринимавшаяся элементами, поврежденными аварийным воздействием.

Панельные здания, как правило, имеют недостаточную связность элементов и низкую пластичность соединений, отсутствие совместной работы плит перекрытий смежных пролетов в месте платформенных стыков со стенами, что увеличивает риск прогрессирующего обрушения. Наиболее опасными зонами являются наружные и внутренние стены, ослабленные проемами (балконы, лоджии, дверные проемы, лестничные клетки), плиты перекрытия с разрезной схемой работы, не связанные между собой и со стенами, отдельно стоящие стены и перекрытия лоджий, не имеющие достаточных связей с несущими конструкциями здания.

Современные нормативные документы⁹ требуют обеспечения устойчивости зданий к прогрессирующему обрушению через: рациональное конструктивно-планировочное решение (избегание изолированных пилонов, обеспечение непрерывности арматуры и связей между элементами); конструктивные меры (усиление связей между панелями, использование пластичных соединений, способных перераспределять нагрузки при локальных разрушениях, размещение периметрических связей); расчет на особое сочетание воздействий (включение кроме действующих нагрузок также гипотетического локального разрушения несущих элементов с изменением расчетной схемы здания).

Для расчетов конструкций используются следующие методы¹⁰:

- проверка «локальной» прочности (обеспечение сопротивления отдельного конструктивного элемента локальному разрушению при особом воздействии);
- разработка альтернативных путей передачи усилий на другие конструктивные элементы после внезапного динамического разрушения отдельного конструктивного элемента.

Внутренние усилия в конструкциях здания после выключения локального конструктивного элемента определяются следующими методами:

- линейным статическим анализом при особом сочетании воздействий с применением нагрузочного повышающего коэффициента *LIF*, учитывающего динамические и нелинейные эффекты, возникающие при внезапном приложении выше расположенных гравитационных нагрузок, включая собственный вес разрушенного локального элемента;
- нелинейным статическим анализом с врезкой пластических шарниров в сечениях конструктивных элементов;
- нелинейным динамическим анализом с заданием истории нагружения и коэффициентов демпфирования с учетом характеристик материалов конструктивных элементов здания при динамических воздействиях.

Имеется значительное количество исследований устойчивости к прогрессирующему обрушению зданий и сооружений с различными конструктивными схемами с применением разных методов расчета [5–11].

Цель настоящего исследования – на конкретном примере продемонстрировать применимость метода «локальной» прочности при линейном статическом расчете внутренних усилий конструктивных элементов при измененной расчетной схеме и нелинейном анализе поперечных сечений конструктивных элементов панельного здания жилого дома с увеличенным шагом поперечных стен и петлевыми соединениями смежных плит перекрытий в местах платформенных стыков.

² Проектирование мероприятий по защите зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Методическое пособие // М-во стр-ва и жил.-комму. хоз-ва РФ. – М., 2018. – 157 с.

³ СП 385.1325800.2018. Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Правила проектирования. Основные положения // М-во стр-ва и жил.-комму. хоз-ва РФ. – М., 2021. – 29 с.

⁴ СП 5.03.01-2020. Бетонные и железобетонные конструкции. – Минск: М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2020. – 236 с.

⁵ Рекомендации по предотвращению прогрессирующих обрушений крупнопанельных зданий. – М., 1999. – 35 с.

⁶ ТКП EN 1991-1-7-2009. Воздействия на конструкции. Еврокод 1. Часть 1–7. Общие воздействия. Особые воздействия. – Минск: М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2022. – 58 с.

⁷ СН 2.01.01-2022. Основы проектирования строительных конструкций. – Минск: М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2022. – 61 с.

⁸ См. сноску 4.

⁹ См. сноски 3–5.

¹⁰ См. сноску 4.

Конструктивная система здания и его конечно-элементная модель. По конструктивному исполнению здание двухсекционного 10-этажного жилого дома является крупнопанельным с несущими поперечными стеновыми панелями высотой 2560 мм, сборными многпустотными плитами перекрытия шириной 1500 мм длиной 3200 мм и 6400 мм, продольными наружными стенами и перегородками из мелкоформатных элементов в виде ячеистобетонных блоков с опиранием на плиты перекрытия с платформенным стыком (защемлением плит перекрытий в местах опирания и обеспечением неразрезности) (рисунок 1).

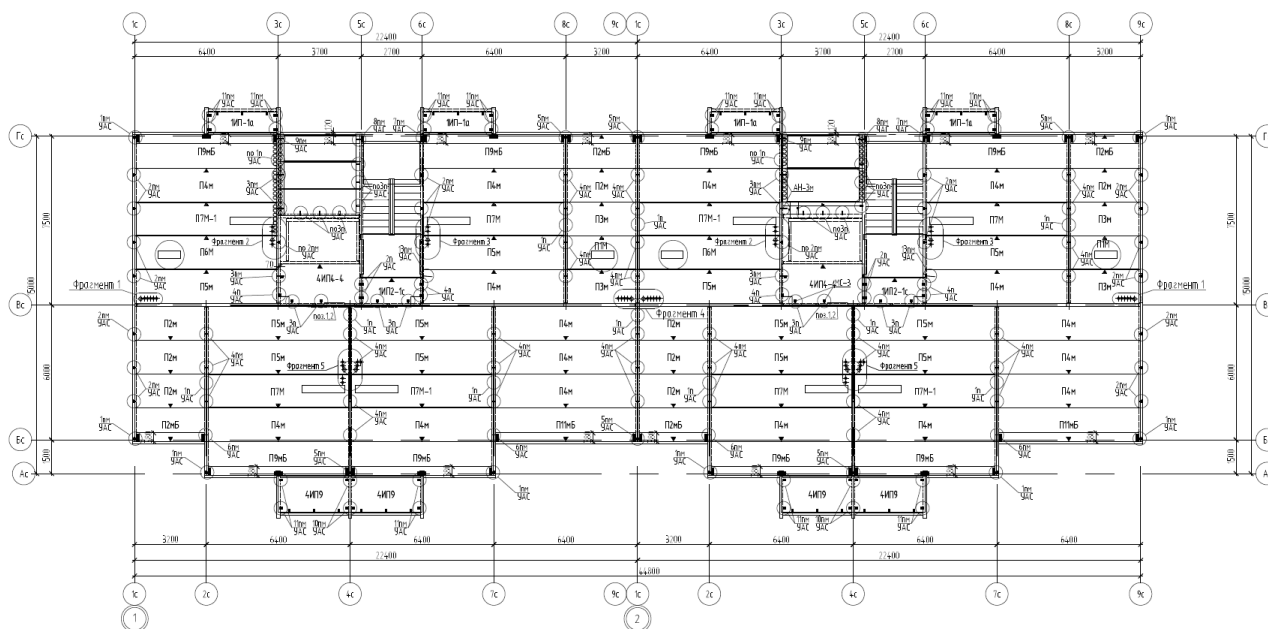


Рисунок 1. – Схема перекрытий типового этажа 10-этажного здания жилого дома

Неразрезность плит перекрытия на опорах шириной 160 мм (толщина стеновой панели), согласно принятой конструктивной схеме, обеспечивается устройством петлевого стыка верхней и нижней надпорной арматуры с продольным арматурным стержнем, установленным в петли плит на крайней опоре и смежных плит на средней опоре (рисунок 2).

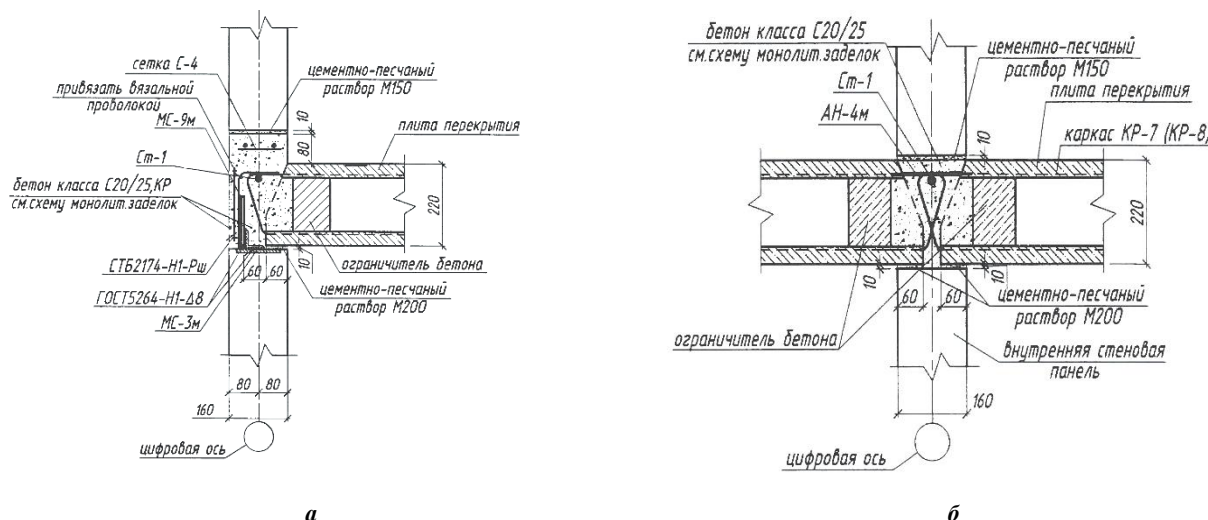


Рисунок 2. – Петлевое соединение плит перекрытия на крайней (а) и средней (б) опорах

Петлевые стыки арматуры известны как стыки растянутых элементов сборных железобетонных ферм академика Г.П. Передерия. В дальнейшем подобный тип стыка был применен для соединения растянутой арматуры изгибаемых железобетонных элементов¹¹, сборных панелей крупнопанельных зданий [12–15].

¹¹ ГОСТ Р 70447-2022. Железобетонные конструкции с петлевыми стыками арматуры для объектов использования атомной энергии. Требования к конструированию и расчету // Национальный стандарт Российской Федерации. – М., 2022. – 23 с.

Петлевой стык арматуры железобетонных конструкций представляет собой соединение двух или более стыкуемых арматурных каркасов путем пересечения встречных петель стержневой арматуры, как правило, круглого очертания, между петлями которых образуется бетонное ядро, передающее усилия с одной части элемента на другую или с одного элемента железобетонной конструкции на другой. Особенностью рассматриваемой конструкции петлевого стыка является его треугольное очертание по технологическим условиям, уменьшающее площадь поперечного сечения бетонного ядра, в сравнении с круглым очертанием. Для усиления треугольного петлевого стыка предусмотрено размещение в уменьшенном бетонном ядре продольного арматурного стержня.

В конечно-элементной модели здания жилого дома поперечные наружные и внутренние железобетонные стеновые панели, а также перекрытия из железобетонных многопустотных плит моделируем плоскими конечными элементами, жестко соединенными в узлах опирания с железобетонной монолитной заделкой по длине стыка, шириной, равной толщине стеновой панели. Железобетонную монолитную заделку в расчетной модели здания принимаем в виде объемных конечных элементов (рисунок 3).

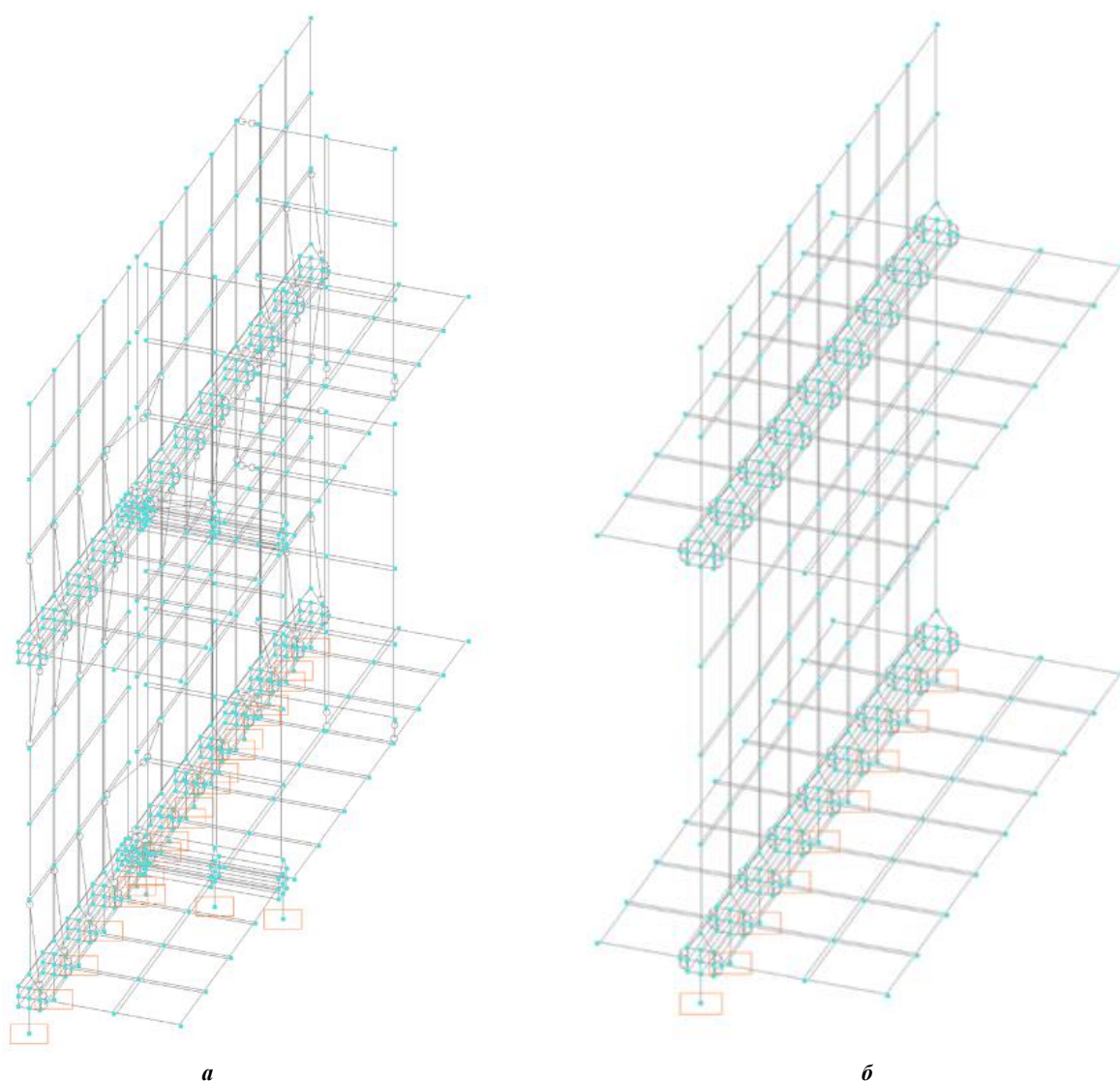


Рисунок 3. – Модель стыкового соединения плит перекрытий со стеновыми панелями на крайней (а) и средней (б) опорах

В исследуемой конструктивной схеме здания отдельно стоящие стеновые пилоны лоджий связаны между собой плитами перекрытий и балконными экранами в виде жесткой связи между вертикальными пилонами лоджий, соединенными с ними в углах экранов. Кроме того, предусмотрены не менее двух гибких связей по длине плит перекрытий лоджий с плитами перекрытий этажей здания. При этом закладные детали экранов лоджий соединены сваркой с продольной арматурой экрана. Пространственная конечно-элементная модель 10-этажного здания жилого дома представлена на рисунке 4.

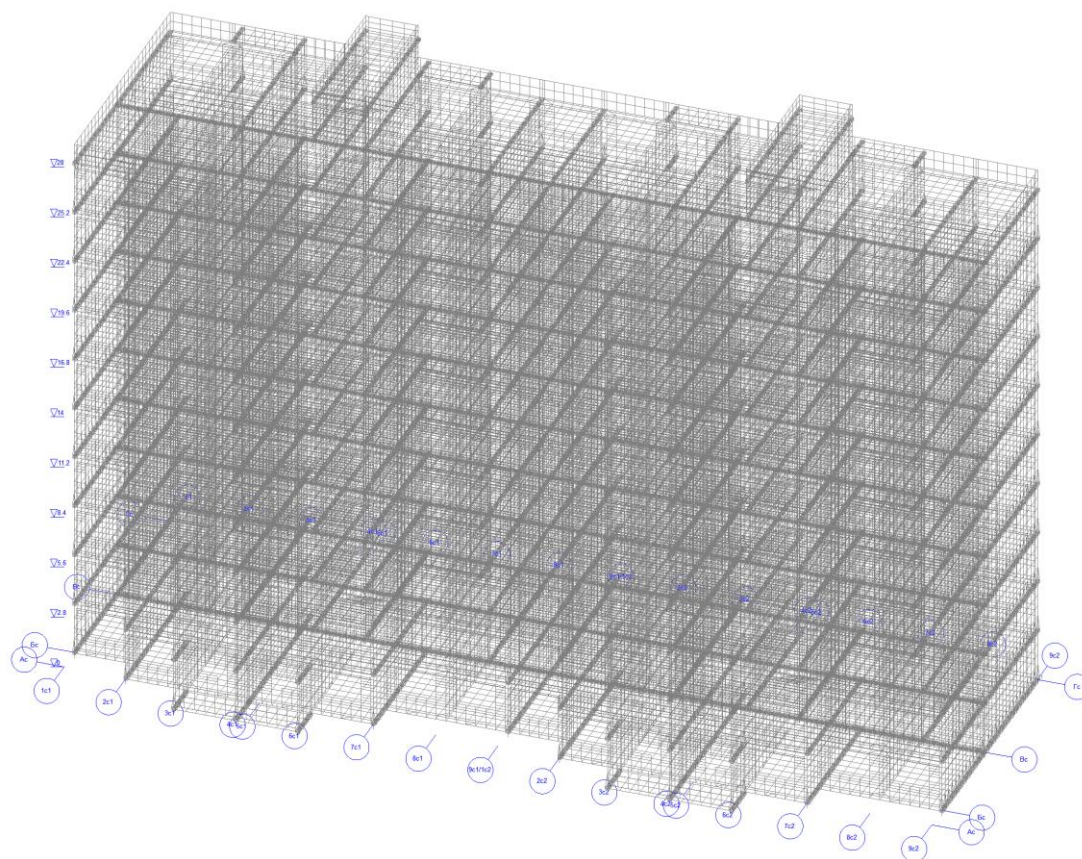


Рисунок 4. – Общий вид пространственной конечно-элементной модели здания 10-этажного жилого дома

Методика расчета на устойчивость к прогрессирующему обрушению. Конструктивная система жилых панельных зданий должна быть защищена от прогрессирующего обрушения в случае локального разрушения ее несущих конструкций при аварийных воздействиях, не предусмотренных условиями нормальной эксплуатации зданий (взрывы, пожары, ударные воздействия транспортных средств и т.п.)¹². Это требование означает, что в случае аварийных воздействий допускаются локальные разрушения несущих конструкций (полное или частичное разрушение отдельных стен в пределах одного этажа и двух смежных осей здания), но эти первичные разрушения не должны приводить к обрушению или к разрушению конструкций, на которые передается нагрузка, ранее воспринимавшаяся элементами, поврежденными аварийным воздействием.

Конструктивная система здания должна обеспечивать его прочность и устойчивость в случае локального разрушения несущих конструкций, как минимум на время, необходимое для эвакуации людей. Перемещение конструкций и раскрытие в них трещин в рассматриваемой чрезвычайной ситуации не ограничивается.

Стратегия устойчивости к прогрессирующему обрушению определяется классом здания жилого дома по последствиям обрушения¹³: 3 класс (многоквартирные жилые здания высотой более 4-х этажей). Коэффициент риска: для многоквартирного здания ($N=1$); высотой от 10 до 30 м, расположенного в небольшом городе (г. Орша Витебской области) ($E=0,3$); более 3-х этажей, с возможным большим скоплением людей ($S=3$); в здании жилого дома, оборудованном природным газом, люди находятся более 18 ч/сут ($C=0$); при обычном (нормальном) характере разрушения слабейшего элемента (несущей стеновой панели) ($D=0$):

$$RF=N+E+S-C-D=1+0,3+3-0-0=4,3>4.$$

Стратегия проверки устойчивости конструктивной системы рассматриваемого здания жилого дома к прогрессирующему обрушению состоит в следующем:

- 1) проверка предельных состояний несущей способности элементов конструктивной системы здания на восприятие воздействий в *обычной расчетной ситуации*;
- 2) проверка конструктивной системы здания расчетом на вынужденное удаление ключевого элемента (КЕ) (поддерживающей стеновой панели или любого другого фрагмента несущей стены (единовременно удаление только одного элемента для каждого этажа здания)) и сохранение живучести модифицированной конструктивной системы (несущая способность и общая устойчивость) в *особой расчетной ситуации*;

¹² См. сноску 5.

¹³ См. сноску 6.

3) проверка (КЕ) предельного состояния несущей способности, в том числе при действии *особой нагрузки* $A_d = 34$ кПа (по всем направлениям) или 34 кН/м – для конструктивного элемента;

4) анализ рисков для здания жилого дома, включая идентификацию явных и неявных угроз и рекомендации по выполнению узлов сопряжения элементов.

Расчетные сочетания воздействий при проверке предельных состояний несущей способности элементов конструктивной системы здания на восприятие воздействий в *обычной расчетной ситуации* составляются с учетом частных коэффициентов безопасности и коэффициентов сочетания воздействий¹⁴. При этом к материалам элементов конструктивной системы здания вводятся соответствующие виду проверки частные коэффициенты безопасности.

Расчетные сочетания воздействий проверки критериев обеспечения несущей способности и общей устойчивости конструктивной системы здания при расчете на прогрессирующее обрушение составляются с частными коэффициентами безопасности и коэффициентами сочетания воздействий в соответствии с приложением Ж СП 5.03.01-2020¹⁵. При этом при выполнении проверки устойчивости к прогрессирующему обрушению к материалам элементов конструктивной системы здания вводятся модифицированные частные коэффициенты безопасности.

Расчетные сочетания при проверке критериев обеспечения несущей способности отдельной конструкции (КЕ), непосредственно воспринимающей особое воздействие, составляются с частными коэффициентами безопасности и коэффициентами сочетания воздействий.

Проверку предельных состояний несущей способности элементов конструктивной системы здания на восприятие воздействий в *обычной расчетной ситуации* выполняем, используя пространственную расчетную модель в линейной постановке для статического расчета усилий в конструктивных элементах и проверке несущей способности на основе нелинейной деформационной расчетной модели (НДМ) поперечных сечений.

Для расчета модифицированных конструктивных систем с удаленными элементами (КЕ) используют пространственные расчетные модели с линейным статическим анализом усилий традиционным методом с врезкой дискретных пластических шарниров в сечениях, где изгибающие моменты достигают предельных значений. Полная расчетная нагрузка для особого сочетания воздействий прикладывается одновременно ко всем элементам модифицированной конструктивной системы с удаленным вертикальным несущим элементом. Полученные внутренние усилия из рассмотрения модифицированной расчетной схемы сравниваются с модифицированной предельной несущей способностью поперечных сечений конструктивных элементов, полученной из НДМ с модифицированными расчетными сопротивлениями материалов конструктивных элементов здания (повышающие коэффициенты к прочности бетона ($1,25 \cdot f_{cd}$) и арматуры ($1,25 \cdot f_{yd}$)). Расчетные сопротивления прокатной стали принимают с коэффициентом условий работы для пластичных сталей¹⁶ ($1,1 \cdot f_{yd}$).

В модифицированной расчетной схеме к участкам перекрытия (покрытия), находящимся над удаляемым элементом, прикладывают квазистатическую повышенную нагрузку в соответствии с особым сочетанием умножением на нагрузочный повышающий коэффициент LIF , учитывающим динамические (инерционные) и нелинейные эффекты, возникающие при внезапном приложении гравитационной нагрузки. Значения нагрузочного повышающего коэффициента LIF определяют по соответствующим диаграммам «усилие – перемещение» (при линейном статическом расчете внутренних усилий приняли $LIF=2$).

При анализе модифицированной конструктивной системы производят удаление участка стен длиной $2H$ или равной расстоянию в свету между элементами, раскрепляющими ее и ограничивающими ее перемещение в поперечном направлении. Для каждого установленного на плане положения удаляемого конструктивного элемента отдельный расчет конструктивной системы выполняют, рассматривая следующие модифицированные расчетные схемы с удаленным элементом: на нижнем этаже; на верхнем этаже (под покрытием); на этаже, расположенном в середине высоты здания.

Расчетные значения воздействий при проверках предельных состояний STR определены в соответствии с таблицей А.3 СН 2.01.01-2022¹⁷. Для постоянных воздействий коэффициент $\gamma_{Gj,sup}$ принят 1,3 и 1,2. Для переменных воздействий коэффициент γ_Q принят: ветровых – 1,5; снеговых – 1,5; функциональных – 1,4. Коэффициент сочетания ψ_0 : для функциональной нагрузки – 0,7; для снеговой и ветровой – 0,6. Все частные коэффициенты сочетаний воздействий учитываются при составлении комбинаций загружений: первое основное сочетание (STR); второе основное сочетание (STR); для проверок предельных состояний (GEO); для проверок предельных состояний (SLS) и прогрессирующего обрушения.

Результаты проверки на устойчивость к прогрессирующему обрушению. Проверка предельных состояний несущей способности, деформаций и трещиностойкости элементов конструктивной системы здания на восприятие воздействий в *обычной расчетной ситуации* выполнена с использованием пространственной расчетной модели в линейной постановке для статического расчета усилий в конструктивных элементах и проверке несущей

¹⁴ См. сноску 7.

¹⁵ См. сноску 4.

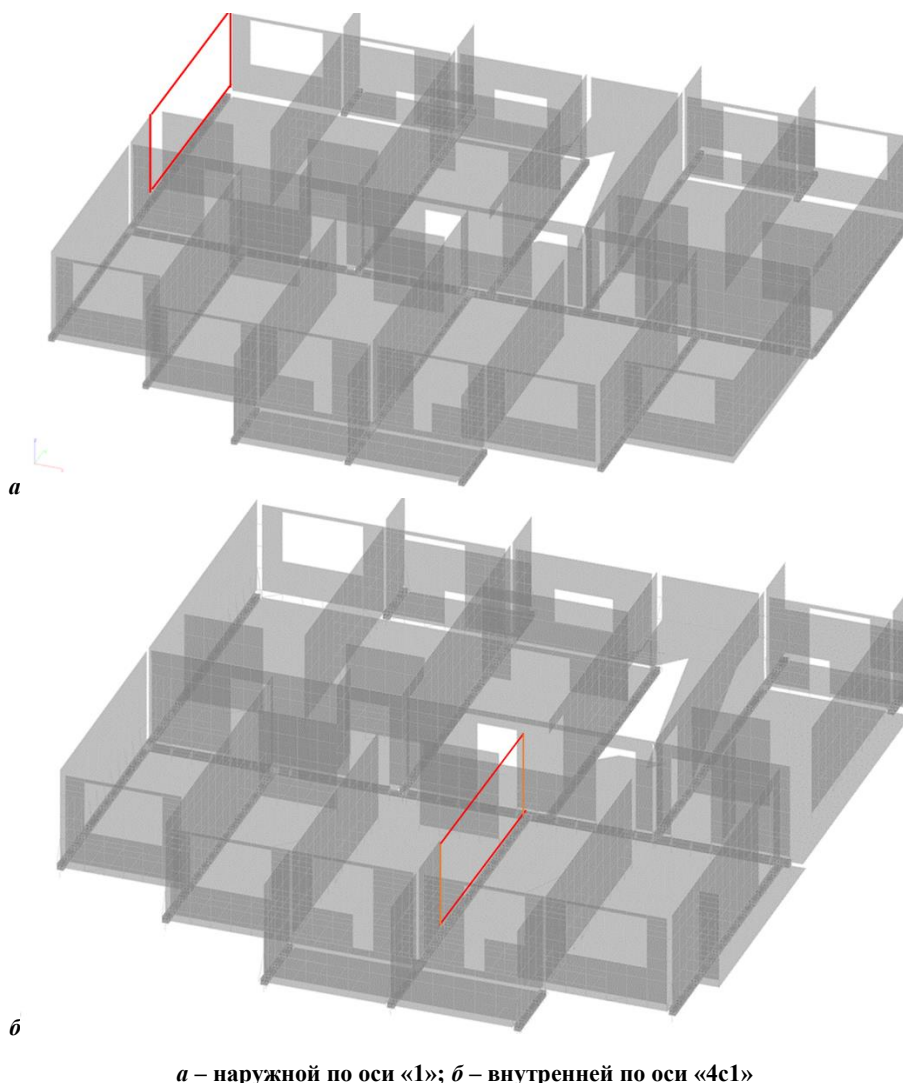
¹⁶ См. сноску 5.

¹⁷ См. сноску 7.

способности на основе: нелинейной деформационной расчетной модели (НДМ) поперечных сечений при действии изгибающих моментов и продольных усилий; ферменной аналогии при действии поперечных усилий. Проверка требований предельных состояний STR и SLS показала соответствие конструктивных элементов здания жилого дома предъявляемым требованиям. Кроме того, были вычислены нагрузки на фундамент от наземной части здания жилого дома для комбинации загружений GEO.

Проверка прочности соединения плит перекрытий над опорами в виде петлевого стыка, в котором петли арматуры создают бетонное ядро с учетом коэффициента повышения прочности бетона ядра стыка, равного 1,5, показала, что предельное усилие среза бетонного ядра N_{cl} превышает значение предельного усилия, выдерживаемого одним стержнем арматуры петлевого стыка при разрыве N_u .

Наиболее нагруженной стеновой панелью обеих секций конструктивной системы жилого дома является: внутренняя панель по осям «4с1» и «4с2»; наружная панель по осям «1с1» и «9с2». Выполняем последовательно удаление участка стеновых панелей длиной 6 м ($2H=2 \cdot 2,56=5,32 \text{ м} < 4 \cdot 1,5=6 \text{ м}$ (четыре плиты перекрытия шириной 1500 мм) на шести участках здания жилого дома. Для каждого положения удаляемого конструктивного элемента выполняем отдельный расчет конструктивной системы, рассматривая модифицированные расчетные схемы с удаленным элементом наружной и внутренней стены: на нижнем и верхнем этаже (под покрытием) и на этаже, расположенном в середине высоты здания. При этом на сопряжении удаленного участка с соседними плитами не учитываем влияние заполнения продольных швов между плитами перекрытий («клавишная» работа сборных плит перекрытий). Фрагмент модифицированной расчетной схемы здания жилого дома с удаленным участком наружной и внутренней стеновой панели этажей приведен на рисунке 5. При этом неразрезная конструкция плит перекрытия длиной 6,4 м теряет промежуточную опору и увеличивает их свободную длину до 12,8 м. В комбинациях загружений при статическом расчете внутренних усилий в элементах модифицированной расчетной схемы учитываются частные коэффициенты безопасности и сочетаний нагрузки в соответствии с принятой методикой.



а – наружной по оси «1»; **б** – внутренней по оси «4с1»

Рисунок 5. – Фрагмент модифицированной расчетной схемы здания жилого дома с удаленным участком стеновой панели (выделен красным цветом) (1 этап)

Полученные внутренние усилия из рассмотрения модифицированной расчетной схемы сравнивали с модифицированной предельной несущей способностью поперечных сечений конструктивных элементов, полученной из НДМ (рисунок 6) с модифицированными расчетными сопротивлениями материалов конструктивных элементов здания (повышающие коэффициенты к прочности бетона $(1,25 \cdot f_{cd})$ и арматуры $(1,25 \cdot f_{yd})$).



а – в пролете; б – у опоры

Рисунок 6. – Результаты вычисления параметров напряженно-деформированного состояния плит перекрытий в предельной стадии (цифры на выносных линиях – нормальные напряжения в МПа; синим и красным цветом показано распределение по высоте поперечного сечения относительных деформаций соответственно в сжатой и растянутой зонах; голубым и розовым – аналогично, нормальных напряжений; графики – диаграмма деформирования арматуры)

Учитывая, что основными усилиями в элементах, воспринимающих увеличенную нагрузку при удалении конструктивного элемента, являются изгибающие моменты, которые контролируются деформацией с учетом проверки способности сечений к пластическому повороту, расчетные усилия сравниваем с расчетным сопротивлением элемента, умноженным на нагрузочный повышающий коэффициент LIF , учитывающий расчетную деформативность элемента (при линейном расчете внутренних усилий $LIF=2$).

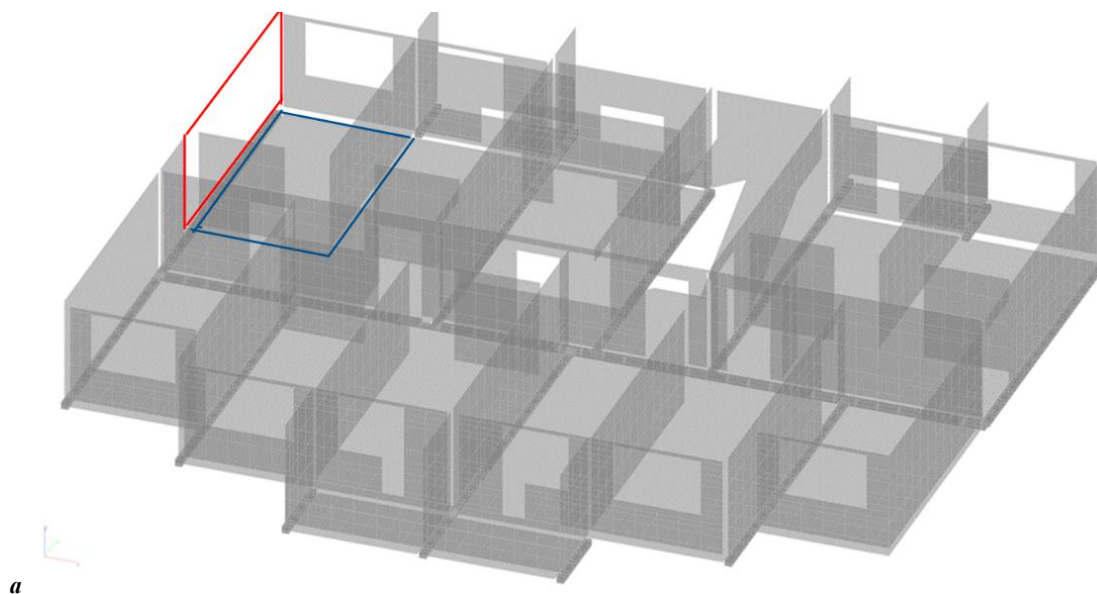
Проверка прочности плит перекрытий в зоне возможного обрушения с учетом пластической работы сечений в пролете (sp) и на опорах (sup) по всем вариантам удаления несущих элементов стен выполняется из условия пластического перераспределения усилий (угол пластического поворота сечений не превышает допустимого значения): $M_{E\Sigma} = M_{Esp} + 0,5 \cdot (M_{Esup1} + M_{Esup2}) \leq M_{R\Sigma} = [M_{Rsp} + 0,5 \cdot (M_{Rsup1} + M_{Rsup2})] / (b \cdot LIF)$. Условие восприятия действующих усилий плитами перекрытий при обрушении КЕ в зоне обрушения для рассматриваемого здания жилого дома не выполняется.

Проверка прочности участков стеновых панелей в зоне удаления конструктивных элементов проводится сравнением нормальных вертикальных сжимающих напряжений рядом с удаленным участком КЕ и горизонтальных растягивающих напряжений над удаленным участком КЕ с их прочностью бетона соответственно при сжатии и растяжении (без учета их конструктивного продольного и поперечного армирования): $\sigma_x \leq f_c / LIF$; $\sigma_y \leq f_{ct} / LIF$. Условие восприятия уменьшенным участком панели сжимающих усилий и отсутствия трещин нормального отрыва в стеновых панелях при удалении КЕ выполняется за исключением внутренних стеновых панелей первого и среднего по высоте здания этажей. При этом растягивающие усилия нижней зоны в стеновых панелях воспринимаются их продольным армированием и не угрожают обрушением.

В результате расчета на первом этапе всех вариантов возможной схемы обрушения конструктивного элемента в виде внутренней или наружной стеновых панелей установлено, что во всех вариантах возможного обрушения КЕ прочность не обеспечена.

При возможном обрушении участка панелей перекрытия на нижележащий этаж выполнена проверка прочности плит перекрытия нижележащего этажа (в неразрезной конструкции с длиной плит 6,4 м в пролетах) в особой расчетной ситуации на втором этапе. При этом нагрузка от собственного веса, функциональная нагрузка от разрушаемого участка передается как дополнительная на нижележащие плиты перекрытия (рисунок 7). Результаты проверки показали, что дальнейшего разрушения конструктивной системы здания жилого дома на вынужденное удаление ключевого элемента (КЕ) не происходит и сохраняется живучесть модифицированной конструктивной системы в особой расчетной ситуации. Повреждения носят локальный характер и ограничиваются разрушением плит перекрытий на участке над удаляемым КЕ по всем шести вариантам расчета.

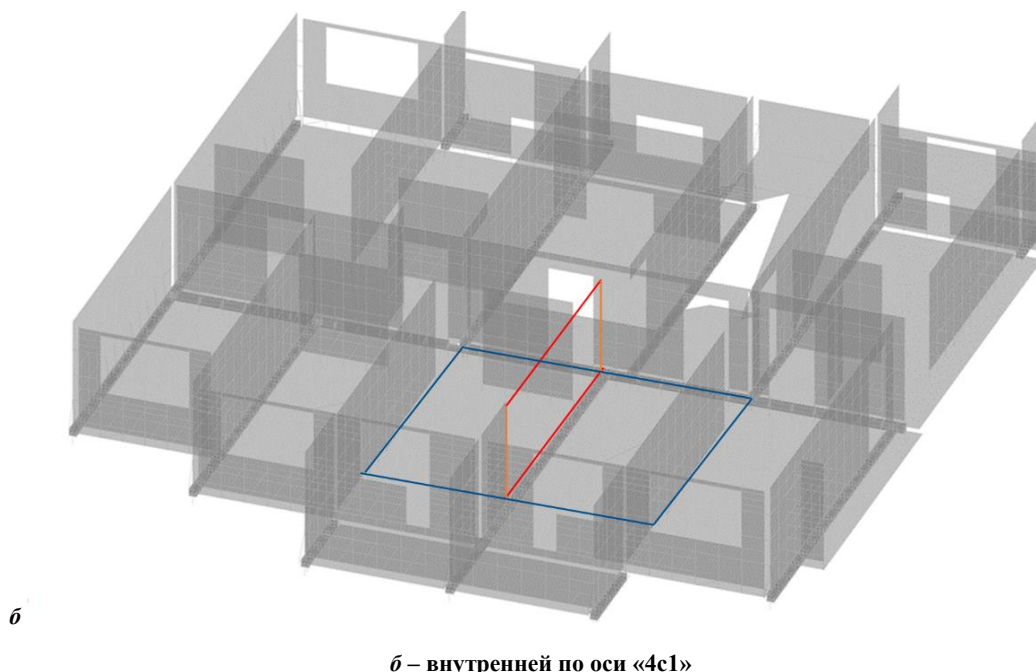
Согласно принятой методике расчета устойчивости к прогрессирующему разрушению выполнена проверка прочности внутренней и наружной стеновых панелей конструктивной системы здания жилого дома при действии *особой нагрузки* 34 кН/м – для конструктивного элемента по направлению: вертикально в плоскости элемента из условия $\sigma_{Ed} \leq \sigma_{Rd}$ и горизонтально перпендикулярно плоскости КЕ из условия ($M_{Ed} \leq M_{Rd}$).



a

a – наружной по оси «1»

Рисунок 7. – Фрагмент модифицированной расчетной схемы здания жилого дома с удаленным участком стеновой панели (выделен красным цветом) и участком перекрытия, воспринимающим увеличенную нагрузку от разрушенного участка перекрытия (выделен синим цветом) (2 этап) (начало)



б – внутренней по оси «4с1»

Рисунок 7. – Фрагмент модифицированной расчетной схемы здания жилого дома с удаленным участком стеновой панели (выделен красным цветом) и участком перекрытия, воспринимающим увеличенную нагрузку от разрушенного участка перекрытия (выделен синим цветом) (2 этап) (окончание)

Анализ рисков для здания жилого дома. В исследуемой конструктивной системе здания жилого дома стратегия управления рисками прогрессирующего обрушения направлена на создание неразрезности перекрытия и конструктивной целостности системы при полном расчете поврежденной конструктивной системы с учетом эффектов, которые не учитываются при традиционном проектировании (мембранные усилия в сборных перекрытиях с учетом заделки межплитных швов, большие углы поворота сечений и перемещения в результате пластического деформирования плит перекрытий в пролете и на опорах для полного перераспределения усилий и т.д.). Пластичность работы конструктивных элементов перекрытий в пролете и в зоне петлевого стыка данного объекта в предельной стадии обеспечивается применением арматуры класса деформативности не ниже В (таблица 6.7 СП 5.03.01-2020¹⁸).

Учитывая конструктивное исполнение петлевого стыка плит перекрытий смежных пролетов исследуемого объекта, исходя из конструктивных соображений, в бетонном ядре петлевого стыка арматуры предусмотрена установка дополнительной продольной арматуры. Дополнительная продольная арматура, устанавливаемая в бетонном ядре петлевых стыков арматуры, у открытых торцевых поверхностей, должна быть заанкерена за крайнюю продольную арматуру.

В исследуемой конструктивной системе стеновые пилоны лоджий скреплены плитами перекрытий и балконными экранами посредством жесткой связи между вертикальными пилонами лоджий, соединенными с ними в углах экранов. Кроме того, предусмотрены не менее двух гибких связей по длине плит перекрытий лоджий с плитами перекрытий этажей здания. При этом закладные детали экранов лоджий следует соединять сваркой с продольной арматурой экрана. В проекте следует указать на недопустимость демонтажа балконных экранов в процессе эксплуатации зданий (например, при устройстве балконного остекления «в пол»). Названные мероприятия обеспечивают устойчивость конструкции лоджий при обычной и особой расчетной ситуации.

Для исследуемой конструктивной системы здания жилого дома нет необходимости применять сложные конструктивные решения, которые в свою очередь ведут к удорожанию объекта. Согласно проведенному исследованию увеличения прочности конструктивных элементов также не требуется.

Заключение. Проведенное исследование конструктивной системы здания 10-этажного 2-секционного многоквартирного жилого дома с шагом несущих стен 6,4 м показывает соответствие требованиям по прочности и устойчивости в обычной расчетной ситуации и против прогрессирующего обрушения в особой расчетной ситуации.

На примере многоэтажного крупнопанельного здания жилого дома с увеличенным шагом поперечных стен и петлевыми соединениями смежных плит перекрытий в местах платформенных стыков продемонстрирована применимость метода «локальной» прочности при линейном статическом расчете внутренних усилий конструктивных элементов при измененной расчетной схеме и нелинейном анализе поперечных сечений конструктивных элементов панельного здания жилого дома.

¹⁸ См. сноску 4.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сергеев Д.Д. Краткий обзор отчета об аварии 22-этажного жилого дома в Лондоне. Обзорная информация № 2. – М.: ГлавАПУ, 1969. – 120 с.
2. Тур В.В., Марковский Д.М., Тур А.В. Стратегия управления рисками прогрессирующего обрушения при проектировании зданий и сооружений // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2008. – № 1. – С. 185–190.
3. Тур В.В. Оценка рисков конструктивных систем в особых расчетных ситуациях // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F, Строительство. Прикладные науки. – 2009. – № 6. – С. 2–14.
4. Краснощеков Ю.В. Расчет каркасного здания на прогрессирующее обрушение при аварийном отказе колонны // Строительная механика и расчет сооружений. – 2017. – № 1(270). – С. 54–58.
5. Краснощеков Ю.В. Защита от прогрессирующего обрушения зданий со сборными железобетонными перекрытиями // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. – 2022. – Т. 19, № 2. – С. 290–299. DOI: 10.26518/2071-7296-2022-19-2-290-299.
6. Семашкин А.Д., Туснин А.Р., Бергер М.П. Способы расчета несущих конструкций на устойчивость к прогрессирующему разрушению // Строительство: наука и образование. – 2023. – Т. 13, № 2. – С. 31–50. DOI: 10.22227/2305-5502.2023.2.3.
7. Кирколуп Е.Р., Харламов И.В. Особенности расчета стальных каркасов одноэтажных производственных зданий на прогрессирующее обрушение квазистатическим методом // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. – 2024. – Т. 21, № 6. – С. 948–959. DOI: 10.26518/2071-7296-2024-21-6-948-959.
8. Расчет на прогрессирующее обрушение большепролетных металлических конструкций покрытий / Д.Н. Лазовский, А.В. Поправко, Т.М. Пецольд и др. // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В, Прикладные науки. Строительство. – 2007. – № 6. – С. 29–35.
9. Ефрюшин С.В., Саражинский А.С. Расчетный анализ конструктивных мероприятий по повышению устойчивости каркасного здания к прогрессирующему обрушению // Строительная механика и конструкции. – 2018. – № 2(17). – С. 97–110.
10. Каньшина Е.А., Балдин И.В. Расчет блок-секции 9-этажного кирпичного дома с железобетонными сердечниками на прогрессирующее обрушение // Избранные доклады 65-й Юбилейной университетской научно-технической конференции студентов и молодых ученых: сборник докладов, Томск, 25 апреля 2019 года. – Томск: Томский государственный архитектурно-строительный университет, 2019. – С. 60–63.
11. Особенности расчета на прогрессирующее обрушение каркаса уникального здания многофункционального комплекса / Г.М. Кравченко, Е.В. Труфанова, А.К. Кущенко и др. // Инженерный вестник Дона. – 2022. – № 9(93). – С. 172–181.
12. Киреева Э.И. Крупнопанельные здания с петлевыми соединениями конструкций // Жилищное строительство. – 2013. – № 9. – С. 47–51.
13. Домасевич Р.В. Крупнопанельные здания с петлевыми соединениями конструкций // VII Международный студенческий строительный форум – 2022: сборник докладов VII Международного студенческого строительного форума, Белгород, 24 ноября 2022 года. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2022. – С. 120–124.
14. Проектирование железобетонных конструкций с петлевыми стыками арматуры в соответствии с ГОСТ Р 70447-2022 / К.В. Авдеев, А.Н. Болгов, С.А. Зенин и др. // Бетон и железобетон. – 2023. – Т. 618, № 4. – С. 18–27. DOI: 10.37538/0005-9889-2023-4(618)-18-27.
15. Петлевые стыки стержневой арматуры. История развития, проблемы и актуальность / К.В. Авдеев, А.Н. Мамин, В.В. Бобров и др. // Теория инженерных сооружений. Строительные конструкции. – 2022. – № 6(104). – С. 4–11. DOI: 10.33979/2073-7416-2022-104-6-4-11.

REFERENCES

1. Sergeev, D. (1969). *Kratkii obzor otcheta ob avarii 22-etazhnogo zhilogo doma v Londone. Obzornaya informatsiya № 2*. M.: GlavAPU. (In Russ.).
2. Tur, V., & Markovskii, D. (2008). Strategiya upravleniya riskami progressiruyushchego obrusheniya pri proektirovanii zdaniy i sooruzhenii. *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, (1), 185–190. (In Russ.).
3. Tur, V.V. (2009). Otsenka riskov konstruktivnykh sistem v osobykh raschetnykh situatsiyakh. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya F, Stroitel'stvo. Prikladnye nauki*, (6), 2–14. (In Russ.).
4. Krasnoshchekov, Yu.V. (2017). Raschet karkasnogo zdaniya na progressiruyushchee obrushenie pri avariinom otkaze kolonny. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenii*, 1(270), 54–58. (In Russ.).
5. Krasnoshchekov, Yu.V. (2022). Zashchita ot progressiruyushchego obrusheniya zdaniy so sbornymi zhelezobetonnyimi perekrytiyami. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta*, 19(2), 290–299. DOI: 10.26518/2071-7296-2022-19-2-290-299. (In Russ., abstr. in Engl.).
6. Semashkin, A.D., Tusnin, A.R., & Berger, M.P. (2023). Spособы rascheta nesushchikh konstruktssii na ustoichivost' k progressiruyushchemu razrusheniyu. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie*, 13(2), 31–50. DOI: 10.22227/2305-5502.2023.2.3. (In Russ., abstr. in Engl.).
7. Kirkolup, E.R., & Kharlamov, I.V. (2024). Osobennosti rascheta stal'nykh karkasov odnoetazhnykh proizvodstvennykh zdaniy na progressiruyushchee obrushenie kvazistaticheskim metodom. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta*, 21(6), 948–959. DOI: 10.26518/2071-7296-2024-21-6-948-959. (In Russ., abstr. in Engl.).
8. Lazovskii, D.N., Popravko, A.V., Petsol'd, T.M., & Zhuravskii, V.Yu. (2007). Raschet na progressiruyushchee obrushenie bol'sheproletnykh metallicheskih konstruktssii pokrytii. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya B, Prikladnye nauki. Stroitel'stvo*, (6), 29–35. (In Russ.).
9. Efryushin, S.V., & Sarazhinskii, A.S. (2018). Raschetnyi analiz konstruktivnykh meropriyatii po povysheniyu ustoichivosti karkasnogo zdaniya k progressiruyushchemu obrusheniyu. *Stroitel'naya mekhanika i konstruktssii*, 2(17), 97–110. (In Russ.).
10. Kan'shina, E.A., & Baldin, I.V. (2019). Raschet blok-sektsii 9-etazhnogo kirpichnogo doma s zhelezobetonnyimi serdechnikami na progressiruyushchee obrushenie. *Izbrannye doklady 65-i Yubileinoi universitetskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii studentov i molodykh uchenykh: sbornik dokladov*, Tomsk, 25 aprelya 2019 goda (60–63). Tomsk: Tomskii gosudarstvennyi arkhitekturno-stroitel'nyi universitet. (In Russ.).

11. Kravchenko, G.M., Trufanova, E.V., Kushchenko, A.K., & Bychenko, I.V. (2022). Osobennosti rascheta na progressiruyushchee obrushenie karkasa unikal'nogo zdaniya mnogofunktsional'nogo kompleksa. *Inzhenernyi vestnik Dona*, 9(93), 172–181. (In Russ.).
12. Kireeva, E.I. (2013). Krupnopanel'nye zdaniya s petlevymi soedineniyami konstruksii. *Zhilishchnoe stroitel'stvo*, (9), 47–51. (In Russ.).
13. Domasevich, R.V. (2022). Krupnopanel'nye zdaniya s petlevymi soedineniyami konstruksii. VII Mezhdunarodnyi studencheskii stroitel'nyi forum – 2022: sbornik dokladov VII Mezhdunarodnogo studencheskogo stroitel'nogo foruma, Belgorod, 24 noyabrya 2022 goda (120–124). Belgorod: Belgorodskii gosudarstvennyi tekhnologicheskii universitet im. V.G. Shukhova. (In Russ.).
14. Avdeev, K.V., Bolgov, A.N., Zenin, S.A., & Mart'yanov, K.V. (2023). Proektirovanie zhelezobetonnykh konstruksii s petlevymi stykami armatury v sootvetstvii s GOST R 70447-2022. *Beton i zhelezobeton*, 618(4), 18–27. DOI: 10.37538/0005-9889-2023-4(618)-18-27. (In Russ., abstr. in Engl.).
15. Avdeev, K.V., Mamin, A.N., Bobrov, V.V., Bammatov, A.A., Mart'yanov, K.V., & Pryakhin, S.N. (2022). Petlevye styki sterzhnevoi armatury. Istoriya razvitiya, problemy i aktual'nost'. *Teoriya inzhenernykh sooruzhenii. Stroitel'nye konstruksii*, 6(104), 4–11. DOI: 10.33979/2073-7416-2022-104-6-4-11. (In Russ., abstr. in Engl.).

Поступила 01.09.2025

PRACTICAL CALCULATION OF STABILITY TO PROGRESSIVE COLLAPSE OF A 10-STORY RESIDENTIAL BUILDING WITH INCREASED PITCH OF TRANSVERSE LOAD-BEARING WALLS

D. LAZOUSKI¹⁾, A. KHATKEVICH²⁾, A. MATLAKHOV³⁾

(^{1), 2)} Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk, ³⁾ UE "Vitebskgrazhdanproekt")

The article presents the results of practical application of the "local" strength method in the linear static calculation of internal forces of structural elements with a modified calculation scheme and nonlinear analysis of cross-sections of structural elements of a panel residential building with an increased step of transverse walls and loop connections of adjacent floor slabs at platform joints.

The conducted study of the structural system of a 10-story 2-section multi-apartment residential building with a step of load-bearing walls of 6.4 m shows compliance with the requirements of regulatory documents for strength and stability in a normal design situation and against progressive collapse in a special design situation.

Keywords: *progressive collapse, linear static calculation of internal forces, nonlinear analysis of cross sections, original design scheme, modified design scheme.*