

УДК 624.012.45

<https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-2-290-299><https://elibrary.ru/WVZTMU>

Научная статья



ЗАЩИТА ОТ ПРОГРЕССИРУЮЩЕГО ОБРУШЕНИЯ ЗДАНИЙ СО СБОРНЫМИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫМИ ПЕРЕКРЫТИЯМИ

Ю. В. Краснощеков*Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ),
г. Омск, Россия**uv1942@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-6695-1648>*

АННОТАЦИЯ

Введение. Приведены результаты анализа исследований защиты многоэтажных зданий от прогрессирующего обрушения, которые свидетельствуют о недостаточном внимании к конструктивным системам из сборного железобетона, вследствие чего нормы проектирования ориентируют проектировщика на применение не всегда эффективных монолитных конструкций. В частности, практически не изучена проблема защиты от прогрессирующего обрушения при исключении сборных ригелей перекрытий и покрытий. Цель исследования - разработка метода расчета неразрезной системы многопустотных плит, изготовленных методом безопалубочного формования.

Материалы и методы. При проектировании защиты многоэтажных зданий из сборных элементов обычно выполняется статический расчёт с исключением вертикальных конструкций (стен, колонн) и усилением ригелей перекрытий и покрытий путем обеспечения их неразрезности. Существуют конструктивные методы усиления сборных перекрытий созданием неразрезности плит смежных пролетов с помощью соединительных элементов из пластичной арматурной стали, однако расчет таких систем не разработан. Предлагается метод расчета системы двух плит по схеме жесткой нити.

Выводы. В настоящее время разработаны теоретические методы, позволяющие решать различные задачи защиты зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Однако существует множество конструктивных требований по защите многоэтажных зданий от прогрессирующего обрушения, пока не получивших экспериментально-теоретического подтверждения для эффективного решения практических задач. Представляется, что в данной статье одна из таких задач частично решена.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: прогрессирующее обрушение, железобетонные сборные конструкции, конструктивные системы зданий, предельное состояние, расчётные схемы, моделирование.

Статья поступила в редакцию 29.03.2022; одобрена после рецензирования 11.04.2022; принята к публикации 12.04.2022.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. **Конфликт интересов отсутствует.**

Для цитирования: Краснощеков Ю.В. Защита от прогрессирующего обрушения зданий со сборными железобетонными перекрытиями // Вестник СибАДИ. 2022. Т.19, № 2(84). С. 290-299. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-19-2-290-299>

© Краснощеков Ю. В., 2022



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

<https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-2-290-299>
<https://elibrary.ru/WVZTMU>
Original article

PROTECTION AGAINST PROGRESSIVE COLLAPSE OF BUILDINGS WITH PRECAST REINFORCED CONCRETE FLOORS

Yuriy V. Krasnoshchekov

*Siberian State Automobile and Highway University (SibADI),
Omsk, Russia*

uv1942@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-6695-1648>

ABSTRACT

Introduction. The results of the studies analysis on the protection of multi-storey buildings from progressive collapse are presented, which indicates insufficient attention to structural systems made of precast reinforced concrete, as a result of which design standards orient the designer to the use of not always effective monolithic structures. In particular, the problem of protection against progressive collapse with the exclusion of prefabricated crossbars of floors and coatings has not been practically studied. The purpose of the study is to develop a method for calculating a continuous system of hollow plates made by the method of formless molding.

Materials and methods. When designing the protection of multi-storey buildings from prefabricated elements, a static calculation is usually carried out with the exception of vertical structures (walls, columns) and the reinforcement of floor crossbars and coatings by ensuring their continuity. There are constructive methods of reinforcing prefabricated floors by creating continuous plates of adjacent spans with the help of connecting elements made of plastic reinforcing steel, but the calculation of such systems has not been developed. A method for calculating a system of two plates according to a rigid thread scheme is proposed.

Conclusions. Currently, theoretical methods have been developed to solve various problems of protecting buildings and structures from progressive collapse. However, there are many design requirements for the protection of multi-storey buildings from progressive collapse, which have not yet received experimental and theoretical confirmation for the effective solution of practical problems. It seems that in this article one of these problems is partially solved.

KEYWORDS: *progressive collapse, reinforced concrete prefabricated structures, structural systems of buildings, beyond condition, design schemes, modelling.*

The article was submitted 29.03.2022; approved after reviewing 11.04.2022; accepted for publication 12.04.2022.

The authors have read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

For citation: Krasnoshchekov Yuriy V. Protection against progressive collapse of buildings with precast reinforced concrete floors. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022; 19 (2): 290-299. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-2-290-299>

© Krasnoshchekov Y. V., 2022



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1. Анализ исследований защиты многоэтажных зданий от прогрессирующего обрушения, выполненных в последние два десятилетия свидетельствует о недостаточном внимании к конструктивным системам из сборного железобетона, вследствие чего нормы проектирования ориентируют проектировщика на применение монолитных конструкций. Несмотря на растущий интерес исследователей к этой проблеме, многие задачи ждут своего решения. Практически не изучены особенности работы сборных железобетонных перекрытий в запредельной стадии. Цель исследования – анализ и разработка способов защиты от прогрессирующего обрушения многоэтажных зданий со сборными железобетонными перекрытиями.

2. Решается задача обеспечения необходимого сопротивления прогрессирующему обрушению многоэтажных зданий путем усиления сборных железобетонных плит при отказе несущих стен или ригелей, на которые они опираются. Неразрезность плит достигается с помощью соединительных элементов из пластичной стали. При расчете такие плиты рассматриваются как элементы висячей системы, а висячая конструктивная система с жесткими железобетонными плитами принимается в виде жесткой нити или системы жестких нитей, т.е. элементов, работающих на изгиб и растяжение. Рассмотрен пример расчета типовых плит, изготовленных методом безопалубочного формования, при исключении опорной конструкции.

3. В настоящее время разработаны теоретические методы, позволяющие решать различные задачи защиты зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Однако существует множество конструктивных требований, пока не получивших теоретического подтверждения для решения практических задач и получения эффективных решений. Представляется решение одной из таких задач.

ВВЕДЕНИЕ

Пожалуй, основной проблемой безопасной эксплуатации зданий повышенной ответственности в последние два десятка лет является защита от прогрессирующего обрушения. Проблема прогрессирующего обрушения формировалась в период с 1968 по 2001 г. в результа-

те цепи событий, связанных с частичным или полным обрушением зданий, различающихся по конструктивным системам, материалам несущих конструкций и строительным технологиям, при возрастающих экономических и человеческих потерях.

Одним из первых принято считать прогрессирующее обрушение угла 22-этажного крупнопанельного здания в Лондоне в 1968 г. в результате взрыва газа на 18 этаже. Термин «прогрессирующее обрушение» и формулировка проблемы защиты от него панельных зданий появились в докладе комиссии, расследовавшей причины аварии. После публикации доклада практически во всех развитых странах были начаты исследования этой проблемы, которые впоследствии были отражены в нормах проектирования. Однако в период между 1975 и 1995 годами исследования прогрессирующего обрушения пережили определённый застой [1]. Не случайно, что в России первый документ¹ по этой проблеме появился лишь в 1999 г.

Проблема защиты от прогрессирующего обрушения многократно обострилась после разрушения крыла каркасного здания торгового центра в Сеуле в 1995 г. Обрушение произошло в результате потери устойчивости железобетонного каркаса из-за продавливания монолитной плиты при локальном перегрузе безбалочного покрытия [2].

Как видно, первые случаи прогрессирующего обрушения связаны с бетонными и железобетонными конструкциями. Обрушение высотных зданий Всемирного торгового центра с металлическим каркасом в 2001 г. в результате террористической атаки явилось решающим толчком для глобализации проблемы прогрессирующего обрушения зданий и поводом для исследований различных конструктивных систем зданий на аварийные (запредельные) воздействия.

Такие исследования не прекращаются и в настоящее время, что свидетельствует о том, что проблема ещё далеко не решена. В работе [3] приведен анализ основных экспериментально-теоретических исследований, выполненных в последние полтора десятка лет и реализованных в нормах проектирования. На сегодняшний день большинство существующих исследований сосредоточено на железобетонных монолитных конструкциях [4, 5, 6].

¹ Рекомендации по предотвращению прогрессирующего обрушения крупнопанельных зданий. Москомархитектура. 1999.

Результаты сравнения затрат, требуемых для защиты от прогрессирующего обрушения бескаркасных и каркасных зданий приведены в работе [7].

Следует отметить, что работа каркасов из сборных железобетонных элементов, которые наиболее часто используются для зданий с массовым нахождением людей, совершенно недостаточно изучена в стадии прогрессирующего обрушения [3]. Описаны лишь весьма скромные результаты исследований по обеспечению устойчивости сборных связевых каркасов из железобетонных элементов [8], которые пока не получили должного развития.

Обзор исследований по прогрессирующему обрушению сборных железобетонных конструкций, выполненных за рубежом, представлен в работе [8]. Отмечено, что сборные железобетонные конструкции считаются более уязвимыми к прогрессирующему обрушению, чем монолитные, ввиду отсутствия эффективного механизма перераспределения нагрузки между элементами. Наиболее часто наблюдаются разрушения, обусловленные сдвигом и падением элементов сборных пе-

рекритий и покрытий многоэтажных зданий, которые рассматриваются обычно в виде систем балочных и плитных элементов. Сопротивление элементов прогрессирующему обрушению определяют по схемам предельных состояний: изгибной, арочной или цепной [9]. Иногда процесс прогрессирующего обрушения представляют в виде последовательности стадий балочного механизма, переходной стадии и стадии цепного действия [1].

При исследовании сборных конструктивных систем большое внимание уделяется работе узловых соединений и их усилению [10]. В работе [11] предложена конструкция платформенного сборно-монолитного стыка рамных панелей и многопустотных плит (рис. 1). Отмечено, что при выключении пролетного сечения ригеля локальное разрушение следует ограничить самим ригелем и опирающимися на него плитами смежных пролетов этих плит. Сделан вывод, что традиционные решения конструкций каркасных зданий должны быть дополнены новыми элементами, обеспечивающими защиту от прогрессирующего обрушения.

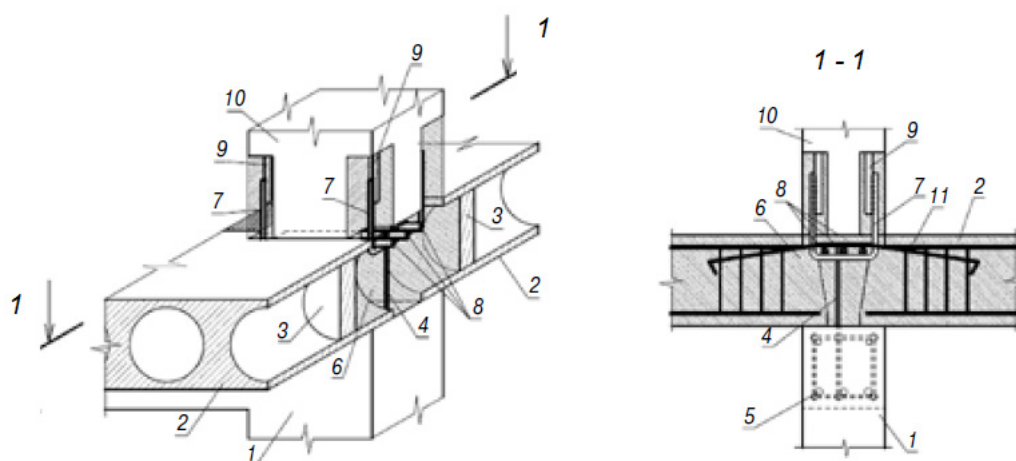


Рисунок 1 – Платформенный сборно-монолитный стык:
1 – панель-рама; 2 – многопустотная плита; 3 – заглушка;
4 – арматурные выпуски из ригеля; 5 – каркас ригеля;
6 – бетон замоноличивания; 7 – выпуски арматуры;
8 – армирование монолитной части ригеля;
9 – арматура стойки; 10 – стойка рамы;
11 – соединительный стержень

Источник: заимствовано [11] с авторским изменением.

Figure 1 – Platform prefabricated monolithic joint:
1 - panel-frame; 2 - multi-wall plate; 3 - blanking;
4 - reinforcement outlets from crossbar; 5 - frame of crossbar;
6 - grouting concrete; 7 - valve outlets;
8 - reinforcement of the monolithic part of the crossbar;
9 - strut reinforcement; 10 - frame strut;
11 - connecting rod

Source: borrowed [11] with the author's change.

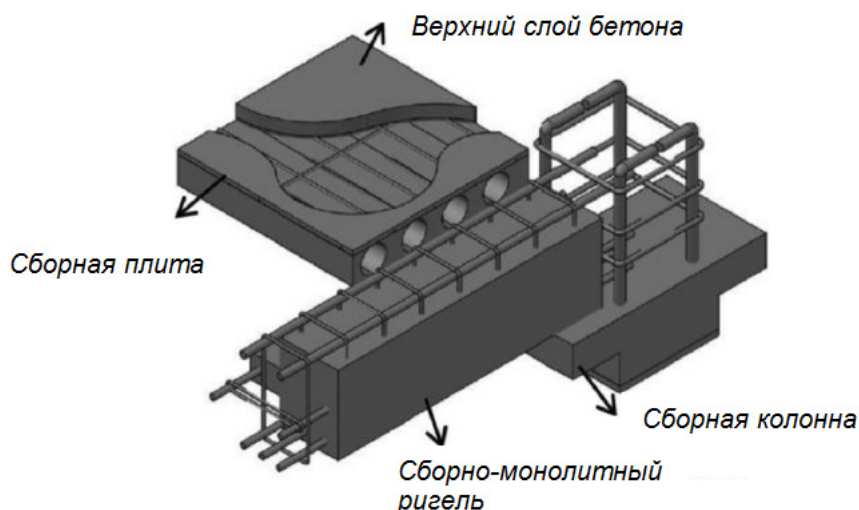


Рисунок 2 – Конструкция узла сборно-монокрипного каркаса по [12]
Источник: заимствовано [12] с авторским изменением.

Figure 2 – Platform prefabricated monolithic joint [12]
Source: borrowed [12] with the author's change.

Результаты исследования каркаса с подобными элементами перекрытий приведены в [12] (рис. 2).

Можно отметить также исследования перекрытий каркасных зданий с использованием численных подходов. В статьях [13, 14] рассматривается роль моделирования динамического разрушения железобетонных конструкций. В работе [14] приведены результаты экспериментально-теоретического исследования железобетонных плит перекрытия при отказе колонн, свидетельствующие о значительных расхождениях опытных и теоретических данных.

Авторы работы [15] изучали влияние конструкции железобетонных балок и плит перекрытия на сопротивление прогрессирующему обрушению каркасных зданий. Результаты исследования показали существенное влияние перекрытий на перераспределение усилий в элементах каркаса.

Таким образом, выполнен большой объем исследований по защите от прогрессирующего обрушения крупнопанельных зданий и монолитных каркасов. Несмотря на растущий интерес исследователей к этой проблеме, многие задачи ждут своего решения. Практически не изучены особенности работы сборных железобетонных перекрытий в запредельной стадии.

Цель данного исследования – анализ и разработка способов защиты от прогресси-

рующего обрушения многоэтажных зданий со сборными железобетонными перекрытиями.

Решается задача обеспечения необходимого сопротивления прогрессирующему обрушению многоэтажных зданий путем усиления сборных железобетонных плит при отказе несущих стен или ригелей, на которые они опираются.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследования приняты многоэтажные здания со сборными перекрытиями из типовых изделий. В сборных перекрытиях применяют три типа железобетонных плит: сплошного сечения, многопустотных и ребристых. Конструкции типовых плит, изготавливаемых в России, достаточно полно описаны в справочнике [16]. Для исследования приняты многопустотные плиты, изготавливаемые по технологии безопалубочного формования.

Типовые изделия рассчитаны для работы по однопролетной балочной схеме. При отказе опорных конструкций, такие плиты неизбежно должны падать. Поэтому с целью защиты от прогрессирующего обрушения при проектировании многоэтажных зданий отдается предпочтение монолитным перекрытиям с двойным армированием².

² Рекомендации по защите жилых каркасных зданий при чрезвычайных ситуациях. М.: ГУП НИИЦ. 2002. 11 с.

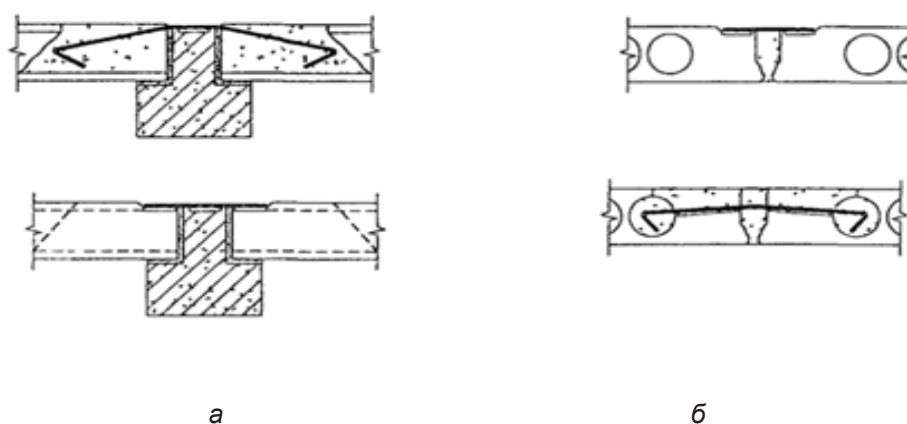


Рисунок 3 – Варианты соединения плит перекрытия:
а) с ригелями; б) между собой
Источник: заимствовано с авторским изменением³.

Figure 3 – Options for connecting floor slabs:
a) with crossbars; b) among themselves
Source: borrowed with the author's change³.

Применение типовых изделий, как правило, допустимо лишь при усилении перекрытий на основе специальных расчетов. На данном этапе теоретической основой исследования являются соответствующие положения нормативных проектирования и стандартов.

Основное средство защиты многоэтажных зданий от прогрессирующего обрушения - создание неразрезности любых перекрытий с помощью горизонтальных продольных и поперечных связей. Пластичные связи предназначены для удержания перекрытия от падения (в случае его разрушения) на ниже лежащий этаж при отказе колонн, ригелей или стен. Пластичность необходима для того, чтобы после исчерпания несущей способности связи не выключались из работы и допускали сравнительно большие деформации.

Связи рекомендуются рассчитывать на нормативный вес половины пролета перекрытия с расположенным на нем полом. Сечения связей определяются расчетом на усилия не менее 10 кН на 1 м длины здания или 15 кН на 1 м ширины здания. Расстояние между связями не более чем 3,6 м. Связи соединяют элементы сборного перекрытия и размещают обычно в пустотах (рис. 3).

Подобное решение усиления сборных перекрытий предусмотрено также для защиты от прогрессирующего обрушения бескаркасных зданий⁴. В таких зданиях связи закрепляют плиты перекрытия в железобетонных монолитных поясах, расположенных по наружным стенам на каждом этаже.

Согласно СП 385.1325800.2018⁵, введенному в действие 2019-01-06, здания и сооружения повышенного уровня ответственности, а также здания и сооружения нормального уровня ответственности с массовым пребыванием людей следует проектировать с учетом защиты от прогрессирующего обрушения вследствие начального локального разрушения. Предполагаемое при проектировании локальное разрушение понимается как удаление несущего конструктивного элемента, имитирующего потерю несущей способности и устойчивости, а также приводящего к изменению конструктивной системы здания и сооружения.

Для многоэтажных зданий рассматривают локальные разрушения несущей стены на участке длиной не более 6 м, колонны, ригеля, элемента несущей конструкции покрытия. Надо полагать, что упомянутые здесь ригели могут быть элементами не только покрытий, но и перекрытий.

³ Рекомендации по защите жилых каркасных зданий при чрезвычайных ситуациях. М.: ГУП НИАЦ. 2002. 11 с.

⁴ Рекомендации по защите жилых зданий с несущими кирпичными стенами при чрезвычайных ситуациях. М.: ГУП НИАЦ. 2002. 14 с.

⁵ СП 385.1325800.2018. Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Правила проектирования. Основные положения (с Изменением № 1). Введен 2019-01-06.

Рациональными средствами защиты от прогрессирующего обрушения являются повышение степени статической неопределимости конструкций, а также применение материалов и конструктивных решений, обеспечивающих развитие в элементах пластических деформаций. В системах из сборных элементов особое внимание должно уделяться узлам и соединениям, способным воспринимать перераспределение усилий.

Для обеспечения защиты от прогрессирующего обрушения выполняют расчёт как системы здания и сооружения, так и отдельных элементов и узлов сопряжений по двум расчётным схемам. По первичной расчётной схеме выявляют критические элементы и участки локального разрушения, по вторичной схеме с исключением критического элемента проверяют способность конструктивной системы выполнять ограниченные несущие функции в результате предполагаемого локального разрушения. Критерии несущей способности и деформативности принимают как для особого предельного состояния. Для расчёта следует использовать статический метод.

При больших прогибах плиты рассматриваются как элементы висячей (цепной) системы с условием обеспечения анкеровки арматуры и восприятия возникающих при этом горизонтальных усилий. Допускаемые (предельные) прогибы $1/30 - 1/50$ длины пролёта в зависимости от пластичности арматуры.

Специальные требования к каркасным конструкциям из сборного железобетона не установлены.

В методических пособиях^{6, 7}, разработанных в развитие СП 385, приведены некоторые уточнения рекомендаций СП и примеры расчётов различных конструктивных систем зданий. В частности, при проектировании одноэтажных каркасных зданий рекомендуется принимать меры по ужесточению дисков покрытий из ребристых плит путем объединения монтажных петель плит хомутами и сварки закладных деталей, устанавливаемых дополнительно. В примере расчёта многоэтажного каркасного промздания предусмотрен сценарий прогрессирующего обрушения участка перекрытия двух смежных шагов в одном пролёте на нижележащее перекрытие, однако расчет этого вида аварийного воздействия отсутствует. К сожалению, варианты отказа риге-

лей или плит перекрытий в примерах не рассматриваются. Отсутствуют примеры расчёта элементов висячей системы.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для примера выполнен расчёт защиты от прогрессирующего обрушения сборного железобетонного перекрытия из плит безопалубочного формования ПБ 60.15-8-25 в результате отказа опорных конструкций в виде стены или ригеля.

Исходные данные для расчёта.

Расчётный пролёт плиты $l_0 = 5,9$ м; номинальная ширина $b = 1,5$ м; расчётная унифицированная нагрузка $p = 8$ кПа (800 кгс/м²) и нормативная унифицированная нагрузка $6,88$ кПа; нормативная нагрузка от собственного веса с учётом замоноличенных швов $g = 3,3$ кПа; нормативная полная нагрузка $q = 10,18$ кПа. Нормативная временная нагрузка учитывается как длительная.

Плита армируется высокопрочной проволокой класса Вр1400 в растянутой зоне 19Ø5 ($A = 3,72$ см²) при расстоянии до крайнего нижнего волокна $a = 3$ см и в сжатой зоне 4Ø5 (площадь сечения $A = 4,5$ см² всей арматуры 23Ø5). Арматура сжатой зоны в расчёте не учитывается. Минимальная толщина бетона сжатой зоны $2,8$ см. Плиты смежных пролётов соединены связями из стали А500.

Расчётные прочностные характеристики бетона и арматуры в соответствии с СП 385 принимаются равными их нормативным значениям по СП 63.13330.2018 (табл. 1). Расчётные значения призмочной прочности бетона приняты с учётом коэффициента условия работы $1,15$ для изделий заводского изготовления особого предельного состояния в соответствии с СП 385. Расчётные значения сопротивления арматуры с физическим пределом текучести приняты с учётом коэффициента условия работы $1,1$.

На рис. 4 показана конструктивная система из двух плит перекрытия, соединённых связями из пластичной стали, которая потеряла способность работать на изгиб в результате отказа одного из ригелей. При больших прогибах плиты рассматриваются как элементы висячей системы с условием обеспечения анкеровки соединительных элементов и восприятия возникающих при этом горизонтальных усилий. Согласно СП 385 допускаемые (предельные) прогибы $f = L/30 = 0,4$ м.

⁶ Проектирование мероприятий по защите зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. М.: 2018. 157 с.

⁷ Проектирование мероприятий по защите зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. М.: 2020. 197 с.

Таблица 1
Расчётные характеристики материалов
Источник: составлено автором.

Table 1
Design characteristics of materials
Source: compiled by the author.

Класс	Нормативное сопротивление, МПа	Коэффициент условия работы	Расчётное сопротивление, МПа
Бетон			
B25	18,5	1,15	21,3
Арматура			
A500	500	1,1	550
Вр1400	1400	1	1400

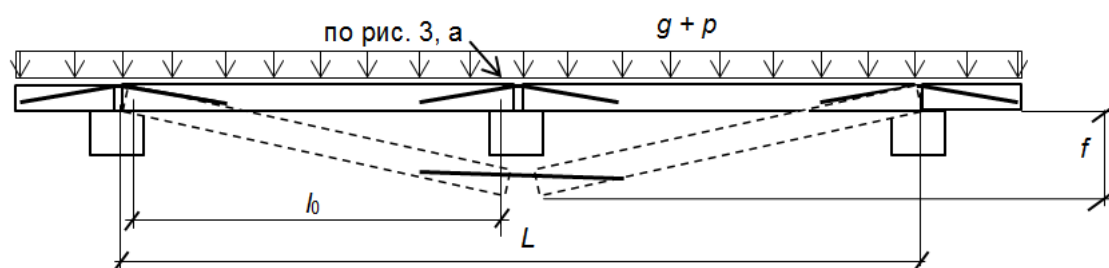


Рисунок 4 – Расчётная схема плит перекрытия при отказе ригеля
Источник: составлено автором на основе анализа механизма разрушения.

Figure 4 – Design scheme of floor slabs in case of bolt failure
Source: compiled by the author based on the analysis of the mechanism of destruction.

В простейшем случае натяжение (распор) абсолютно гибкой нерастяжимой нити длиной l , нагруженной равномерно распределенной нагрузкой $q = g + p$, определяется по формуле

$$H = \frac{qbl^2}{8f}. \quad (1)$$

Зависимость (1) соответствует шарнирному закреплению нити на опорах без опорных моментов. Принимая полученное значение распора $H = 687$ кН, равным расчётному усилию в соединительных стержнях $R_{sn} A_s$ по формуле (1) имеем $A_s = 10,18 \cdot 1,5 \cdot 12^2 / (8 \cdot 550 \cdot 0,4) = 12,5 \text{ см}^2$, что соответствует 4Ø20 A500 ($A_s = 12,56 \text{ см}^2$).

В общем случае висячую конструктивную систему с жёсткими железобетонными плитами целесообразно рассматривать в виде жесткой нити или системы жестких нитей, т.е. элементов, работающих на изгиб и растяжение. Следует отметить, что абсолютно гибких нитей не существует, жесткостью их на изгиб можно только пренебречь. Так как в жесткой нити балочный момент частично воспринимается по балочной схеме с изгибной жесткостью D , её натяжение характеризуется величиной [17] при $f = 0,4$ м

$$H = \frac{qbl^2}{8f} - \frac{48D}{5L^2}. \quad (2)$$

Второй член правой части формулы (2) характеризует величину распора ΔH абсолютно гибкой нити, компенсированную работой элемента на изгиб. Жёсткость нити можно оценить из расчётной схемы системы плиты, защемленной на опоре при задаваемом значении опорного момента, из формулы $f = M_{on}(L/2)^2 / 4D$. Плечо пары сил, образующих опорный момент, $z = 0,9h = 0,2$ м. Принимая в первом приближении $H = 687$ кН, получим $M_{on} = Hz = 137,4$ кН·м.

Тогда $D = 137,4 \cdot 6^2 / (4 \cdot 0,4) = 3091$ кН·м² и по формуле (2) $H = 687 - 206 = 481$ кН. Принимая для ускорения приближения $H = 687 + 481 = 584$ кН, уточняем $M_{on} = Hz = 116,8$ кН·м, $D = 2628$ кН·м² и $H = 687 - 175 = 512$ кН. На следующем этапе приближения $H = 584 + 512 = 548$ кН, уточняем $M_{on} = Hz = 109,6$ кН·м, $D = 2466$ кН·м² и окончательно принимаем $H = 687 - 164 = 523$ кН, что соответствует требуемому значению $A_s = 9,51 \text{ см}^2$ или 4Ø18 A500 ($A_s = 10,18 \text{ см}^2$).

Проверяем несущую способность плит при работе на растяжение $N = 1400 \cdot 4,5 \cdot 10 = 630$ кН > 523 кН. В примере не учтены дина-

мический характер аварийного воздействия и деформативность нити. Но известно, что при применении арматуры класса А500 коэффициент динамичности не превышает 1,1 [18], а учет только упругих деформаций нити снижает величину распора на 10-15 %, поэтому результаты расчёта приемлемы для практического применения.

Следует отметить, что принятое значение опорного момента работает и на эксплуатационной стадии. В данном примере с исходной нагрузкой $p = 8$ кПа возможно применение плит пониженной несущей способности на изгиб при условии обеспечения несущей способности на растяжение.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Длительный опыт исследований защиты многоэтажных зданий от прогрессирующего обрушения свидетельствует о недостаточном внимании конструктивным системам из сборного железобетона, вследствие чего нормы проектирования ориентируют проектировщика на применение монолитных конструкций.

При проектировании защиты многоэтажных зданий из сборных элементов обычно выполняется статический расчёт с исключением вертикальных конструкций (стен, колонн) и усилением ригелей перекрытий и покрытий путем обеспечения их неразрезности. Проблема защиты от прогрессирующего обрушения при исключении отдельных ригелей перекрытий и покрытий практически не изучена.

Существуют конструктивные методы усиления перекрытий созданием неразрезности плит смежных пролетов с помощью соединительных элементов из пластичной арматурной стали, однако расчет таких систем не разработан. Рассмотрен пример расчета многопустотных плит, изготовленных методом безопалубочного формования, как элементов висячей системы.

В настоящее время разработаны теоретические методы, позволяющие решать различные задачи защиты зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Однако существует множество конструктивных требований, пока не получивших теоретического подтверждения для решения практических задач и получения эффективных решений. Представляется, что в данной статье одна из таких задач решена, но требует экспериментальной проверки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Azim I., Yang J., Bhatta S., Wang F., Liu Q. Factors influencing the progressive collapse resistance of RC frame structures [Факторы, влияющие на со-

противление прогрессирующему обрушению железобетонных каркасов]. *Journal of Building Engineering*, 27 (2020). 100986.

2. Краснощеков Ю. В. Устойчивость каркасного здания при отказе колонны (уроки трагедии Сеула) // *Промышленное и гражданское строительство*. 2019. № 12. С. 4-10.

3. Андросова Н. Б., Ветрова О. А. Анализ исследований и требований по защите зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения в законодательно-нормативных документах России и странах Евросоюза // *Строительство и реконструкция*. 2019. № 1. С. 85-96.

4. Рекунов С. С., Косова А. Ю., Иванов С. Ю., Завьялов И. С. Расчёт многоэтажного здания на прогрессирующее обрушение при сейсмическом воздействии // *Инженерно-строительный вестник Прикаспия*. 2021. № 3 (36). С. 15-20.

5. Fedorova N. V., Vu N. T. Deformation criteria for reinforced concrete frames under accidental action [Критерии деформации железобетонных каркасов при случайном воздействии]. *Magazine of Civil Engineering*, 109 (1). 2022.

6. Федорова Н. В., Кореньков П. А., Ву Н. Г. Методика экспериментальных исследований деформирования монолитных железобетонных каркасов зданий при аварийных воздействиях // *Строительство и реконструкция*, № 4 (78). 2018. С. 42-52.

7. Каргина Е. Е., Аксенов В. Н. Сравнение технико-экономических показателей монолитных зданий стеновой и каркасной конструктивных схем при расчете на прогрессирующее обрушение // *Инженерный вестник Дона*. № 5. 2020.

8. Кодыш Э. Н., Трекин Н. Н., Никитин И. К. Проектирование многоэтажных зданий с железобетонным каркасом. М.: Издательство АСВ. 2009. 346 с.

9. Alshairh I. M., Abadel A. A., Alrubaydi M. Precast RC structures progressive collapse resistance: Current knowledge and future requirements [Сопротивление прогрессирующему обрушению сборных железобетонных конструкций]. *Structures*, 27 (2022). Pp. 338-352.

10. Qian K., Liang S-L., Fu F., Fang Q. Progressive collapse resistance of precast concrete beam-column sub-assemblages with high-performance dry connections [Сопротивление прогрессирующему обрушению сборных железобетонных каркасов с высокоэффективными узловыми соединениями]. *Engineering Structures*, 2019. 109552.

11. Емельянов С. Г., Федорова Н. В., Колчунов В. И. Особенности проектирования узлов конструкций жилых и общественных зданий из панельно-рамных элементов для защиты от прогрессирующего обрушения // *Строительные материалы*. 2017. № 3. С. 23-26.

12. Qian K., Li B. Investigation into resilience of precast concrete floors against progressive collapse // *ACI Structures*. 116 (2). 2019. Pp. 171-182.

13. Chemodurov V. T., Korenkov P. A., Leonenko Yu. S., Korenkova O. O. Physical modeling of reinforced concrete structures exposed to emergency loads // *Journal of Physics: Conference Series*. 1425. 2020. 012061.

14. Dmitriev A. N., Lalin V. V. Comparison of different procedures for progressive collapse. Analysis of RC Flat slab structures under corner column. Loss scenario // Buildings. 2021. 11. 405.

15. Bredean L., Botez M. The influence of beam design and the slabs effect on the progressive collapse resisting mechanism development for RC framed structures // Engineering Failure Analysis. 91 (2018). Pp. 527-542.

16. Краснощеков Ю. В., Заполева М. Ю. Серии железобетонных изделий перекрытий и покрытий. М. Вологда: Инфра-инженерия. 2020. 280 с.

17. Качурин В. К. Теория висячих систем. Статический расчет. М.: Госстройиздат, 1962. 224 с.

18. Краснощеков Ю. В. Расчет каркасного здания на прогрессирующее обрушение при аварийном отказе колонны // Строительная механика и расчет сооружений. № 1. 2017. С. 54-58.

REFERENCES

1. Azim I., Yang J., Bhatta S., Wang F., Liu Q. Factors influencing the progressive collapse resistance of RC frame structures. Journal of Building Engineering, 27 (2020). 100986.

2. Krasnoshchekov Yu. V. Ustoychivost karkasno-go zdaniya pri otkaze kolonny (uroki tragedii Seula) [Stability of a frame building in case of column failure (lessons from the tragedy of Seoul)]. Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitelstvo [Industrial and civil construction. 2019; 12: 4-10. (In Russ.)

3. Androsova N. B., Vetrova O. A. Analis issledovaniy i trebovaniy po zashchite zdaniy i sooruzheniy ot progressiruyushchego obrusheniya v zakonodatel'no-normativnykh dokumentakh Rossii i stranakh Evrosoyuza [Analysis of research and requirements for the protection of buildings and structures from progressive collapse in the legislative and regulatory documents of Russia and the EU countries]. Stroitelstvo i rekonstruktsiya. 2019; 1: 85-96. (In Russ.)

4. Rekunov S. S., Kosova A. Yu., Ivanov S. Yu., Zavyalov I. S. Raschyot mnogoetazhnogo zdaniya na progressiruyushchee obrushenie pri seismicheskom vosdeystvii [Calculation of a multi-storey building for progressive collapse under seismic influence]. Inzhenerno-stroitelny vestnik Prikaspiya. 2021; 3 (36): 15-20. (In Russ.)

5. Fedorova N. V., Vu N. T. Deformation criteria for reinforced concrete frames under accidental action. Magazine of Civil Engineering. 109 (1). 2022.

6. Fedorova N. V., Korenkov P. A., Vu N. G. Meyodika eksperimentalnykh issledovaniy deformirovaniya monolitnykh zhelezobetonnykh karkasov zdaniy pri avariynnykh vozdeystviyakh [Methods of experimental studies of deformation of monolithic reinforced concrete frames of buildings under emergency impacts]. Stroitelstvo i rekonstruktsiya. 2018; 4 (78): 42-52. (In Russ.)

7. Kargina E. E., Aksyonov V. N. Sravnenie tekhniko-ekonomicheskikh pokazateley monolitnykh zdaniy stenovoy i karkasnoy konstruktivnykh schem pri raschyote na progressiruyushchee obrushenie [Comparison of technical and economic indicators of monolithic buildings of wall and frame structural schemes in the

calculation of progressive collapse]. Inzhenerny vestnik Dona. 2020; 5. (In Russ.)

8. Kodysh E. N., Trekin N. N., Nikitin I. K. Proektirovanie mnogoetazhnykh zdaniy s zhelesobetonnykh karkasom [Design of multi-storey buildings with reinforced concrete frame]. Moscow, Isdatelstvo ASV, 2009. 346 p. (In Russ.)

9. Alshairh I. M., Abadel A. A., Alrubaydi M. Precast RC structures progressive collapse resistance: Current knowledge and future requirements. Structures. 27 (2022). Pp. 338-352.

10. Qian K., Liang S-L., Fu F., Fang Q. Progressive collapse resistance of precast concrete beam-column sub-assemblages with high-performance dry connections. Engineering Structures. 2019. 109552.

11. Emelyanov S. G., Fyodorova N. V., Kolchunov V. I. Osobennosti proektirovaniya uzlov konstruktivnykh zhilykh i obshchestvennykh zdaniy iz panelno-ramnykh elementov dlya zashchity ot progressiruyushchego obrusheniya [Design features of structural units of residential and public buildings made of panel-frame elements to protect against progressive collapse]. Stroitelnye materialy. 2017; 3: 23-26. (In Russ.)

12. Qian K., Li B. Investigation into resilience of precast concrete floors against progressive collapse. ACI Structures. 116 (2). 2019. Pp. 171-182.

13. Chemodurov V. T., Korenkov P. A., Leonenko Yu. S., Korenkova O. O. Physical modeling of reinforced concrete structures exposed to emergency loads. Journal of Physics: Conference Series. 1425. 2020. 012061.

14. Dmitriev A. N., Lalin V. V. Comparison of different procedures for progressive collapse. Analysis of RC Flat slab structures under corner column. Loss. Buildings. 2021. 11. 405.

15. Bredean L., Botez M. The influence of beam design and the slabs effect on the progressive collapse resisting mechanism development for RC framed structures. Engineering Failure Analysis. 91. 2018: 527-542.

16. Krasnoshchekov Yu. V., Zapolova M. Yu. Serii zhelesobetonnykh izdeliy perekrytiy i pokrytiy [Series of reinforced concrete products of floors and coatings]. Moscow-Vologda, Infra-Inzheneriya. 2020. 280 p. (In Russ.)

17. Kachurin V. K. Teoriya visyachih system. Staticheskiy raschyot [Theory of hanging systems. Static calculation]. Moscow. Gosstroyizdat. 1962: 224. (In Russ.)

18. Krasnoshchekov Yu. V. Raschyot karkasnogo zdaniya na progressiruyushchee obrushenie pri avariynom otkaze kolonny [Calculation of a frame building for progressive collapse in case of an emergency failure of the column]. Stroitel'naya mekhanika i raschyot sooruzheniy. 2017;1: 54-58. (In Russ.)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Краснощеков Юрий Васильевич – д-р. техн. наук, проф. кафедры «Строительные конструкции».

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Yuriy V. Krasnoshchekov – Dr. of Sci, Professor of the Building Structures Department.