

Исследование методов предотвращения прогрессирующего обрушения железобетонных конструкций в зданиях и сооружениях различного назначения

Б.К. Джамуев, И.А. Аттоев, А.А. Багов, У.И. Джатдоев

Национальный исследовательский московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия

Аннотация: Целью настоящего исследования является комплексный анализ существующих методов и подходов к предотвращению прогрессирующего обрушения строительных конструкций, а именно железобетонных монолитных и сборных. В рамках работы проводится систематическое изучение как теоретических основ явления прогрессирующего обрушения, так и практических методов обеспечения устойчивости конструкций. Особое внимание уделяется анализу российской нормативной базы в данной области, включая положения СНиП 2.01.07-85, СНиП 52-01-03 (Строительные нормы и правила), СП 52-101-2003 (Свод правил) и СТО 36554501-014-2008 (Стандарт организации).

В ходе исследования решаются следующие задачи: классификация типов прогрессирующего обрушения и механизмов его развития; анализ причин и последствий данного явления; оценка эффективности различных методов проектирования, направленных на повышение устойчивости конструкций; рассмотрение практических рекомендаций по снижению риска прогрессирующего обрушения. Теоретическую основу работы составили отечественные нормативно-технические документы, а также научные публикации и специализированные исследования в области живучести строительных конструкций. Практическая значимость исследования заключается в систематизации знаний о методах противодействия прогрессирующему обрушению, что представляет ценность для инженеров-проектировщиков, работающих над созданием безопасных и надёжных сооружений. Результаты исследования могут быть использованы для дальнейшего совершенствования подходов к проектированию конструкций с учётом требований устойчивости к прогрессирующему обрушению.

Ключевые слова: Прогрессирующее обрушение, живучесть конструкции, строительство, железобетон, крупнопанельное здание, монолитное железобетонное здание, потеря устойчивости, первичная конструктивная система, вторичная конструктивная система, объёмно - планировочное решение, местная потеря устойчивости.

Введение

Проблема прогрессирующего обрушения продолжает оставаться одним из наиболее сложных вызовов в области строительной безопасности [1]. Это явление, характеризующееся каскадным распространением локального повреждения с последующим разрушением значительной части сооружения, требует постоянного изучения и совершенствования подходов к его предотвращению [2]. Особую актуальность эта проблема приобретает при

проектировании общественных сооружений, где последствия возможного обрушения носят катастрофический характер.

Типы прогрессирующего обрушения

Хотя прогрессирующее обрушение в нормах проектирования рассматривается как единое явление, его можно классифицировать на несколько типов в зависимости от механизма развития. Ниже будут описаны типы прогрессирующего обрушения. Представленные режимы разрушения - «блин», «молния», «домино», по причине потери устойчивости, вследствие отказа сечения (локальное или секционное разрушение) [3, 4].

«Блинный рулет»

Данный тип разрушения происходит, когда несущая способность элемента, воспринимающего вертикальную нагрузку, становится недостаточной. Это приводит к обрушению целой секции конструкции. Верхняя часть повреждённого участка начинает падать, накапливая кинетическую энергию. Ударная сила, возникающая при падении, обычно значительно превышает расчётную статическую нагрузку на нижележащие конструкции. Если перекрытие не способно выдержать этот удар, обрушение продолжается этаж за этажом, напоминая сложенные друг на друга плиты-блины. (рис. 1).

Этапы прогрессирующего обрушения по типу «блин» следующие:

- Первоначальное разрушение несущего вертикальную нагрузку строительного элемента;
- Преобразование потенциальной энергии конструкции в кинетическую энергию падающих масс;
- Ударное воздействие обрушившейся части конструкции на нижележащие несущие элементы;
- Разрушение этих вертикальных и горизонтальных элементов под действием динамической нагрузки;

- Распространение разрушения в вертикальном направлении на последующие этажи.

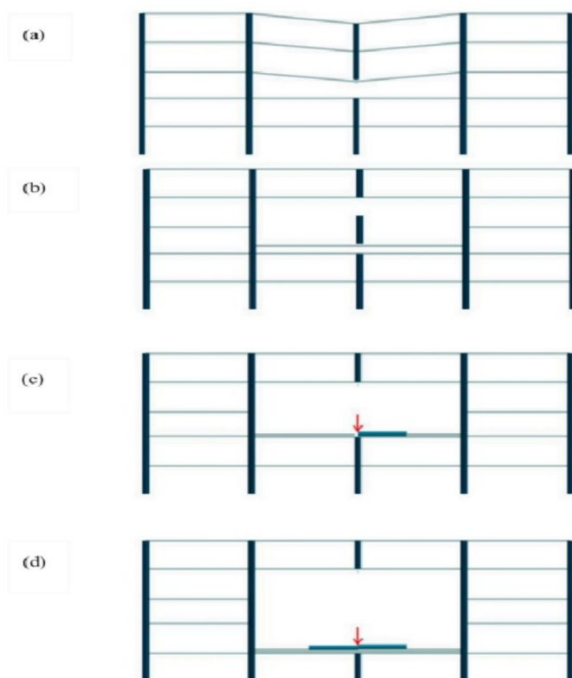


Рис 1. Стадии прогрессирующего обрушения типа «блин», которые включают (а) - начальное разрушение колонны; (b) - изменение потенциальной энергии конструкции на кинетическую энергию; (c) - перегрузку конструкции ниже уровня первоначального разрушения; (d) - усиление (распространение) разрушения.

Сворачивание типа молнии (зигзаг)

Потеря одного несущего элемента приводит к перераспределению усилий на другие элементы, расположенные поперек направления разрушения, как показано на рисунке 2. Если сопротивление остальных элементов будет превышено из-за дополнительной нагрузки или её динамического характера, разрушение прогрессирует.

Этапы работы механизма типа "молния" следующие:

1. Первоначальный выход из строя одного или нескольких вертикальных несущих элементов;

2. Динамическое увеличение нагрузки на остальные элементы из-за перераспределения усилий;
3. Концентрация напряжений в несущих элементах, аналогичных по типу и функции первоначально вышедшим из строя элементам, а также расположенных рядом с ними;
4. Комбинированное статическое и динамическое воздействие на конструкцию после начального отказа;
5. Перегрузка наиболее нагруженных оставшихся элементов;
6. Последовательный отказ элементов, расположенных поперек направления развития разрушения;

Также при таком типе разрушения отказ элементов может быть связан с любым режимом локального разрушения, который содержит потерю устойчивости (продольный изгиб).

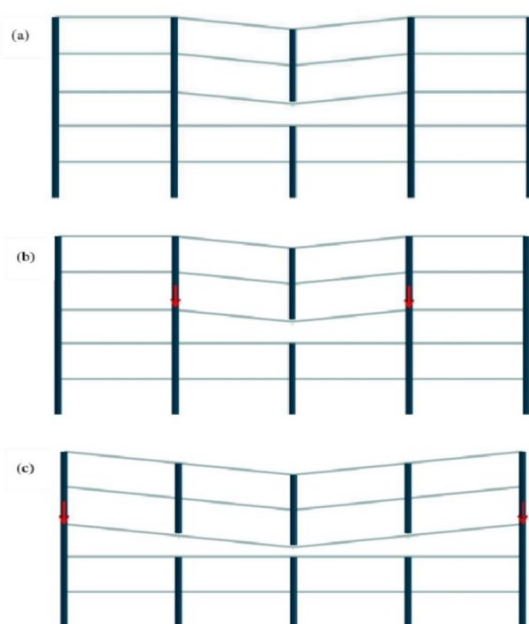


Рис 2. Этапы прогрессирующего разрушения типа молнии, включая (а) - начальный отказ колонны; (б) - перегрузку ближайших колонн; (с) - прогрессирование отказа.

Разрушение по типу домино

Характеристикой разрушения по типу домино является начальное опрокидывание одного элемента. Затем происходит неожиданное опрокидывание задействованных элементов рядом с первым повреждённым элементом конструкции. И если элементы, на которые был нанесён удар, теряют свою устойчивость и опрокидываются, разрушение прогрессирует в горизонтальном направлении.

Фазы разрушения типа домино являются:

- Первоначальное опрокидывание элемента;
- Переход потенциальной энергии конструкции в кинетическую вследствие поворота;
- Влияние поворотного элемента на следующий несущий элемент;
- Обрушение деформированной несущей детали, приводящее к прогрессирующему коллапсу в горизонтальном направлении.

Высота опрокидывающего элемента должна быть больше расстояния до следующего элемента, или элементы должны быть соединены друг с другом каким-либо горизонтальным элементом, передающим нагрузку, как показано на рисунке 3.

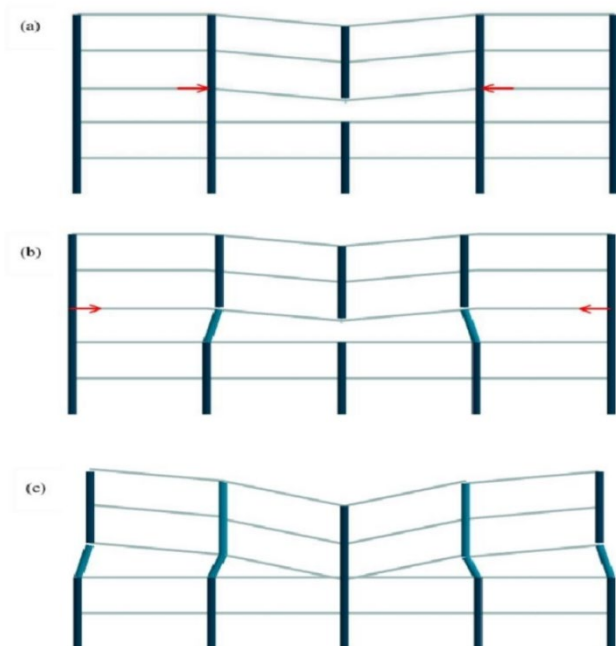


Рис 3. Этапы прогрессирующего обрушения по типу домино, включая
(а) - начальный провал и нагрузку колонн, находящихся рядом с ним;
(б) - опрокидывание (переворот) колонн;
(с) - развитие разрушения вплоть до полного обрушения.

Потеря устойчивости

Если первоначальное разрушение происходит в критическом элементе, обеспечивающем устойчивость всей конструкции, может произойти обрушение, вызванное потерей устойчивости, как показано на рисунке 4. Первоначальное повреждение при обрушении по типу потери устойчивости незначительно по масштабу, но критично из-за своего направления или местоположения. Такой тип обрушения часто происходит в сжатых элементах, где первоначальное повреждение может. Если же первоначальное разрушение немедленно приводит к диспропорциональному обрушению, то прогрессирование разрушения проблематично определить.

Фазы механизма обрушения по типу потери устойчивости следующие:

1. Первоначальное разрушение стабилизирующего элемента;
2. Нарушение в передачи стабилизирующих усилий от этого элемента на остальные элементы конструкции;

3. Прогрессирующее обрушение из-за потери устойчивости нагруженных элементов или мгновенное обрушение из-за потери устойчивости всей конструкции.

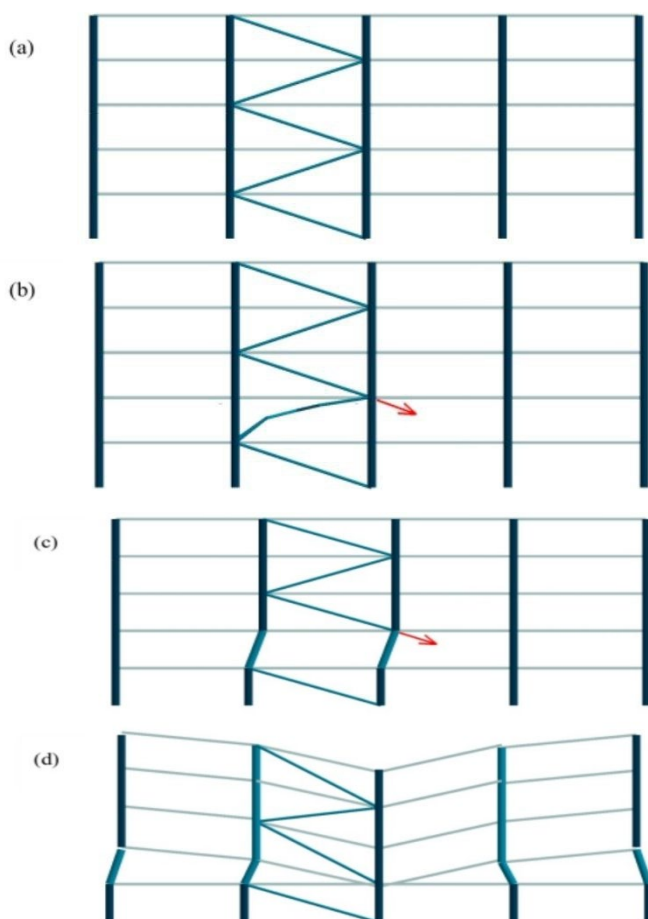


Рис 4. Стадии прогрессирующего обрушения по типу потери устойчивости, включающие: (а) - исходную конструкцию со связевой; (b) - первоначальное разрушение в балке; (c) - потерю устойчивости с последующим отказом части фермы; (d) - обрушение вследствие потери устойчивости.

Разрушение вследствие отказа сечения

При местном (секционном) разрушении рассматривается балка, воспринимающая изгибающий момент, или стержень, работающий на осевое растяжение. Если часть соответствующего поперечного сечения условно удаляется, внутренние усилия, передававшиеся этой частью,

перераспределяются на оставшуюся площадь сечения. Соответствующее увеличение напряжений в некоторых зонах может привести к разрушению следующих частей сечения и прогрессирующему отказу по всему поперечному сечению.

Местное разрушение внешне похоже на обрушение по типу "молнии-застёжки". Основное различие заключается в том, что поперечное сечение является сплошным и однородным, в то время как, например, вантовый мост состоит из отдельных элементов, которые могут иметь различные свойства.

Некоторые требования к конструкции

Качественный проект предполагает выход за рамки минимальных строительных требований, установленных нормами и стандартами [5]. Влияние экстремальных нагрузок, их пространственный эффект и риск прогрессирующего обрушения должны быть прямо отражены в сводах правил и нормах и стать важной частью процесса проектирования. В нормативных документах должно быть указано, что учёт риска прогрессирующего обрушения является необходимой частью проектирования и что эти воздействия должны рассматриваться с точки зрения общей структурной безопасности. На общем уровне необходимость учёта аварийных нагрузок и прогрессирующего обрушения при проектировании конструкций должна быть закреплена в строительных нормах и стандартах как требование к эксплуатационным характеристикам.

Приведём некоторые европейские и российские стандарты и нормы по проектированию зданий, устойчивых к прогрессирующему обрушению: Еврокод SFS-EN 1991-1-7 (Suomen Standardisoimisliitto European Norm), Еврокод SFS-EN 1992-1-1 (Suomen Standardisoimisliitto European Norm), СТО 008-02495342-2009 (Стандарт организации), МДС 20-2.2008 (Методические рекомендации по обеспечению безопасности). В нормах должны содержаться положения общего характера о сфере их применения, а также указания на специфические факторы, обуславливающие необходимость учёта

устойчивости к прогрессирующему обрушению. Наконец, должны быть приведены критерии нагрузок для проверки способности конструкции сопротивляться аварийным воздействиям. Как правило, при таких проверках безопасности необходимо рассматривать только основную несущую систему.

Разумеется, существуют общие методы повышения общей устойчивости конструкции и её способности перераспределять нагрузки с повреждённых зон. Конструктивные системы должны проектироваться устойчивыми к прогрессирующему обрушению. Их работа не должна быть чувствительной к неучтенным неопределённостям в распределении или величине эксплуатационных нагрузок и других воздействий. Компоновка стен и колонн должна обеспечивать устойчивость и сокращать количество стен, которые могут быть разрушены. Плиты перекрытий должны быть рассчитаны на адаптацию к изменению направлений пролётов при потере опоры и на передачу нагрузки на другие опоры, возможно, за счёт цепного (канатного) эффекта. Стены должны проектироваться так, чтобы перекрывать зоны повреждений за счёт балочной или арочной работы. Следует избегать применения элементов с низким сопротивлением сжатию и хрупких узлов в критических точках потенциальных альтернативных путей передачи нагрузки, как и узлов, вызывающих текучесть в ограниченных зонах [9].

Для снижения вероятности возникновения прогрессирующего обрушения в российских нормах рекомендуется следующее. Выбор марки бетона и класса арматуры в несущих элементах должен осуществляться по наибольшим значениям, которые были получены при анализе результатов расчётов для технического состояния здания, при котором обеспечены его безопасность, функциональная пригодность и надёжность. Из основных требований к армированию следует выделить:

- Надёжность анкеровки. Тут уделяем особое внимание надёжному закреплению арматуры в узлах примыкания. Запас в 20% должен распространяться для длины нахлёста и анкеровки стержней;

- Должна обеспечиваться непрерывность арматуры;

- Минимальное армирование. Для таких элементов, как плиты и балки минимальная площадь продольного армирования составляет не менее 0,2% от площади сечения элемента. Для вертикальных конструкций установлено минимальное растягивающее усилие в 10 кН на каждый квадратный метр грузовой площади, которое арматура должна воспринимать без деформаций.

Во избежание непрерывного обрушения при потере несущих способностей элементов в проекте должны быть предусмотрены некоторые конструктивные особенности, которые в совокупности формируют живучие конструкции, блокирующие распространение повреждений от исходного события:

Резервирование. Формирование запасных путей передачи нагрузок в вертикальной несущей системе помогает обеспечить наличие альтернативных решений в случае местного разрушения элементов.

Связевая система. Потеря основного несущего элемента, как правило, приводит к перераспределению нагрузок и прогибам элементов. Эти процессы требуют передачи нагрузок по всей конструкции (в вертикальном и горизонтальном направлениях) по определенным траекториям. Способность конструкции перераспределять или передавать нагрузки по этим путям в значительной степени основана на связях между смежными элементами. Часто это называют «связыванием здания в единое целое» с помощью интегрированной системы связей в трёх направлениях вдоль основных линий конструктивного каркаса. На рисунке 5 показаны различные типы связей, которые обычно используются для обеспечения структурной целостности здания.

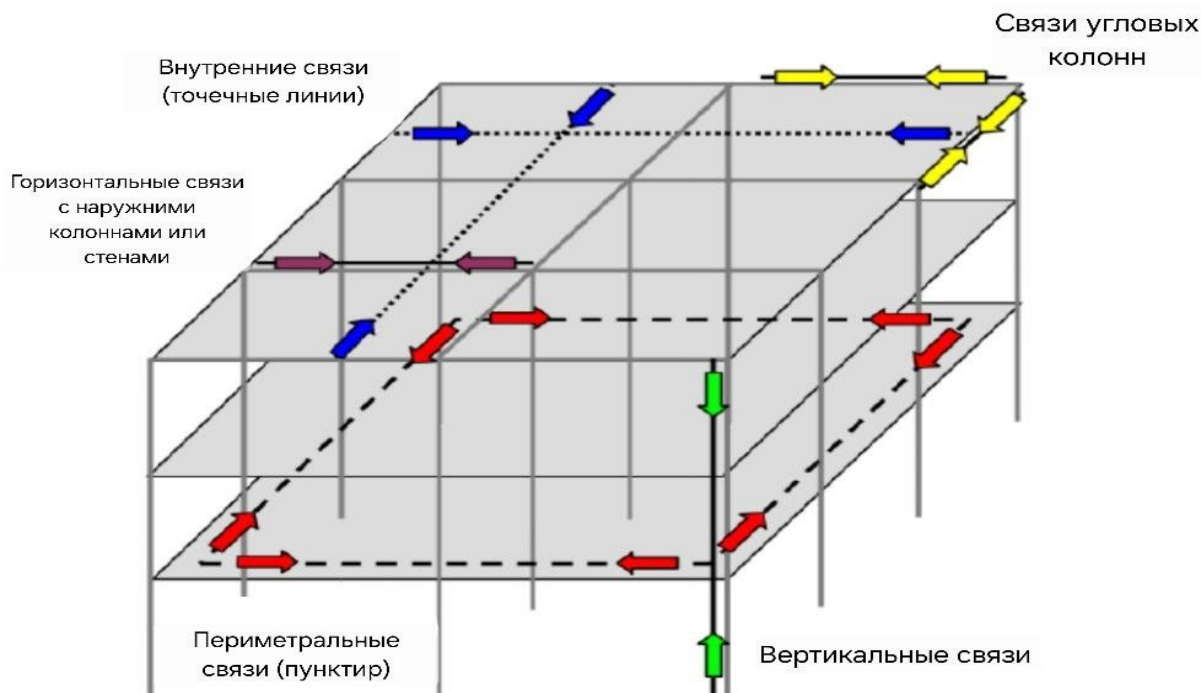


Рис 5. Различные типы связей, используемых для обеспечения структурной целостностью.

Пластичность. При аварийном воздействии элементы и их соединения могут быть обязаны сохранять прочность в условиях значительных деформаций (прогибов и поворотов) и перераспределения нагрузок, вызванных потерей ключевых несущих элементов [5]. Для железобетонных и каменных конструкций пластичность достигается за счёт:

- обеспечения достаточного охвата арматуры бетоном;
- создания непрерывности арматурного каркаса с помощью надёжных анкерровок, нахлестов или механических стыков;
- сохранения общей структурной устойчивости;
- проектирования соединений между элементами, прочность и вязкость которых превышает таковые для самих соединяемых элементов [6].

Достаточная прочность на срез. Несущие элементы в уязвимых местах (такие как периметральные балки или плиты) должны быть рассчитаны на восприятие поперечной силы, превышающей ту, что связана с предельным изгибающим моментом при потере опоры. Разрушение по типу прямого среза

является хрупким и не должно быть определяющим механизмом отказа. Несущая способность на срез всегда должна быть больше прочности на изгиб, чтобы обеспечить податливое поведение. Безбалочные перекрытия должны сохранять остаточную несущую способность даже при наличии сколов вокруг колонн и значительных повреждений.

Способность сопротивляться реверсивным нагрузкам. Как основные несущие элементы (колонны, ригели, кровельные балки, элементы системы горизонтального сопротивления), так и второстепенные (балки перекрытий и плиты) должны быть спроектированы с использованием апробированных методик для восприятия реверсивных нагрузок в уязвимых зонах.

Для повышения живучести конструкции также рекомендуются следующие меры:

- В каркасных системах следует ограничивать шаг колонн. Выбор неоправданно большого шага приводит к снижению способности конструкции к перераспределению нагрузок при отказе колонны;

- Наружные ячейки наиболее уязвимы, особенно для зданий, выходящих на общественные улицы. Их способность к перераспределению нагрузок при повреждении элемента ограничена из-за невозможности двухстороннего распределения. Целесообразно устраивать узкие крайние пролёты для локализации возможных повреждений;

- Потеря трансферной балки или колонны, её поддерживающей, может дестабилизировать значительную часть здания. Расположение трансферных балок по внешнему контуру (часто для организации погрузочных доков) повышает их уязвимость к взрывным воздействиям. Крайне желательно избегать трансферных балок или добавлять резервные системы там, где их применение неизбежно;

- В бескаркасных системах с опорой на внутренние поперечные стены следует периодически располагать продольные внутренние стены для

повышения устойчивости и ограничения поперечного распространения повреждений;

- В системах с несущими наружными стенами следует предусматривать поперечные стены или мощные пилостры с регулярным шагом для ограничения объёма стены, который может быть повреждён.

Повышение устойчивости к прогрессирующему обрушению в процессе проектирования приводит к созданию соединений с повышенной прочностью, которые не были бы необходимы при расчёте только на вертикальные и нормативные горизонтальные нагрузки. Многочисленные надёжные соединения обеспечивают более равномерное и плавное перераспределение нагрузок, предотвращая резкие изменения жёсткости, которые приводят к концентрации напряжений, перегрузу и преждевременному разрушению.

Для железобетонного каркаса могут быть применены следующие конструктивные решения:

- Использование жёстких (моментных) соединений в узлах «балка-колонна», которые воспримут перераспределение усилий, в то время как при обычном проектировании были бы достаточны шарнирные соединения;

- Применение непрерывной верхней и нижней арматуры в балках и плитах перекрытия, что позволяет им перекрывать увеличенные пролёты или работать на цепное (канатное) действие.

Предотвращение прогрессирующего обрушения железобетонных монолитных конструкций зданий (СТО-008-02495342-2009 (Стандарт организации))

Область применения

Обращаясь к повествованию в источнике [4], мы сталкиваемся с регламентами проектирования монолитных железобетонных конструкций зданий (жилых, общественных, производственных) с учётом требований по защите от прогрессирующего обрушения в условиях аварийных воздействий.

Так же тут приведены объекты, разрушение или отказ которых, в следствии игнорирования требований по недопущению прогрессирующего обрушения, может повлечь значительный ущерб, как социально-экономический, так и экологический.

К таким объектам относятся:

- а) Жилые здания высотой свыше 10 этажей;
- б) Общественные здания, классификация которых приведена в СНиП 2.08.02-89 и СНиП 31-05-2003 (Строительные нормы и правила), рассчитанные на одновременное пребывание 200 и более человек;
- в) Производственные и вспомогательные здания с численностью одновременно пребывающих 200 и более человек в пределах деформационного блока.

Проектирование объектов жизнеобеспечения, а также особо опасных, технически сложных и уникальных объектов* должно выполняться на основе специальных технических условий.

*) Классификация объектов по указанным категориям приведены в Градостроительном кодексе Российской Федерации, Статья 48.1.

Основные положения

Конструкция здания должна быть рассчитана на предотвращение прогрессирующего обрушения. Это означает, что при аварийном разрушении одного из вертикальных элементов (колонны, стены) локальные повреждения не должны приводить к обрушению смежных конструкций. Устойчивость должна сохраняться в изменённой системе, образовавшейся после гипотетического отказа одного элемента.

Комплекс мер по предотвращению обрушений прогрессирующего характера, включает в себя:

- Проектные решения. Тут акцент делается на объёмно - планировочных решениях, которые учитывают аварийные воздействия, и на

конструктивные меры повышающие статическую неопределимость и общую живучесть системы;

- Прочностные и деформационные требования. Достаточно обеспечить прочность конструкций, способность узлов и элементов воспринимать пластические деформации для перераспределения нагрузок;

- Расчётное обоснование. Проверка на устойчивость изменённой системы (после условной ликвидации одного несущего элемента) при особом сочетании нагрузок. В случае недостаточной устойчивости производится усиление конструкции;

На основе расчётов для нормальных и аварийных условий окончательно назначаются класс бетона и параметры арматуры.

Порядок оценки устойчивости к прогрессирующему обрушению включает анализ, который выполняется методом последовательного исключения из рабочей схемы на каждом этаже одной колонны или фрагмента стены. Условия, подтверждающие устойчивость изменённой системы:

- Внутренние усилия, возникшие от аварийной комбинации нагрузок, не должны быть больше несущей способности конструктивных элементов.

- Общая устойчивость сооружения в изменённой расчётной схеме должна быть обеспечена с коэффициентом не менее 1,3.

Требования к деформациям и ширине раскрытия трещин в условиях аварийной ситуации не регламентируются.

Конструктивно - планировочные решения

Чтобы здание не сложилось как карточный домик при разрушении одной опоры, его архитектура и конструкции должны образовывать «подвешенную» систему. Эта система позволяет перераспределить нагрузку с повреждённой зоны на соседние целые колонны или стены.

Для создания такой системы применяют следующие конструктивные меры:

1. Жёсткие узлы сопряжений. Плиты перекрытия должны быть жёстко заделаны в колонны и стены, чтобы создавать рамный эффект и работать на распор.

2. Армированные пояса жёсткости. По периметру перекрытий устраивают монолитные железобетонные пояса, которые работают как ригели над проёмами, повышая пространственную жёсткость и передавая распор.

3. Связевое покрытие. Монолитные парапеты, объединённые с плитой покрытия, и специальные связевые балки или стены в верхнем уровне связывают все вертикальные конструкции в общую пространственную раму, создавая альтернативные пути для нагрузки.

4. Целостность диафрагм жёсткости. Проёмы в стенах жёсткости не должны доходить до верха этажа. Сохранённая надпроёмная часть стены (перемычка) обеспечивает целостность и связевое действие всей диафрагмы.

Нагрузки

Расчёт на прогрессирующее обрушение включает в себя проверку изменённой расчётной схемы (после условного удаления элемента) выполняют на особое сочетание нагрузок. При этом постоянные и длительные временные нагрузки (например, собственный вес конструкций, вес отделки, давление грунта) учитываются по их нормативным значениям без снижения, то есть с коэффициентом сочетания $\psi = 1.0$.

К длительно действующим временным нагрузкам следует относить:

- пониженные нагрузки от людей и оборудования по табл. 3 СНИП 2.01.07-85 (Строительные нормы и правила);
- 35% полной нормативной нагрузки от автотранспорта;
- 50% полной нормативной снеговой нагрузки.

Все нагрузки следует рассматривать как статические с коэффициентом надёжности по нагрузке $\gamma_f = 1,0$

Характеристики бетона и арматуры

Особенности расчёта ЖБК (железобетонных конструкций) на прогрессирующее обрушение.

При расчёте элементов для исключения прогрессирующего обрушения используются специальные подходы к назначению расчётных сопротивлений материалов.

Бетон:

- На сжатие. Расчётное сопротивление принимается равным нормативному, но для вертикально бетонируемых конструкций умножается на коэффициент условий работы $\gamma_{b3} = 0,9$.

- На растяжение (при расчёте на поперечную силу и местное смятие). Расчётное сопротивление равно нормативному, делённому на $\gamma_n = 1,15$.

Арматура:

- Продольная. Расчётное сопротивление растяжению принимается равным нормативному.

- Продольная на сжатие. Также принимается равной нормативному сопротивлению растяжению. Исключение: для арматуры A500 $R_s = 469$ МПа, а для B500 $R_s = 430$ МПа.

- Поперечная. Расчётное сопротивление растяжению равно нормативному, умноженному на $\gamma_{s1} = 0,8$.

Нормативные значения сопротивлений бетона и арматуры, а также модули упругости (E_s , E_b) принимаются по актуализированной версии СП 52-101-2003 (Свод правил).

Расчёт

Методика расчёта на прогрессирующее обрушение

1. Общий подход.

Расчёт выполняется для гипотетического локального разрушения отдельных вертикальных элементов. Допускается рассмотреть только наиболее опасные случаи:

- колонны с максимальной грузовой площадью;
- элементы на краю или в углу здания.

2. Моделирование.

Исходная расчётная схема (для нормальной эксплуатации) преобразуется во вторичную путём последовательного исключения критических вертикальных элементов:

- колонн, пилонов;
- участков стен (до 7 м длиной) в зонах примыканий.

Все конструкции считаются жёстко заделанными в фундаменте.

3. Учёт нелинейности

Статический расчёт выполняется в сертифицированных ПК (SCAD, Лира и т.п.) с учётом:

- геометрической нелинейности (обязательно);
- физической нелинейности (рекомендуется).

4. Жёсткости сечений

Вариант 1 (с физической нелинейностью): Жёсткости назначаются по СП 52-101-2003 (Свод правил) с учётом трещинообразования.

Вариант 2 (только геометрическая нелинейность): Жёсткость

$$B = E_{np} \times J_b.$$

Модуль E_{np} принимается:

- для усилий: $0,6Eb$ (горизонтальные), Eb (вертикальные);
- для устойчивости: $0,4Eb$ (горизонтальные), $0,6Eb$ (вертикальные).

5. Результаты расчёта

По полученным усилиям (считаются кратковременными) выполняется:

- подбор армирования и классов бетона;
- проверка устойчивости каркаса.

При недостаточной устойчивости усиливаются сечения или корректируется конструктивная схема.

Расчёт сечений — по Пособию к СП 52-101-2003 (Свод правил).

Конструктивные требования

Общие принципы проектирования:

- Конструирование элементов и узлов производить в соответствии с Пособием по проектированию бетонных и железобетонных конструкций к СП 52-101-2003 и СП 52-103-2007 (Свод правил).

- Окончательные характеристики бетона и арматуры назначать по наихудшему случаю из двух расчётов: на нормальные и эксплуатационные условия и особое сочетание нагрузок.

При армировании конструктивных элементов следует обеспечить надёжную анкеровку стержней, особенно в узловых сопряжениях. Длина анкеровки и нахлёста были указаны выше.

Продольная арматура конструктивных элементов должна быть непрерывной. Площадь сечения продольной арматуры (отдельно нижней и отдельно верхней) плит безбалочных перекрытий и балок балочных перекрытий должна составлять не менее $\mu_{s,min} = 0,2\%$ площади сечения элемента.

Продольное армирование вертикальных несущих конструктивных элементов должно воспринимать усилие растяжения не менее 10 кН (1 тс) на каждый квадратный метр грузовой площади этого конструктивного элемента [7].

Методы предотвращения обрушений железобетонных конструкций в крупнопанельных зданиях

Общие принципы обеспечения живучести конструктивных систем

Обеспечение устойчивости зданий при локальных повреждениях является ключевой задачей современного строительства. Для конструкций из сборного железобетона, особенно крупнопанельного типа, эта проблема наиболее актуальна в связи с их массовым распространением и спецификой работы стыковых соединений. Российская нормативная база в данной

области сформирована на основе Федерального закона № 384-ФЗ (Федеральный закон), а также комплекса стандартов и сводов правил, среди которых центральное место занимает СП 385.1325800.2018 (Свод правил).

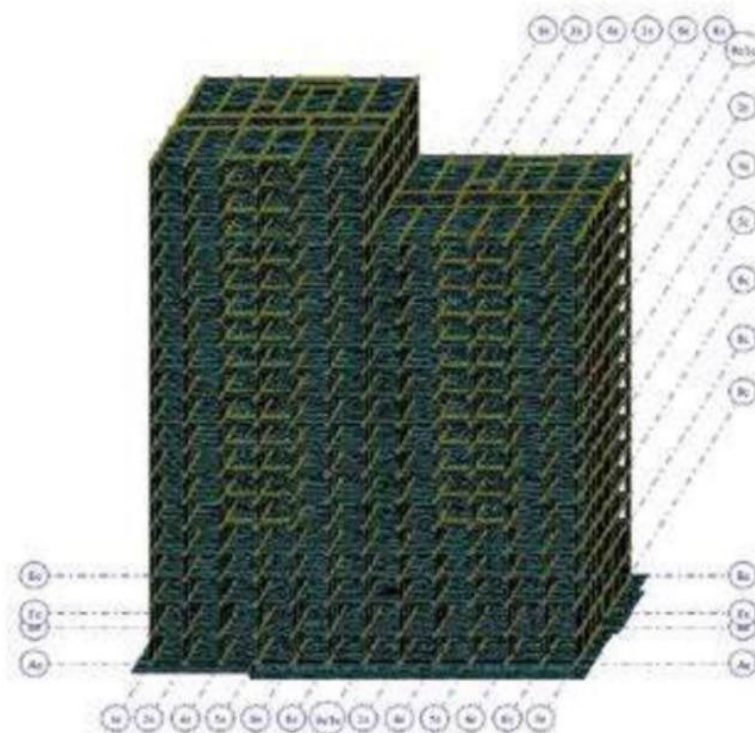


Рис 1. Расчётная модель двухсекционного дома.

Основным принципом, который закладывается в указанных документах это требование о недопущении развития прогрессирующего обрушения при возможном удалении одного из несущих элементов. Критерием выполнения этого требования служит условие, при котором эксплуатационные нагрузки не превышают потенциал несущей способности конструкций в особом расчётном состоянии:

$$F < R, F = R \quad (1);$$

где F – силовые воздействия в элементах конструкции; R – расчётный потенциал несущей способности этих элементов. Данное условие служит базой для применения различных методик расчёта и проектирования защитных мероприятий.

Методологические подходы к расчётному обоснованию

В инженерной практике для проверки выполнения условия (1) применяются два принципиально различных, но взаимодополняющих метода: кинематический анализ и расчёт по пространственной модели методом конечных элементов.

Применение кинематического метода

Такая методика является наиболее эффективной для систем, способных к значительным пластическим деформациям и перераспределению усилий.

Методика расчёта состоит из нескольких этапов:

1. Формирование модели разрушения. Для расчётной схемы здания определяется кинематически возможный механизм потери устойчивости, вызванный устранением опорного элемента. Выбор обоснованной схемы осуществляется из условия минимума потенциальной энергии системы;
2. Оценка несущего потенциала. Для всех элементов, вовлечённых в выбранный механизм (включая зоны пластического течения), определяются предельные значения воспринимаемых усилий;
3. Баланс энергетических затрат. Производится расчёт работы, совершаемой внешними силами U на виртуальных перемещениях, и внутренних сил сопротивления W .
4. Верификация условия устойчивости. Проверяется выполнение ключевого неравенства:

$$W > U, W = U \quad (2).$$

Невыполнение условия (2) свидетельствует о необходимости усиления конструкций или корректировки расчётной схемы.

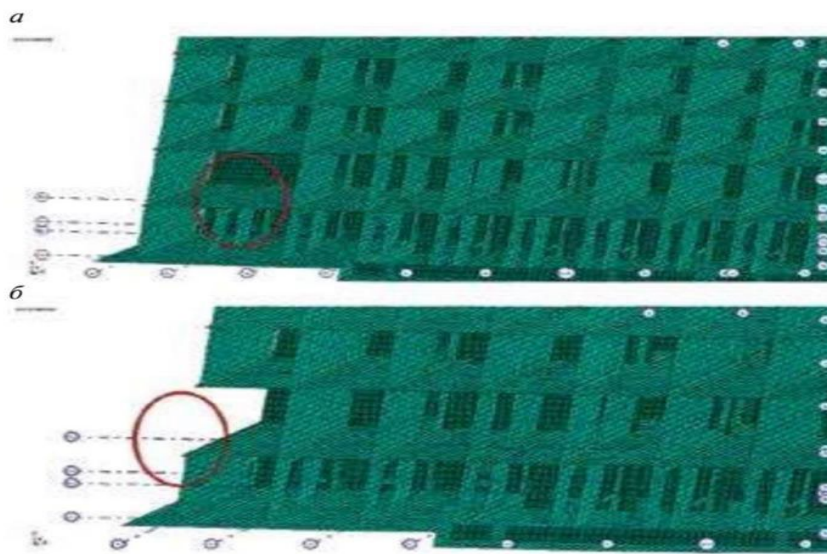


Рис 2. Рассматриваемые локальные схемы разрушения: а - схема локального разрушения № 1; б - схема локального разрушения № 2.

Из преимуществ данного подхода стоит выделить его наглядность и относительную простоту, позволяющую быстро оценить общую устойчивость системы.

Численное моделирование методом конечных элементов

Для сложных объектов, где требуется учёт реальной работы стыков и пространственного взаимодействия элементов, применяется МКЭ (Метод конечных элементов) в квазистатической постановке. Процедура анализа состоит из двух стадий:

1. Базовый расчёт. На первоначальном этапе формируется детализированная пространственная модель, адекватно описывающая работу несущего остова в штатных условиях (Рис. 1). Моделирование выполняется для особой комбинации нагрузок. Для оптимизации вычислительных затрат часто используется приём приведения стеновых панелей к эквивалентным стойкам, обобщённая жёсткость которых интегрирует жёсткость самой панели, межэтажного перекрытия и узлов сопряжения.

2. Имитация аварийной ситуации. На следующем этапе выполняется виртуальное удаление одного из ключевых несущих элементов (например,

панели нижнего этажа). Анализ полученной модифицированной схемы позволяет оценить способность конструкции к перераспределению нагрузок по обходным путям и идентифицировать критические элементы, в которых возникают усилия, превышающие их несущий потенциал.

Использование МКЭ (Метод конечных элементов) [8] предоставляет проектировщику детальную информацию о напряженно-деформированном состоянии, что особенно ценно при оценке работы соединений и дисков перекрытий.

Конструктивные решения для обеспечения живучести

Результаты расчётного анализа являются основой для разработки конкретных инженерных решений, направленных на предотвращение цепного обрушения. Наиболее рациональным и широко применяемым способом повышения устойчивости панельных зданий признано создание системы связевости [9].

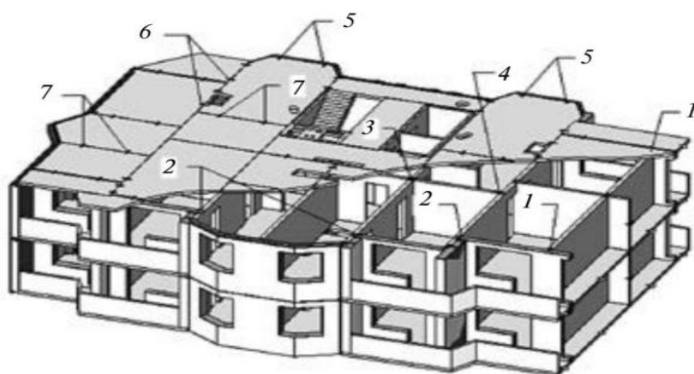


Рис 3. Схема расположения связей в крупнопанельном здании: 1 - между панелями наружных и внутренних стен; 2 - то же, между продольных несущих стен; 3 - между продольных внутренних стен; 4 - между поперечных и продольных внутренних стен; 5 – между наружных стен и плит перекрытий; 6 - между плитами перекрытий вдоль длины здания; 7 - поперек длины здания. В состав такой системы входят:

- Связи вертикального типа: размещаются в межпанельных швах для обеспечения совместной работы стеновых конструкций по вертикали и создания альтернативных путей передачи нагрузки;

- Связи горизонтального типа: устраиваются в плоскости перекрытий и покрытия для обеспечения их целостности и функционирования в качестве жёстких горизонтальных диафрагм, перераспределяющих усилия на смежные вертикальные конструкции;

- Связи в наружных стенах: позволяют вовлекать в работу ограждающие конструкции, существенно повышая общий ресурс устойчивости здания.

Проектирование указанных связей выполняется на основании расчётных усилий, однако СП 385.1325800.2018 (Свод правил) регламентирует и их минимальную несущую способность, которая должна быть обеспечена в обязательном порядке.

Перспективные направления совершенствования методик

Несмотря на значительный прогресс в области нормирования, остаются вопросы, требующие дальнейшего научного изучения [10]. К ним можно отнести:

1. Дифференциация нормативных требований. Актуальной задачей является разработка принципов назначения различных уровней защищенности для отдельных частей здания в зависимости от их роли в общей пространственной работе;

2. Уточнение критериев предельного состояния. Требуется более глубокая проработка критериев прочности и устойчивости для элементов и соединений, находящихся в условиях аварийного нагружения;

3. Исследование поведения материалов. Изучение эффектов динамического упрочнения строительных материалов при кратковременных импульсных воздействиях может открыть дополнительные резервы при проектировании.

Выводы

Комплексный подход к проектированию крупнопанельных зданий [11], направленный на предотвращение прогрессирующего обрушения, базируется на строгом соблюдении актуальных нормативных требований, применении современных методов расчётного анализа (от кинематических до сложных компьютерных моделей) и реализации эффективных конструктивных мер [8], среди которых ведущая роль отводится системе связей. Адаптация проектной практики к новому поколению нормативных документов является обязательным условием для обеспечения должного уровня безопасности объектов массовой застройки.

Литература

1. Ведяков И.И., Еремеев П.Г., Одесский П.Д., Попов Н.А., Соловьёв Н.А. Анализ нормативных требований к расчёту строительных конструкций на прогрессирующее обрушение // Вестник НИЦ «Строительство». 2019. 28 с. URL: vestnik.cstroy.ru/jour/article/view/18.
2. Каргина Е.Е., Аксенов В.Н. Сравнение технико-экономических показателей монолитных зданий стеновой и каркасной конструктивных схем при расчётах на прогрессирующее обрушение // Инженерный вестник Дона. 2025. №4. URL: ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_25__4_Kargina.pdf_c0689899cf.pdf.
3. Wu Y., Bai Y. Progressive Collapse of Structures: A Perspective from Structural Robustness // Buildings. 2020. Vol. 15. URL: doi.org/10.3390/buildings12020185.
4. Kolakkattil R., Tsavdaridis D.S., Sanjeevi A.J. A state-of-the-art review of progressive collapse research and guidelines for single-layer lattice shell structures. 2023. Vol. 73. URL: researchgate.net/publication/372768917_A_state-of-the-art_review_of_progressive_collapse_research_and_guidelines_for_single-layer_lattice_shell_structures.

5. Ключева Н.В., Азжеуров О.В. Научно-технические проблемы нормирования живучести железобетонных конструкций при внезапных запроектных воздействиях // Технические науки - от теории к практике. 2012. с. 79-83. URL: cyberleninka.ru/article/n/nauchno-tehnicheskie-problemy-normirovaniya-zhivuchesti-zhelezobetonnyh-konstruktsiy-pri-vnezapnyh-zaproektnyh-vozdeystviyah.

6. Радайкин О.В., Хнычева Н.В. Влияние различных факторов на прочность, жёсткость и трещиностойкость монолитных железобетонных стен гражданских зданий: классификация факторов, влияние геометрических параметров и соотношения нагрузок // Инженерный вестник Дона. 2024. №11. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2024/9634.

7. Меркулов С.И. Живучесть железобетонных конструкций и конструктивных систем // Вестник БГТУ. 2015. с. 58-61. URL: dspace.bstu.ru/jspui/handle/123456789/610.

8. Zeddon A.I., Ebenezer N.B., Prayer B.O. Finite Element Analysis of Progressive Collapse Resistance of Reinforced Concrete Framed Multi-Storey Building Subjected To Extreme Loadings. Vol.12-22. URL: researchgate.net/publication/388816701_Finite_Element_Analysis_of_Progressive_Collapse_Resistance_of_Reinforced_Concrete_Framed_MultiStorey_Building_Subjected_To_Extreme_Loadings.

9. Шапиро Г.И., Зенин С.А., Шарипов Р.Ш. Нормирование в крупнопанельном домостроении: новый свод правил по проектированию крупнопанельных конструктивных систем // Промышленное и гражданское строительство. 2018. 10-15 с. URL: pgs1923.ru/ru/index.php?m=4&y=2018&v=02&p=01.

10. Кудишин Ю., Дробот Д. Живучесть конструкций в аварийных ситуациях // Наука. 2008. с. 20-26. URL: 905505.ru/wp-content/uploads/2013/02/%D0%9C%D0%B5%D1%82%D0%B0%D0%BB%D0%

BB%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B5-
%D0%B7%D0%B4%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D1%8F.pdf.

11. Руденко Д.В., Руденко В.В. Защита каркасных зданий от прогрессирующего обрушения // Инженерно-строительный журнал. 2009. с.38–41. URL: engstroy.spbstu.ru/article/2009.5.8/.

References

1. Vedyakov I.I., Ereemeev P.G., Odesskiy P.D., Popov N.A., Solov'ev D.V. Vestnik NITs «Stroitel'stvo». 2019. 28 p. URL: vestnik.cstroy.ru/jour/article/view/18.

2. Kargina E.E., Aksenov V.N. Inzhenernyj vestnik Dona. 2025. №4. URL: ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_25__4_Kargina.pdf_c0689899cf.pdf.

3. Wu Y., Bai Y. Buildings. 2020. 15 p. URL: doi.org/10.3390/buildings12020185.

4. Kolakkattil R., Tsavdaridis D.S., Sanjeevi A.J. 2023. 73 p. URL: researchgate.net/publication/372768917_A_state-of-the-art_review_of_progressive_collapse_research_and_guidelines_for_singlelayer_lattice_shell_structures.

5. Klyueva N.V., Azzheurov O.V. Tekhnicheskie nauki - ot teorii k praktike. 2012. pp. 79-83. URL: cyberleninka.ru/article/n/nauchno-tehnicheskie-problemy-normirovaniya-zhivuchesti-zhelezobetonnyh-konstruktsiy-pri-vnezapnyh-zaproektnyh-vozdeystviyah.

6. Radaykin O.V., Khnycheva N.V. Inzhenernyj vestnik Dona. 2024. №11. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2024/9634.

7. Merkulov S.I. Vestnik BGTU. 2015. 58-61 p. URL: dspace.bstu.ru/jspui/handle/123456789/610.

8. Zeddon A.I., Ebenezer N.B., Prayer B.O. 12-22 p. URL: researchgate.net/publication/388816701_Finite_Element_Analysis_of_Progressive_Collapse_Resistance_of_Reinforced_Concrete_Framed_MultiStorey_Building_Subjected_To_Extreme_Loadings.



9. Shapiro G.I., Zenin S.A., Sharipov R.Sh. Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. 2018. pp. 10-15. URL: pgs1923.ru/ru/index.php?m=4&y=2018&v=02&p=01.
10. Kudishin Yu., Drobot D. Nauka. 2008. 20-26 p. URL: 905505.ru/wp-content/uploads/2013/02/%D0%9C%D0%B5%D1%82%D0%B0%D0%BB%D0%BB%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B5-%D0%B7%D0%B4%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D1%8F.pdf.
11. Rudenko D.V., Rudenko V.V. Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal. 2009. pp. 38–41. URL: engstroy.spbstu.ru/article/2009.5.8/.

Дата поступления: 18.11.2025

Дата публикации: 24.12.2025