
**РУКОВОДСТВО ПО РАСЧЕТУ
НА ПРОГРЕССИРУЮЩЕЕ
РАЗРУШЕНИЕ ДЛЯ НОВЫХ И
РЕКОНСТРУИРУЕМЫХ
ФЕДЕРАЛЬНЫХ ОФИСНЫХ
ЗДАНИЙ**

Выборочный русский перевод

Управление общих служб федерального
правительства США (GSA)

U.S. General Services Administration (GSA)

Progressive collapse analysis
and design guidelines
for Federal Office Buildings and
Major Modernization Projects

СОДЕРЖАНИЕ

ГЛАВА 2. ОПРЕДЕЛЕНИЯ	3
2.1 Основные термины.....	3
2.2 Хрупкий/нехрупкий фасад.....	6
2.3 Методы альтернативного расчета	6
ГЛАВА 4. РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЗДАНИЙ	9
4.1 Строительство новых зданий.....	9
4.2 Существующее здание	20

ГЛАВА 2. ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Нижеуказанные определения относятся к терминам, используемым в настоящем Руководстве. Основные термины даны в Разделе 2.1, хрупкий/нехрупкий фасад подробно описан в Разделе 2.2, а методы альтернативного расчета обсуждаются в Разделе 2.3.

2.1 Основные термины

Непредвиденные нагрузки – другие нагрузки, а не нагрузки стандартной конструкции (постоянные, временные, ветровые, сейсмические, и т.д.) для конструкций, такие как давление воздушной ударной волны, вызванное взрывом или автомобильным воздействием.

Допустимый предел разрушения (внешнее воздействие) – предел разрушения в результате потери опоры внешнего основного вертикального несущего элемента конструкции, который распространяется на один этаж над уровнем земли (один этаж) и должен быть ограничен. Подробные ограничения разрушения основного и второстепенного элементов конструкции определены в Разделах 4 и 5.

Допустимый предел разрушения (внутреннее воздействие) - предел разрушения в результате потери опоры внутреннего основного вертикального несущего элемента конструкции, который распространяется на один этаж над уровнем земли (один этаж) и должен быть ограничен. Подробные ограничения разрушения основного и второстепенного элементов конструкции определены в Разделах 4 и 5.

Методы альтернативного расчета – сложные методы расчета (например, нелинейный, динамический расчет конечного элемента, и т.д.), которые могут использоваться при определении вероятности прогрессирующего разрушения в рассматриваемом сооружении. Требования и дальнейшее обсуждение данной темы дано в Разделе 2.3.

Нетипичная структурная схема – структурная схема, обладающая отличительными характеристиками или деталями. Нетипичная структурная схема подробно обсуждается в Приложении А.

Избыточность соединения – соединение балка-к-колонне, предоставляющее прямые различные пути нагружения по соединению.

Ударная вязкость соединения – соединение балка-к-колонне, способное без разрыва противостоять жестким и разрушительным условиям нагрузки вследствие удаления колонны. Данная способность вызвана прочностью на скручивание и пределов прочности при изгибе непрочной оси соединения, его надежностью и основному использованию проверенных свойств пластичности данного строительного материала.

Расстояние между защищенными зазорами – расстояние между защищенными зазорами – это предел между точкой вдоль защищенного периметра и ближайшим элементом конструкции.

Защищенный периметр – защищенный периметр представляет собой линию, определяющую границы защищенных зон зазора (Рисунок 2.1). Парковка в пределах данной защищенной зоны должна ограничиваться контролем сотрудников или парковкой, контролируемой другим образом, как определено Критериями безопасности ISC. В дополнение если парковка находится в данной зоне, должны обеспечиваться защитные контрмеры по усилению безопасности (например, система автоматической идентификации транспортных средств (AVI), система первичного осмотра, и т.д.) для снижения вероятности доставки взрывного устройства в данную защищенную зону. Чтобы периметр считался защищенным, должны быть как минимум барьеры, перекрывающие проезд транспортным средствам, способные остановить угрозу взрыва автомобиля среднего уровня защиты (определенную в Критериях безопасности ISC), если не определен Высокий уровень защиты. Барьеры, перекрывающие проезд транспортным средствам, такие как тумбы, преграды, подпорные стенки, создание неровностей на дороге, и т.д., может быть спроектировано для остановки транспортного средства определенного веса и скорости, соответствующих критериям.

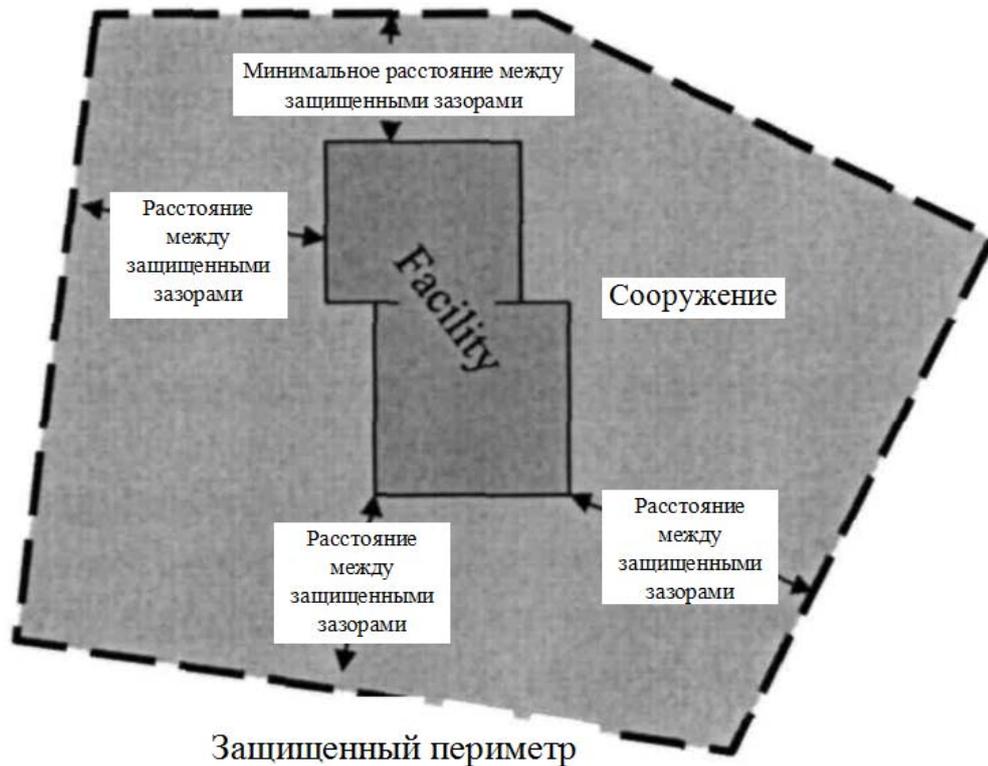


Рис. 2.1. Изображение, описывающее защищенный периметр и расстояния между защищенными зазорами

Отдельная непрерывность балка-к-балке – отдельная, четко определенная непрерывность соединения балка-к-балке через колонну, для приложений соединения стальной конструкции балка-к-колонне, способной независимо переносить нагрузки от собственного веса конструкции при состоянии удаленной колонны, несмотря на действительное или потенциальное состояние разрушения колонны.

Процедура освобождения – процесс освобождения сооружения предлагается как для новых, так и для существующих зданий. Процесс представляет проектировщик/расчетчик с внесением на дальнейшее рассмотрение прогрессирующего разрушения, если сооружение имеет конструктивные характеристики и/или характеристики стройплощадки, с помощью которых сооружение считается имеющим низкую вероятность прогрессирующего разрушения.

Хрупкий фасад – система внешних фасадов (системы стен, окон, и т.д.), имеющая предельную неразложенную способность на изгиб, меньшую 1.0 фунта на квадратный дюйм. Более подробное описание дано в Разделе 2.2.

Высокая вероятность прогрессирующего разрушения – считается, что сооружение имеет высокую вероятность прогрессирующего разрушения если результаты расчета показывают, что элемент(ы) конструкции и/или соединения не соответствуют критериям допустимости расчета прогрессирующего разрушения.

Высокий уровень защиты ISC – незначительное разрушение, поддающееся восстановлению. Сооружение или защищенное пространство в целом могут выдержать незначительное разрушение с некоторым возможным местным существенным разрушением. Люди могут получить некоторые травмы, и имущество может подвергнуться незначительному разрушению.

Низкий и средний/низкий уровень защиты ISC – значительное разрушение. Сооружение или защищенное пространство выдержит высокий уровень разрушения без прогрессирующего разрушения. Будут жертвы и разрушение имущества. Компоненты здания, включая элементы конструкции, потребуют замены, или здание может быть полностью непригодным к ремонту, потребуются снос и замена.

Средний уровень защиты ISC – среднее разрушение, поддающееся восстановлению. Сооружение или защищенное пространство выдержит значительную степень разрушения, но конструкция должна быть пригодной для повторного использования. Вероятны некоторые жертвы и разрушение имущества. Элементы здания кроме основных элементов конструкции могут потребовать замены.

Линейная процедура – линейная процедура представляет собой упрощенный метод расчета и подразумевает использование или статического или динамического линейно-упругого расчета конечного элемента.

Низкая вероятность прогрессирующего разрушения – считается, что сооружение имеет низкую вероятность прогрессирующего разрушения, если результаты расчета показывают, что элемент(ы) конструкции и/или соединения соответствуют критериям допустимости расчета прогрессирующего разрушения. Такие сооружения могут исключаться из дальнейшего рассмотрения на прогрессирующее разрушение.

Нехрупкий фасад – системы внешних фасадов (системы стен, окон, и т.д.), имеющая предельную неразложенную способность на изгиб, выше или равную 1.0 фунта на квадратный дюйм. Более подробное описание дано в Разделе 2.2.

Нелинейная процедура – нелинейная процедура представляет собой более сложный метод расчета и подразумевает использование или статических или динамических упругопластических методов расчета конечного элемента, которые охватывают нелинейность как материалов, так и геометрии. В целом это более точный метод расчета, чем Линейные процедуры для характеристики состояния разрушения конструкции. При использовании таких процедур, разрешаются менее ограничивающие критерии допустимости (Таблица 2.1) в распознавании улучшенной информации отклика который получен при таких процедурах при их использовании высококвалифицированными расчетчиками.

Основные элементы конструкции – как определено Критериями безопасности ISC, основные элементы конструкции являются необходимыми частями противостояния здания непредвиденным нагрузкам и прогрессирующему разрушению, включая колонны, ригели, кровельные балки, и систему сопротивления сдвигу.

Основные несущие элементы конструкции – как определено Критериями безопасности ISC, основными рассматриваемыми несущими элементами конструкции являются все элементы (включая их крепление), которые необходимы для систем жизнеобеспечения или элементы, которые могут нанести значительную травму при разрушении, включая, но не ограничиваясь, потолки или тяжелые подвесные механические элементы.

Прогрессирующее разрушение – это ситуация, при которой местное разрушение основного элемента конструкции приводит к разрушению примыкающих элементов, что в свою очередь влечет за собой дополнительное разрушение. Поэтому общее разрушение непропорционально исходной причине разрушения.

Квалифицированный инженер /консультант по взрывам – консультант должен пройти официальное обучение динамическим характеристикам конструкций с принятыми нормами проектирования для взрывобезопасного проектирования и со ссылками на технические руководства (Рисунок 3.3). Чтобы считаться квалифицированным, консультант по взрывам должен обладать как минимум подтвержденным пятилетним стажем проектирования и оценки сооружений, подвергающихся нагрузкам от взрыва, а также опытом тестирования и оценки продуктов, уменьшающих опасность.

Надежность – способность конструкции или элементов конструкции благодаря своему мощному усилию и жесткости противостоять разрушению без преждевременного и/или хрупкого разрушения из-за таких событий, как взрывы, воздействия, пожар или последствия человеческой ошибки.

Второстепенные элементы конструкции – как определено Критериями безопасности ISC, второстепенными элементами конструкции являются все другие несущие элементы (не относящиеся к категории основных элементов конструкции), такие как балки перекрытия, плиты и т.д.

Второстепенные несущие элементы конструкции – как определено Критериями безопасности ISC, второстепенными несущими элементами конструкции являются все элементы, не относящиеся к основным несущим элементам, такие как перегородки, мебель и осветительная арматура.

Одноточечный механизм разрушения – характеристика конструкции, у которой местное разрушение конструкции может привести к широко распространенному разрушению конструкции. Основным примером является использование ригелей рамного каркаса (например, балки и ригели, которые обычно обеспечивают вертикальную опору для промежуточных колонн или несущих элементов, расположенных выше, таким образом, перенося нагрузку на несущие элементы, поддерживающие ригель). Другой пример включает незащищенные колонны периметра.

Симметричное армирование – симметричное армирование определено здесь как имеющее продолжительные (например, нет стыков внахлестку через колонну) и равные доли основной стальной арматуры как в сжатых, так и в растянутых гранях элемента железобетонного ригеля или балки через колонну.

Обычное соединение, воспринимающее изгибающий момент – «обычное» соединение, воспринимающее изгибающий момент определено здесь как стальная конструкция соединения балка-к-колонне, противостоящая моменту, которая 1) обычно соединяет полки балки или ригеля непосредственно с лицевой стороной полки колонны в области, используя или полное проплавление соединения (CIP) шва с разделкой кромок в схеме углового соединения, и/или 2) может в значительной степени зависеть от доли зоны панели от стенки колонны для достижения ее поворотной способности.

Типичная структурная схема – типичная структурная схема состоит из конструктивной схемы здания, которая в целом является простой и не содержит размещений нетипичных структурных схем.

Предельная неразложенная способность – расчетные способности на изгиб, сдвиг и ось без использования фактора снижения способности (например, $\phi = 1.0$).

Неконтролируемые общественные зоны – данные зоны расположены на первом этаже, и они используются розничной торговлей и другими пользователями и либо не имеют вообще, либо имеют недостаточные оперативные защитные контрмеры по усилению безопасности. Эта ситуация интересна тем, что взрывное устройство можно пронести в сооружение и разместить в уязвимой зоне, например, рядом с колонной.

Неконтролируемая парковка – общественная парковка или парковочная зона, расположенная в пределах площади у основания рассматриваемого здания, где нет оперативных защитных контрмер по усилению безопасности для защиты транспортных средств, которые могут заехать в данную зону с взрывным устройством.

2.2 Хрупкий/нехрупкий фасад

Системы фасадов, которые создают как минимум 25% зоны стен на пролет конструкции должны быть оценены на способность к изгибу. Система фасадов, имеющая наибольшую способность должна использоваться для определения типа системы фасадов (например, *хрупкий* или *нехрупкий*). Любая система фасадов, занимающая менее 25% зоны стен на пролет конструкции не должна включаться в это рассмотрение.

Система *нехрупких фасадов* измеряется в статической способности к изгибу, равной 1.0 фунта на квадратный дюйм или более, основываясь на равно распределенной внутренней нагрузке (по направлению к внешней части здания).

Система *хрупких фасадов* измеряется в статической способности к изгибу, меньшей 1.0 фунта на квадратный дюйм, основываясь на равно распределенной внутренней нагрузке.

Процедура (например, действие, граничные условия, и т.д.) для определения способности к изгибу системы фасадов должна соответствовать строительным деталям действующей системы фасадов. При определении способности должно использоваться неразложенное, предельное усилие.

Примеры данного процесса приведены в Приложении С.

2.3 Методы альтернативного расчета

Нелинейная процедура

Нелинейная процедура подразумевает использование или статического или динамического метода расчета конечных элементов, которые охватывают нелинейность как материала, так и геометрии. В целом это более сложный метод расчета, чем Линейные процедуры, характеризующие работу конструкции. При использовании данных процедур, разрешаются меньшие ограничительные критерии допустимости, и принятие улучшенных результатов, которые получаются при использовании данных процедур. Следует с осторожностью использовать Нелинейные процедуры из-за потенциальных проблем с числовым сходимостью, которые могут возникнуть во время выполнения расчета, также возможны проблемы с чувствительностью к допущениям для граничных условий, геометрии и моделей материалов, также как и другие возможные трудности из-за размера конструкции. Таким образом, обязательным фактором является то, что внедрение этих сложных методов расчета должно осуществляться только квалифицированными расчетчиками проектирования конструкций, обладающими передовыми знаниями по проектированию конструкций, при трактовке результатов следует использовать оценочные суждения. Квалификация и опыт людей, избранных для выполнения Нелинейной процедуры, должны быть проверены и утверждены руководителем проекта перед началом выполнения работ.

Эмпирически определяемый критерий разрушения должен использоваться для прогнозирования вероятности разрушения элемента конструкции. Один такой набор критериев разрушения, который может использоваться в сочетании с методом нелинейного расчета, описывается временным Отделом защиты стандартов строительства (Министерство обороны, Временный антитерроризм/Силовая защита стандартов строительства, Руководство по Требованиям к конструкциям (Проект), март 2001) и включен в Таблицу 2.1. Таблица 2.1 предоставляет максимальную допустимую пластичность и/или пределы поворота для многих компонентов конструкции и типов строительства для ограничения вероятности разрушения. Перечисленные значения даны для типовых элементов традиционного строительства (например, строительство, не предусмотренное для противостояния непредвиденной нагрузке). Во время составления документа Министерство обороны проводило доработку своего руководства. При однозначном утверждении GSA руководства и критериев в документе от марта 2001 года, как включено в Таблицу 2.1, они могут быть использованы.

Из-за неотъемлемых препятствий, сложностей и расходов, сопутствующих Нелинейным процедурам, они менее часто используются для расчета прогрессирующего разрушения, чем Линейные процедуры. В дополнение, нечастое использование Нелинейных процедур вплоть до настоящего времени, усиливалось ограниченностью компьютерной техники и программным обеспечением расчетов. Однако развитие компьютерной техники и пакетов программного обеспечения расчетов широкого применения за последние несколько лет сделали возможным задействование сложных методов оценки конструкций на крупных и комплексных конструкциях, включая динамическую динамику изменения нелинейного отклика высотных конструкций, содержащих тысячи элементов и соединений, охватывающих широкий спектр неупругих основных отношений с целью практического применения проектирования. Инженеры-конструкторы, обладающие достаточными опытом и знаниями в области динамики конструкций, теперь могут создать глобальную модель всей конструкции с учетом нелинейности как материалов, так и геометрии, и выполнить требуемый динамический нелинейный расчет динамики изменений всей конструкции.

Таблица 2.1. Критерии допустимости для нелинейного расчета ¹.

КОМПОНЕНТ	ПЛАСТИЧНОСТЬ (μ)³	Градусы поворота (θ)⁴	Радианы поворота % (θ)⁴	Приме- чания
Железобетонная балка ⁵ (Ж/Б)		6	10.5	
Ж/Б плиты, армированные в одном направле- нии без мембраны напряжения ⁵		6	10.5	
Ж/Б плиты, армированные в одном направле- нии с мембраной напряжения ⁵		12	21	
Ж/Б плиты, армированные в двух направлениях без мембраны напряжения ⁵		6	10.5	
Ж/Б плиты, армированные в двух направлениях с мембраной напряжения ⁵		12	21	
Ж/Б колонны (регулировки напряжения) ⁵		6	10.5	
Ж/Б колонны (регулировки сжатия)	1			
Ж/Б Рамы		2	3.5	H/25 Макс. перекос
Предварительно напряженные балки	2			
Стальные балки	20	12	21	
Стены из стоек из тонкостенных профилей	7			
Стальная балка открытой решетки (основана на изгибающем напряжении на растяжение в нижнем поясе фермы)	6			
Металлическая опорная плита	20	12	21	
Стальные колонны (регулировки напряжения)	20	12	21	
Стальные колонны (регулировки сжатия)	1			
Стальные рамы		2	3.5	H/25 Макс. перекос
Соединения стальной рамы, полностью ограни- ченные				См. Прило- жение D
<ul style="list-style-type: none"> • Сварная или металлическая полка бал- ки или (все типы) • Сокращенный участок балки 		1.5	2.5	
		2	3.5	
Соединения стальной рамы; Собственник ⁶		2 до 2.5	3.5 до 4.5	См. Прило- жение D
Соединения стальной рамы, частично ограни- ченные				
<ul style="list-style-type: none"> • Предельное состояние, обусловленное заклепкой, работающей на срез или изги- бающим выходом плиты, угол или Т- образное сечение 		1.5	2.5	См. Прило- жение D
<ul style="list-style-type: none"> • Предельное состояние, обусловленное сдвигом высокопрочного болта, разруше- нием при растяжении или заклепкой или болтом, или разрушением при растяжении плиты, угол или Т-образное сечение 		1	1.5	
Кирпичная кладка, неармированная в одном направлении (не перекрытая аркой)	1			
Кирпичная кладка, неармированная в одном направлении (мембрана сжатия)	1			
Кирпичная кладка, неармированная в двух направлениях (мембрана сжатия)	1			
Кирпичная кладка, армированная в одном направлении		2	3.5	

Кирпичная кладка, армированная в двух направлениях		2	3.5	
Кирпичные пилястры (регулировки)		2	3.5	
Кирпичные пилястры (регулировки сжатия)	1			
Деревянный частокол	2			
Деревянные фермы или несущая балка	2			
Деревянные балки	2			
Деревянные внешние колонны (изгиб)	2			
Деревянные внутренние колонны (изгиб)	1			
* См. примечания на следующей странице.				

1. Для использования обновленных таблиц должно быть получено разрешение COTR.
2. Пластичность определяется как отношение предельного отклонения к упругой деформации (X_u/X_e).
3. Поворот для элементов или рам можно определить, используя нижеуказанные Рисунки 2.2 и 2.3.
4. Бетон, имеющий поворот более 2 градусов, должен включать арматурный хомут сдвига согласно требованиям Руководства DAHSCWE (См. Ссылку 3, страница 6-1.)
5. Частные соединения должны иметь задокументированные результаты испытаний, подтверждающие использование повышенных пределов поворотов.

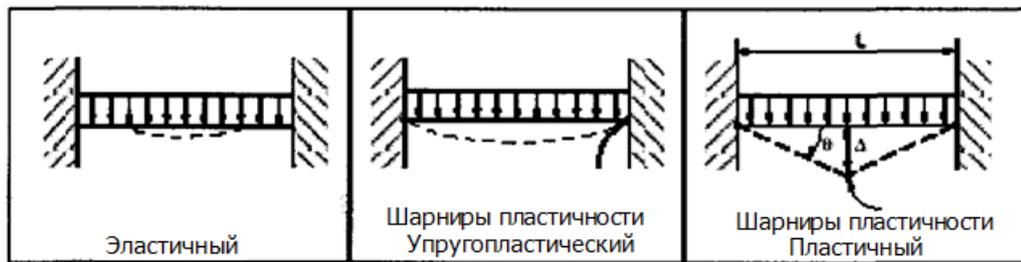


Рис. 2.2. Измерение θ после формирования шарниров пластичности

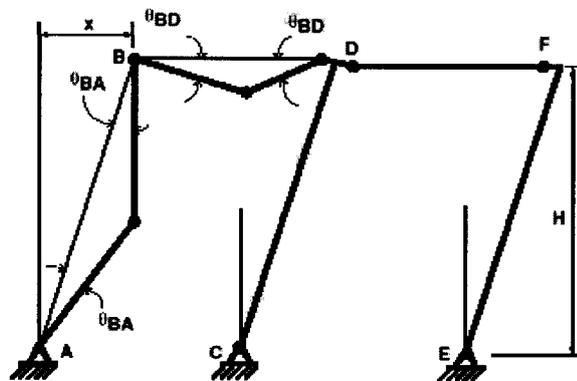


Рис. 2.3. Перекос и повороты конца элемента конструкции (θ) для рам

Дополнительно рекомендуется применение следующих нисходящих нагрузок при оценке вероятности прогрессирующего разрушения, как представлено в настоящем Руководстве.

Статический расчет нагрузки

Для статического расчета нагрузки к рассматриваемой конструкции должна применяться в нисходящем направлении следующая вертикальная нагрузка:

$$\text{Нагрузка} = 2(DL + 0.25LL) \quad (2.1)$$

Динамический расчет нагрузки

Для динамического расчета нагрузки к рассматриваемой конструкции должна применяться в нисходящем направлении следующая вертикальная нагрузка:

$$\text{Нагрузка} = DL + 0.25LL \quad (2.2)$$

где,

DL = постоянная нагрузка

LL = временная нагрузка (выше расчетной временной нагрузки или временной нагрузки кодекса).

ГЛАВА 4. РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЗДАНИЙ

4.1 Строительство новых зданий

Все новые построенные сооружения должны быть спроектированы с учетом снижения вероятности прогрессирующего разрушения вследствие непредвиденного воздействия независимо от требуемого уровня защиты. Процесс, представленный в настоящем Руководстве, состоит из подхода, заключающегося в расчете перепроектирования. Целью данного метода является увеличение вероятности того, что если произойдет местное разрушение, вследствие непредвиденного воздействия, то не возникнет прогрессирующего разрушения, или конструкция разрушится до степени, несоразмерной исходной причине разрушения. Технологическая схема процесса, показанная на Рисунке 4.1, описывает этот процесс для снижения вероятности прогрессирующего разрушения в новопостроенных сооружениях.

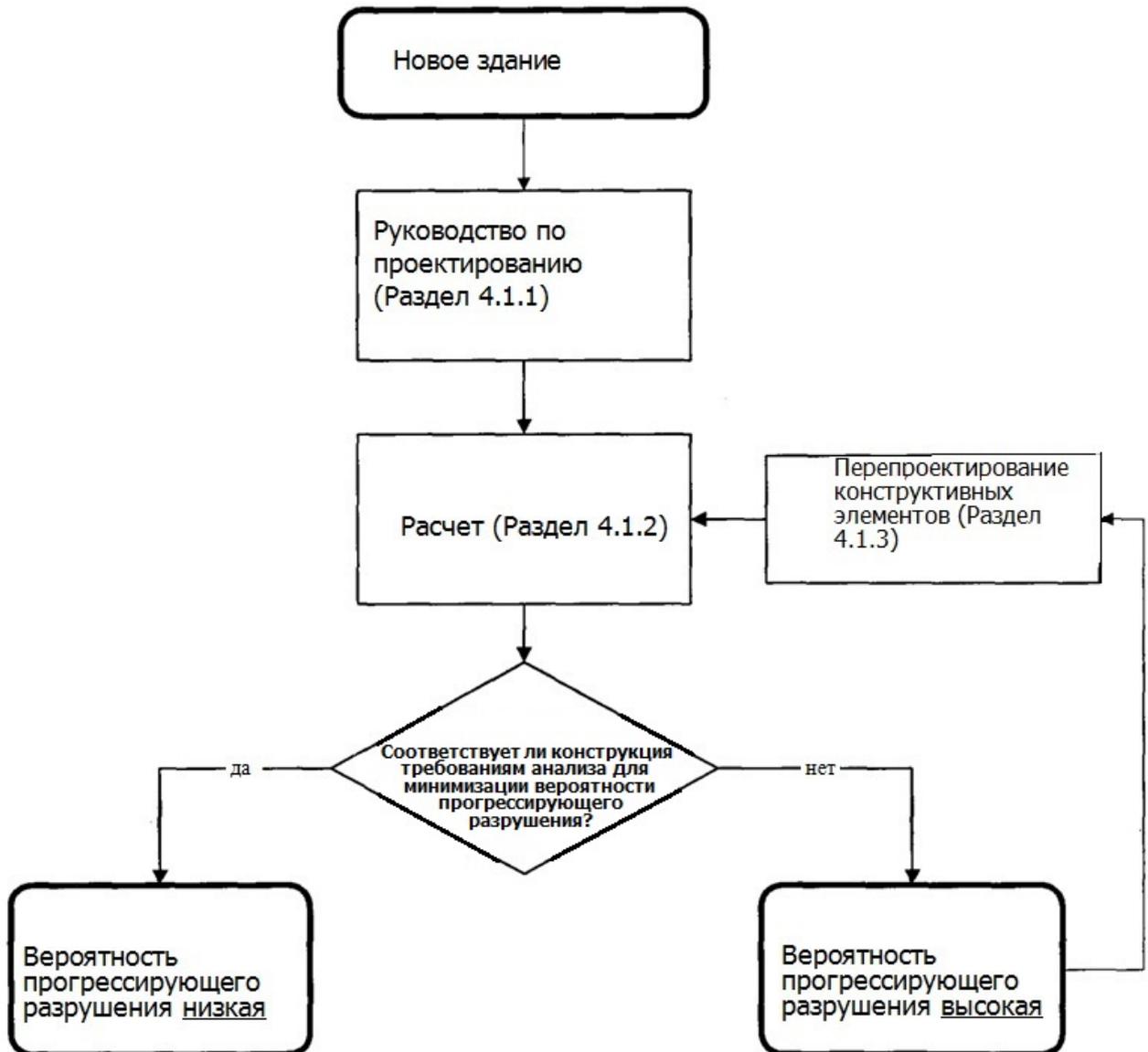


Рис. 4.1. Процесс для снижения вероятности прогрессирующего разрушения для строительства нового здания

4.1.1 Руководство по проектированию

Руководство по проектированию строительных конструкций предоставляется для рассмотрения во время фазы начального проектирования строительных конструкций и до выполнения расчета на прогрессирующее разрушение, описанного в Разделе 4.1.2 для минимизации влияния на окончательное проектирование здания. Данные рекомендации должны действовать как дополнение к критериям проектирования безопасности Межведомственного комитета по безопасности (ISC) для новых федеральных офисных зданий и основных проектах по реконструкции, в которых сформулировано что уменьшение прогрессирующего разрушения должно рассматриваться при проектировании новых зданий.

Рекомендуется рассмотреть следующие конструктивные характеристики на начальных стадиях проектирования строительных конструкций. Включение этих характеристик обеспечит более надежные конструкции и повысит вероятность достижения низкой возможности прогрессирующего разрушения при проведении процедуры анализа в Разделе 4.1.2.

Избыточность – использование избыточных горизонтальных и вертикальных систем сопротивления силам весьма приветствуется при рассмотрении прогрессирующего разрушения. Избыточность стремится способствовать общей более прочной конструкции и помогает обеспечить доступность альтернативных путей нагрузки в случае разрушения конструктивного(ых) элемента(ов). Дополнительно избыточность в общем обеспечивает различные помещения для проведения осадки, которая повышает возможность того, что разрушение может быть ограничено.

Использование конструирования для обеспечения связности и пластичности конструкции – Важно то, чтобы основные конструктивные элементы (т.е. ригели и балки) могли перекрывать два полных пролета. Это требует как непрерывности узла соединения балка-к-балке через удаленную колонну, так и способности, как основных, так и второстепенных элементов деформироваться при изгибе далеко за пределы предела упругости без разрушения конструкции. Поэтому верное конструирование соединений будет необходимо при проектировании для обеспечения непрерывности узлов балка-к-балке через колонну, и для обеспечения резервирования соединений и деформативности. Для железобетонных конструкций важно армировать элементы (например, ригели, балки и колонны) так, чтобы бетон мог работать в пластичной манере. Возможность достижения пластичного ответа важна при рассмотрении перераспределения предельной нагрузки так, как в случае разрушения конструктивного элемента (элементов).

Способность сопротивления при изменении направления нагрузки – Рекомендуется, чтобы как основные, так и второстепенные конструктивные элементы были спроектированы так, чтобы эти компоненты были способны сопротивлению при изменении направления нагрузки в случае разрушения конструктивного элемента (элементов).

Далее следует пример, иллюстрирующий важность способности сопротивления при изменении нагрузки. Рассмотрим железобетонное здание, спроектированное только для нагрузок от собственного веса конструкции (т.е. нагрузки от собственного веса конструкции и полезной нагрузки). Возможно, что многие из конструктивных элементов не смогут сопротивляться изменению направления нагрузки. В то время как колонны могут содержать арматуру со всех сторон и быть способными к обеспечению устойчивости во всех направлениях, горизонтальные конструктивные элементы (например, балки, плиты, и т.д.) могут только содержать арматуру, необходимую для сопротивления нисходящей нагрузке, вызванной силой тяжести.

Рассмотрим схему, показанную на Рисунке 4.2. Вдоль длины балки обеспечивается отрицательное армирование (верхнее армирование) в местах, где отрицательные моменты вызваны нисходящей нагрузкой. Аналогичным образом положительное армирование (нижнее армирование) обеспечивается в местах, где положительные моменты вызваны нисходящей нагрузкой. ACI 318 включает условие для армирования связности конструкции которое требует некоторой верхней и нижней арматуры быть непрерывной для балок, таких как показаны на Рисунке 4.2. Количество непрерывной арматуры, которое требует ACI 318, может быть недостаточным для предотвращения прогрессирующего разрушения при мгновенном удалении колонны.

Нежелательно чтобы структурная схема, проиллюстрированная на Рисунке 4.2, была способна эффективно перераспределять нагрузки, когда основная опорная колонна удалена, как показано на Рисунке 4.3. Удваивается не только пролет без опоры, но и потеря опоры вызывает усилие в балке, которое не рассматривалось в исходном проекте. В особенности область балки, спроектированной для сопротивления отрицательному моменту силы внезапно подверженной положительному моменту и существенному повышению вертикальной нагрузки. Из-за конфигурации арматуры сопротивление балки очень мало относительно перераспределяемой нагрузки и она скорее всего разрушится в непластичной манере, которая возможно приведет к возникновению дополнительных разрушений конструкции.

Способность сопротивления разрушению от сдвига – Важно, чтобы основные элементы конструкции сохраняли достаточную прочность и пластичность при непредвиденной нагрузке для предотвращения разрушения от сдвига такого как в случае разрушения каких-либо элементов конструкции. Когда несущая способность сдвига исчерпывается до несущей способности изгиба, существует вероятность внезапного непластичного разрушения элемента, что возможно приведет к прогрессирующему разрушению конструкции.

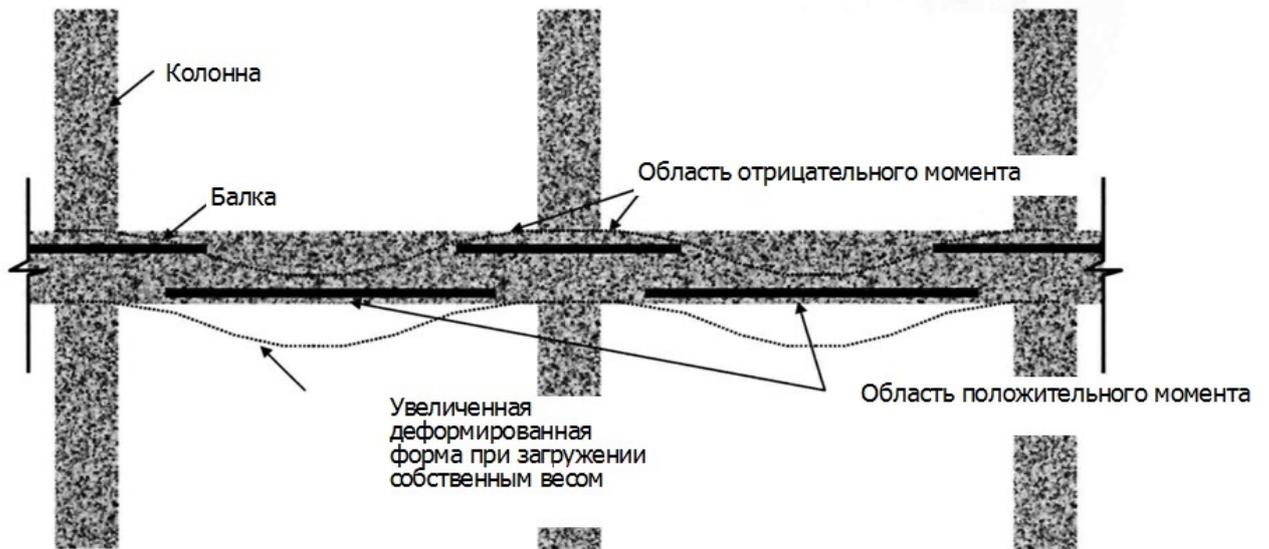


Рис. 4.2. Схематическое изображение арматуры для балки, спроектированной только для нагрузки от собственного веса конструкции

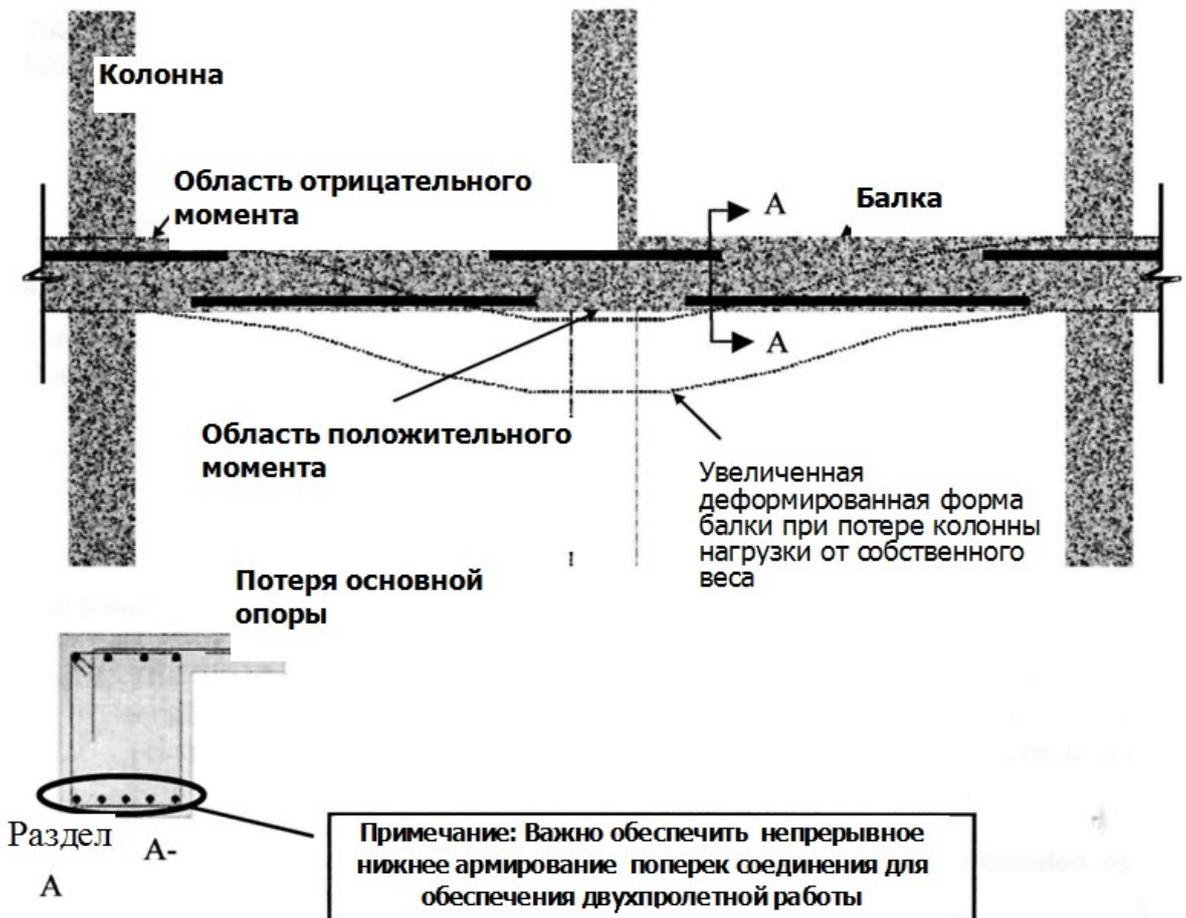


Рис. 4.3. Ответ балки, показанной на Рис. 4.2, после потери опоры основной колонны показывает невозможность защиты от прогрессирующего разрушения

Примечание:

Ряд методик проектирования для предварительного определения размеров конструктивных элементов включен в Приложение В. Выполнение этих процедур не требуется данными Рекомендациями. Однако эти

процедуры могут использоваться для предварительного определения размеров и конструировании элементов до выполнения расчета на прогрессирующее разрушение, представленного в Разделе 4.1.2., если того требует главный конструктор проекта.

4.1.2 Расчет

Следующий метод статистического линейного упругого расчета может использоваться для оценки возможности прогрессирующего разрушения во всех новопостроенных сооружениях. Другие методы расчета также могут использоваться, как те, которые обсуждаются в Разделе 2.3, но принципы расчета (Раздел 4.1.2.3) и допустимая степень разрушения (Раздел 4.1.2.4) должны использоваться в определении возможности прогрессирующего разрушения.

Следующая процедура использует статический линейный метод, совмещенный со следующим:

Критерием оценки результатов анализа
Набор расчетных ситуаций
Особые нагрузки должны быть учтены в анализе

4.1.2.1 Методы расчета

Следующая процедура расчета должна быть выполнена с использованием апробированных методов статического линейного расчета. Рекомендуется использовать трехмерные расчетные модели для учета возможных пространственных эффектов и избегания слишком традиционных решений. Тем не менее, могут использоваться и двухмерные модели при условии, что общий ответ и пространственные эффекты могут быть адекватно учтены.

4.1.2.2 Процедура

Вероятность прогрессирующего разрушения может быть определена при помощи следующей процедуры.

Шаг 1. Компоненты и соединения, как основных, так и второстепенных конструктивных элементов должны быть проанализированы для случая внезапной потери в основной вертикальной опоре. Применяемая нисходящая нагрузка должна быть совместима с представленной в Разделе 4.1.2.3.

Шаг 2. Результаты анализов, выполненных в Шаге 1, должны быть оценены при помощи критериев анализа, определенных в Разделе 4.1.2.4.

Примечание:

Если результаты анализа выявят, что элемент(ы) конструкции и/или соединения/узлы не соответствуют критериям анализа, представленным в Разделе 4.1.2.4 (т.е. несущая способность элемента и/или соединения значительно превышена и то, что конструкция не способна эффективно перераспределять нагрузки), сооружение выявляет высокую вероятность прогрессирующего разрушения и пользователь должен перепроектировать элементы и/или соединения/узлы в соответствии с процедурой, описанной в Разделе 4.1.3. Однако если результаты анализа выявят, что элемент(ы) конструкции/или соединения/узлы соответствуют критериям анализа, представленным в Разделе 4.1.2.4, сооружение выявляет низкую вероятность прогрессирующего разрушения и не требует дальнейшего рассмотрения прогрессирующего разрушения.

4.1.2.3 Расчетные предпосылки и загрузка

Необходимо использовать следующие расчетные предпосылки при оценке прогрессирующего разрушения для типичных структурных схем. Нетипичные структурные схемы рассмотрены в Разделе 4.1.2.3.2.

4.1.2.3.1 Типичные структурные схемы

Сооружения, которые имеют относительно простой план без нетипичных структурных схем должны использовать следующие сценарии анализа:

Рамные конструкции или плоские плиты

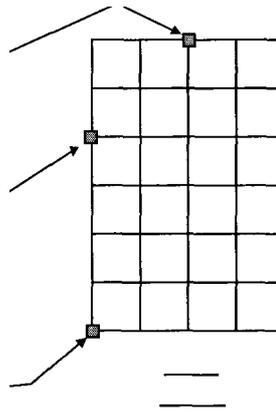
Внешнее воздействие

Следующие случаи внешнего воздействия должны быть рассмотрены в процедуре, описанной в Разделе 4.1.2.2.

1 Проанализируйте для внезапной потери колонны для одного этажа над уровнем (1 этаж) расположенного на или рядом с серединой короткой стороны здания.

2 Проанализируйте для внезапной потери колонны для одного этажа над уровнем (1 этаж) расположенного на или рядом с серединой длинной стороны здания.

3 Проанализируйте для внезапной потери колонны для одного этажа над уровнем (1 этаж) расположенного на углу здания.

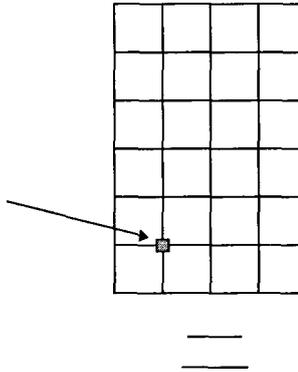


Вид сверху

Внутреннее рассмотрение

Сооружения с подземной парковкой и/или неконтролируемыми общественными зонами на первом этаже должны использовать следующие случаи внутреннего анализа в процедуре, описанной в Разделе 4.1.2.2.

1 Проанализируйте для внезапной потери 1 колонны которая расширяется с этажа зоны подземной парковки или неконтролируемого общественного первого этажа до следующего этажа (1 этаж). Рассматриваемая колонна должна быть внутренней по периметру линий колонны.



Вид сверху

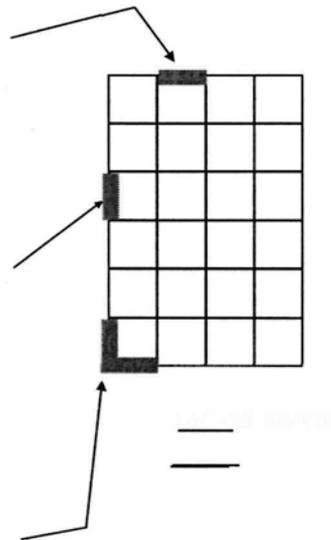
Сдвиговые/Несущие конструкции стен
Внешнее воздействие

Следующие случаи внешнего воздействия должны быть рассмотрены в процедуре, описанной в Разделе 4.1.2.2.

1 Проанализируйте для внезапной потери одного пролета или 30 погонных футов (10м) участка внешней стены (в зависимости от того, что меньше) для одного этажа над уровнем, расположенного на или рядом с серединой короткой стороны здания.

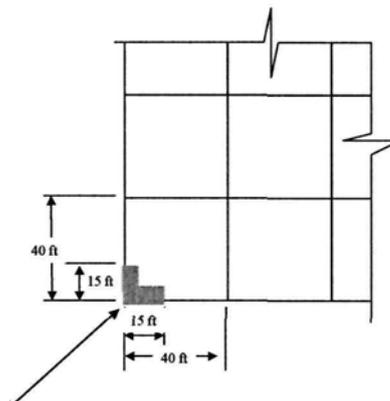
2 Проанализируйте для внезапной потери одного пролета или 30 погонных футов (10м) участка внешней стены (в зависимости от того, что меньше) для одного этажа над уровнем, расположенного на или рядом с серединой длинной стороны здания.

3 Проанализируйте для внезапной потери целой несущей стены вдоль периметра на углу пролета конструкции или для потери 30 погонных футов стены (15 футов (4,57 метра) в каждом основном направлении) (в зависимости от того, что меньше) для одного этажа над уровнем земли*.



Вид сверху

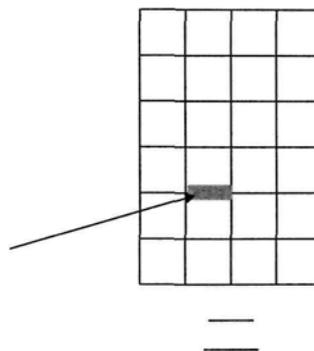
* Потеря участка стены при рассмотрении угла должна быть непрерывной и включать угол. Например, если пролет конструкции сооружения составляет 40 футов (12,2 метра) на 40 футов, участок стены который потребуется удалить состоит из 30 футов (9,14 метра) начиная от угла, и распространяется на 15 футов (4,57 метра) в каждом основном направлении.



Внутреннее воздействие

Сооружения с подземной парковкой и/или неконтролируемыми общественными зонами на первом этаже должны использовать случаи следующего внутреннего анализа в процедуре, описанной в Разделе 4.1.2.2.

1 Проанализируйте для внезапной потери одного пролета конструкции или 30 погонных футов участка внутренней стены (в зависимости от того, что меньше) на уровне этажа зоны подземной парковки и/или неконтролируемой зоны первого этажа. Рассматриваемый участок стены должен быть внутренним по периметру линии несущей стены.



Вид сверху

Анализ нагрузки

Для целей статического расчета должна применяться следующая вертикальная нагрузка, приложенная к рассматриваемым конструкциям:

$$\text{Нагрузка} = 2(\text{DL} + 0.25\text{LL}) \quad (4.1)$$

где,

DL= постоянная нагрузка

LL= временная нагрузка

Примечание:

В зависимости от характеристик сооружения и/или результата процесса освобождения, от пользователя может потребоваться выполнить только один из случаев анализа. Например, если сооружение не содержит каких-либо неконтролируемых парковочных зон и/или общественных зон, пользователю не потребуется выполнять анализы для внутреннего рассмотрения. Дополнительные случаи анализа должны быть рассмотрены, однако, если есть существенные изменения в прочности или конструировании колонн или других несущих элементах или в какой-либо части сооружения.

4.1.2.3.2 Нетипичные структурные схемы

Все конструкции в основном уникальны и зачастую нетипичны (т.е. здания часто содержат отличительные структурные характеристики или детали), поэтому непрактично разрабатывать ряд расчетных предпосылок, которые применяются к каждому сооружению. Таким образом, пользователь настоящего Руководства должен использовать инженерную оценку для определения критических расчетных сценариев, которые должны быть рассмотрены в дополнение к ситуациям, представленным в Разделе 4.1.2.3.1. Смысл этих условий должен быть отражен в сценариях этих расчетов. В особенности сценарии должны рассматривать случаи, где потеря вертикальной опоры (колонны или стены) может привести к непропорциональному разрушению. Возможные структурные схемы, из которых может последовать нетипичная структурная компоновка включают, но не ограничиваются, следующими конфигурациями:

Сочетание конструкций

Вертикальные разрывы/ перехватывающие балки

Неравномерные пролеты/большие размеры балок

Нерегулярность плана

Близко расположенные колоны

Эти нетипичные структурные схемы подробнее описаны в Приложении А.

4.1.2.4 Критерии расчета

Разрушение конструкции в результате внезапного удаления основной вертикальной опоры должно быть ограничено. Типично допустимая зона разрушения для здания будет основана на размере пролета конструкции. Однако с учетом структурных схем, которые имеют значительно большие размеры пролетов, область разрушения также должна быть ограничена до соответствующего обоснованного размера. Допустимая степень разрушения для внезапного удаления элемента основной вертикальной опоры вдоль внешней части и в пределах внутренней части здания определяется следующим образом.

Внешнее воздействие

Максимальная допустимая степень разрушения в результате внезапного удаления внешнего элемента основной вертикальной опоры в пределах одного этажа над уровнем земли должна быть ограничена следующим образом:

1. пролеты конструкции прямо связанные с внезапно удаляемым вертикальным элементом в пределах этажа непосредственно над внезапно удаляемым вертикальным элементом конструкции.

или

2. 167 м² на уровне этажа непосредственно над внезапно удаляемым вертикальным элементом. в зависимости оттого, что составляет меньшую площадь (Рисунок 4.4.a).

Внутреннее воздействие

Допустимая степень разрушения в результате внезапного удаления внутреннего элемента основной вертикальной опоры в неконтролируемой зоне первого этажа и/или зоне подземной парковки для одного уровня этажа должна быть ограничена до:

1. пролеты конструкции непосредственно связанные с внезапно удаляемым вертикальным элементом или

2. 334,5 м² на уровне этажа непосредственно над внезапно удаляемым вертикальным элементом.

в зависимости оттого, что составляет меньшую площадь (Рисунок 4.4.b). Если нет неконтролируемой зоны первого этажа и/или зоны подземной парковки в рассматриваемом сооружении, рассмотрение на внутреннее воздействие не требуется.

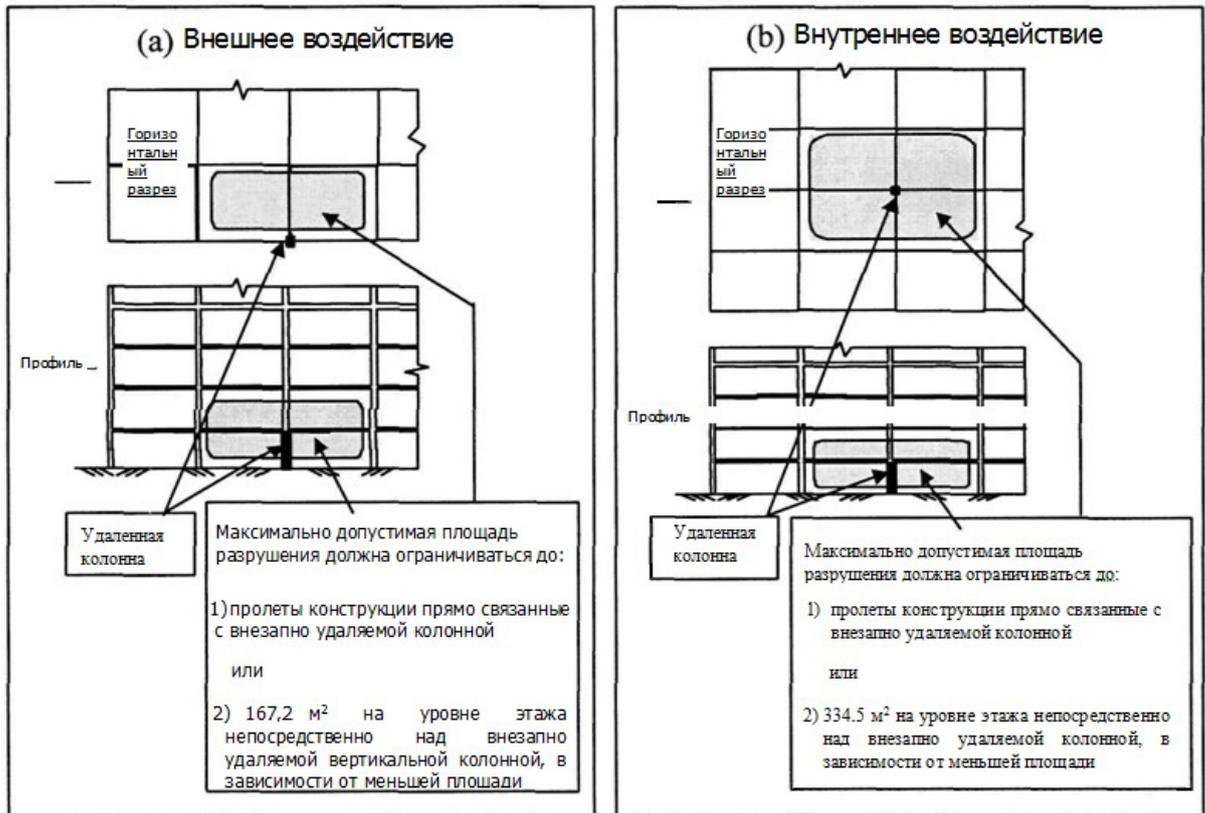


Рис. 4.4. Пример максимально допустимых площадей разрушения для конструкции, где колонны являются основными вертикальными опорами

Критерии допустимости

Анализ результатов линейного расчета должен выполняться определением размера и распределением вероятных влияний на основные и второстепенные конструктивные элементы для определения количества возможных площадей разрушения. Определение величины и распределение этих величин характеризуется Коэффициентом Воздействие-Несущая способность (DCR). Эти значения и методы частично основаны на методике, представленной в следующих ссылках:

Комментарии NEHRP к Рекомендациям по Сейсмическому восстановлению зданий (FEMA 274). Издание Федерального агентства по чрезвычайным ситуациям США, октябрь 1997 года.

Проект стандарта и комментарии по Сейсмическому восстановлению зданий (FEMA 356). Издание Федерального агентства по чрезвычайным ситуациям США, ноябрь 2000 года.

Временный антитерроризм/Стандарт на конструкцию по защите сил, Руководство по конструктивным требованиям (Проект). Издание Министерства обороны, март 2001 года.

Анализ прогрессирующего разрушения и рекомендации по проектированию для новых федеральных офисных зданий и основных проектов по модернизации Управления общих служб в федеральном правительстве США и официально зарегистрированной Ассоциации прикладных исследований, ноябрь 2000 года.

Критерии допустимости для основных и второстепенных конструктивных компонентов должны определяться как:

$$DCR = \frac{Q_{UD}}{Q_{CE}} \quad (4.2)$$

где,

Q_{UD} = Действующая сила (воздействие) определяемая в элементе или соединении/узле (момент, аксиальная сила, сдвиг и возможное сочетание сил)

Q_{CE} = Ожидаемая предельная нормативная способность компонента и/или соединения/шарнира (момент, продольная сила, сдвиг и возможное сочетание сил)

При использовании DCR, линейный метод, конструктивные элементы и соединения, которые имеют значения DCR, превышающие следующие допустимые значения, считаются значительно поврежденными или разрушенными.

Допустимые значения DCR для основных и второстепенных конструктивных элементов следующие:

$DCR \leq 2.0$ для типичных структурных схем (Раздел 4.1.2.3.1)

$DCR \leq 1.5$ для нетипичных структурных схем (Раздел 4.1.2.3.2)

Примечание:

Критерии для нетипичных структурных схем (т.е. $DCR \leq 1.5$) могут ограничиваться «нетипичной» областью, если это локально. Например, рассмотрим конструкцию, которая использует передаточные балки (подстроительные балки) вдоль одной стороны периметра и типичную структурную схему для оставшейся части конструкции. Балки конструкции периметра вдоль стороны здания, которые используют ригели рамного каркаса, должны использовать DCR меньший, чем или равный 1.5, но оставшаяся часть здания должна использовать DCR меньший или равный 2.0 для оценки вероятности прогрессирующего разрушения.

Метод, используемый при оценке определения размеров и распределения возможных неупругих воздействий и перемещений, используемых в данном Руководстве, аналогичны методам «м-фактора», в настоящее время используемых FEMA 273 и 356 для методов линейного анализа.

Пошаговая процедура для проведения линейного статического анализа выглядит следующим образом.

Шаг 1. Удалите вертикальную опору с рассматриваемого места и проведите линейный статический расчет конструкции как указано в Разделе 4.1.2.2. Нагрузите модель $2(DL + 0.25LL)$.

Шаг 2. Определите, какой из элементов и соединений имеет значения DCR, которые превышают критерии приемки. Если DCR для какого-либо элемента соединения концов превышен, основываясь на силе сдвига, этот элемент должен рассматриваться как разрушенный элемент. В дополнение если изгибающиеся значения DCR для обоих концов элемента или его соединений, а также сам пролет, превышены (создавая трехшарнирный механизм разрушения – Рисунок 2.2), этот элемент должен рассматриваться как разрушенный элемент. Разрушенные элементы должны быть удалены из модели и все постоянные и временные нагрузки, связанные с разрушенными элементами, должны быть перераспределены на остальные элементы в смежных балках.

Шаг 3. Для элемента конструкции или соединения, чей коэффициент Q_{ud}/Q_{se} превышает допустимый DCR на изгиб, разместите шарнир на конце элемента или соединения, чтобы отпустить момент. Этот шарнир должен располагаться в месте пластического шарнира этого элемента или узла. Используйте жесткие вставки и/или короткие элементы, чтобы смоделировать шарнир в надлежащем месте. Для шарнира на конце элемента центр шарнира не должен браться более чем $\frac{1}{2}$ высоты элемента со стороны пересекающего элемента, который обычно является колонной (Рисунок 4.5).

Шаг 4. К каждому добавленному шарниру примените равные, но противоположные моменты для вставки и на конце элемента с каждой стороны шарнира. Размеры моментов должны равняться ожидаемой несущей способности на изгиб, и направление моментов должно совпадать с направлением моментов в расчете, выполненном в Шаге 1.

Шаг 5. Повторно запустите анализ и повторите Шаги 1-4. продолжите этот процесс до тех пор, пока не будут превышены значения DCR. **Если моменты были перераспределены по всей площади всего здания и значения DCR все еще превышают допустимые пределы области разрушения, конструкция считается имеющей высокую вероятность прогрессирующего разрушения.**



Рис. 4.5. Расположение жесткой вставки

4.1.2.5 Свойства материалов

Для настоящего Руководства расчетная прочность материала может быть увеличена при помощи коэффициента повышения прочности для определения ожидаемой прочности материала (для определения несущих способностей, и т.д.). Это должно использоваться только в случаях, когда проектировщик или расчетчик уверены в действительных характеристиках материалов сооружения. Эти значения приведены в Таблице 4.2.

Таблица 4.2. Коэффициенты повышения прочности для различных строительных материалов

Строительный материал	Коэффициент повышения прочности
Железобетон	
Прочность при сжатии бетона	1.25
Стальная арматура (временное сопротивление разрыву и напряжение текучести)	1.25
Кладка из бетонных блоков	
Прочность при сжатии	1.0
Временное сопротивление разрыву при изгибе	1.0
Прочность сдвига	1.0
Деревянная и легкая металлическая рама	
Все компоненты	1.0

4.1.2.6 Руководство по составлению расчетных схем

Общие сведения

Аналитическая(и) модель(и) используемые при оценке возможности прогрессирующего разрушения должны моделироваться как можно более точно к ожидаемым или существующим условиям. Это включает все свойства материалов, подробности проекта, и т.д. В дополнение, расчетчик должен реалистично задать тип граничных условий (например, защемленные, свободные, и т.д.), и должен знать обо всех ограничениях или аномалиях пакета (пакетов) программного обеспечения используемого для выполнения расчета.

Удаление вертикального элемента

Вертикальный элемент (т.е. колонна, несущая стена и т.д.), который удаляется должен удаляться внезапно. Если скорость, с которой удаляется элемент, не влияет на статический анализ, то скорость, с которой элемент удаляется в динамическом анализе, может иметь существенное влияние на поведение конструкции. Поэтому рекомендуется для случая выполнения динамического анализа удалять вертикальный опорный элемент за период не больший чем $1/10$ периода, связанного с режимом отклика конструкции на удаление вертикального элемента. Также удаление вертикального элемента должно состоять из удаления только вертикального элемента. Это удаление не должно проникать в соединение/узел или горизонтальные элементы на уровнях этажей. Пример эскиза, иллюстрирующий верный и неверный способ удаления колонны показан на Рисунке 4.6. Важно чтобы пользователь понимал, что эскиз не является образцом разрушения из-за какой-либо особой угрозы (см. Раздел 1.3 для обсуждения метода удаления элемента конструкции).

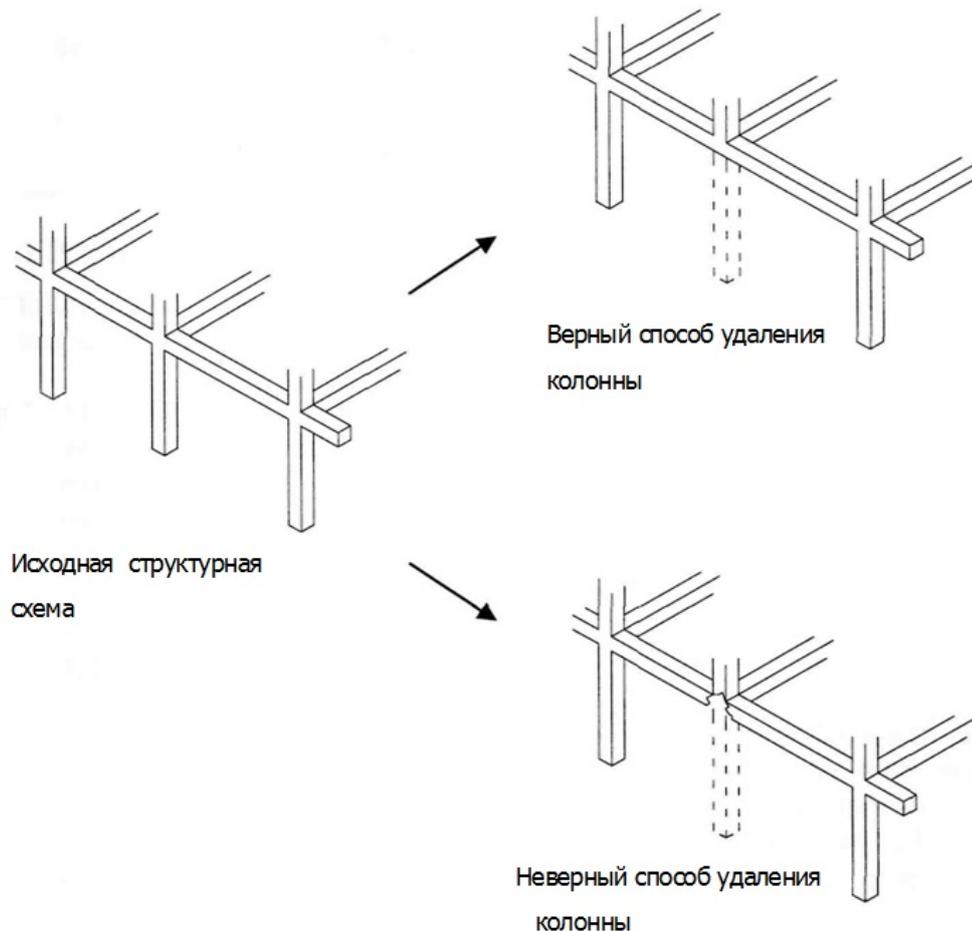


Рис. 4.6. Эскиз верного и неверного способа удаления колонны

4.1.3 Перепроектирование конструктивных элементов

Структурные схемы, рассчитанные в соответствии с Разделом 4.1.2, для которых определена высокая вероятность прогрессирующего разрушения, должны быть перепроектированы до уровня, соответствующего низкой вероятности прогрессирующего разрушения.

4.1.3.1 Процедура

Необходимо следовать следующим шагам при перепроектировании недостаточных конструктивных элементов, определенных в процедуре анализа (Раздел 4.1.2).

Шаг 1. Как минимум конструктивные элементы и/или соединения, определенные как недостаточные в Разделе 4.1.2, должны быть перепроектированы в соответствие с перераспределенной нагрузкой, определенной в этом процессе в сочетании со стандартными требованиями по проектированию строительного(ых) кодекса(ов) специфичных проектов, с использованием апробированных методик проектирования. Критерии перепроектирования для типичных и нетипичных структурных схем следующие:

Типичные структурные схемы

Конструктивные элементы и соединения балка-к-колонне должны иметь значение DCR 2.0 или меньше для основных и второстепенных конструктивных элементов в проектировании недостаточных компонентов и соединений. Если используется утвержденный альтернативный критерий анализа, дефектные компоненты должны быть спроектированы таким образом, чтобы как минимум достигать допустимых значений, связанных с этим критерием для перераспределяемой нагрузки.

Нетипичные структурные схемы

Конструктивные элементы и соединения балка-к-колонне должны иметь значение DCR 1.5 или меньше для основных и второстепенных конструктивных элементов в проектировании недостаточных компонентов и соединений. Если используется утвержденный альтернативный критерий анализа, недостаточные компоненты должны быть спроектированы таким образом, чтобы как минимум достигать допустимых значений, связанных с этим критерием для перераспределяемой нагрузки.

Шаг 2. По завершении выполнения Шага 1, перепроектированная конструкция должна быть повторно проанализирована в соответствии с процедурой анализа, описанной в Разделе 4.1.2.

Примечание:

Чтобы достичь необходимых требований проектирования, могут потребоваться существенные изменения конструкции, такие как значительно увеличенные размеры элементов, дополнение симметричной арматуры (для железобетонных элементов), жесткие узлы и т.д. Однако критерии проектирования для нетипичных кон-

струкций могут ограничиваться до «нетипичной» области, если это локально. Например, рассмотрим здание, которое использует подстроительные балки вдоль одной стороны периметра и типичную структурную схему для оставшейся части конструкции. Балки конструкции периметра должны быть спроектированы так, чтобы иметь значение DCR равное 1.5 или меньше, но оставшаяся часть здания может быть спроектирована так, чтобы иметь максимальные значения DCR равные 2.0 для основных и второстепенных конструктивных элементов.

Следует учесть, что для того, чтобы достичь низкой вероятности прогрессирующего разрушения, может потребоваться более одного повтора перепроектирования/процесса анализа. Например, изменение размера конструктивных элементов может изменить определение размеров и распределение перераспределяемой нагрузки.

Проектировщик не ограничен определенным методом улучшения исходного проекта с учетом минимизации вероятности прогрессирующего разрушения. Для примера, проиллюстрированного на Рисунке 4.7, предположим, что результаты Раздела 4.1.2 указывают, что балки между наружными колоннами с 2 этажа до крыши для заданной конструкции жесткой рамы не адекватны в отношении критерия анализа, представленного в Разделе 4.1.2.4. У проектировщика есть свободная возможность равномерно распределить улучшенное перепроектирование вдоль общей высоты сооружения или сконцентрировать их над несколькими этажами (Рисунок 4.7), также как и добиться общей цели минимизации вероятности прогрессирующего разрушения, как определено в Разделе 4.1.2.4.

4.2 Существующее здание

Существующие сооружения, проходящие реконструкцию, должны быть обновлены до требований к новым сооружениям, когда того требует проектная оценка риска безопасности сооружения и где это осуществимо. В дополнение сооружения, проходящие реконструкцию, должны как минимум оценивать вероятность прогрессирующего разрушения в результате непредвиденных нагрузок. Технологическая схема процесса, показанная на Рисунке 4.8, описывает процесс оценки вероятности прогрессирующего разрушения в существующих сооружениях. Данные этого анализа должны быть объединены в оценку риска проекта, и должны быть задокументированы в соответствии с условиями Раздела 1.5. Условия «анализа», находящиеся в Разделе 4.1.2, относительно методов анализа, процедуры, рассмотрений анализа и критериев нагрузки, критериев анализа, свойств материалов и моделирования руководства, также должны применяться к существующим зданиям.

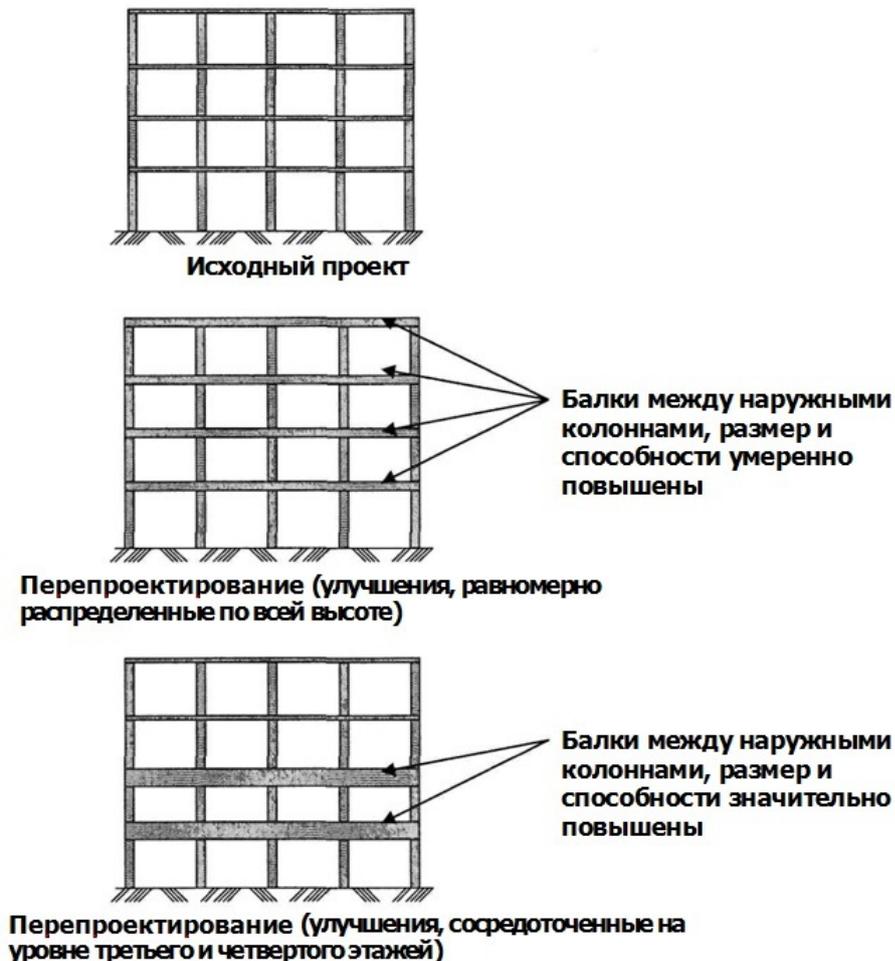


Рис. 4.7. Возможные методы перепроектирования конструкции, в которой определили, что она имеет высокую вероятность прогрессирующего разрушения

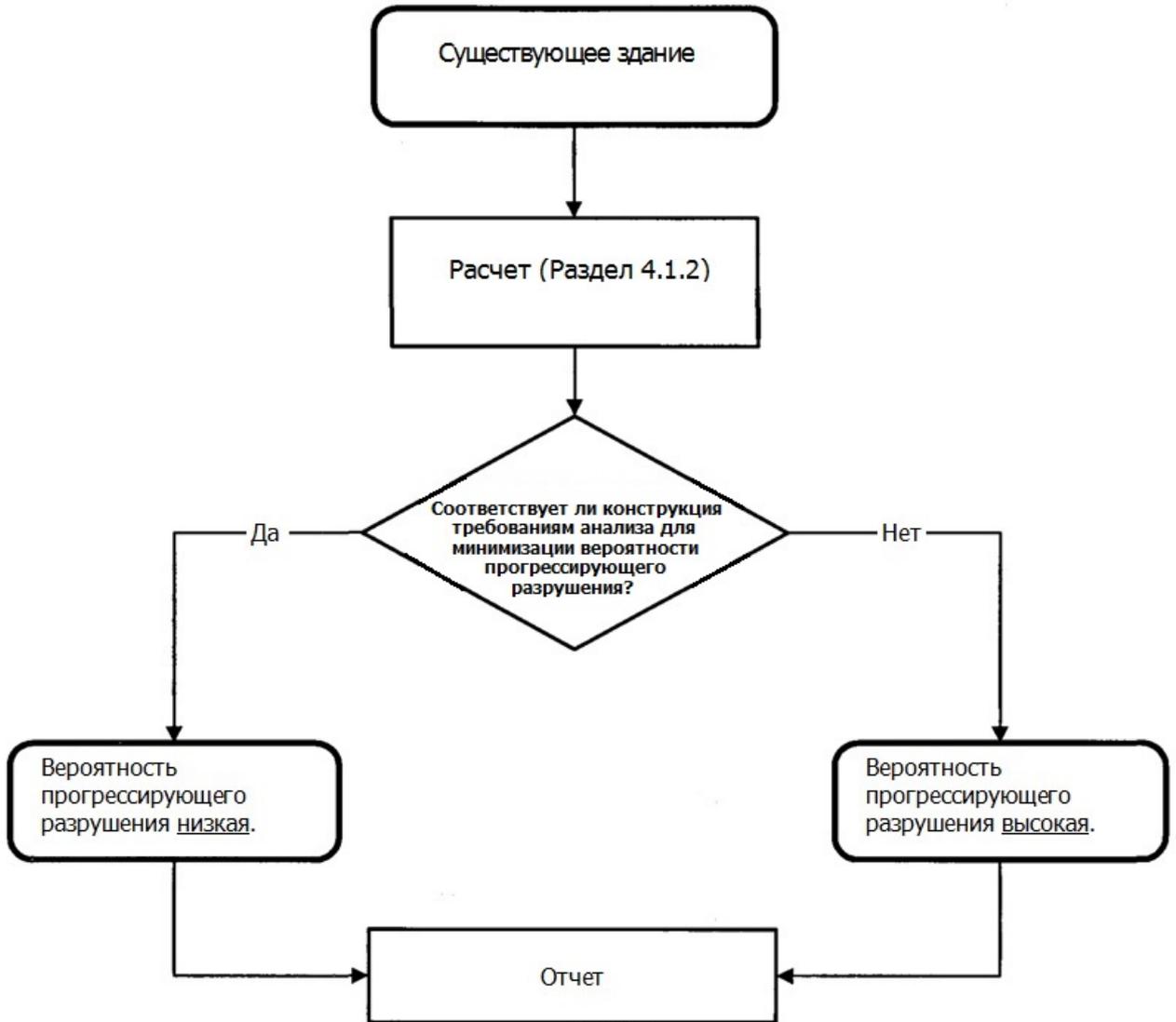


Рис. 4.8. Процесс оценки вероятности прогрессирующего разрушения в существующем здании