
НЕПРОПОРЦИОНАЛЬНОЕ РАЗРУШЕНИЕ

Сравнение методов расчета

ООО ГП

ООО Грачев и Партнеры
www.gppb.ru

Грачев В. Ю., Вершинина Т. А., Пузаткин А. А.,

Непропорциональное разрушение. Сравнение методов расчета.

Екатеринбург, Издательство «Ажур», 2010, 81 с.

ISBN 978-5-91256-018-7

Книга посвящена сравнительному анализу методов расчета зданий и сооружений на устойчивость к непропорциональному разрушению, используемых при проектировании строительных конструкций в России и в зарубежных странах. Приводится сравнение терминов «непропорциональное разрушение», «прогрессирующее разрушение» и «целостность конструкции», их общее и различие. Приведен обзор и классификация применяемых в практике методов расчета и реализация этих методов в строительных нормах и стандартах. На примере расчета многоэтажного здания выполнено сравнение методов по материалоемкости запроектированных зданий и трудоемкости выполнения расчетов и конструирования.

В основу книги положена дипломная работа студентов Кафедры САПРОС Строительного факультета Уральского Государственного технического Университета (УГТУ-УПИ) Штейнзика Максима Юрьевича и Пузаткина Андрея Анатольевича, выполненная в 2008 году под руководством доцента кафедры САПРОС Грачева Владимира Юрьевича. В работе приняли активное участие консультанты – инженеры Чеботков Алексей Иванович, Вершинина Татьяна Александровна. Методическое и научное руководство работой осуществляли сотрудники кафедры САПРОС профессор д.т.н Алехин Владимир Николаевич (заведующий кафедрой, декан Строительного факультета), доценты к.т.н. Антипин Алексей Александрович, к.т.н. Гордилов Сергей Николаевич, к.т.н. Макаркин Сергей Владимирович, старшие преподаватели – Шубин Сергей Николаевич, Плетнев Максим Валерьевич, Балув Владимир Юрьевич.

ООО «Грачев и Партнеры»
620028 Екатеринбург, ул. Долорес Ибаррури, 2
Тел: (3430 379-45-90 e-mail: info@gppb.ru
www.gppb.ru

© ООО «Грачев и Партнеры», 2010 г.
© Грачев В.Ю., 2010 г.

...В консульство Марка Лициния и Луция Кальпурния неожиданное бедствие унесло не меньшее число жертв, чем их уносит кровопролитнейшая война, причем начало его было вместе с тем и его концом. Некто Атилий, по происхождению вольноотпущенник, взявшись за постройку в Фидене амфитеатра, чтобы давать в нем гладиаторские бои, заложил фундамент его в ненадежном грунте и возвел на нем недостаточно прочно сколоченное деревянное сооружение, как человек, затеявший это дело не от избытка средств и не для того, чтобы снискать благосклонность сограждан, а ради грязной наживы. И вот туда стеклись жадные до таких зрелищ мужчины и женщины, в правление Тиберия почти лишённые развлечений этого рода, люди всякого возраста, которых скопилось тем больше, что Фидена недалеко от Рима; это усугубило тяжесть разразившейся тут катастрофы, так как набитое несметной толпой огромное здание, перекосившись, стало рушиться внутрь или валиться наружу, увлекая вместе с собой или погребая под своими обломками несчетное множество людей, как увлеченных зрелищем, так и стоявших вокруг амфитеатра. И те, кого смерть настигла при обвале здания, благодаря выпавшему им жребию избавились от мучений; еще большее сострадание вызывали те изувеченные, кого жизнь не покинула сразу: при дневном свете они видели своих жен и детей, с наступлением темноты узнавали их по рыданиям и жалобным воплям. Среди привлеченных сюда разнесшейся молвой тот оплакивал брата, тот — родственника, иные — родителей. И даже те, чьи друзья и близкие отлучились по делам из дому, также трепетали за них, и, пока не выяснилось, кого именно поразило это ужасное бедствие, неизвестность только увеличивала всеобщую тревогу.

Когда начали разбирать развалины, к бездыханным трупам устремились близкие с объятиями и поцелуями, и нередко возникал спор, если лицо покойника было обезображено, а одинаковые телосложение и возраст вводили в заблуждение признавших в нем своего. При этом несчастье было изувечено и раздавлено насмерть пятьдесят тысяч человек, и сенат принял постановление, воспрещавшее устраивать гладиаторские бои тем, чье состояние оценивалось менее четырехсот тысяч сестерциев, равно как и возводить амфитеатр без предварительного обследования надежности грунта. Атилий был отправлен в изгнание...

Корнелий Тацит

«Анналы»

Книга IV

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	5
ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ.....	6
ПРОГРЕССИРУЮЩЕЕ ИЛИ НЕПРОПОРЦИОНАЛЬНОЕ?.....	7
ОБЗОР НОРМАТИВНЫХ ТРЕБОВАНИЙ.....	9
ОБЗОР И КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ РАСЧЕТА.....	12
ОБЗОР НОРМ И СТАНДАРТОВ.....	17
СНиП 2.01.07-85 «Нагрузки воздействия» и другие СНиП и СП.....	19
Рекомендации по защите монолитных жилых зданий от прогрессирующего обрушения.....	20
Рекомендации по защите высотных зданий от прогрессирующего обрушения.....	22
Рекомендации по защите жилых каркасных зданий.....	23
Рекомендации по предотвращению прогрессирующих обрушений крупнопанельных зданий.....	27
МГСН 4.19-05 «Временные нормы по проектированию многофункциональных высотных комплексов»...	31
ТСН 31-332-2006 «Жилые и общественные высотные здания».....	33
МДС 20-2.2008 «Рекомендации по обеспечению безопасности большепролетных сооружений от лавинообразного обрушения...».....	34
Еврокод EN 1991-1-7 «Нагрузки на конструкции. Основные нагрузки. Случайные воздействия».....	36
UFC 4-023-03 «Проектирование зданий для предотвращения прогрессирующего обрушения».....	42
NYBC «Строительные нормы Нью-Йорка».....	44
GSA «Рекомендации по расчету прогрессирующего обрушения и проектированию новых федеральных офисных зданий и крупных реконструкций».....	47
РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДОВ РАСЧЕТА.....	51
ДП – Добавочная прочность.....	51
УСК - Увеличение связности конструкции.....	52
АП - Альтернативный путь.....	53
ЛП - Локальная прочность.....	54
ОР – Оценка риска.....	55
УЧЕТ УРОВНЯ ОТВЕТСТВЕННОСТИ.....	56
ПРИМЕР РАСЧЕТА ОТ НЕПРОПОРЦИОНАЛЬНОГО ОБРУШЕНИЯ.....	57
Расчет по СНиП.....	61
Расчет по методу добавочной прочности (ДП).....	68
Расчет по методу альтернативного пути (АП).....	71
Расчет по методу локальной надежности (ЛН).....	74
Расчет по методу усиления связности конструкции (СК).....	75
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	77
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	79

ПРЕДИСЛОВИЕ

Термин “прогрессирующее обрушение” (progressive collapse) и проблемы защиты от него панельных зданий и зданий других конструктивных схем появилась в 1968 г. в докладе комиссии, расследовавшей причины аварии 22-этажного панельного жилого дома “Ронан Поинт” в Лондоне [7]. Взрыв газа из-за неисправной газовой духовки в угловой квартире на 18 этаже выбил несущую стеновую панель. Вышележащие конструкции, потеряв опору, обрушились. Вследствие ударного воздействия от падающих конструкций и добавочной нагрузки от обломков также разрушились и нижележащие конструкции. В результате, из-за выхода из строя одного элемента произошло обрушение части здания, несоизмеримо большего объема, чем объем непосредственно связанных с разрушившимся элементом конструкций.

После публикации доклада практически во всех развитых странах были начаты исследования этой проблемы, и к концу 70-х годов анализ возможных средств защиты от прогрессирующего обрушения зданий различных конструктивных систем с учетом экономических критериев был в основном завершен. Основные выводы, полученные разными исследователями, и последовавшие за ними изменения норм проектирования ряда стран (в основном это были западноевропейские государства) оказались схожи. При дальнейшем рассмотрении этой проблематики в части определения критериев нормирования уровня защиты зданий и сооружений от подобных ситуаций был введен термин «непропорциональное разрушение» (disproportionate collapse) и его характеристика – объем сооружения или площадь здания, которые могут разрушиться при разрушении или выходе из строя (любого) каждого отдельного несущего элемента. В настоящее время именно величина непропорционального разрушения в виде допустимой суммарной площади участков этажей рядом с местом локального разрушения элемента нормируется в европейских странах – в Еврокоде и соответствующих ему национальных стандартах, строительных законах и строительных нормах [18, 19, 20, 22, 23, 27].

В Америке, и впоследствии в ряде международных стандартов, получил распространение термин «конструктивная целостность» (general structural integrity) как обобщенная характеристика способности сооружения противостоять локальному разрушению и экстремальным воздействиям без разрушения целиком или без разрушения значительной части, несоизмеримой с величиной воздействия [15, 16, 17, 26, 29, 30, 33, 34, 35].

В некоторых недавно разработанных строительных нормах, основанных на функционально-ориентированном (гибком) подходе, требование надежности конструкции формулируется, как способность конструкции не разрушаться при экстремальных воздействиях в течение времени, необходимом для проведения эвакуации людей из здания и проведения аварийно-спасательных работ [28].

Другими событиями, вызвавшими новую волну исследований в области надежности зданий и сооружений при чрезвычайных ситуациях и последовавшие изменения в строительных нормах, стали террористические атаки на здания в США. Это разрушение значительной части «Федерального здания Альфреда Мюррея» в Оклахома Сити в 1995 году, когда подрыв начиненного взрывчаткой автомобиля привел к разрушению колонны на первом этаже, что привело к цепной реакции разрушения несущих балок, рядом расположенных колонн и связанных с ними участков перекрытий [44]. Это также атака в 2001 году на здания Мирового Торгового Центра в Нью-Йорке и последовавшие разрушения башен-близнецов WTC1 и WTC2, и последовавшее через несколько часов обрушение здания 52-этажного здания WTC7 вследствие неконтролируемого пожара [45]. Результатом осмысления этих событий стала разработка в США ряда дополнительных требований надежности для государственных зданий и сооружений и объектов министерства обороны, и соответствующих рекомендаций по расчету и проектированию [36, 37, 32]. В названии этих документов присутствует термин «прогрессирующее обрушение», но при этом следует отметить, что эти документы не являются строительными нормами и посвящены описанию требуемых или рекомендуемых методов расчета и конструирования. При этом в обычных строительных нормах в США, как в национальном масштабе, так и в отдельных штатах и городах, как правило, используются понятия «целостности конструкции» и «пропорциональности разрушения».

В Российской практике последних лет в нормативной и методической литературе в основном используется только термин «защита от прогрессирующего обрушения» и не приводятся другие возможные подходы к обеспечению надежности зданий и сооружений [8, 9, 10, 11, 12, 46]. При этом следует отметить, что российским специалистам приходится работать с зарубежными источниками, не переведенными или переведенными частично в виде обзорной информации и журнальных статей. Отечественный анализ примеров прогрессирующего разрушения, приведших к обрушению значительной части конструкций, непропорциональному исходному воздействию, практически отсутствует. Имеется в виду не обмен профессиональными и непрофессиональными мнениями в средствах массовой информации и интернете, а официально опубликованные технические отчеты об авариях. Во всяком случае, привести в списке литературы к этой книге опубликованный для научной и инженерной общественности документ с анализом характера и причин разрушения 14 февраля 2004 года здания «Трансвааль-парка» не представляется возможным.

ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Ниже приведены термины и определения, наиболее близко соответствующие их использованию в книге, с указанием источников, откуда взяты формулировки определений.

Непропорциональное разрушение – разрушение здания или его части при непредвиденном воздействии, несоразмерное величине воздействия, вызвавшего такое разрушение [23].

Конструктивная целостность – свойство конструкции не разрушаться при воздействиях, подобных наводнениям, оползням, пожарам, взрывам, ударам или стечением человеческих ошибок, на величину непропорциональную исходной причине [15].

Прогрессирующее разрушение – разрушение конструкций строительного сооружения, когда локальное разрушение приводит к разрушению смежных элементов конструкции из-за потери ими опоры и/или от нагружения весом и динамическим воздействием обломков ранее разрушенных конструктивных элементов здания, сооружения и его содержимого [12].

Расчетная ситуация – совокупность существенных параметров здания или сооружения и возможных воздействий на него в некоторый момент времени при строительстве, использовании, расширении, реконструкции или демонтаже здания или сооружения [12].

Ключевой элемент — элемент конструкции, локальное разрушение которого приводит к непропорциональному разрушению здания или сооружения [23].

Чрезвычайное воздействие — маловероятное предвиденное или непредвиденное воздействие на элементы конструкции или конструкцию в целом, имеющее значительную величину по сравнению с предвиденными воздействиями [12].

Чрезвычайная ситуация — расчетная ситуация при чрезвычайном воздействии [12].

Локальное разрушение — разрушение (потеря несущей способности) отдельного конструктивного элемента (балка, колонна) или отдельного участка протяженного конструктивного элемента (стена, перекрытие) строительного сооружения. [12]

Критически важные точки здания — строительные конструкции и их узлы, инженерные и другие системы, выход из строя которых может привести к развитию чрезвычайных ситуаций [12].

Проектная угроза — совокупность условий и факторов, определяемых в процессе проведения анализа уязвимости высотного здания, способных нарушить его нормальную эксплуатацию и привести к чрезвычайной ситуации [12].

Физический барьер — преграды и технические средства, препятствующие проникновению нарушителя в охраняемые зоны или к уязвимым местам высотного здания [12].

Аварийная расчетная ситуация — явление, представляющее исключительные условия работы конструкции на аварийные воздействия, имеющие малую вероятность появления и небольшую продолжительность, но приводящие, в большинстве случаев, к тяжелым последствиям [14].

Большепролетные системы — конструкции пролетом свыше 36 м. Это пространственные конструкции – сплошные и стержневые оболочки, купола, висячие вантовые, тонколистовые (мембранные) и тентовые покрытия, стержневые пространственные конструкции (структуры), перекрестные системы, а также традиционные конструкции больших пролетов – фермы, рамы, арки и т.п. [14].

Лавинообразное (прогрессирующее) обрушение — распространение начального локального повреждения в виде цепной реакции от элемента к элементу, которое, в конечном счете, приводит к обрушению всего сооружения или непропорционально большой его части [14].

ПРОГРЕССИРУЮЩЕЕ ИЛИ НЕПРОПОРЦИОНАЛЬНОЕ ?

Чем отличается используемый в России термин «прогрессирующее разрушение» от термина «непропорциональное разрушение» и соответствующего ему понятия «конструктивная целостность», широко используемого в зарубежных нормах?

Прежде всего, следует отметить, что прогрессирующее разрушение определяет один из возможных, но не единственно возможный механизм обрушения здания и (или) сооружения. Безусловно, цепная реакция, соответствующая прогрессирующему разрушению, является весьма опасной и зачастую приводит к значительным последствиям. Но не всегда. Возможны разрушения элементов конструкции прогрессирующего характера, которые не приводят к итоговым разрушениям, являющимся критическими для сооружения.

С другой стороны, обрушение конструкции может быть значительным, но при этом не иметь прогрессирующего характера. Такая ситуация характерна для конструкций с небольшим количеством элементов.

Например, можно рассмотреть ферму однопролетного моста значительной длины, предположим 100 метров и двухпролетный мост с двумя 50-метровыми пролетами и одним средним устоем. Рассмотрим следующие гипотетические случаи:

1. При чрезвычайном воздействии разрушился локальный элемент 100-метровой фермы моста – опорный раскос. Произошло обрушение пролетного строения, то есть численная характеристика величины разрушения соответствует 100 метрам мостовой конструкции.

2. При чрезвычайном воздействии разрушился локальный элемент двухпролетного моста – средний устой. При этом одновременно исчезла опора у обоих пролетных строений, и они упали. Численная характеристика величины разрушения соответствует 100 метрам моста.

3. При чрезвычайном воздействии разрушился локальный элемент одного из пролетов двухпролетного моста – опорный раскос. При падении фермы разрушился средний устой моста, вследствие чего потерял опору и разрушился второй пролет моста. Численная характеристика разрушения соответствует 100 метрам моста.

При рассмотрении последствий этих трех гипотетических сценариев следует отметить, что величина разрушения во всех случаях одинакова – 100 метров моста. Но при этом прогрессирующий характер разрушения имел только третий сценарий.

Рассмотрим четвёртый пример – 100 метровый мост из 10 пролетов по 10 метров. При ситуации, аналогичной ранее рассмотренному третьему сценарию аварии, предположим, произошла цепная реакция, и разрушилось три пролета. Характер разрушения – прогрессирующий, величина разрушения – 30 метров моста, в три раза меньше чем в первых трех сценариях.

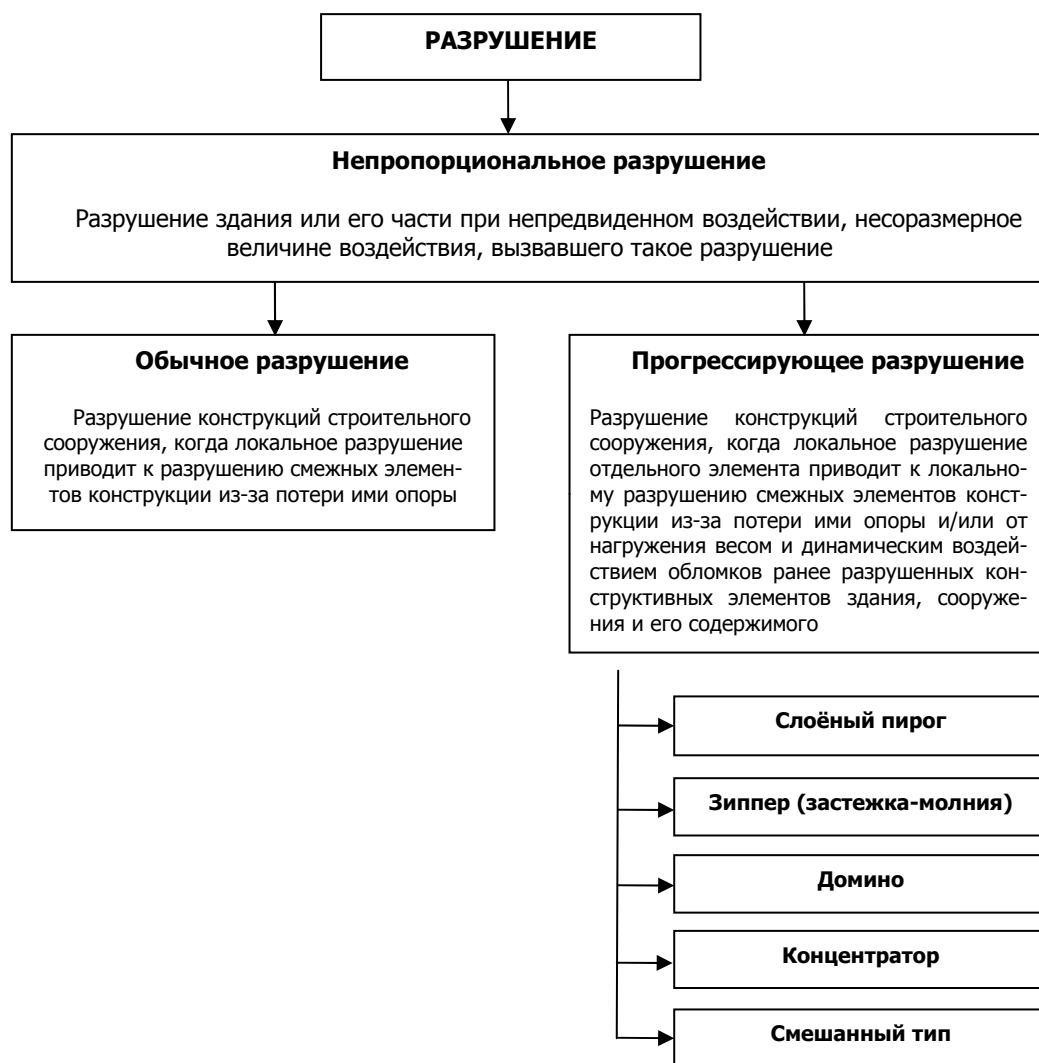
Таким образом, различия между понятиями прогрессирующего и непропорционального разрушения можно сформулировать следующими тезисами:

- прогрессирующее обрушение описывает характер разрушения, а непропорциональное разрушение - величину последствий.
- непропорциональное разрушение может быть как прогрессирующим, так и обычным.
- прогрессирующее обрушение является качественной характеристикой механизма разрушения, для него сложно задать универсальную характеристику, выражающуюся в абсолютных величинах, характеризующих сооружение неопределенного конструктивного типа.
- непропорциональное обрушение является характеристикой величины разрушения, для которого возможно подобрать численный измеритель, характеризующий сооружение. Например, длину линейного сооружения или площадь разрушенной части здания.

Не смотря на то, что оба рассматриваемых термина в основном соизмеримы и созвучны, понятие непропорционального исходному воздействию разрушения конструкции является более универсальным и легче поддается измерению и, соответственно, формулированию критериев допустимого уровня разрушения в нормах и стандартах.

Прогрессирующее разрушение характеризуется возникновением цепной реакции, когда последствия исходного воздействия или локального разрушения становятся причиной разрушения смежных элементов, которое, в свою очередь, передает воздействие дальше и зачастую увеличивает его в геометрической прогрессии.

Можно выделить следующие типы механизмов развития прогрессирующего обрушения [43]:



Слоёный пирог – разрушение вертикального несущего элемента приводит к обрушению вышележащих конструкций на перекрытия и конструкции нижележащих этажей. На нижележащие конструкции добавляется вес обломков и кинематическая энергия от их падения.

Примером такого типа является разрушения башен WTC в Нью-Йорке.

Зиппер – разрушение несущего элемента, как правило, удерживающего типа, например ванты моста или грунтового анкера подпорной стены. С выходом из строя элемента удерживаемое им усилие передается на соседние элементы, превышает их несущая способность и они разрушаются. Далее происходит цепная реакция.

Примером такого типа является разрушение моста Такома в 1940 году от флаттера, вызванного сильным ветром.

Домино – разрушение одного из рядом расположенных вертикальных несущих элементов, как правило, в виде опрокидывания или потери устойчивости положения. При опрокидывании первый элемент воздействует на другой, и так далее.

Примером такого типа является разрушение линий электропередач при сильном ветре или обледенении проводов.

Концентратор – хрупкое разрушение вследствие развития трещины или иного дефекта в растянутой зоне сечения несущего элемента. Увеличение трещины или дефекта приводит к значительному увеличению напряжений в зоне концентратора напряжений и инициирует дальнейшее развитие трещины. Последствием является внезапное хрупкое разрушение элемента.

Смешанный тип – сложный характер прогрессирующего обрушения, для которого возможно выделить разные вышеописанные типы развития разрушения.

ОБЗОР НОРМАТИВНЫХ ТРЕБОВАНИЙ

Ниже приведены требования к надежности конструкций при чрезвычайных воздействиях из различных нормативных документов

Технический регламент о безопасности зданий и сооружений

Положения статьи 7 «Требования механической безопасности» не содержат понятий прогрессирующего и непропорционального разрушения, и не оговаривают соответствующих принципов надежности при чрезвычайных воздействиях. По всей видимости, эти требования будут сформулированы в дальнейшем в одном из обязательных сводов правил.

EN 1990 Еврокод. Основы проектирования конструкций

2.1 (4)Р Конструкции должны быть запроектированы и построены таким образом, чтобы они не были повреждены при наступлении таких событий, как:

- взрыв,*
 - удар,*
 - последовательность человеческих ошибок,*
- на величину, непропорциональную исходной причине*

ASCE 7-05 Минимальные нагрузки для расчета зданий и сооружений

1.4 Общая конструктивная целостность

Здания и другие конструкции должны быть запроектированы так, чтобы выдерживать локальное повреждение, в то время как конструктивная система в целом остается устойчивой и не разрушается на величину, непропорциональную исходному локальному повреждению. Это должно достигаться через устройство конструктивных элементов, которые обеспечивают устойчивость конструктивной системы в целом, путем передачи нагрузок от любого локально поврежденного элемента, рядом расположенным частям конструкции, способным выдерживать эти нагрузки без разрушения. Это должно сопровождаться обеспечением достаточной связности, избыточности, или энергораспределяющей способностью (пластичностью), или комбинацией вышеперечисленного в элементах конструкции.

ИСС РС Функциональные нормы для зданий и сооружений Совета по международным нормам

501.3.2 Непропорциональное обрушение

Конструкции должны быть запроектированы так, чтобы воспринимать локальное повреждение. Конструктивная система в целом должна оставаться устойчивой и не должна повреждаться на величину, непропорциональную исходному локальному повреждению.

NFPA 5000 Нормы по строительству и безопасности

5.2.3.4 Свойство предотвращения обрушению

Здания должны быть запроектированы и построены так, чтобы в достаточной степени предотвращать разрушение конструкций при чрезвычайных воздействиях и обеспечивать спасателям обеспечение эвакуации и спасение находящихся в здании людей.

Рекомендации по защите монолитных жилых зданий от прогрессирующего обрушения

1.1 Жилые монолитные здания должны быть защищены от прогрессирующего (цепного) обрушения в случае локального разрушения их несущих конструкций при аварийных воздействиях, не предусмотренных усло-

виями нормальной эксплуатации зданий (пожары, взрывы, ударные воздействия транспортных средств, не-санкционированная перепланировка и т.п.). Это требование означает, что в случае аварийных воздействий допускаются локальные разрушения отдельных вертикальных несущих элементов в пределах одного этажа, но эти первоначальные разрушения не должны приводить к обрушению или разрушению конструкций, на которые передается нагрузка, ранее воспринимавшаяся элементами, поврежденными аварийным воздействием.

Рекомендации по защите жилых каркасных зданий при чрезвычайных ситуациях

1.1 Жилые каркасные здания должны быть защищены от прогрессирующего (цепного) обрушения в случае локального разрушения их несущих конструкций при аварийных воздействиях, не предусмотренных условиями нормальной эксплуатации зданий (взрывы, пожары, ударные воздействия транспортных средств и т.п.).

Каркасные здания имеют несущие элементы, которые невозможно защитить от прогрессирующего обрушения конструктивными мероприятиями. Это ключевые элементы каркаса (в первую очередь колонны), и для повышения устойчивости здания против прогрессирующего обрушения при ЧС следует резервировать для этих элементов дополнительную прочность, поэтому то понимание защиты от прогрессирующего обрушения, которое пришло от панельных зданий, для каркасных зданий трактуется иначе.

Конструктивная система каркасного здания должна обеспечивать его прочность и устойчивость в случае локального воздействия на отдельные элементы, не предусмотренного условиями нормальной эксплуатации здания как минимум на время, необходимое для эвакуации людей.

Рекомендации по предотвращению прогрессирующих обрушений крупнопанельных зданий

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

Конструктивная система здания должна обеспечивать его прочность и устойчивость в случае локального разрушения несущих конструкций как минимум на время, необходимое для эвакуации людей.

МГСН 4.19-05. Временные нормы по проектированию многофункциональных высотных комплексов

6.1.1 Высотные здания должны быть защищены от прогрессирующего обрушения в случае локального разрушения несущих конструкций в результате возникновения аварийных чрезвычайных ситуаций (ЧС).

К последним относятся:

– природные ЧС – опасные метеорологические явления, образование карстовых воронок и провалов в основании зданий;

– антропогенные (в том числе техногенные) ЧС – взрывы снаружи или внутри здания, пожары, аварии или значительные повреждения несущих конструкций вследствие дефектов в материалах, некачественного производства работ и др.

6.1.7 Основное средство защиты зданий от прогрессирующего обрушения – резервирование прочности несущих элементов, обеспечение несущей способности колонн, ригелей, диафрагм, дисков перекрытий и стыков конструкций; создание неразрезности и непрерывности армирования конструкций, повышение пластических свойств связей между конструкциями, включение в работу пространственной системы ненесущих элементов.

ТСН 31-332-2006 Жилые и общественные высотные здания

1. Высотные здания должны быть защищены от прогрессирующего (цепного) обрушения в случае локального разрушения несущих конструкций в результате возникновения чрезвычайных ситуаций (ЧС) – сейсмические воздействия, опасные метеорологические явления, взрывы снаружи и внутри здания, пожары, аварии или значительные повреждения несущих конструкций вследствие дефектов в материалах, некачественного производства работ и прочее.

2. Устойчивость здания против прогрессирующего обрушения должна проверяться расчетом и обеспечиваться конструктивными мерами, способствующими развитию в несущих конструкциях и их узлах пластических деформаций при предельных нагрузках.

МДС 20-2.2008 Временные рекомендации по обеспечению безопасности большепролетных сооружений от лавинообразного (прогрессирующего) обрушения при аварийных воздействиях

3. Сооружения должны проектироваться, возводиться и эксплуатироваться так, чтобы ущерб, возникающий как следствие аварийных событий, не достигал размеров, несоизмеримо больших, чем последствия изначального повреждения.

ОБЗОР И КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ РАСЧЕТА

Методы расчета на устойчивость против прогрессирующего обрушения или, другими словами, мероприятия против непропорционального обрушения, можно классифицировать по различным признакам.

Классификация методов приведена в части 1991-1-7 «Случайные нагрузки» Еврокода [20], в комментариях к американскому стандарту ASCE 7-05 «Минимальные расчетные нагрузки на здания и сооружения» [34], и в других источниках [38, 41]

Классификация методов (strategies for accidental design situations) в соответствии с Еврокодом иллюстрируется следующим образом:

EN 1991-1-7: Чрезвычайные расчетные ситуации (accidental design situations)

1. Стратегии, основанные на учёте установленных (известных) чрезвычайных нагрузок

- 1.1. Проектирование конструкций для обеспечения достаточной минимальной надежности
- 1.2. Предотвращение или уменьшение воздействия, например защитные меры
- 1.3. Проектирование конструкций, выдерживающих чрезвычайную нагрузку

2. Стратегии, основанные на ограничении размера локализованного разрушения

- 2.1. Повышенная избыточность (enhanced redundancy), например альтернативные пути нагрузки
- 2.2. Расчет ключевых элементов (key elements), воспринимающих условную чрезвычайную нагрузку A_d
- 2.3. Предписывающие правила, например целостность и пластичность

Стратегии, описанные в разделе 1991-1-7 Еврокода, являются реализацией одного из основных требований к проектированию строительных конструкций в EN 1990 «Еврокод. Основы проектирования конструкций» [18, 19]. Ниже приведен текст этого положения из обоих документов. Несмотря на то, что Белорусский стандарт имеет обозначение "IDT", говорящее об идентичности национального перевода тексту Еврокода на официальных языках, в формулировках даже основных принципов можно заметить различия:

BS EN 1990:2002 (Великобритания)

2.1 (4)P A structure shall be designed and executed in such a way that it will not be damaged by event such as:
- explosion,
- impact, and
- the consequence of human errors,
to the extent disproportionate to the original cause.

Note 1. The events to be taken into account are those agreed for the individual project with client and the relevant authority.

Note 2. Further information is given in EN 1991-1-7

2.1 (4)P Конструкции должны быть запроектированы и построены таким образом, чтобы они не были повреждены при наступлении таких событий, как:

- взрыв,*
- удар,*
- последовательность человеческих ошибок,*
- на величину, непропорциональную исходной причине*

Примечание 1. События, принимаемые в расчете – это события, согласованные для отдельного проекта с застройщиком и соответствующим компетентным органом

Примечание 2. Дальнейшая информация приведена в EN 1991-1-7

СТБ EN 1990-2007 (Белоруссия)

2.1 (4)P Несущую конструкцию следует проектировать и строить таким образом, чтобы при наступлении таких событий как взрыв, удар или механический отказ не возникали несоизмеримые последствия

Примечание 1. Указанные выше события и опасности необходимо устанавливать для каждого проекта вместе с строительной организацией и соответствующим ведомством

Примечание 2. Дополнительная информация содержится в EN 1991-1-7

Для обеспечения данного требования, равно как и требований обеспечения несущей способности и эксплуатационной пригодности, нужно выполнение следующих мероприятий:

- исключение или уменьшение величины возможного чрезвычайного воздействия на здание или сооружение.
- выбор конструктивной схемы здания или сооружения, малочувствительной к чрезвычайным воздействиям;
- выбор конструктивной схемы здания или сооружения и конструирование соединений элементов для возможности обеспечения пространственной неизменяемости при локальном разрушении;
- проектирование конструктивной системы так, чтобы при потере несущей способности одного или нескольких элементов обеспечивался альтернативный путь передачи нагрузок за счет перераспределения усилий;
- при проектировании использовать конструктивные «ключевые» элементы, способные в дополнение к существующим нагрузкам воспринимать чрезвычайное воздействие;
- рационально решать систему конструктивных связей, узлов, элементов соединений и стыков;
- не использовать, по возможности, типов конструкции, которые могут разрушиться внезапно без предварительного возникновения видимых дефектов.

Для первой группы методов, базирующихся на выявлении и учете возможных чрезвычайных нагрузок, Еврокод рекомендует в зависимости от частоты (вероятности) воздействия и возможных последствий, с учетом возможного общественного резонанса и уровня риска жизни людей и/или повреждения имущества, принимать меры для исключения воздействия или снижения величины воздействия.

Примером исключения воздействия от ударов транспортными средствами может быть устройство защитных барьеров или планировочные и организационные мероприятия, исключающие неконтролируемый подъезд автомобилей.

Примером снижения уровня воздействия от взрыва газа является устройство проемов и легкобросаемых ограждающих конструкций.

При проектировании конструкций, выдерживающих чрезвычайную нагрузку, следует отметить известный факт, что чрезвычайные нагрузки от взрыва, удара и внезапного разрушения элементов имеют случайный динамический характер и подобны по воздействию локальной сейсмической нагрузке. Поэтому принципы расчета и конструирования, принятые в сейсмостойком строительстве во многом, если практически не во всем основном, подходят для ограничения величины непропорционального разрушения.

Для второй группы стратегий, основанных на ограничении величины разрушений при чрезвычайных воздействиях, проектом должны быть предусмотрены мероприятия при возможном местном повреждении конструкции от предполагаемого или не предполагаемого воздействия.

Для обеспечения ограничения величины возможного разрушения необходимо предусматривать один из предлагаемых методов, или при необходимости несколько методов одновременно.

Элементы конструкции, от которых зависит прочность и устойчивость конструкции в целом, должны быть рассчитаны на дополнительную условную чрезвычайную нагрузку. Рекомендуемая величина этой нагрузки может быть принята как распределенная по поверхности элемента нагрузка 34 кН/м^2 .

При проектировании для ограничения величины разрушения (localised failure) я при выходе из строя любого отдельного несущего элемента, допускаемая величина разрушения рекомендуется в размере 100 м^2 на трех смежных этажах в зоне повреждения, но не более 15% площади этажа.

К конструктивным мероприятиям предписывающих методов относится обеспечение связности конструкций путем использования дополнительных «опоясывающих» вертикальных и горизонтальных связей, обеспечение пластичности соединений, и другие подобные мероприятия.

Ниже также приведена классификация методов (design approaches) в соответствии со стандартом американского общества гражданских инженеров ASCE 7-05:

ASCE 7-05 Методы проектирования (design approaches)

1. Косвенный метод расчета (indirect design approach)

2. Прямые методы расчета (direct design approaches)

2.1. Метод альтернативного пути нагружения (Alternate path direct design approach)

2.2. Метод особой локальной прочности (Specific local resistance direct design approach)

В соответствии с положениями ASCE 7 конструирование и расчет элементов должны выполняться с учётом возможности восприятия дополнительной нагрузки при повреждении какого-либо отдельного элемента.

Предлагаются три метода.

При косвенном методе следует выполнять предписываемые отдельными нормами, требования минимальной связности, неразрезности и пластичности соединений. Например, стандарт расчета железобетонных конструкций ACI 318 [35] требует обеспечения прочности связей прикрепления колонн к балкам и дискам перекрытий не менее 14 тонн в любом направлении, и соответствующей несущей способности колонн на растягивающую нагрузку во всех стыках и сечениях. При этом соединения должны быть достаточно пластичными, и анкеровка связующих элементов достаточно прочной, чтобы после достижения предела несущей способности стыка не возникало внезапного хрупкого разрушения стыка или соединения.

В прямом методе расчета по альтернативному пути нагрузки требуется обеспечение восприятия нагрузки от элементов, потерявших опору за счет запасов несущей способности элементов и способности работать при изменившейся расчетной схеме. Этот метод также часто называют «мостовым» методом (bridging), исходя из аналогии, что нагрузки от элементов, потерявших опору, должны по некоторому «мосту» перейти на соседние несущие элементы – колонны, стены или балки.

Этот метод нередко подвергается критике по следующим причинам:

- метод предполагает выход из строя только одного отдельно взятого элемента. При этом при таких воздействиях как взрыв, возможно одновременное повреждение нескольких смежных элементов.
- метод не учитывает динамического эффекта нагружения, возникающего при внезапном отказе поврежденного несущего элемента.

В другом прямом методе – методе расчета особой локальной прочности, предполагается расчет ответственных элементов на некоторое экстремальное воздействие дополнительно к приложенным к элементу обычным нагрузкам. Например, это может быть давление от взрывной волны. При этом ASCE 7 не содержит конкретных рекомендаций по выбору расчетных экстремальных воздействий и их величин.

При сравнении прямых методов в литературе [38] отмечается, что метод локальной прочности является более универсальным, поскольку не имеет методического ограничения на учёт воздействия только на один элемент, и при этом приводит к более экономичным и технологичным проектным решениям.

Кроме вышеописанных методов защиты против прогрессирующего непропорционального обрушения, связанных с повышением надежности как отдельных элементов и их соединений, так и надежности конструкций в целом путем усиления связности и неразрезности, существуют и противоположные подходы, которые можно назвать «сегментацией» [38], или методом контролируемого обрушения. Сущность подхода основывается на принципе ограничения разрушения конструкции в целом путем деления её на отдельные не связанные или слабо связанные между собой самостоятельные подконструкции, обладающих самостоятельной конструктивной системой для обеспечения прочности и устойчивости. При чрезвычайном воздействии на какой либо элемент подконструкции максимальная область возможного разрушения ограничивается размером подконструкции, воздействие дальше не передается на соседние подконструкции.

В качестве иллюстрации можно привести рассмотренный выше пример № 4 с 10-пролетным мостом. Для ограничения величины возможного разрушения, предусматривают деформационные швы между сегментами из нескольких смежных пролётов, сконструировав каждый сегмент как отдельный конструктивный блок.

Однако поскольку метод сегментации не относится непосредственно к методам расчета на устойчивость против непропорционального разрушения, в дальнейшем он рассматриваться и анализироваться не будет.

Вышеперечисленные методы могут использоваться как по отдельности, так и в сочетании друг с другом. Поэтому кроме этих частных методов можно выделить некоторый комплексный метод анализа, учитывающий вероятность и величину возможных чрезвычайных воздействий, и вероятную тяжесть их последствий. Для минимизации величины ущерба при оптимальном снижении затрат на защитные мероприятия используются методы оценки риска для технических систем.

МДС 20-2:2008 (Москва)

Существующие методы по предотвращению лавинообразного обрушения можно объединить в две основные группы - прямой метод и косвенный метод.

1. Прямой метод.

Прямой метод предусматривает прямое (явное) рассмотрение сопротивления лавинообразному обрушению при проектировании и включает два варианта.

Вариант 1.

Необходимо выполнить требование, чтобы конструктивная система не теряла несущую способность в случае удаления части элементов при аварийных воздействиях. Конструктивную систему проектируют так, чтобы перекрыть потерю одного или нескольких несущих элементов, обеспечивая альтернативные пути передачи нагрузок за счет перераспределения усилий, ограничивая и локализуя область повреждения. Принимают допустимую минимальную площадь или объем повреждения сооружения. Работа всей конструкции может быть проанализирована путем удаления в расчетной схеме одного или нескольких элементов, с одновременной проверкой возможности лавинообразного обрушения. Однако практически весьма сложно обосновать отвлеченное удаление того или иного элемента, выбрать наиболее значимый элемент среди большого числа возможных локальных повреждений и определить допустимые количественные критерии повреждений.

Вариант 2.

Необходимо выполнить требование, чтобы сооружение (или его часть) было бы запроектировано так, чтобы противостоять заданным аварийным воздействиям или угрозам. В этом случае прочность, целостность и жесткость конструктивных «ключевых» элементов, способных в дополнение к существующим нагрузкам воспринимать аварийные воздействия, обеспечивается их усилением. Конструктивные мероприятия по усилению могут иметь различные формы в зависимости от материала несущих элементов, назначения сооружения и т.д. Этот вариант предполагает обязательное нормирование интенсивности аварийного воздействия.

2. Косвенный метод.

Косвенный метод предусматривает не прямое рассмотрение сопротивления лавинообразному обрушению при проектировании и включает также два варианта.

Вариант 1

Устранение или уменьшение влияния аварийных воздействий и потенциальной опасности в целом за счет применения превентивных или организационных мероприятий.

Вариант 2.

Избыточное повышение степени статической неопределимости системы. Вариант достигается, например, включением в рамную конструкцию дополнительных связей, пространственной работой конструкции за счет включения в работу второстепенных элементов и т.п.

Для удобства дальнейшего изложения при анализе и сравнении различных методов расчета, предлагается нижеследующая классификация, обобщающая подходы в вышеописанных нормах. Также для удобства введены мнемонические обозначения методов.

Расчетные методы ограничения непропорционального разрушения

1. Выявление и учёт чрезвычайных воздействий

- 1.1. **ИВ** – Исключение Воздействия
- 1.2. **РВ** – Расчёт на Воздействие

2. Конструктивные методы

2.1. Прямые методы

- 2.1.1. **ЛН** – Локальная Надежность
- 2.1.2. **АП** – Альтернативный Путь нагрузки

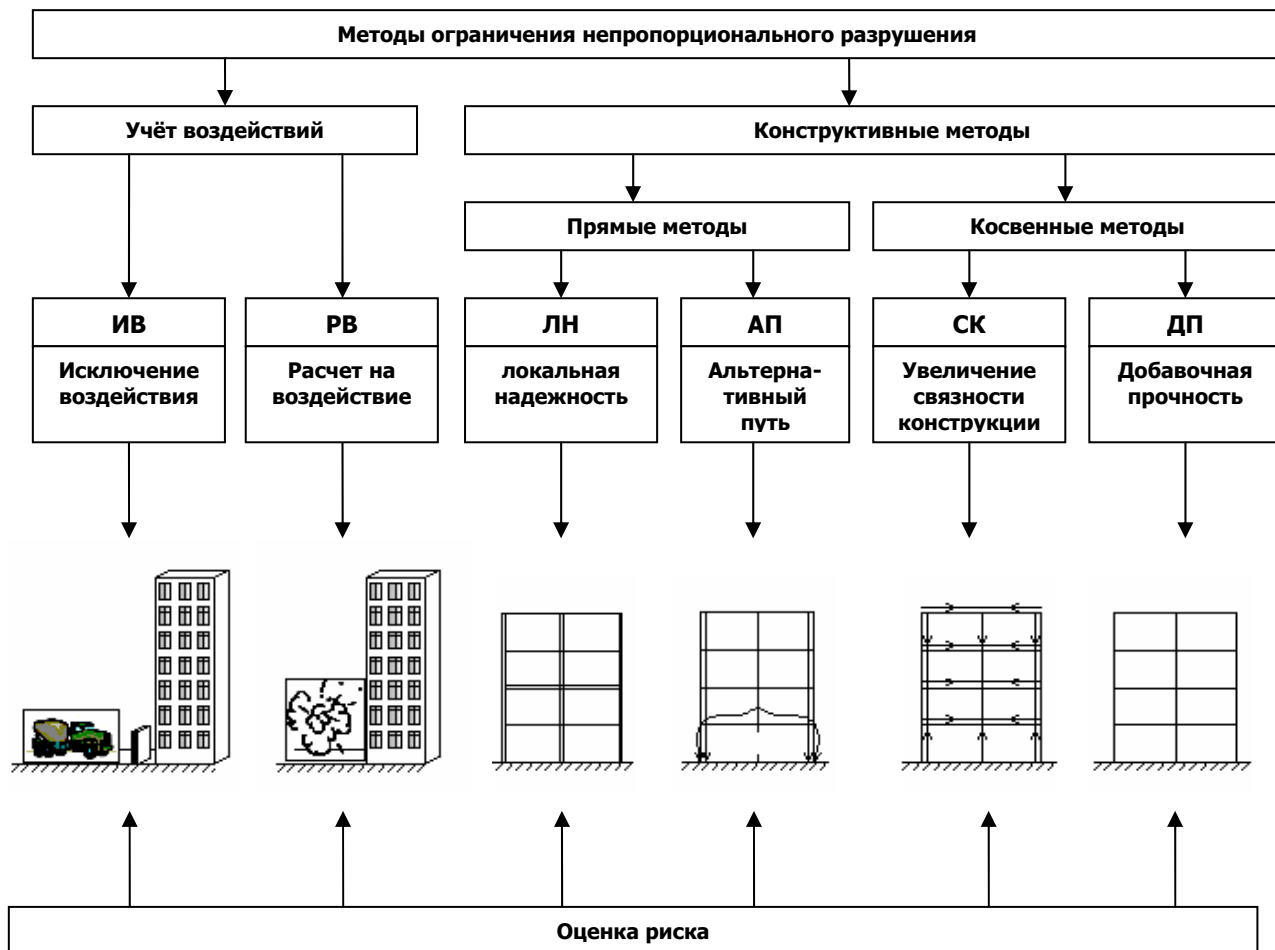
2.2. Косвенные методы

- 2.2.1. **СК** – усиление Связности Конструкций
- 2.2.2. **ДП** – Добавочная Прочность элементов

3. Комплексный метод

- 3.1. **ОР** – Оценка Риска

Схематичное изображение иерархии методов представлено на схеме:



ОБЗОР НОРМ И СТАНДАРТОВ

В этой главе приводится информация о некоторых отечественных и зарубежных нормах, стандартах и руководствах, содержащих положения по защите от непропорционального обрушения и/или методы расчета на прогрессирующее обрушение. Перечень рассмотренных норм не является полным, в перечень вошла часть существующих норм и стандартов на русском и английском языках из числа доступных авторам книги. Однако сравнительный анализ этих источников дает представление о тенденциях в нормировании методов расчета в области надежности конструкций.

Ниже приведен перечень рассмотренных документов и для удобства дальнейшего изложения дано их условное обозначение. Документы расположены в хронологическом порядке по дате выпуска первой редакции (в том числе предварительной), содержащей положения по защите от непропорционального разрушения.

СНиП	СНиП 2.01.07-85* Нагрузки и воздействия [2]	Россия	1952
ADA	Building Regulations. Approved Document A. Structure.[23] <i>(Строительные нормы. Свод правил "А". Конструкции.)</i>	Великобритания	1992
EC1	EN 1991-1-7. Eurocode 1. Action on structures. Accidental actions [20]	Евросоюз	1998
РПЗ	Рекомендации по защите панельных зданий [8]	Россия	1999
РКЗ	Рекомендации по защите каркасных жилых зданий [9]	Россия	2002
GSA	Progressive collapse analysis and design guidelines for new federal office buildings and major modernisation projects. GSA. [24] <i>(Рекомендации по расчету прогрессирующего обрушения и проектированию новых федеральных офисных зданий и крупных реконструкций.)</i>	США	2003
МГСН	МГСН 4.19-05 Временные нормы проектирования многофункциональных высотных комплексов [12]	Москва, Россия	2005
UFC	UFC 4-023-03 Design of buildings to resist progressive collapse. [32] <i>(Проектирование зданий для предотвращения прогрессирующего обрушения)</i>	США	2005
ТСН	ТСН 31-332-2006 Жилые и общественные высотные здания [13]	Санкт-Петербург, Россия	2006
РМЗ	Рекомендации по защите монолитных жилых зданий от прогрессирующего обрушения [11]	Москва, Россия	2005
РВЗ	Рекомендации по защите высотных зданий от прогрессирующего обрушения [10]	Россия	2006
NYBC	New-York Building Code [30] <i>(Строительные нормы города Нью-Йорк)</i>	Нью-Йорк, США	2007
МДС	МДС 20-2.2008 Временные рекомендации по обеспечению безопасности большепролетных сооружений от лавинообразного (прогрессирующего) обрушения при аварийных воздействиях [14]	Москва, Россия	2008

Для описания расчетных сочетаний усилий для различных расчетных ситуаций, с учётом разнотипности обозначений в разных нормативных документах, приняты следующие обозначения:

W	– ветровая нагрузка;
S	– снеговая нагрузка + собственный вес;
q_p	– расчетная нагрузка на элемент;
q_p^c	– расчетная нагрузка на связь;
$q_{соб.вес}^H$	– нормативный вес плиты перекрытия;
$q_{пол}^H$	– нормативный вес пола;
g_k	– постоянная нагрузка на плиту перекрытия + собственный вес;
g_n	– временная нагрузка на плиту перекрытия;
q	– особая кратковременная нагрузка;
Q	– нагрузка от удара грузового автомобиля;
N_d	– дополнительная нагрузка с удаленного элемента;
F	– усилие в элементе, определяемое из статического расчета;
F_u	– усилие в элементе, определяемое из упругого расчета;
S_p	– расчетная несущая способность;
Δ	– усилие сдвига между колоннами и диафрагмами;
$F_{св}$	– проектируемая связывающая сила;
$F_{тр}$	– требуемая связывающая сила;
N	– нормальная сила в колонне;
$Q_{уд}$	– действующая сила в элементе или соединении;
$Q_{се}$	– ожидаемая предельная нормативная способность элемента или соединения;
w_i	– усилия в разрушаемых элементах;
s_i	– перемещение от усилий в разрушаемых элементах;
g_i	– равнодействующая внешних сил;
u_i	– перемещение в результате действия внешних сил;
W_p	– работа внутренних сил;
U_p	– работа внешних сил;
$N_{св}$	– несущая способность связи;
T_i	– несущая способность горизонтальных связей и их соединений для внутренних элементов;
T_o	– несущая способность горизонтальных связей и их соединений для крайних элементов;
T	– несущая способность вертикальных связей;
R_n	– нормативная сила связи;
R_y	– расчетное сопротивление;
γ_c	– коэффициент условий работы;
γ_u	– коэффициент условий работы;
Φ	– фактор снижения силы;
DCR	– коэффициент основных и резервных элементов;
L	– пролет плиты перекрытия;
$L_{св}$	– длина связывающего элемента;
A	– площадь стены;
A_n	– площадь сечения связи;
S_a	– ширина грузовой площади связывающего элемента;
H	– высота стены;
t	– толщина стены.

СНиП 2.01.07-85 «Нагрузки воздействия» и другие СНиП и СП

Основы метода расчета по предельным состояниям и нормирование уровня надежности конструкций заложены в довоенных и послевоенных работах отечественных ученых [2, 47, 48].

Расчет бетонных и железобетонных конструкций следует производить по предельным состояниям включающим:

- предельные состояния первой группы (по полной непригодности к эксплуатации вследствие потери несущей способности);
- предельные состояния второй группы (по непригодности к эксплуатации вследствие образования или чрезмерного раскрытия трещин, появления недопустимых деформаций и др.).

Расчет по предельным состояниям первой группы включает в себя расчеты по прочности с учетом, в необходимых случаях, деформированного состояния конструкции перед разрушением.

Расчеты по предельным состояниям второй группы включают в себя расчеты по раскрытию трещин и по деформациям. Расчет бетонных конструкций по предельным состояниям второй группы не производится.

Расчет по предельным состояниям конструкции в целом, а также отдельных её элементов следует, как правило, производить для всех стадий – изготовления, транспортирования, возведения и эксплуатации, при этом расчетные схемы должны отвечать принятым конструктивным решениям.

Определение усилий и деформаций от различных воздействий в конструкциях и в образуемых ими системах зданий и сооружений следует производить с учетом возможного образования трещин и неупругих деформаций в бетоне и арматуре (физическая нелинейность), а также с учетом в необходимых случаях деформированного состояния конструкции перед разрушением (геометрическая нелинейность).

Для статически неопределимых конструкций, методика расчета которых с учетом физической нелинейности не разработана, допускается определять усилия в предположении линейной упругости материала.

Нормативные значения нагрузок и воздействий, коэффициенты сочетаний, коэффициенты надежности по нагрузке, коэффициенты надежности по назначению, а также подразделение нагрузок на постоянные и временные (длительные и кратковременные) принимают согласно СНиП 2.01.07-85*.



Рис. 1 Расчетная схема СНиП

Рекомендации по защите монолитных жилых зданий от прогрессирующего обрушения

Основные расчетные требования

Основная цель настоящей методики – обеспечение безопасности монолитных жилых зданий при запроектных чрезвычайных ситуациях [11].

Чрезвычайные ситуации сводятся к локальным аварийным воздействиям на отдельные конструкции здания: взрывы, пожары, ДТП, дефекты конструкций и материалов, некомпетентная реконструкция и т.п. случаи.

Основные положения:

1. В случае аварийных воздействий допускаются локальные разрушения отдельных вертикальных несущих элементов в пределах одного этажа, но эти первоначальные разрушения не должны приводить к обрушению или разрушению конструкции, на которые передается нагрузка, ранее воспринимавшаяся поврежденным элементом.

2. Расчет здания в случае локального разрушения несущих конструкций производится только по предельным состояниям первой группы. Развитие неупругих деформаций, перемещения конструкций и раскрытие в них трещин в рассматриваемой чрезвычайной ситуации не ограничиваются.

3. Устойчивость монолитного жилого здания против прогрессирующего обрушения следует обеспечивать экономичными средствами:

- рациональным конструктивно-планировочным решением здания;
- конструктивными мерами, обеспечивающими неразрезность конструкции;
- применения материалов и конструктивных решений, обеспечивающих развитие в элементах конструкций и их соединениях пластических деформаций.

4. Реконструкция монолитного жилого дома, не должны снижать его устойчивость против прогрессирующего обрушения.

5. В качестве локального разрушения следует рассматривать разрушение вертикальных конструкций одного (любого) этажа здания:

- двух пересекающихся стен на участках от места их пересечения (в частности, от угла здания) до ближайшего проема в каждой стене или до следующего вертикального стыка со стеной другого направления (но на суммарной длине не более 7 м);
- отдельно стоящей колонны (пилона);
- колонны (пилона) с участками примыкающих стен на их длине;

Для оценки устойчивости здания против прогрессирующего обрушения разрешается рассматривать наиболее опасные расчетные схемы разрушения.

6. Расчет по прочности и устойчивости производят на особое сочетание нагрузок и воздействий, включающее постоянные и длительные временные нагрузки, а также воздействие на конструкцию здания локальных гипотетических разрушений.

7. Постоянная и длительная временная нагрузка принимается согласно действующим нормативным документам (или по специальному заданию).

8. Расчетные прочностные и деформационные характеристики материалов принимаются равными их нормативным значениям, согласно действующим нормам проектирования железобетонных и стальных конструкций.

Расчет монолитных жилых зданий на устойчивость:

1. Для расчета монолитных жилых зданий рекомендуется использовать пространственную расчетную модель здания. В модели могут учитываться элементы, которые при нормальных эксплуатационных условиях являются ненесущими (наружные стеновые панели, железобетонные ограждения балконов и т.п.), а при локальном воздействии участвуют в перераспределении усилий.

2. Удаление элементов изменяет конструктивную схему и характер работы элементов, примыкающих к месту разрушения либо зависших над ним, что необходимо учитывать при назначении жесткостных характеристик элементов и их связей.

3. Расчетная модель здания рассчитывается отдельно с учетом каждого (одного) из локальных разрушений.

4. Расчет здания выполняют с использованием программных комплексов, допускающих возможность учета физической и геометрической нелинейности элементов.

Устойчивость здания против прогрессирующего обрушения обеспечивается, если

$$F \leq S_p, \text{ где}$$

F – усилие, определяемое в элементе из статического расчета;

S_p – расчетная несущая способность элемента.

5. В случае обеспечения пластичной работы конструктивной системы в предельном состоянии проверку устойчивости элементов, расположенных над локальными разрушениями, рекомендуется проводить кинематическим методом теории предельного равновесия.

– Задаются механизм прогрессирующего обрушения элементов здания, потерявших опору (то есть определяют все разрушаемые связи, в том числе и образовавшиеся пластические шарниры, и находят возможные обобщенные перемещения (w_i) по направлению усилий в этих связях);

– Для каждого механизма определяются предельные усилия, которые могут быть восприняты сечениями всех пластично разрушаемых элементов и связей (s_i); находятся равнодействующие (g_i) внешних сил, приложенных к отдельным не разрушаемым элементам, и перемещения по направлению их действия (u_i);

– Определяются работы внутренних сил (W_p) и внешних нагрузок (U_p) на возможных перемещениях рассматриваемого механизма

$$W_p = \sum s_i w_i; U_p = \sum g_i u_i$$

и проверяется условие равновесия

$$W_p \geq U_p.$$

Если пластичность какого-либо элемента или связи не обеспечена, их работа не учитывается.

6. При каждом локальном разрушении необходимо рассмотреть все указанные механизмы прогрессирующего обрушения:

– Первый механизм характеризуется одновременным поступательным смещением вниз всех вертикальных конструкций, расположенных над локальным разрушением;

– Второй механизм характеризуется одновременным поворотом каждой конструктивной части здания, расположенной над локальным разрушением, вокруг своего центра вращения;

– Третий механизм – это условие не обрушения только участка перекрытия, расположенного непосредственно над выбитой вертикальной конструкцией и первоначально на нее опертого;

– Четвертый механизм предусматривает перемещение конструкций одного этажа. В этом случае происходит отрыв вертикальных конструкций от перекрытия, расположенного над ними.

7. В некоторых случаях целесообразно рассматривать работу перекрытий над удаленной колонной (стеной) при больших прогибах как элемент висячей системы или с учетом мембранного эффекта.

8. В несущих колоннах (стенах), не расположенных над локальным разрушением, его воздействие приводит к увеличению напряжений и усилий. Необходимо сравнить усилия в колоннах (стенах) при их максимальном нагружении с усилиями, возникающими при локальном разрушении вертикального элемента, расположенного близко к рассматриваемому. Оценку усилий, в элементах, допускается выполнять приближенными методами, например, с использованием грузовых площадей. В случае если увеличение усилий в колонне (стене) превышает 30%, следует уточнить усилия (другими методами строительной механики) и выполнить проверку прочности колонны (стены), при необходимости усилить конструкцию. В противном случае допускается проверку прочности элемента не проводить.

Конструктивные требования:

Основное средство защиты монолитных жилых зданий от прогрессирующего обрушения:

- обеспечение прочности конструктивных элементов;
- повышение пластических свойств применяемой арматуры и стальных связей;
- включение в работу пространственной системы ненесущих элементов.

1. В зданиях следует отдавать предпочтение монолитным и сборно-монолитным перекрытиям, которые должны быть надежно соединены с вертикальными несущими конструкциями здания стальными связями.

2. Соединения сборных элементов с монолитными конструкциями, препятствующие прогрессирующему обрушению зданий, должны проектироваться неравнопрочными, при этом элемент, предельное состояние которого обеспечивает наибольшие пластические деформации соединения, должен быть наименее прочным.

Для выполнения этого условия рекомендуется рассчитать все элементы соединения, кроме наиболее пластичного, на усилие в 1,5 раза превышающее несущую способность пластичного элемента, например, анкеровку закладных деталей и сварные соединения рекомендуется рассчитывать на усилие в 1,5 раза больше, чем несущая способность самой связи. Замена пластичных элементов более прочными недопустима.

3. Для повышения сопротивления прогрессирующему обрушению здания рекомендуется:

– надпроемные перемычки, работающие как связи сдвига, проектировать так, чтобы они разрушались от изгиба, а не от действия поперечной силы;

– шпоночные соединения в сборно-монолитных конструкциях проектировать так, чтобы прочность отдельных шпонок на срез была в 1,5 раза больше их прочности при смятии;

– обеспечивать достаточность длины анкеровки арматуры при ее работе как связи сдвига.

4. Минимальная площадь сечения (суммарная для нижней и верхней арматуры) горизонтальной арматуры, как продольной, так и поперечной в железобетонных перекрытиях и покрытии должна составлять не менее 0,25% от площади сечения бетона. При этом арматура должна быть непрерывной и стыковаться в соответствии с требованиями действующих нормативных документов на проектирование железобетонных конструкций.

5. Горизонтальные связи бетонных и железобетонных навесных наружных панелей с несущими элементами здания должны воспринимать растягивающие усилия не менее 10кН (1тс) на 1 м. длины панели при высоте этажа 3,0 м. и 12кН (1,2тс) на 1 м. длины панели при высоте этажа 3,5 м.

6. Вертикальная междуэтажная арматура пилона (колонны, стены) должны воспринимать растягивающие усилия не менее 10кН (1тс) на каждый квадратный метр грузовой площади этого пилон.

Рекомендации по защите высотных зданий от прогрессирующего обрушения

Основные расчетные требования

Основная цель настоящей методики – обеспечение безопасности высотных зданий при запроектных чрезвычайных ситуациях [10].

Данная методика полностью включает в себя «Рекомендации по защите монолитных жилых зданий от прогрессирующего обрушения».

Кроме того, в методику включены следующие дополнительные положения:

- в качестве локального разрушения рассматривают удаление вертикальных конструкций одного (любого) этажа здания, ограниченных кругом площадью:
 - до 80 м² (диаметр 10 м) для зданий высотой до 200 м;
 - до 100 м² (диаметр 11,5) для зданий выше 200 м.
- каждое перекрытие высотного здания должно быть рассчитано на восприятие веса участка перекрытия вышележащего этажа (постоянная и длительная нагрузки с коэффициентом динамичности $k_f=1,5$):
 - на площади 80 м² для зданий до 200 м;
 - на площади 100 м² для зданий выше 200 м.
- горизонтальные связи бетонных или железобетонных навесных наружных панелей с несущими элементами здания должны воспринимать растягивающие усилия не менее:
 - 10 кН (1 тс) на 1 м длины панели при высоте этажа 3 м;
 - 12 кН (1,2 тс) на 1 м длины панели при высоте этажа 3,5 м;
 - 14 кН (1,4 тс) на 1 м длины панели при высоте этажа 4,0 м и выше, если требуется по расчету.
- В зданиях с применением металлических конструкций предусматривать сталежелезобетонные перекрытия, избегать гибких соединений ригелей с колоннами. Горизонтальные ветровые связи должны обеспечивать объединение диска перекрытия. Использовать стали с повышенной пластичностью и вязкостью.

Рекомендации по защите жилых каркасных зданий

Основные расчетные требования

Основная цель настоящих рекомендаций – обеспечение безопасности жилых зданий при запроектных чрезвычайных ситуациях [9].

К чрезвычайным воздействиям и ситуациям относятся следующие расчетные ситуации:

1. Природные чрезвычайные ситуации:
 - сейсмические воздействия;
 - опасные метеорологические явления (приводящие к повышенным ветровым нагрузкам на здание);
 - образование карстовых воронок и провалов в основании зданий.
2. Антропогенные (в том числе техногенные) чрезвычайные ситуации:
 - взрывы снаружи или внутри здания (бытовой газ, взрывоопасные газовые смеси и жидкости, бомбы и другие взрывные устройства);
 - пожары;
 - транспортные аварии (ДТП, авиационные катастрофы);
 - аварии зданий и сооружений вызванные одной из следующих причин:
 - ошибки в проектах, в том числе вызванные несовершенством СНиП;
 - недоброкачественное производство работ (на заводе или на монтаже);
 - дефекты материалов;
 - недостатки эксплуатации зданий, в том числе их инженерного оборудования;
 - небрежность, некомпетентность, случаи вандализма жильцов, технического персонала или посетителей здания (в частности перепланировка квартир с ослаблением несущих конструкций).

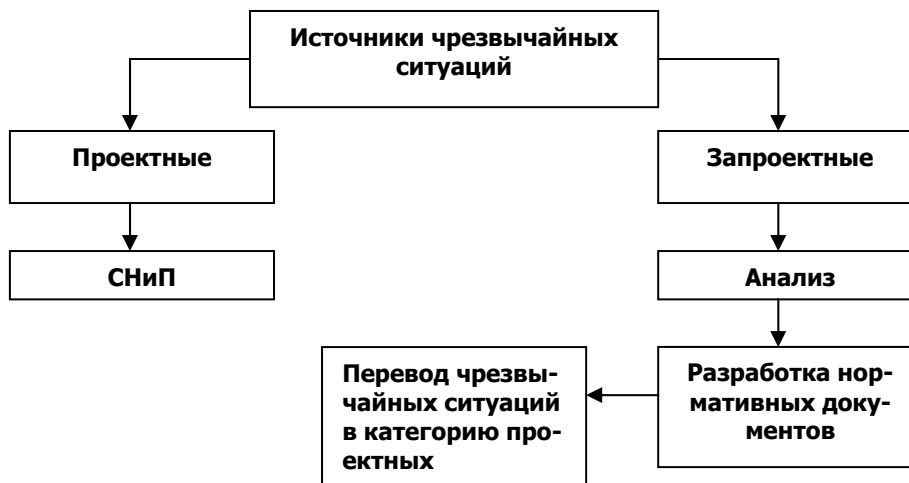


Рис. 2 Стратегия проектирования

Основные положения:

- *Каркасные здания* имеют несущие элементы, которые невозможно защитить от прогрессирующего обрушения конструктивными мероприятиями. Это *ключевые элементы* каркаса (колонны, ригели, диафрагмы и т.п.), и для повышения устойчивости здания против прогрессирующего обрушения при чрезвычайных ситуациях следует резервировать для этих элементов дополнительную прочность.

- Конструктивная система *каркасного здания* должна обеспечивать его прочность и устойчивость в случае локального воздействия на отдельные элементы, не предусмотренного условиями нормальной эксплуатации здания как минимум на время, необходимое для эвакуации людей.

Перемещения конструкций и раскрытие в них трещин в рассматриваемой чрезвычайной ситуации не ограничивается.

- Устойчивость здания против прогрессирующего обрушения следует обеспечивать:
 - конструктивными мерами, способствующими развитию в ригелях и их соединениях пластических деформаций при предельных нагрузках;
 - рациональным решением системы конструктивных связей, отдельных узлов и элементов соединений и стыков.

Расчет каркасных жилых зданий на устойчивость:

1. Устойчивость здания проверяется расчетом на особое сочетание нагрузок (постоянные и временные длительные, а также одно из гипотетических воздействий).
2. Коэффициенты сочетаний нагрузок и коэффициенты надежности по нагрузкам к постоянным и длительным нагрузкам следует принимать равным единице.
3. Модель здания рассчитывается на все локальные воздействия:
 - Карстовая воронка диаметром 6 м., расположенная в любом месте под фундаментом здания (для карстоопасных районов);
 - Повреждение перекрытия общей площадью 40 м²;
 - Неравномерные осадки основания;
 - Горизонтальная нагрузка на вертикальные элементы: 3,5 т. для стержневых и 1 т. для пластинчатых на 1 м² поверхности рассматриваемого элемента в пределах одного этажа (коэффициент надежности по нагрузке равен единице)
4. Расчетные характеристики сопротивления материалов повышают за счет использования коэффициентов надежности. Кроме того, расчетные сопротивления умножают на коэффициенты условий работы.
5. Для расчета зданий рекомендуется использовать пространственную расчетную модель. Такая модель может учитывать элементы, которые являются ненесущими, а при наличии локальных воздействий участвуют в перераспределении нагрузки (перегородки и т.п.).
6. Упругая модель здания должна быть рассчитана на локальное воздействие, и позволять учитывать изменившийся характер работы элементов.
Устойчивость здания против прогрессирующего обрушения обеспечивается, если

$$F_u \leq S, \text{ где}$$

F_u – усилие, определяемое в элементе из упругого расчета;

S – расчетная несущая способность элемента.

7. В случае пластичной работы конструктивной системы в предельном состоянии расчет рекомендуется проводить методом теории предельного равновесия.
8. При расчетах на воздействие чрезвычайных ситуаций полученные усилия без учета неравномерных осадок рекомендуется увеличивать на 15%.

$$N_p = 0,15N + N; \Delta_p = 0,15\Delta + \Delta, \text{ где}$$

N – нормальные силы в колоннах;

Δ – усилия сдвига между колоннами и диафрагмами.

9. Связи перекрытия рассчитываются на нагрузку:

$$q_p = (q_{\text{соб.вес}}^H + q_{\text{пол}}^H) L/2, \text{ где}$$

q_p , [Т/М] – расчетная нагрузка на связь;

$q_{\text{соб.вес}}^H$, [Т/М²] – нормативный вес плиты перекрытия;

$q_{\text{пол}}^H$, [Т/М²] – нормативный вес пола;

L , [М] – пролет плиты перекрытия.

10. В случае применения сборных плит перекрытия, необходимо устраивать монолитные участки или проводить альтернативные мероприятия (например, устройство специальных распорок).

Конструктивные требования:

Основное средство защиты от прогрессирующего обрушения:

- резервирование прочности несущих элементов;
- обеспечение необходимой несущей способности конструкций;
- создание неразрезности перекрытий;
- повышение пластических свойств связей;
- вовлечение в работу пространственной системы ненесущих элементов.

Система связей:

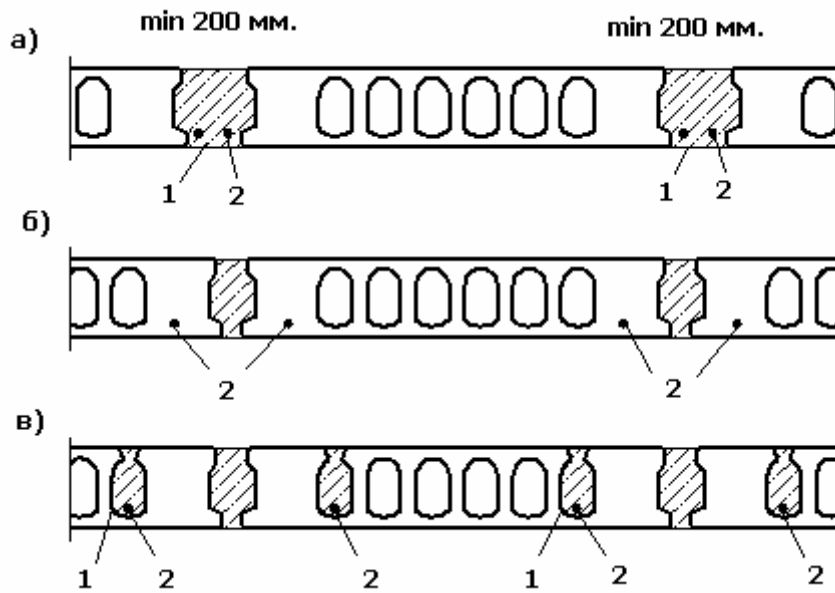
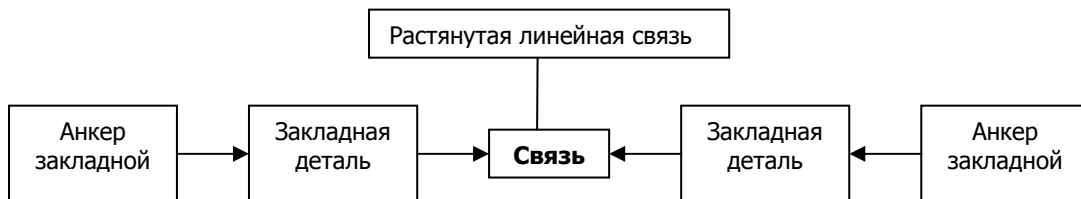


Рис. 3 Варианты укладки дополнительной арматуры с увеличенным защитным слоем

- а) в монолитных участках,
 - б) в плитах перекрытия,
 - в) в замоноличенных пустотах плит перекрытия
- 1 – бетон, 2 – арматура

Эффективная работа связей, возможна при обеспечении их пластичности в предельном состоянии, необходимо чтобы после исчерпания несущей способности связь не выключалась из работы и допускала без разрушения сравнительно большие абсолютные деформации (порядка нескольких миллиметров).

Соединения сборных элементов должны включать специальные пластичные элементы, выполненные из пластичной листовой или арматурной стали.



Предельное состояние всего стыка определяется слабейшим звеном. Реальная пластичность всего соединения зависит от того, какой элемент окажется слабейшим.

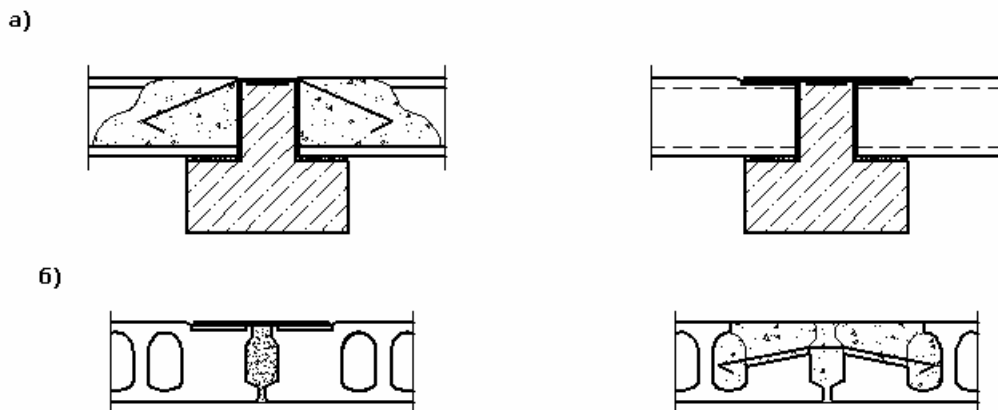


Рис. 4 Варианты соединения плит перекрытия

- а) с ригелями; б) между собой

Соединения сборных элементов, препятствующие прогрессирующему обрушению каркасных зданий, должны проектироваться неравнопрочными, при этом элемент, предельное состояние которого обеспечивает наибольшие пластические деформации соединения, должен быть наименее прочным.

Например, анкеровку закладных деталей и сварные соединения рекомендуется рассчитывать на усилие в 1,5 раза большее, чем несущая способность самой связи.

Несущая способность связи определяется по СНиП II-23-81

$$N_{св} = A_n R_y \gamma_{св} (\gamma_c = 1)$$

Замена пластичных элементов более прочными недопустима.

В каркасных зданиях следует отдавать предпочтение монолитным перекрытиям.

Рекомендации по предотвращению прогрессирующих обрушений крупнопанельных зданий

Основные расчетные требования

1. Для защиты крупнопанельных зданий от прогрессирующего обрушения связи между сборными элементами, устанавливаемые по расчету или по конструктивным соображениям, следует проектировать с учетом возможности аварийных локальных разрушений [8]. Наиболее предпочтительной является следующая система связей:

- горизонтальные продольные и поперечные связи между плитами перекрытий, обеспечивающие необходимую прочность дисков перекрытий при растяжении и сдвиге (1 на рис.5);

- вертикальные (междуэтажные) связи между несущими стеновыми панелями одного стенового пилона, обеспечивающие необходимую прочность горизонтальных стыков стен и перекрытий при растяжении и сдвиге (2 на рис.5);

- горизонтальные связи между навесными наружными стенами и дисками перекрытий, обеспечивающие устойчивость и работу на ветровые и температурные воздействия навесных стеновых панелей (3 на рис.5).

В оптимальную систему связей не включены монтажные горизонтальные связи между стеновыми панелями одного этажа (4 на рис.5); эти связи не всегда осуществимы (возможность их постановки зависит от планировочных решений здания) и, как правило, малоэффективны в условиях, отличных от монтажных.

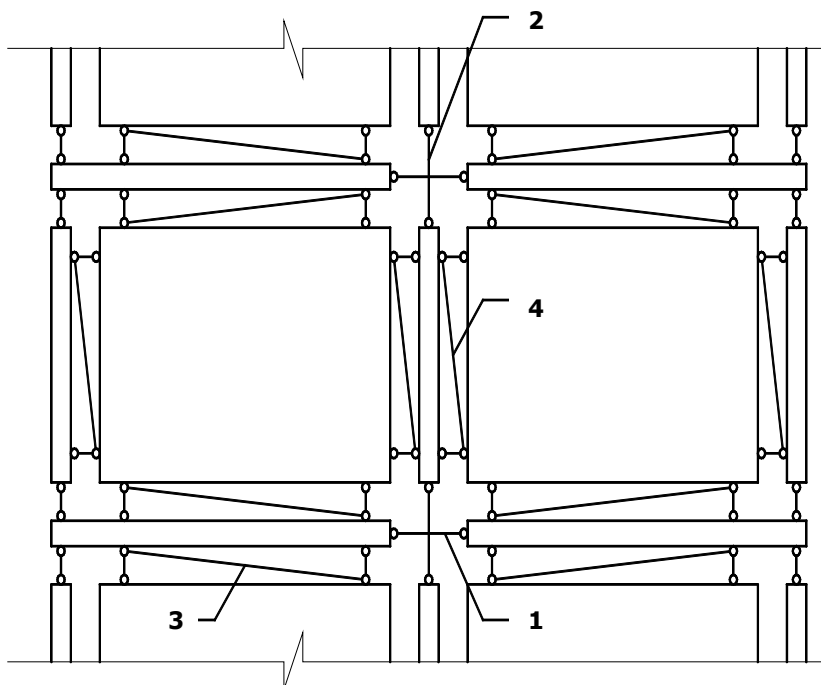


Рис. 5 Система связей в крупнопанельном здании

2. Эффективная работа связей, препятствующих прогрессирующему обрушению, возможна лишь при обеспечении их пластичности в предельном состоянии.

Для обеспечения пластичности соединений сборных элементов их конструктивные решения должны включать специальные пластичные элементы, выполненные из пластичной листовой или арматурной стали.

Соединения сборных элементов, препятствующие прогрессирующему обрушению панельных зданий, должны проектироваться неравнопрочными, при этом элемент, предельное состояние которого обеспечивает наибольшее пластические деформации соединения, должен быть наименее прочным.

Для выполнения этого условия рекомендуется считать все элементы соединения, кроме наиболее пластичного, на усилия в 1,5 раза превышающие несущую способность пластичного элемента, например, анкеровку закладных деталей и сварные соединения рекомендуется рассчитывать на усилия в 1,5 раза больше, чем несущая способность самой связи. При этом несущую способность связи следует определяться в соответствии со СНиП II-23-81* по формуле

$$N_{св} = A_n R_u (\gamma_c / \gamma_u),$$

при $\gamma_c = 1, \gamma_u = 1,2$

3. Необходимо обеспечить пластичную работу в предельном состоянии других конструктивных элементов. В частности необходимо:

- надпроемные перемычки, работающие как связи сдвига, проектировать так, чтобы они разрушались от изгиба, а не от действия поперечной силы;
 - шпоночные соединения проектировать так, чтобы прочность отдельных шпонок на срез была в 1,5 раза больше их прочности при смятии.
4. Сечение всех перечисленных типов связей (см.п.1) должно определяться расчетом, при этом должны воспринимать усилия не менее следующих величин:

Тип связи	Растягивающее усилие, кН
Горизонтальная связь, расположенная в перекрытиях вдоль длины протяженного в плане здания, на 1 м ширины здания	15
Горизонтальные связи, расположенные в перекрытиях перпендикулярно длине протяженного в плане здания, а также с компактным планом, на 1 м длины здания	10
Горизонтальные связи между бетонными и железобетонными навесными наружными панелями с дисками перекрытий, на 1 м длины стены	10
При других конструктивных решениях, на 1 м ширины стены	25

Расчет на устойчивость

1. Устойчивость здания против прогрессирующего обрушения проверяется расчетом на особое сочетание нагрузок и воздействий, включающее постоянные и временные длительные нагрузки, а также воздействие гипотетических локальных разрушений несущих конструкций.
2. Постоянная и временная длительная нагрузка должна определяться по СНиП 2.01-07-85*. При этом коэффициенты сочетаний нагрузок и коэффициенты надежности по нагрузкам к постоянным и длительным нагрузкам следует принимать равными единице.

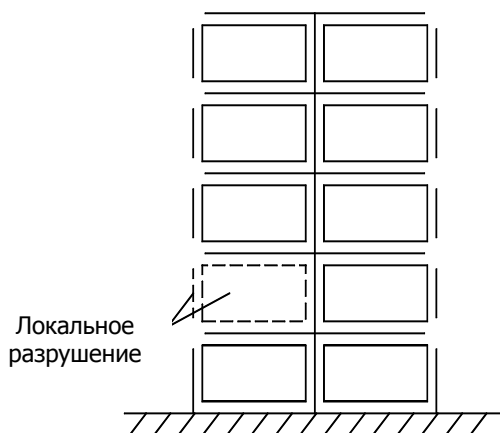
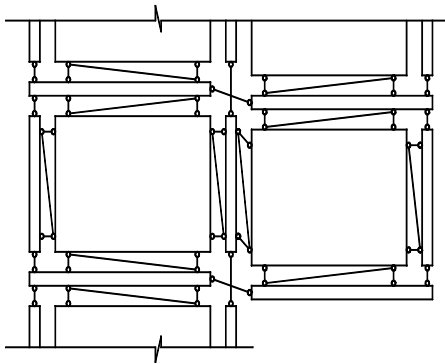
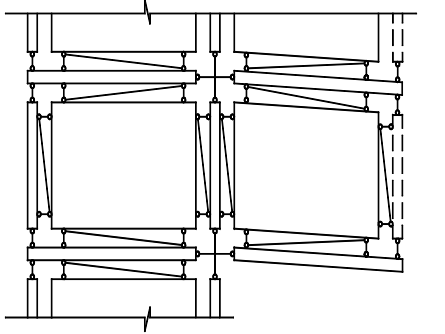
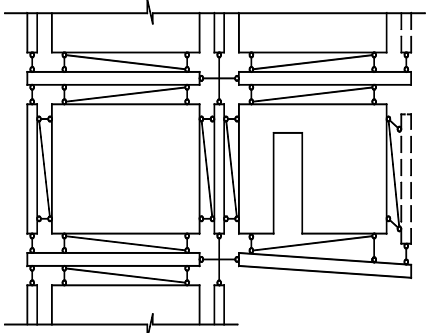
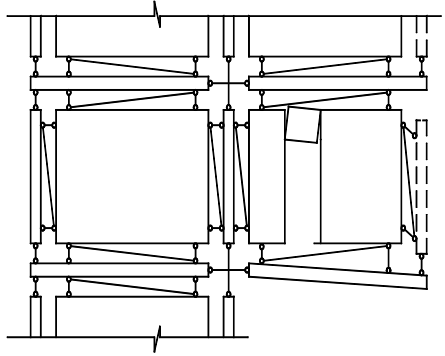


Рис. 6 Расчетная схема локального обрушения

3. Существует 4 механизма прогрессирующего обрушения

<p>I механизм прогрессирующего обрушения. Характеризуется одновременным поступательным смещением вниз всех стеновых панелей (или отдельных их частей), расположенных над локальным разрушением. Такое смещение возможно при разрушении связей сдвига между продольными и поперечными стенами или разрушении надпроемных перемычек и плит перекрытий.</p>	
<p>II механизм прогрессирующего обрушения. Характеризуется одновременным поворотом каждой стеновой панели, расположенной над локальным разрушением, вокруг своего центра вращения. Такое смещение требует разрушения растянутых связей этих панелей с неповрежденной стеной, разрушения связей сдвига стеновых панелей с плитами перекрытия в горизонтальных стыках и пластического излома плит перекрытия, первоначально опертых по трем сторонам</p>	
<p>III механизм прогрессирующего обрушения. Характеризуется обрушением только плит перекрытий, расположенных непосредственно над выбитой панелью поперечной стены и первоначально опертых по трем сторонам.</p>	
<p>IV механизм прогрессирующего обрушения. Характеризуется перемещением конструкций в пределах одного этажа, расположенного непосредственно над выбитой панелью поперечной стены. Этот механизм предполагает сочетание поступательного перемещения поперечной стены (как в I механизме) с изломом плит, характерным для второго механизма. Такой механизм возможен лишь при ослаблении поперечной стены дверными или оконными проемами.</p>	

4. Нормативные сопротивления материалов принимаются в соответствии со СНиП 2.03.01-84* и СНиП II-23-81*. Расчетные характеристики сопротивления материалов повышают за счет использования коэффициентов условий работы и надежности, указанных в рекомендациях.

5. Рекомендуется использовать пространственную расчетную модель в виде системы пластинок (с проемами и без), соединенных между собой сосредоточенными связями, прочность которых эквивалентна прочности фактических связей между панелями (см. рис. 21).

Такая модель должна включать несущие элементы, которые при локальном разрушении активно участвуют в перераспределении нагрузки (наружные навесные панели, монтажные связи и т.п.)

6. В случае обеспечения пластичной работы конструктивной системы в предельном состоянии допускается проверять устойчивость лишь элементов, расположенных над локальным разрушением и расчет проводят по следующей процедуре:

а) определить все разрушаемые связи и найти возможные обобщенные перемещения (w_i) по направлению усилий в этих связях;

б) для каждого из выбранных механизмов прогрессирующего обрушения определяются прочности всех пластично разрушаемых связей (s_i) находятся равнодействующие внешних сил, приложенных к отдельным звеньям механизма, то есть к отдельным неразрушаемым элементам или их частям (g_i) и перемещения по направлению их действия (u_i).

в) определяются работы внутренних сил (W) и внешних нагрузок (U) на возможных перемещениях рассматриваемого механизма

$$W_p = \sum s_i w_i; U_p = \sum g_i u_i$$

и проверяется условие равновесия

$$W_p \geq U_p$$

Если пластичность какой-либо связи не обеспечена, связь считается отсутствующей и её работа не учитывается. Если таких связей и элементов, которые могут разрушаться хрупко, слишком много, и их формальное исключение слишком сильно уменьшает оценку сопротивления здания прогрессирующему обрушению, следует или обеспечить пластичность связей, или использовать другую – упругую расчетную модель здания.

7. Упругая расчетная модель здания, как и упругопластическая, должна включать расчетное локальное разрушение и позволяет учитывать изменившийся характер работы элементов потерявших опору.

Полученные при упругом расчете усилия в отдельных элементах должны сравниваться с их расчетными несущими способностями. Устойчивость здания будет обеспечена, если для любого элемента соблюдается условие

$$F_u \leq S,$$

где F_u - усилие в элементе, найденное из упругого расчета

S - расчетная несущая способность.

Допускается вместо расчета на устойчивость против прогрессирующего обрушения рассчитывать здание на сейсмическое воздействие равное 6 баллов в соответствии со СНиП II-7-81*, принимая необходимые коэффициенты по экстраполяции. По результатам этого расчета должны быть запроектированы узлы и связи в соответствии со СНиП 2.03.01-84* и СНиП II-23-81*.

МГСН 4.19-05 «Временные нормы по проектированию многофункциональных высотных комплексов»

Основные расчетные требования

1. Высотные здания должны быть защищены от прогрессирующего (цепного) обрушения в случае локального разрушения их несущих конструкций при аварийных воздействиях, не предусмотренных условиями нормальной эксплуатации зданий (взрывы, пожары, ударные воздействия транспортных средств и т.п.) [12].

Это требование означает, что в случае аварийных воздействий допускаются локальные разрушения отдельных вертикальных несущих элементов в пределах одного этажа, но эти первоначальные разрушения не должны приводить к обрушению или разрушению конструкций, на которые передается нагрузка, ранее принимавшаяся элементами, поврежденными аварийным воздействием.

Расчет здания в случае локального разрушения несущих конструкций производится только по предельным состояниям первой группы. Развитие неупругих деформаций, перемещения конструкций и раскрытие в них трещин в рассматриваемой чрезвычайной ситуации не ограничиваются.

2. Устойчивость здания против прогрессирующего обрушения следует обеспечивать наиболее экономичными средствами:

- применением материалов и конструктивными мерами, способствующими развитию в ригелях и их соединениях пластических деформаций при предельных нагрузках;
- рациональным решением системы конструктивных связей, отдельных узлов и элементов соединений и стыков;
- конструктивными мерами, обеспечивающими неразрезность конструкции.

3. Реконструкция здания (в частности, перепланировка квартир) не должна снижать устойчивость здания против прогрессирующего обрушения.

4. В качестве локального (гипотетического) разрушения следует рассматривать разрушение (удаление) вертикальных конструкций одного (любого) этажа здания.

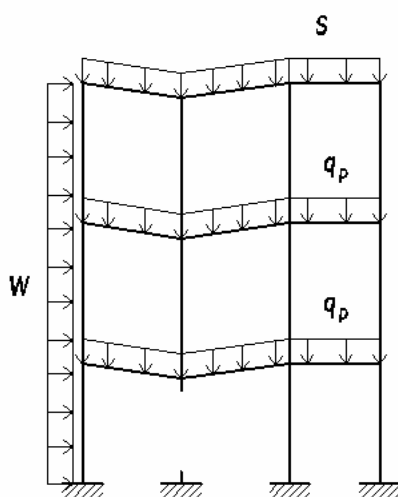


Рис. 7 Расчетная схема МГСН

Для оценки устойчивости здания против прогрессирующего обрушения допускается рассматривать лишь наиболее опасные схемы локального разрушения:

- Разрушение (удаление) двух пересекающихся стен одного (любого) этажа на участке от их пересечения (в частности, от угла здания) до ближайших проемов в каждой стене или до следующего пересечения с другой стеной длиной не более 10 м, что соответствует повреждению конструкции в круге площадью 80 м² (площадь локального разрушения);
- Разрушение (удаление) колонн (пилонов), либо колонн (пилонов) с примыкающими к ним участками стен, расположенных на одном (любом) этаже на площади локального разрушения;
- Обрушение участка перекрытия одного этажа на площади локального разрушения.

5. Расчет по прочности и устойчивости производят на особое сочетание нагрузок и воздействий, включающее постоянные и длительные временные нагрузки, а также воздействие на конструкцию здания локальных гипотетических разрушений. Локальное разрушение может быть расположено в любом месте здания.

6. Постоянная и длительная временная нагрузки принимаются согласно действующим нормативным документам (или специальному заданию) с коэффициентами сочетания нагрузок и коэффициентами надежности по нагрузкам, равными единице.

7. Расчетные прочностные и деформационные характеристики материалов принимаются равными их нормативным значениям, согласно действующим нормам проектирования железобетонных и стальных конструкций.

8. Для расчета жилых зданий рекомендуется использовать пространственную расчетную модель. В модели могут учитываться элементы, которые при нормальных эксплуатационных условиях являются ненесущими, а при наличии локальных воздействий активно участвуют в перераспределении нагрузки.

Расчетная модель здания должна предусматривать возможность удаления (разрушения) отдельных вертикальных конструктивных элементов в соответствии с п.4.

Удаление одного или нескольких элементов изменяет конструктивную схему и характер работы элементов, примыкающих к месту разрушения либо зависших над ним, что необходимо учитывать при назначении жесткостных характеристик элементов и их связей.

9. Расчет здания можно выполнять с использованием различных программных комплексов, в том числе основанных на методе конечного элемента. Использование программных комплексов, допускающих возможность учета физической и геометрической нелинейности жесткостных характеристик элементов, обеспечивает наибольшую достоверность результатов расчета и снижение дополнительных материалозатрат.

10. Основное средство защиты зданий от прогрессирующего обрушения – резервирование прочности несущих элементов, обеспечение несущей способности колонн, ригелей, диафрагм, дисков перекрытий и стыков конструкций; создание неразрезности и непрерывности армирования конструкций, повышение пластических свойств связей между конструкциями, включение в работу пространственной системы ненесущих элементов.

Эффективная работа связей, препятствующих прогрессирующему обрушению, возможна при обеспечении их пластичности в предельном состоянии, чтобы после исчерпания несущей способности связь не выключалась из работы, и допускала без разрушения необходимых деформаций. Для выполнения этого требования связи должны предусматривать из пластичной листовой или арматурной стали, а прочность анкеровки связей должна быть больше усилий, вызывающих их текучесть.

11. В высотных зданиях следует отдавать предпочтение монолитным и сборно-монолитным перекрытиям, которые должны быть надежно соединены с вертикальными несущими конструкциями здания связями.

Связи, соединяющие перекрытия с колоннами, ригелями, диафрагмами и стенами, должны удерживать перекрытие от падения (в случае его разрушения) на нижележащий этаж.

ТСН 31-332-2006 «Жилые и общественные высотные здания»

Основные расчетные требования

1. Высотные здания должны быть защищены от прогрессирующего (цепного) обрушения в случае локального разрушения несущих конструкций в результате возникновения чрезвычайных ситуаций - сейсмические воздействия, опасные метеорологические явления, взрывы снаружи и внутри здания, пожары, аварии или значительные повреждения несущих конструкций вследствие дефектов в материалах, некачественного производства работ и прочее [13].

2. Устойчивость здания против прогрессирующего обрушения должна проверяться расчетом и обеспечиваться конструктивными мерами, способствующими развитию в несущих конструкциях и их узлах пластических деформаций при предельных нагрузках.

Расчет устойчивости здания производят на особое сочетание нагрузок, включающее постоянные, длительные, кратковременные воздействия и одну из ситуаций:

- повреждение перекрытий общей площадью до 40,0 м²;
- неравномерные осадки основания;
- воздействие горизонтальной нагрузки на вертикальные несущие конструкции – 35кН (3,5тс) для колонн и 10 кПа на поверхности стен в пределах одного этажа;
- расположение карстовой воронки диаметром 6,0 м в любом месте под фундаментом здания.

3. Для расчета зданий против прогрессирующего обрушения рекомендуется использовать пространственную расчетную модель здания, которая может учитывать элементы, являющиеся при обычных эксплуатационных условиях ненесущими, а при наличии локальных разрушений активно участвуют в перераспределении нагрузки.

4. Средства защиты зданий от прогрессирующего обрушения:

- резервирование прочности несущих элементов, обеспечение необходимой несущей способности колонн, ригелей, диафрагм, дисков перекрытий и стыков конструкций;
- создание неразрезности перекрытий, повышение пластических свойств связей между несущими конструкциями, включение в работу пространственной системы ненесущих элементов.

5. В высотных зданиях рекомендуется применять монолитные и сборно-монолитные перекрытия, которые должны быть надежно соединены с вертикальными несущими конструкциями здания связями:

- связи, соединяющие перекрытия с колоннами, ригелями, диафрагмами и стенами, должны удерживать перекрытие от падения (в случае его разрушения) на нижележащий этаж;
- связи должны рассчитываться на нормативный вес половины пролета перекрытия с расположенным на нем полом и другими конструктивными элементами.

6. В случае локального разрушения одной вертикальной конструкции – стены или колонны, не должно произойти обрушения перекрытия. При этом прогиб и раскрытие трещин не ограничиваются. Количество и места расположения дополнительной арматуры определяется расчетом.

7. Сборные конструкции здания – наружные и внутренние стеновые панели, скорлупы, железобетонные перегородки должны быть соединены с перекрытиями связями, устанавливаемыми по расчету на эксплуатационные или монтажные нагрузки с учетом возможности аварийных локальных разрушений.

8. Перегородки рекомендуется проектировать из листов по каркасу либо едиными сборными элементами из легкого бетона. Конструкции крепления перегородок к вышележащему перекрытию, а также соединения их с соседними перегородками, колоннами и стенами, выполняемые в виде металлических связей, должны быть рассчитаны на восприятие собственного веса перегородок, и обеспечивать их зависание в случае обрушения нижележащего перекрытия.

Эффективная работа связей, возможна при обеспечении их пластичности в предельном состоянии. Связи должны предусматриваться из пластичной листовой или арматурной стали, а прочность анкеровки связей должна быть больше усилий, вызывающих их текучесть.

МДС 20-2.2008 «Рекомендации по обеспечению безопасности большепролетных сооружений от лавинообразного обрушения...»

Основная цель настоящих рекомендаций – обеспечение безопасности большепролетных сооружений от лавинообразного обрушения при аварийных воздействиях [14].

Основные требования к проектированию

• Существующий опыт проектирования показывает, что в большинстве случаев невозможно обеспечить жизнеспособность большепролетных систем после отказа основных (ключевых) несущих конструктивных элементов (например, опорного контура висячих или выпуклых оболочек, несущих пилонов или главных канатов вантовых систем и т.п.). Требование, чтобы подобные конструкции не теряли несущую способность в случае удаления ключевых элементов, при аварийных воздействиях, невыполнимо. При буквальном соблюдении п. 1.10 ГОСТ 27751-88, реальное проектирование таких объектов становится невозможным, ввиду нечеткости и неопределенности части требований этого раздела нормативного документа.

• Наиболее рациональным и экономичным методом обеспечения безопасности большепролетных сооружений от лавинообразного (прогрессирующего) обрушения конструкций являются превентивные меры:

- перед сооружением устанавливаются прочные ограждения (тумбы, наболы, подпорные стенки, траншеи, водоемы и т.п.);
- площадку подъезда располагают ниже пола первого этажа здания;
- выполняется комплекс антитеррористических организационных мероприятий по защите сооружения по периметру.

Конструктивные требования

1. Конструктивные решения должны обеспечивать несущую способность сооружения, предотвращать лавинообразное обрушение системы вследствие разрушения второстепенных элементов конструкции, узлов и деталей (связи, элементы, обеспечивающие устойчивость «ключевых» конструкций, и т.п.).

2. Устойчивость здания против лавинообразного обрушения следует обеспечивать применением конструктивных мер и материалов, способствующих развитию в конструктивных элементах и их соединениях пластических деформаций, а также рациональным решением системы связей и элементов соединений.

3. Специальное внимание следует уделять расчетам и конструированию узлов, выполняя их равнопрочными сопрягаемым элементам по опорным сечениям или, когда сечения подобраны по гибкости или по прочности пролетного сечения, применять дополнительный коэффициент условий работы ($\gamma_{c, доп} = 0,85$). Стыки элементов следует располагать вне зоны максимальных усилий.

4. Следует применять материалы с повышенными требованиями к их пластичности, хладостойкости и свариваемости. Качество и марки материалов стальных конструкций следует применять с учетом степени ответственности большепролетных сооружений для группы 1 по таб. 50* СНиП II-23-81* с дополнительными требованиями.

5. Требования для основных несущих элементов:

– Для стальных «ключевых» элементов рекомендуется использовать конструктивно-технологические решения, не вызывающие значительную концентрацию напряжений, уменьшающие растягивающие напряжения в направлении толщины проката. Конструктивные и технологические решения должны уменьшать влияние остаточных сварочных деформаций и напряжений.

– Стальные периметральные колонны (стойки) из труб и стальные наружные опорные контуры коробчатого сечения должны быть заполнены бетоном класса по прочности на сжатие не ниже B10.

– Железобетонные основные несущие элементы следует проектировать с увеличенным количеством хомутов, постановкой спиральной арматуры или использованием внешнего листового армирования.

– Для предварительно напряженного и сборного железобетона необходимо обращать внимание при проектировании и изготовлении элементов, узлов и деталей.

– Для железобетонных конструкций следует учитывать их постпредельное состояние; работу конструкций при сверхбольших деформациях и прогибах, а также со значительным раскрытием ширины трещин.

6. Нижние части (на высоту не менее 3 м от уровня земли) основных периметральных колонн (стоек) и оттяжек следует усиливать за счет увеличения их массивности (бетонированием), облицовки стальными листами толщиной не менее 20 мм или композитными материалами из углепластика.

7. Рекомендуется в качестве большепролетных покрытий использовать пространственные конструкции – сплошные и стержневые оболочки, купола, висячие вантовые, тонколистовые (мембранные) и тентовые покрытия, стержневые пространственные конструкции (структуры), перекрестные системы.

8. При применении традиционных конструкций – ферм, рам, арок и т.п. – следует повышать степень их статической неопределимости за счет включения в систему дополнительных связей, обеспечивающих пространственную работу большепролетного покрытия.

Проектирование «ключевых» элементов

Проектирование «ключевых» элементов предполагает обязательное нормирование интенсивности аварийных воздействий и объема допускаемых повреждений. При этом следует иметь в виду, что невозможны никакие практические действия по усилению конструкций сооружения, которые позволили бы в полной мере исключить последствия взрыва.

1. Прочность и устойчивость сооружения против лавинообразного обрушения проверяется расчетом конструкций на особое сочетание нагрузок и воздействий, постоянные и временные длительные нагрузки, а также одно из аварийных воздействий. В этих расчетах не учитывают коэффициент надежности по ответственности сооружения.

2. Минимальные величины расчетных аварийных нагрузок принимаются:

- для стержневых элементов в виде сосредоточенной силы не менее чем 35кН (3,5тс);
- для пластинчатых и оболочечных элементов не менее чем 10кН (1тс) на 1 м² поверхности рассматриваемого элемента.

3. Все основные несущие конструкции (периметральные стойки, радиальные стержневые элементы куполов и оболочек и так далее) должны воспринимать особые сочетания нагрузок и воздействий, при исключении из работы одного из примыкающих второстепенных элементов (кольцевых распорок, прогонов, связей и тому подобное), повреждении ограждающих конструкций, обеспечивающих устойчивость основных несущих конструкций на участке общей площадью до 40 м². В этом случае расчетная длина основных несущих конструкций удваивается.

4. Расчетная схема сооружения должна учитывать возможность изменения характера работы системы в целом и отдельных элементов:

- последовательное исключение конструктивных элементов;
- изменение знака усилий, перераспределение нагрузок;
- изменение прочностных и жесткостных характеристик материала и т.п.

5. Возможны три варианта расчетов:

– *Линейный статический*. Расчетные предпосылки основаны на малых деформациях системы и упругой работе материала.

– *Нелинейный статический*. Учитывается физическая и геометрическая нелинейность, с учетом истории нагружения от нулевого состояния до исчерпания несущей способности.

– *Нелинейный динамический*. Учитывается физическая и геометрическая нелинейность. Динамический анализ выполняют, мгновенно удаляя один из элементов из загруженной конструкции и анализируя работу системы до затухания колебаний.

Усилия от аварийных воздействий на узловые элементы и соединения рекомендуется увеличивать на 15%.

6. Расчетные прочностные и деформационные характеристики материалов принимают равными их нормативным значениям согласно действующим нормам. Эти характеристики для ненормируемых аварийных воздействий допускается повышать за счет дополнительных коэффициентов надежности и условий работы, учитывающих малую вероятность аварийных воздействий, использования работы металлических конструкций и арматуры за пределом текучести материала, а также интенсивный рост прочности бетона в начальный период после возведения сооружения. Эти коэффициенты принимают для стальных и железобетонных конструкций суммарно равными 1,15.

7. Так как расчеты с учетом пластичности приводят к большим деформациям и потенциальной возможности образования цепочки шарниров пластичности, расчетный анализ системы должен подтвердить ее неизменяемость.

8. Прочность и устойчивость сооружения в случае локального аварийного воздействия на отдельные элементы должны быть обеспечены как минимум на время, необходимое для эвакуации людей. Перемещения конструкций и раскрытие в них трещин в рассматриваемых чрезвычайных ситуациях не ограничиваются.

Еврокод EN 1991-1-7 «Нагрузки на конструкции. Основные нагрузки. Случайные воздействия»

Основные расчетные требования

1. Здания и сооружения должны быть запроектированы и построены таким образом, чтобы в случае чрезвычайного воздействия разрушение несущих и ограждающих конструкций было соразмерно величине воздействия, вызвавшего разрушение [20].

2. Локальные разрушения не должны приводить к прогрессирующему разрушению несущих и ограждающих конструкций здания или сооружения.

3. Разрушение здания или сооружения при чрезвычайном воздействии должно быть исключено или ограничено выполнением одним или несколькими ниже перечисленными мероприятиями:

- исключение или уменьшение величины возможного чрезвычайного воздействия на здание или сооружение;
- выбора конструктивной схемы здания или сооружения, малочувствительной к чрезвычайным воздействиям;
- выбора конструктивной схемы здания или сооружения и конструирование соединений элементов для возможности обеспечения пространственной неизменяемости при локальном разрушении;
- не использование, по возможности, типов конструкций, которые могут разрушиться внезапно без предварительного возникновения видимых дефектов;
- надлежащее соединение конструктивных элементов между собой.

4. К чрезвычайным воздействиям и ситуациям относятся следующие расчетные ситуации:

- взрыв, удар
- пожар
- последовательность человеческих и/или технологических ошибок
- другие маловероятные воздействия, могущие вызвать локальное разрушение

5. В рамных конструкциях зданий и сооружений должно быть обеспечено эффективное горизонтальное соединение вертикальных несущих элементов конструкции с перекрытиями и/или горизонтальными связями.

Горизонтальные связи и крепления несущих элементов конструкций здания к элементам, обеспечивающим пространственную неизменяемость конструкций, должны быть предусмотрены непрерывно по периметру и внутри каждого перекрытия и покрытия в двух ортогональных направлениях для каждого вертикального несущего элемента (колонн, стоек).

В качестве горизонтальных связей и креплений можно предусматривать стальные и железобетонные балки, арматуру железобетонных перекрытий, арматуру и профилированный лист композитных сталебетонных перекрытий, комбинацию вышеперечисленных конструкций.

Не менее 30% связей должны располагаться непосредственно рядом с раскрепляемым вертикальным элементом.

Несущая способность горизонтальных связей и их соединений должна быть не менее 75 кН (7.5 Т) и не менее следующих значений:

Для внутренних элементов $T_i = 0.8(g_k + 0.8q_k)S_a L_{св}$

Для крайних элементов $T_p = 0.8(g_k + 0.8q_k)S_a L_{св}$

где: g_k - постоянная нагрузка на перекрытие, в том числе собственный вес

q_k - временная нагрузка на перекрытие

S_a - ширина грузовой площади связывающего элемента

$L_{св}$ - длина связывающего элемента

6. Все колонны и несущие стены должны быть непрерывны (воспринимать растягивающие усилия) от фундамента или опоры до верха.

В рамных конструкциях колонны и несущие стены должны воспринимать особую растягивающую нагрузку, равную максимальной нагрузке от перекрытия любого одного этажа. Расчет на данную нагрузку должен производиться во всех сечениях несущих элементов без учета разгружающего действия постоянных и временных нагрузок на конструкцию.

В конструкциях с несущими стенами должны быть выполнены следующие условия:

- Для каменных конструкций толщина стен должна быть не менее 150 мм и прочность на сжатие материала стен не менее 5 МПа.
- Высота стены между перекрытиями в чистоте не должна быть более 20 толщин стены.
- Вертикальные связи стен должны воспринимать следующие растягивающие усилия:

$$T = \frac{34A}{8000} \left(\frac{H}{t}\right)^2 N, \text{ но не менее } 100 \text{ кН/м,}$$

где: A - площадь стены нетто, [мм²]

H - высота стены в чистоте, [мм]

t - толщина стены в чистоте, [мм]

- Шаг связей не более 5 м
 - Расстояние от связей до края стены не более 2,5 м
7. Конструкции должны быть запроектированы и построены таким образом, что при удалении одного любого локального несущего элемента здание в целом остается устойчивым и размер разрушения не превышает 15% площади этажа, но не более 100 м², на каждом из смежных междуэтажных перекрытий или покрытий. Если данное требование не выполняется, то этот локальный несущий элемент должен быть рассчитан как ключевой элемент.

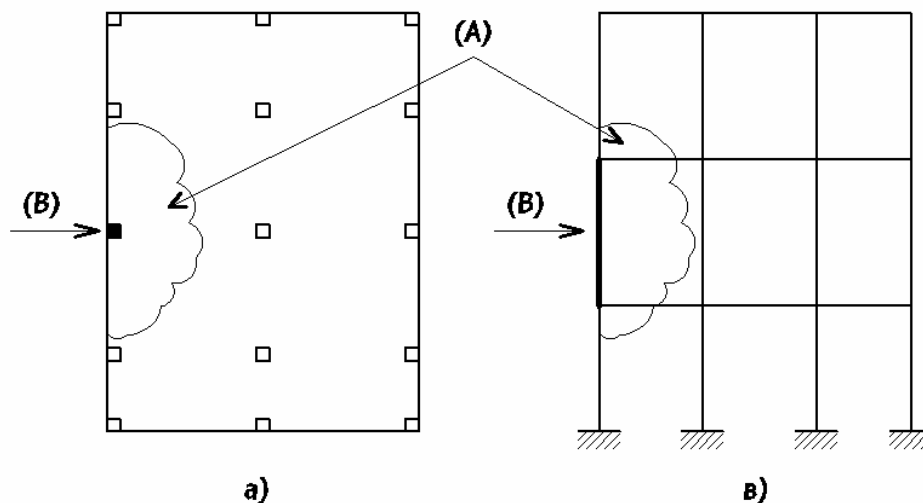


Рис. 8 Локальное разрушение

а) план; в) разрез

(A) – участок локального разрушения перекрытия должен быть площадью не более 15% площади этажа и не более 100 м²

(B) – условно удаляемый несущий элемент (колонна)

8. Ключевые элементы конструкции зданий и сооружений должны быть рассчитаны на особые сочетания нагрузок, включающую особую кратковременную нагрузку q , которая может быть приложена к элементу в любом направлении. Нагрузка q может быть распределенной или сосредоточенной.

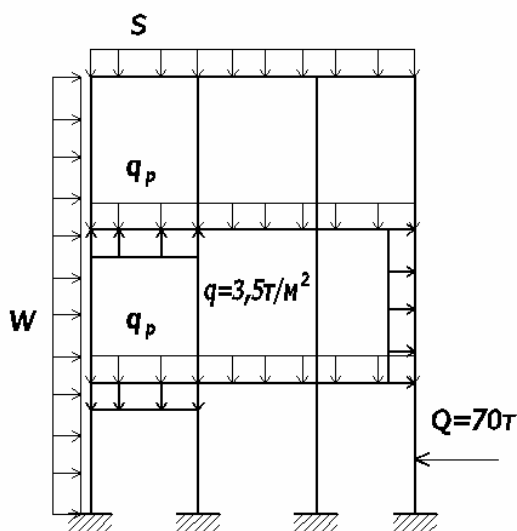


Рис. 9 Расчетная схема Еврокод

Особая нагрузка q составляет не менее 3,5 т/м² на поверхность ключевого элемента и прикрепленных к нему ограждающих элементов (стен, облицовок и т.п.), или соответствующую (эквивалентную) сосредоточенную нагрузку.

Нагрузка q одновременно прикладывается к ключевому элементу, а также к узлам соединений и элементам, обеспечивающих прочность и устойчивость ключевого элемента.

Угловые колонны первого этажа необходимо рассчитать на удар грузового автомобиля $Q=70$ т, так же все колонны необходимо рассчитывать на двойную расчетную длину, если перекрытия не рассчитаны как ключевой элемент.

Для сложных и ответственных сооружений EN 1991-1-7 предписывает выполнять системный анализ рисков (systematic risk assessment). Схема выполнения анализа приведена на диаграмме:

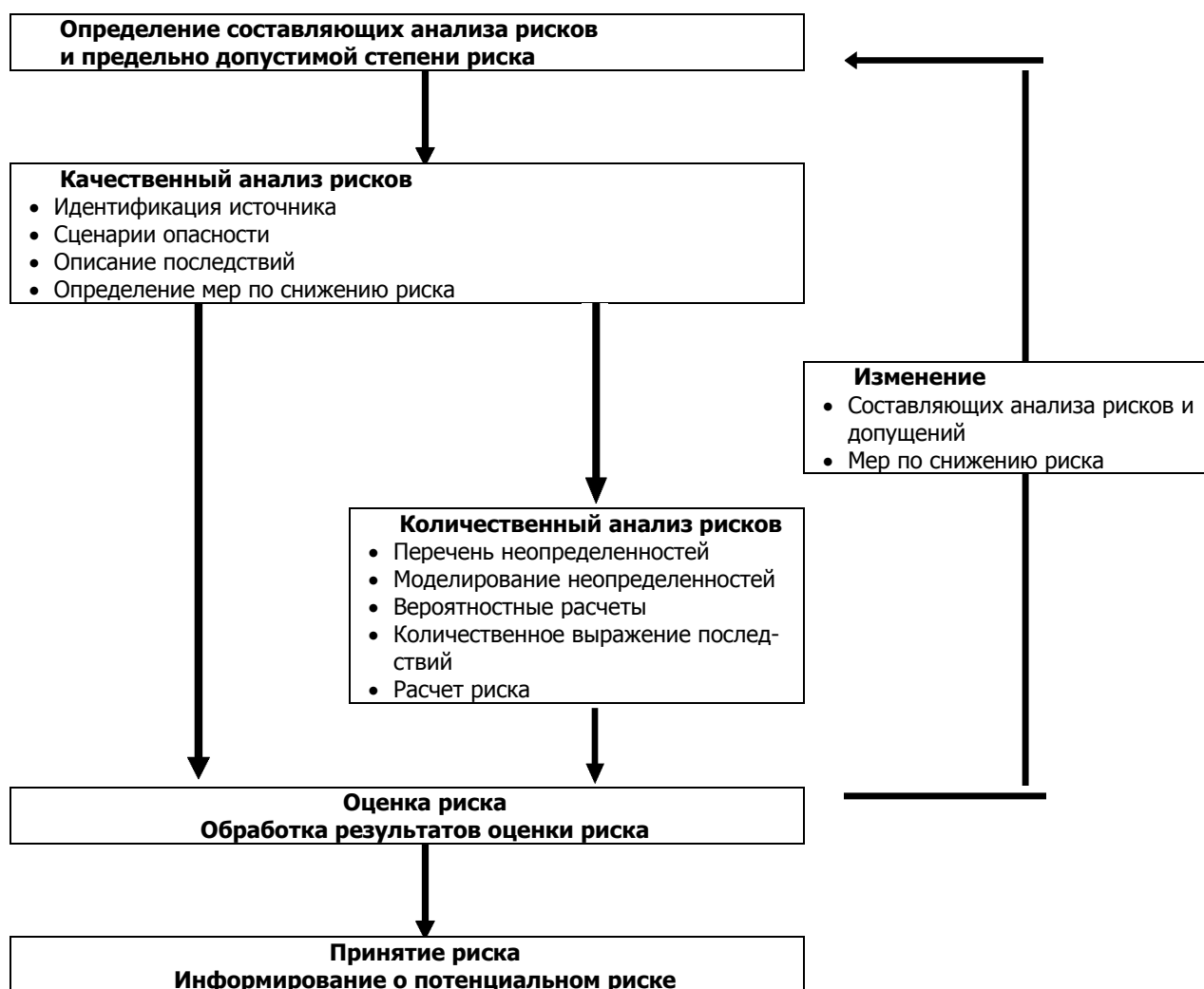


Рис. 10 Обзор анализа рисков

Определения:

Последствия – вероятные последствия события (в анализе рисков, как правило, нежелательного события). Последствия могут быть выражены формально или количественно на основе гибели людей, травм, экономического и экологического ущерба, а также дезорганизации пользователей здания и общества и т.д. Необходимо учитывать как непосредственные последствия, так и последствия, которые могут возникнуть с течением времени.

Сценарий опасности – критическая ситуация в определенный момент времени, при наличии основного опасного фактора и сопутствующих одного и более факторов, которые могут привести к нежелательному событию (например, полному разрушению конструкции).

Риск – сочетание (как правило, результат) вероятности или частоты возникновения определенного опасного фактора и масштаба последствий от данного фактора.

Критерии допустимого риска – предельно допустимая степень вероятности появления определенных последствий нежелательного события, выраженная периодической (ежегодной) частотой. Как правило, данные критерии определяют представители власти для отражения уровня риска, считающегося приемлемым для людей и общества.

Анализ рисков – системный подход к описанию и/или расчету риска. Анализ рисков включает идентификацию нежелательных событий, причины, вероятность возникновения, а также последствия данных событий

Оценка риска – сравнение результатов анализа рисков с критериями допустимого риска и другими решающими показателями.

Управление рисками – системные меры, предпринимаемые в организации, для достижения и поддержания уровня безопасности, соответствующего заданным целям.

Нежелательное событие – событие или условие, которое может привести к получению травм среди людей, или нанести экологический или материальный ущерб.

Описание составляющих анализа рисков.

- Необходимо в полном объеме описать объект, исходные данные и задачи анализа рисков.
- Необходимо в полном объеме описать все технические, экологические, организационные и социальные условия, значимые для рассматриваемой задачи.
- Необходимо в полном объеме указать все предположения, допущения и упрощения, сделанные при анализе рисков.

Методы анализа рисков

В анализ рисков входит описательная (качественная) часть и, если необходимо и осуществимо, также может входить числовая (количественная) часть.

Качественный анализ рисков

В *качественной части* анализа рисков должны быть определены все опасные факторы и соответствующие сценарии опасности. Определение опасных факторов и сценариев опасности является ключевой задачей анализа рисков. Для этого требуется подробное исследование и понимание системы. С этой целью были разработаны различные методы, помогающие инженеру выполнить эту часть анализа (например, предварительный анализ эксплуатационной безопасности (PHA), анализ эксплуатационных характеристик и опасных факторов (HAZOP), дерево отказов, дерево событий, дерево решений, причинные сети и прочее).

При анализе рисков разрушения конструкций угрозу конструкции могут представлять следующие условия:

- высокие показатели обычных нагрузок;
- низкие показатели устойчивости конструкции, возможно вызванные ошибками или непредвиденным износом;
- условия окружающей среды и грунта, отличающиеся от взятых за основу при проектировании;
- случайные воздействия, такие как пожар, взрыв, наводнение (включая, водную эрозию), удар или землетрясение.
- неустановленные случайные воздействия.
- При определении сценариев опасности должны быть учтены следующие факторы:
- ожидаемые или известные переменные нагрузки на конструкцию;
- окружающая среда конструкции;
- предложенный или известный режим инспектирования конструкции;
- концепция конструкции, подробный проект, строительные материалы и вероятные слабые места, ведущие к износу и повреждению;
- последствия типа и степени повреждения в соответствии с определённым сценарием опасности.

Необходимо определить основное применение конструкции с тем, чтобы удостовериться в последствиях, влияющих на безопасность, если конструкция не сможет устоять в случае основного опасного события с вероятными сопутствующими воздействиями.

Одним из способов защиты от рисков является применение матрицы рисков, приведенной на рисунке ниже. Матрица рисков может использоваться для определения степени риска по каждому сценарию с учетом степени тяжести разрушения и его возможных последствий.

Очень высокая				
Высокая				
Средняя				
Низкая				
Очень низкая				
↑ Последствия				
Тип применения	a	b	c	d

Рис. В.2а Матрица рисков для получения результатов качественного анализа рисков

Степень тяжести потенциального разрушения определяется для каждого сценария опасности и классифицируется как очень высокая, высокая, средняя, низкая или очень низкая. Степень тяжести определяется следующим образом:

Очень высокая – внезапное обрушение конструкции с высокой вероятностью смертельных случаев и травм.

Высокая – разрушение части или частей конструкции с высокой вероятностью частичного обрушения и некоторой вероятностью травм и дезорганизации пользователей здания и общества.

Средняя – разрушение части конструкции. Полное или частичное обрушение конструкции маловероятно. Небольшая вероятность травм и дезорганизации пользователей здания и общества.

Низкая – местное нарушение.

Очень низкая – незначительное местное нарушение.

Тип применения, например, конструкций для автомагистралей, может быть следующим: (а) мост на автомагистрали; (b) второстепенный автодорожный мост над автомагистралью или железной дорогой; (с) сигнальный мостик над автомагистралью или железной дорогой; и (d) второстепенный автодорожный мост над второстепенной дорогой или водой.

Количественный анализ рисков

В *количественной части* анализа рисков должны быть определены вероятности всех нежелательных событий и их последствий. Как правило, оценка вероятностей, по крайней мере, частично основана на здравом смысле и может в связи с этим значительно отличаться от частотности фактически происходящих разрушений. Если разрушение может быть выражено в цифрах, риск может быть представлен в качестве математического ожидания последствий нежелательного события. Один из способов представления рисков приведен на рис. В.2b.

Любая неопределенность в расчетах/значениях данных и применяемых моделях должна подробно обсуждаться. Анализ рисков прекращается на соответствующем уровне, принимая во внимание такие факторы, как:

- цель анализа рисков и решения, которые необходимо принять;
- ограничения, установленные на начальном этапе анализа;
- наличие соответствующих или точных данных;
- последствия нежелательных событий.

Когда будут получены результаты анализа, допущения, на основе которых проводился анализ, должны быть пересмотрены. Чувствительность величин, используемых в анализе, должна быть подсчитана.

Очень высокая	X				
Высокая	X				
Средняя		X			
Низкая			X		
Очень низкая				X	
↑ последствие вероятность →	0,00001	0,0001	0,001	0,01	> 0,1
X – указывает на примеры уровней максимально допустимого риска					

Рис. В.2b Вариант диаграммы, демонстрирующей результаты количественного анализа рисков

Принятие допустимого риска и меры по снижению риска

После того, как уровень риска был определен, нужно установить наличие необходимости в спецификации мер (конструктивных или неконструктивных) по снижению риска.

В принятии допустимого риска, как правило, применяется принцип минимального практически приемлемого риска (принцип ALARP). В соответствии с этим принципом выделяются два уровня риска: при значении риска, не превышающем нижнюю границу области приемлемого риска нет необходимости в принятии каких-либо мер; если риск превышает верхнюю границу области приемлемого риска, то риск считается неприемлемым. Если значение риска находится в области приемлемого риска, между верхней и нижней границами, то необходимо искать экономически оптимальное решение.

При оценке риска на определенный период времени в связи с нежелательным событием f , исходя из его последствий C , необходимо учитывать учетный процент r .

Необходимо определить уровни допустимого риска. Они, как правило, должны быть составлены на основе двух следующих критериев допустимости:

- Индивидуальный допустимый уровень риска: индивидуальные риски, как правило, выражены частотой несчастных случаев со смертельным исходом. Они могут быть выражены в качестве годовой вероятности смертности или вероятности на единицу времени единичных случаев смерти в процессе какой-либо деятельности.

- Социальный допустимый уровень риска: социальная приемлемость риска для жизни человека, которая может отличаться с течением времени, часто бывает представлена в виде F-N диаграмм (кривых Фармера), представляющих соотношение между максимальной годовой вероятностью возникновения несчастных случаев и численностью N погибших или пострадавших людей.

Также, могут использоваться понятия величина предотвращенных случаев смерти (VPF) или показатель качества жизни (QIL).

Уровни допустимого риска могут устанавливаться для отдельных проектов.

Критерии допустимости могут устанавливаться исходя из отдельных национальных законов и требований, норм и стандартов или опыта и/или теоретических знаний, которые могут использоваться в качестве основы для принятия решений в отношении допустимого риска. Критерии допустимости могут быть выражены в виде качественных или количественных показателей.

В качественном анализе рисков могут использоваться следующие критерии:

- а) Общая цель должна заключаться в том, чтобы минимизировать риск, избежав значительных потерь.
- б) Для последствий нежелательных событий, расположенных в вертикально заштрихованном участке на Рисунке В.2а, риски, связанные со сценарием являются приемлемыми.
- в) Для последствий нежелательных событий, расположенных в заштрихованном по диагонали участке на Рисунке В.2а, необходимо принимать решение является ли риск приемлемым, и могут ли быть приняты меры по снижению риска.
- д) Для последствий нежелательных событий, которые считаются допустимыми (расположенные в горизонтально заштрихованном участке на Рисунке В.2а) требуют принятия соответствующих мер по снижению риска.

Меры по снижению риска

Могут быть приняты следующие меры по снижению риска:

- а) Ликвидация или снижение опасных факторов путем проведения соответствующего проектирования, совершенствования принципов проектирования и обеспечения, ответных мер по снижению опасных факторов и т.д.
- б) Обход опасных факторов путем изменения принципов проектирования или замысла, например с помощью защиты конструкции, обеспечения спринклерной системы и т.д.
- в) Управление опасными факторами, например, при помощи контрольных проверок, систем оповещения или наблюдения.
- д) Преодоление опасных факторов, например, путем увеличения запасов прочности или устойчивости, обеспечения доступа к дополнительным путям загрузки при помощи структурного резервирования или сопротивления разрушению.
- е) Допущение управляемого обрушения конструкции, при условии, что вероятность получения травм или случаев смерти может быть снижена, например, при воздействии на осветительные или светофорные столбы.

UFC 4-023-03 «Проектирование зданий для предотвращения прогрессирующего обрушения»

Основные расчетные требования

Для защиты от прогрессирующего обрушения по UFC используется два подхода:

- «Связывающие силы»;
- «Альтернативный путь».

1. Метод «связывающей силы»

В методе «Связывающих сил» здание механически связывается, усиливая непрерывность и пластичность конструкции [32].

«Связывающие силы» обеспечиваются существующими конструктивными элементами, запроектированными с использованием стандартных процедур для несения рабочих нагрузок. Проектирование связывающих сил не зависит от проектирования несущих конструкций.

В зависимости от вида конструктивной схемы здания существует несколько видов горизонтальных связей:

- внутренние;
- периферийные;
- связи для соединения колонн.

Вертикальные связи устанавливаются в колоннах и несущих стенах, а горизонтальные в балках и плитах перекрытия.

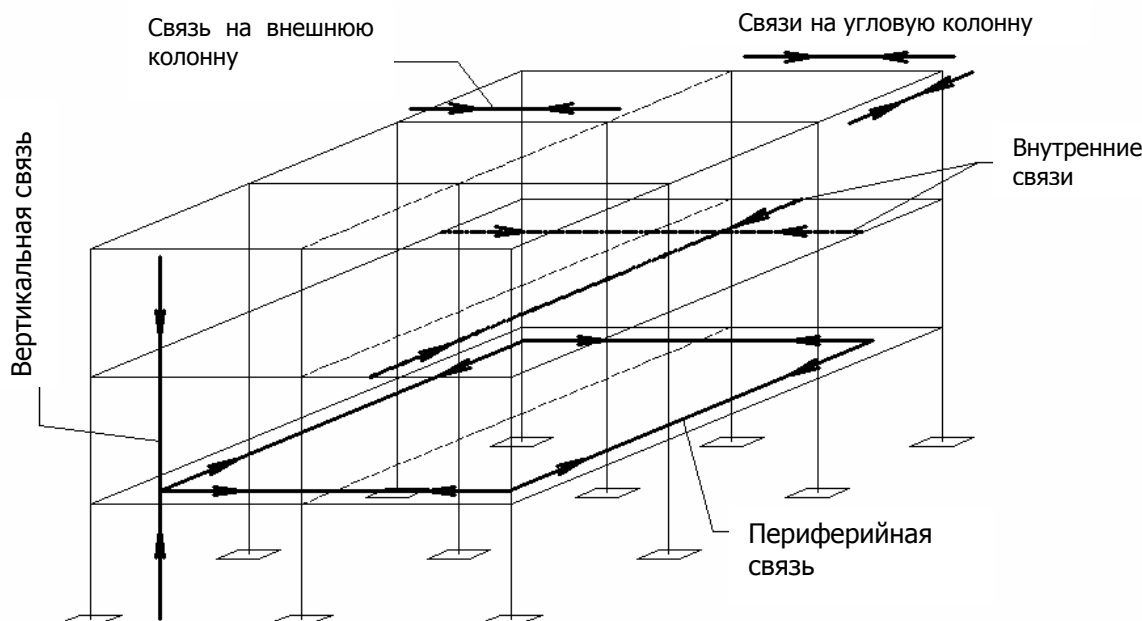


Рис. 11 Расчетная схема UFC. Увеличение связности конструкции

Связи (связывающие силы) должны быть непрерывными по всему зданию и надежно закреплены внутри конструкции.

Проектируемая связывающая сила рассчитывается как произведение фактора снижения силы (Φ) и нормативной силы связи (R_n)

$$F_{св} = \Phi R_n < F_{тп}$$

Если вертикальная связывающая сила любого конструктивного элемента или соединения меньше, чем требуемая связывающая сила, проектировщик должен пересмотреть проект для соответствия требованиям связывающей силы или использовать метод альтернативного пути.

2. Метод альтернативного пути

В методе альтернативного пути возможны три способа расчета:

- линейный статический;
- нелинейный статический;
- нелинейный динамический.

Порядок выполнения линейного статического расчета:

1. Несущие элементы, которые не удовлетворяют требованиям по вертикальной связывающей силе, следует удалить из конструктивной модели здания.
2. К пролетам, смежным с удаленным элементом, и на всех этажах выше удаленного элемента необходимо приложить нагрузку:

$$P = 2[(0,9 \dots 1,2)C.в. + (0,5 \text{Полезн} \dots 0,2 \text{Снег})] + 0,2 \text{Ветр} = 2q$$

Для остальных конструкций используется сочетание:

$$P = (0,9 \dots 1,2)C.в. + (0,5 \text{Полезн} \dots 0,2 \text{Снег}) + 0,2 \text{Ветр} = q$$

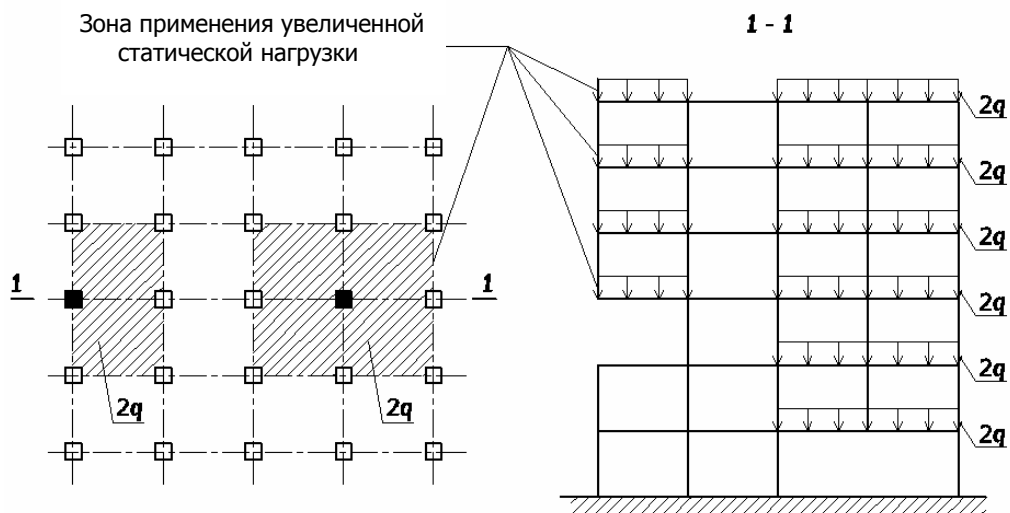


Рис. 12 Схема приложения нагрузки

3. После выполнения анализа необходимо сравнить усилия и деформации с критериями допустимости.
4. Если не один из конструктивных элементов или соединений не нарушает критерии допустимости, расчет считается полным, следовательно, было продемонстрировано удовлетворительное сопротивление прогрессирующему обрушению.
Если какой-либо из конструктивных элементов или соединений не соответствует критериям допустимости, необходимо выполнить следующие процедуры:
 - 4.1 Изменить геометрию или свойства материалов конструкции.
 - 4.2 Если элемент разрушается, необходимо перераспределить нагрузку с разрушенного элемента на соседние конструкции.
 - 4.3 Выполнить повторный анализ измененной модели.
 - 4.4 Сравнить разрушения конструкции с предельно допустимыми значениями. Если ограничения повреждений не нарушены (выполняются условия по площади разрушения), сравнивают усилия и деформации с критериями допустимости.
 - 4.5 Если в новом анализе нарушены какие-либо критерии допустимости, повторяют расчет (п.4.1 – 4.5), до тех пор, пока не будут превышены ограничения повреждений или больше не будет нарушений критериев допустимости. Если ограничения повреждений не нарушены и ни один из новых элементов не нарушил критерии допустимости, то проектирование считается адекватным.

NYBC «Строительные нормы Нью-Йорка»

Основные расчетные требования

В требованиях к проектированию по предотвращению возможности прогрессирующего обрушения используется два подхода [30]:

- Метод альтернативного пути нагружения;
- Метод особой местной прочности.

Данные нормы имеют требования по конструктивной связности:

- все конструктивные элементы должны иметь минимальную степень непрерывности и должны связываться вместе горизонтально и вертикально;
- горизонтальные элементы должны быть рассчитаны с учетом сопротивления поперечной нагрузке.

В обоих методах рассмотрена возможность автомобильного столкновения с вертикальными конструкциями и взрыв бытового газа. При автомобильном ударе наружные угловые колонны первого этажа должны быть запроектированы с учетом сосредоточенной нагрузки 18 т, а все остальные наружные колонны первого этажа - с учетом сосредоточенной нагрузки 9 т. Нагрузка прикладывается горизонтально в любом направлении, с которого может произойти автомобильный удар на высоте 450 мм или 900 мм над уровнем дорожного полотна.

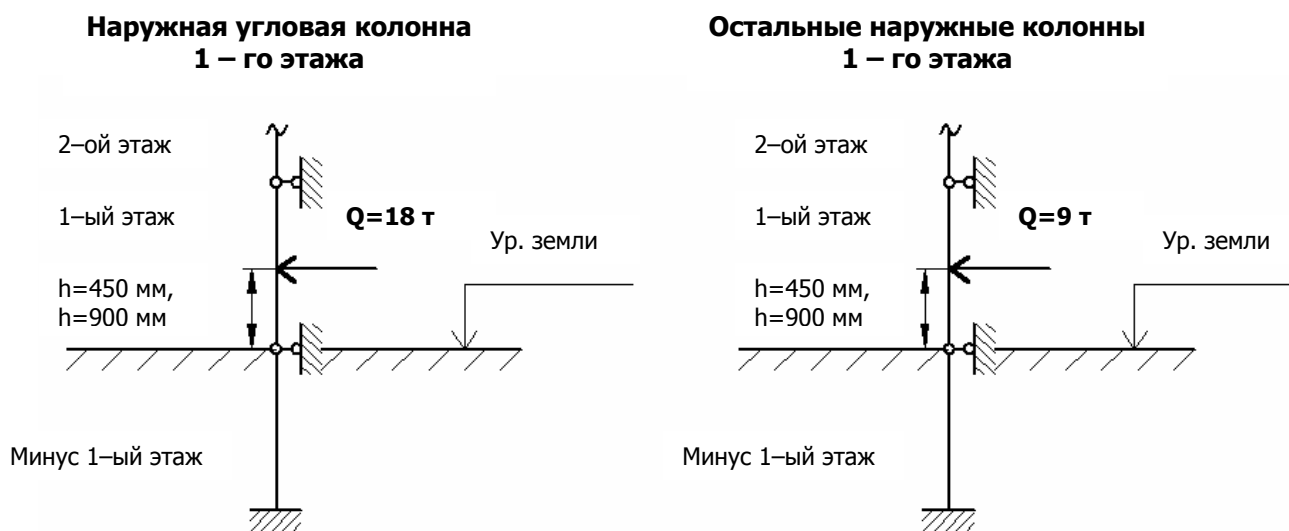


Рис. 13 Схема приложения нагрузки на колонны первого этажа

При расчете на взрыв бытового газа:

- для метода альтернативного пути нагружения конструкции должны быть запроектированы с учетом потенциальных потерь задетых ключевых элементов, одного элемента за один расчет.
- для метода особой местной прочности задетые конструкции должны быть запроектированы с учетом действия нагрузки $2,1\text{ т/м}^2$, применяемой по всей длине элемента.

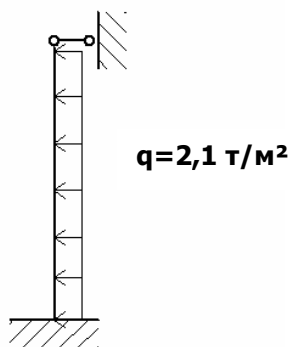


Рис. 14 Схема приложения нагрузки при взрыве бытового газа

Расчет на автомобильное столкновение и на взрыв бытового газа не требуется в случае, когда имеются ограждающие конструкции, способные выдержать указанные нагрузки.

В нормах также указано, что когда расчет на сейсмическое или ветровое воздействие дает большие значения, тогда предпочтение отдается расчету на сейсмическое или ветровое воздействие, с учетом соблюдения всех требований и ограничений, указанных в Нью-Йоркских нормах.

1. Метод альтернативного пути нагружения

В этом методе используется понятие ключевых элементов – элементов (включая его связи), потеря которых ведет более чем к местному разрушению.

Метод альтернативного пути нагружения заключается в предоставлении других путей нагружения для элементов, которые больше не могут выдержать нагрузку при непредвиденном воздействии. При проектировании этим методом нагружения ключевые элементы считаются “условно” убранными, один элемент за один расчет и конструкция проектируется с учетом переноса нагрузок с убранного элемента на другие конструктивные элементы.

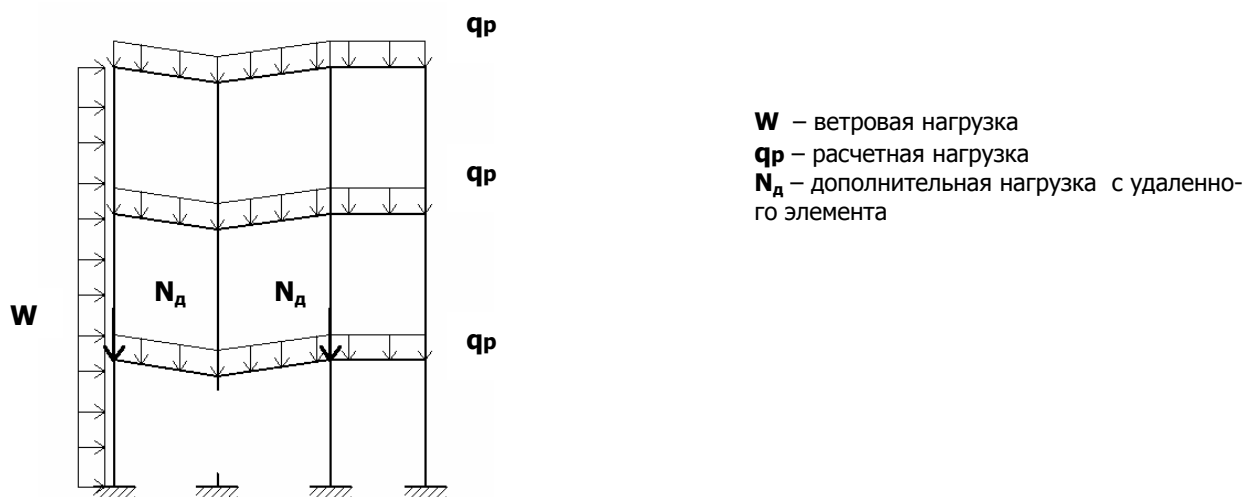


Рис. 15 Расчетная схема альтернативного пути нагружения

2. Метод особой местной прочности

При проектировании методом особой местной прочности для защиты от непредвиденных воздействий предоставляется достаточная прочность элементов, которые могут разрушиться. При проектировании этим методом элементы проектируются для особых местных нагрузок, следующим образом:

1. Каждый элемент, работающий на сжатие, должен быть спроектирован для сосредоточенной нагрузки равно 2% его осевой нагрузки, но не менее 6,8 т, применяемой в центре пролета в любом направлении, перпендикулярно его продольной оси. Эта нагрузка должна применяться в сочетании с полной постоянной нагрузкой и 50% временной нагрузки в элементе, работающем на сжатие.

2. Каждый элемент, работающий на изгиб, должен быть спроектирован для сочетания принципиальных рабочих моментов плюс дополнительный момент, равный 10% принципиального рабочего момента, применяемого в перпендикулярной плоскости.

3. Соединения каждого элемента, работающего на растяжение, должны быть спроектированы с пределом прочности при растяжении, в три раза больше нормативного.

4. Все конструктивные элементы должны быть спроектированы для реверсивного хода нагрузки. Эта нагрузка должна равняться 10% расчетной нагрузки, действующей на элемент в противоположном ей направлении.

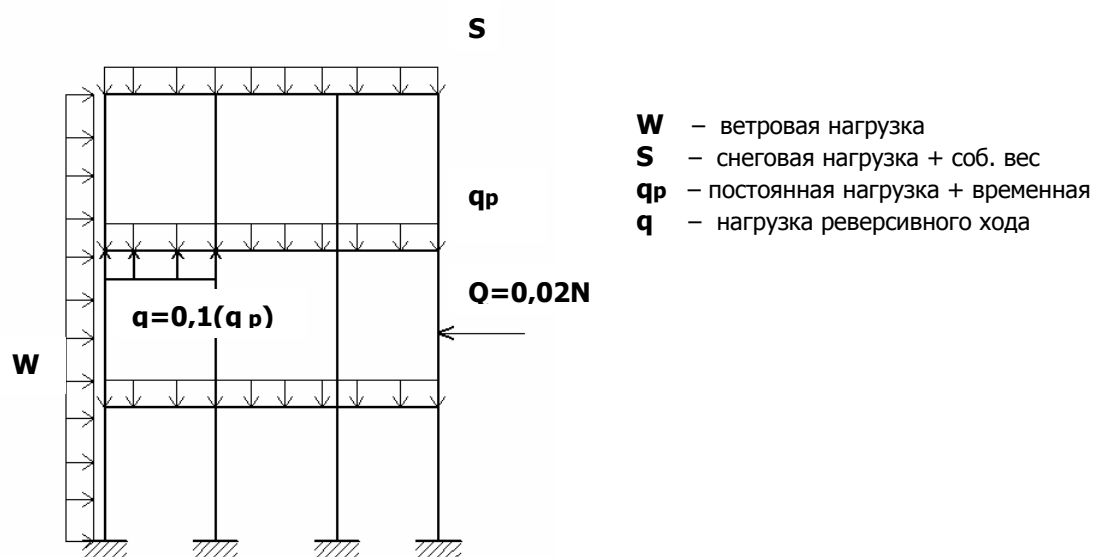


Рис. 16 Расчетная схема метода особой местной прочности

Все анализы строительных конструкций для особых местных нагрузок или ключевых элементов производят одним из следующих методов:

- Линейный статический расчет;
- Нелинейный динамический расчет;
- Нелинейный статический расчет с использованием баланса энергии (энергетический метод).

GSA «Рекомендации по расчету прогрессирующего обрушения и проектированию новых федеральных офисных зданий и крупных реконструкций»

Основные расчетные требования

Целью данного метода является повышение защиты от прогрессирующего обрушения [24].

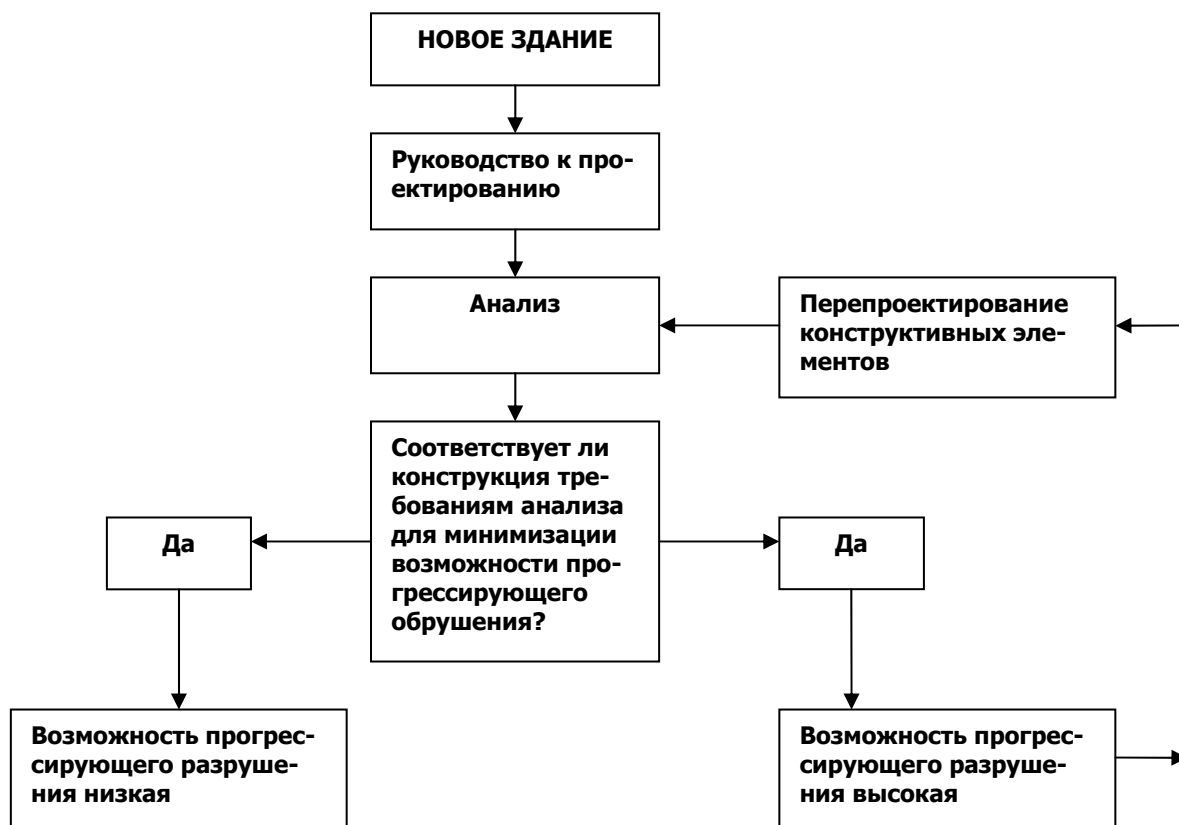


Рис. 17 Стратегия проектирования GSA

На стадии руководства к проектированию приведен перечень мер, понижающих возможность прогрессирующего обрушения, на начальной стадии проектирования. Среди этих мер можно выделить следующее:

- использование резервных горизонтальных и вертикальных путей перераспределения усилий при выходе из работы какой-либо конструкции;
- обеспечение максимальной непрерывности конструкции и пластичности соединений;
- проектирование конструкции, с учетом ее возможной знакопеременности;
- необходимо обеспечить сопротивление разрушению от сдвига.

На стадии анализа, происходит расчет на соответствие конструкции, предъявляемым требованиям для минимизации возможности прогрессирующего обрушения.

Для типичных конструктивных схем рассматривают удаление несущих элементов.

1. Анализ колонн

1. Проанализировать внезапную потерю колонны одного этажа, расположенную на середине или рядом с серединой короткой стороны здания.

2. Проанализировать внезапную потерю колонны одного этажа, расположенную на середине или рядом с серединой длинной стороны здания.

3. Для сооружений с подземным этажом проанализировать потерю колонны, которая в надземной части является наружной.

4. Проанализировать внезапную потерю колонны одного этажа, расположенную на углу здания.

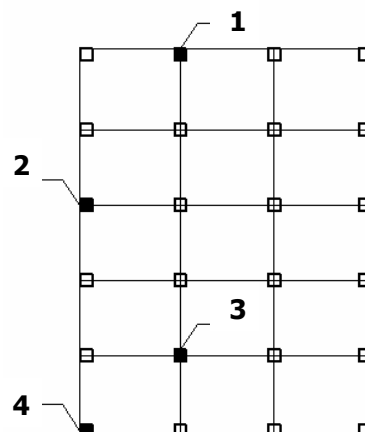


Рис. 18 Схема колонн

2. Анализ балок и стен

5. Проанализировать внезапную потерю стены или 9,14 погонных метров наружной стены (в зависимости от того, что меньше) для одного этажа, расположенную на середине или рядом с серединой короткой стороны здания.

6. Проанализировать внезапную потерю стены или 9,14 погонных метров наружной стены (в зависимости от того, что меньше) для одного этажа, расположенную на середине или рядом с серединой длинной стороны здания.

7. Проанализировать внезапную потерю несущей стены на углу конструкции или 9,14 погонных метров стены (4,57 метра) в каждом направлении (в зависимости от того, что меньше) для одного этажа над уровнем земли*.

* Потеря стены должна быть непрерывной и включать угловой участок стены. Например, если стена сооружения составляет 12,19 м, стена которую потребуется удалить составляет 9,14 м по 4,57 м в каждом направлении.

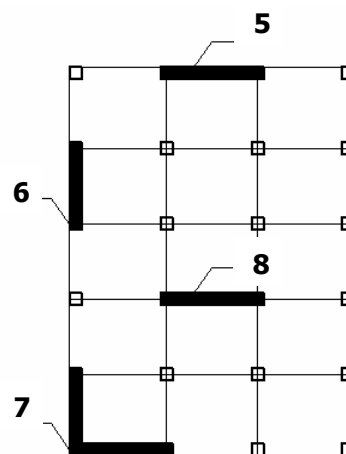
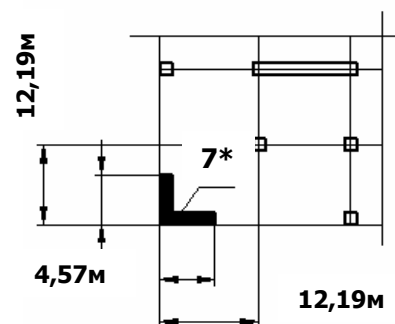


Рис. 19 Схема стен

8. Для сооружений с подземной парковкой проанализировать внезапную потерю стены или 9,14 погонных метров стены (в зависимости от того, что меньше) для одного этажа подземной парковки и/или зоны неконтролируемого первого этажа. Рассматриваемая стена должна быть внутренней.



При этом вертикальная нагрузка q должна быть равна $2(PH+0,25BH)$, где PH – постоянная нагрузка; BH – временная нагрузка.

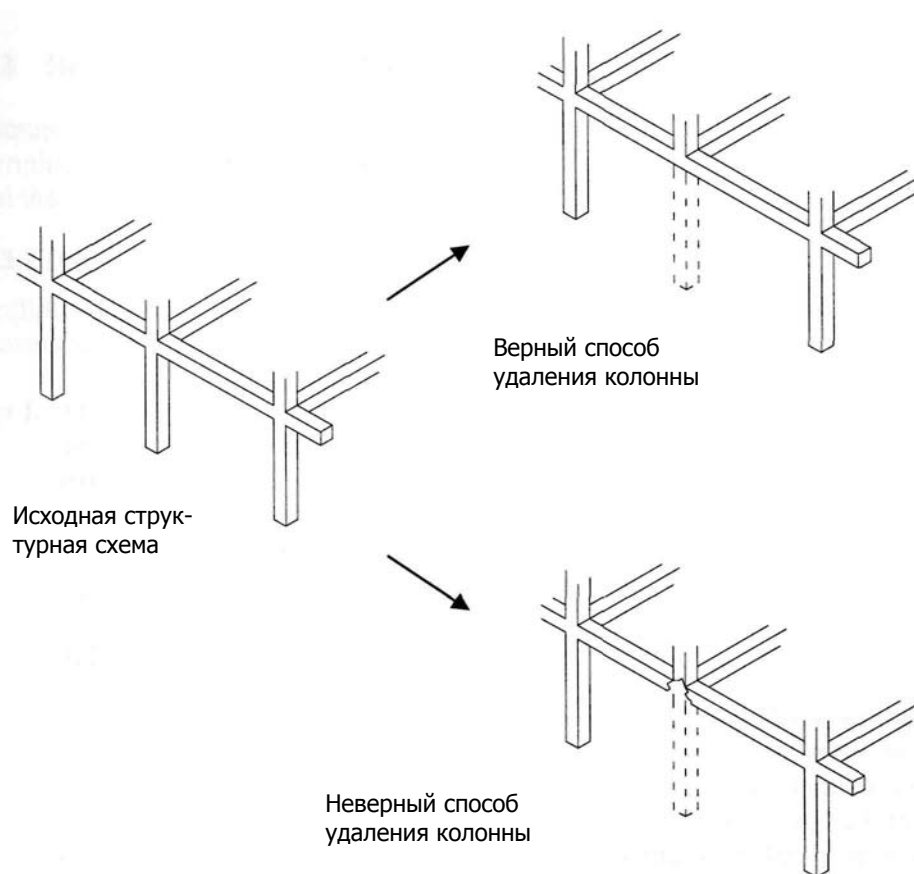


Рис. 20 Схема удаления колонны (GSA)

Для нетипичных конструктивных схем (то есть для схем с отличительными конструктивными особенностями) рассматривают удаление балок или части перекрытия.

Для таких зданий непрактично разрабатывать ряд рассмотрений анализов, применяемых к каждому сооружению. Поэтому конструктор должен самостоятельно дать инженерную оценку и добавить к рассмотрению дополнительные анализы и расчеты, при этом стоит уделить особое внимание анализам и расчетам, направленным на защиту от непропорционального разрушения.

- Для участков перекрытий расположенных вблизи внешних ограждающих конструкций, максимально допустимая степень разрушения, в результате внезапного удаления несущего элемента на один этаж, должна быть ограничена до (в зависимости оттого, что составляет меньшую площадь):

- балки конструкции, прямо связанные с внезапно удаляемым вертикальным элементом в уровне этажа;
- площадь 167,2 м² на уровне этажа прямо над внезапно удаляемым вертикальным элементом.

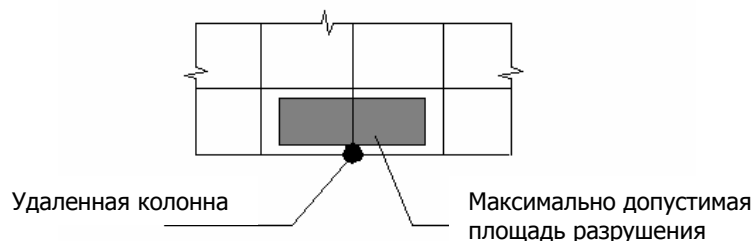


Рис. 21 Схема предельно допустимого разрушения плиты перекрытия в крайних пролетах

- Для участков перекрытий расположенных внутри здания, вдали от внешних ограждающих конструкций максимально допустимая степень разрушения, в результате внезапного удаления несущего элемента на один этаж, должна быть ограничена до (в зависимости оттого, что составляет меньшую площадь):

- Балки конструкции, прямо связанные с внезапно удаляемым вертикальным элементом в уровне этажа;
- Площадь 334,5 м² на уровне этажа прямо над внезапно удаляемым вертикальным элементом.

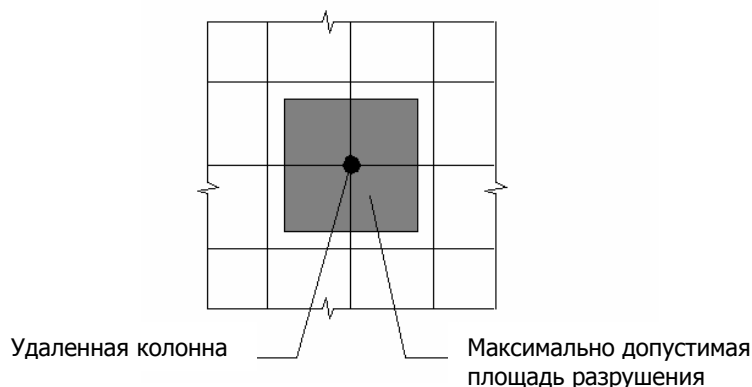


Рис. 22 Схема предельно допустимого разрушения плиты перекрытия в средних пролетах

Критерии приемки для основных и резервных элементов должны определяться как:

$$DCR = Q_{ud} / Q_{ce}, \text{ где}$$

Q_{ud} – действующая сила, определяемая в элементе или соединении (момент, осевая сила, сдвиг и возможное сочетание сил);

Q_{ce} – ожидаемая предельная нормативная способность элемента или соединения (момент, осевая сила, сдвиг и возможное сочетание сил);

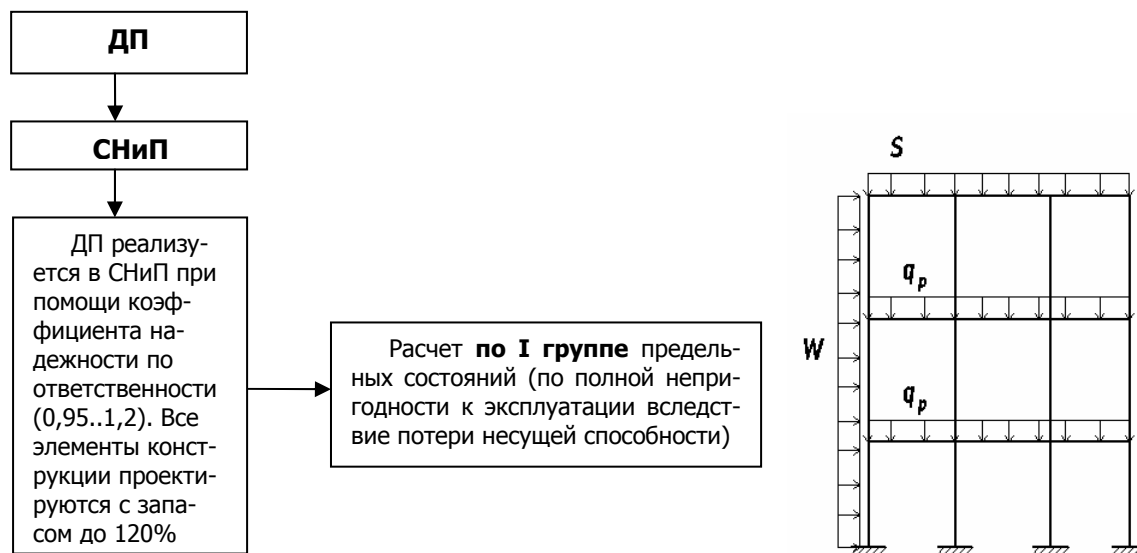
Допустимые значения **DCR** для основных и резервных конструктивных элементов:

- **DCR ≤ 2,0** для типичных конструктивных схем;
- **DCR ≤ 1,5** для нетипичных конструктивных схем (могут ограничиваться «нетипичной» областью, то есть критерий может применяться только к части конструктивной схемы);
- **DCR > 2,0; DCR > 1,5** для типичных и нетипичных конструктивных схем, тогда конструктивные элементы и соединения считаются грубо поврежденными или разрушенными.

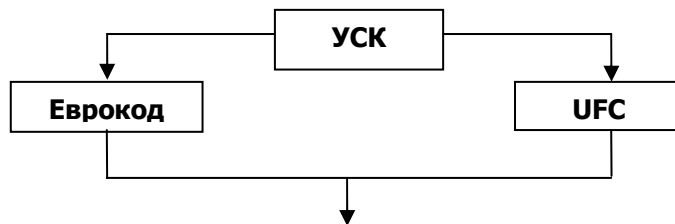
Когда коэффициент DCR превышен при расчете на силу сдвига или при расчете на изгибающий момент, то проводится линейный статический анализ, целью которого является перераспределение моментов по всей площади здания посредством постановки шарниров.

РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДОВ РАСЧЕТА

ДП – Добавочная прочность



УСК - Увеличение связности конструкции

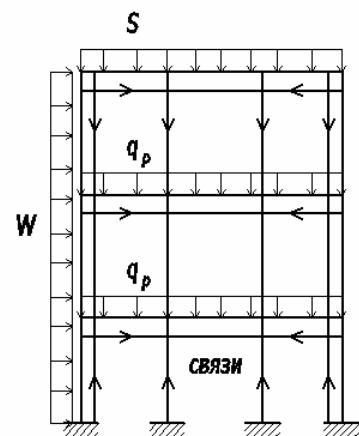


Горизонтальные связи

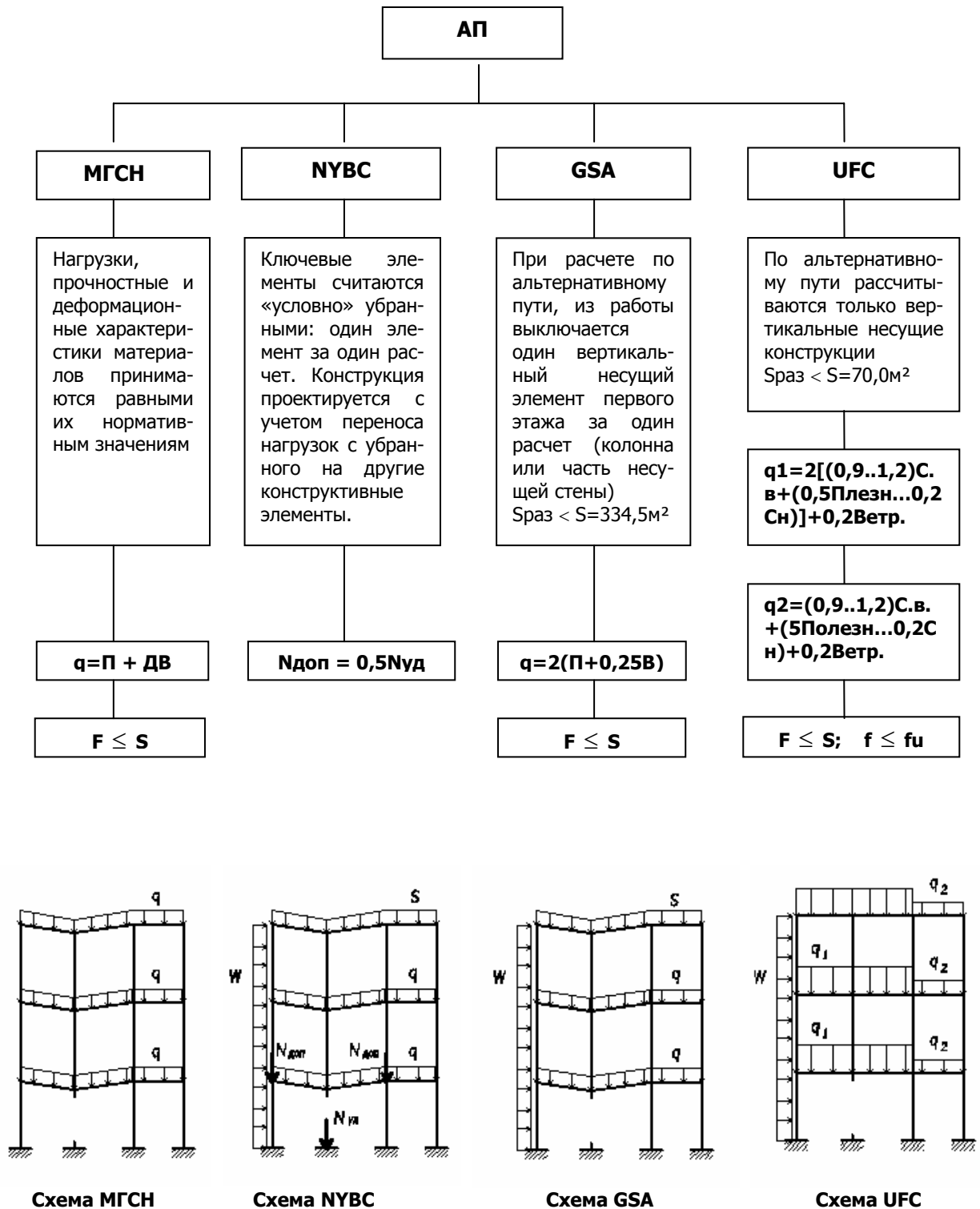
Горизонтальные связи и крепления несущих элементов конструкции здания к элементам, обеспечивающим пространственную неизменяемость конструкции, должны быть предусмотрены непрерывно, по периметру и внутри каждого перекрытия и покрытия в двух ортогональных направлениях для каждого вертикального несущего элемента (колонн, стоек).

Вертикальные связи

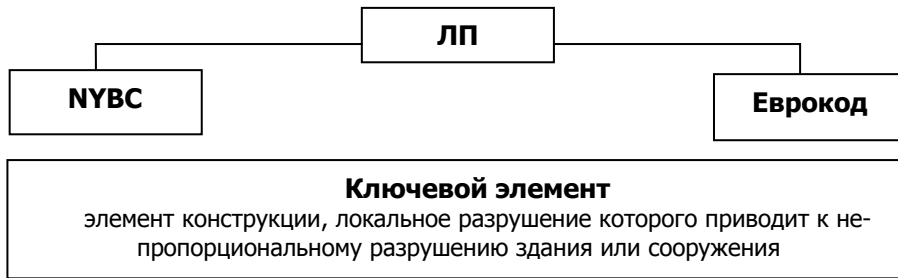
В рамных конструкциях колонны и несущие стены должны воспринимать особую растягивающую нагрузку, равную максимальной нагрузке от перекрытия любого одного этажа. Расчет на данную нагрузку должен производиться во всех сечениях несущих элементов без учета разгружающего действия постоянных и временных нагрузок на конструкцию.



АП - Альтернативный путь

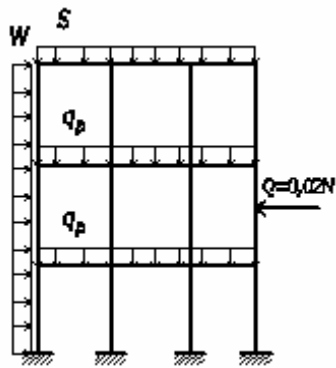


ЛП - Локальная прочность

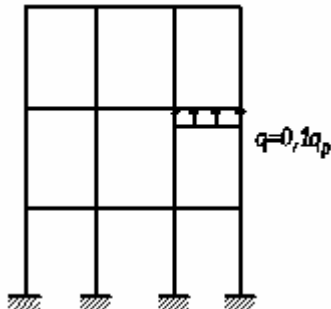


Расчет ключевых элементов

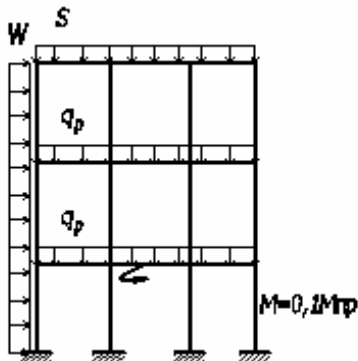
1. На сосредоточенную силу, действующую перпендикулярно в середине элемента, равную 2% от продольной силы



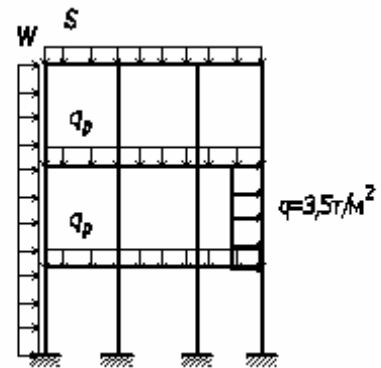
2. На реверсивный ход нагрузки равный 10% рабочей нагрузки



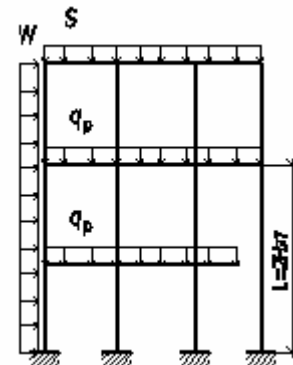
3. На дополнительный момент, равный 10% принципиального момента, действующий в перпендикулярной плоскости



1. На особую распределенную по боковой площади нагрузку 3,5 т/м²

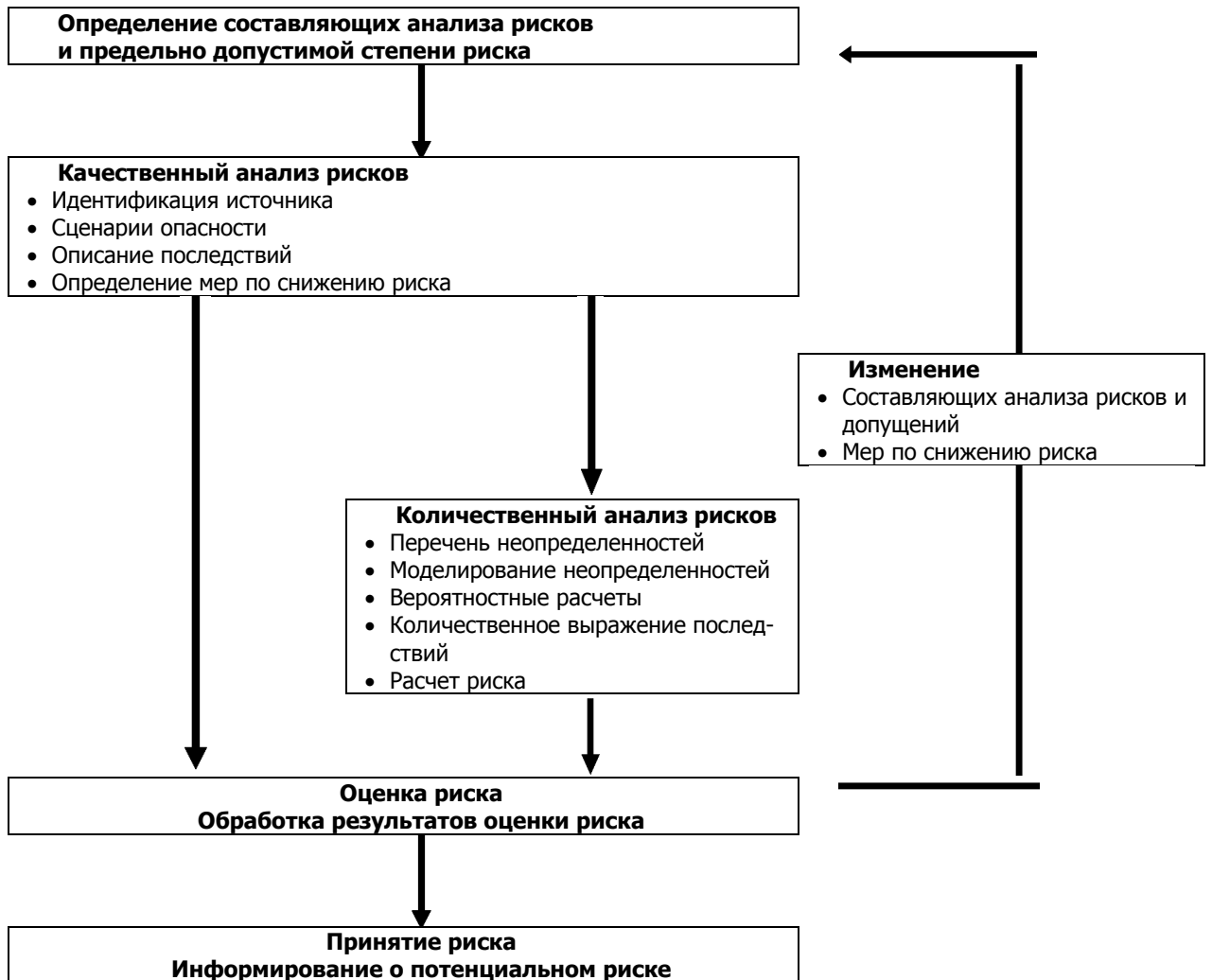


2. На двойную расчетную длину



ОР – Оценка риска

Схема метода оценки риска приведена в соответствии с Еврокодом EN 1991-1-7



УЧЕТ УРОВНЯ ОТВЕТСТВЕННОСТИ

В нижеприведенной таблице показаны требования различных норм и стандартов о необходимости применения различных методов ограничения непропорционального разрушения.

Знаком **X** отмечены обязательные методы.

Знаком **O** отмечены методы, из которых один из обозначенных методов является достаточным.

документ	уровень	Типы зданий и сооружений	исключение	расчет на воз-	локальная на-	альтернатив-	связность кон-	добавочная	оценка риска
			ИВ	РВ	ЛН	АП	СК	ДП	
СНиП		Уникальные здания и сооружения; Сооружения высотой 100 м и более; Здания с пролетами 100 м и более						X	
МГСН ТСН		Жилые здания высотой более 75 метров; Общественные здания высотой более 50 метров		X	X	X		X	
ADA Еврокод (EC1)	1	Индивидуальные жилые дома не более 4 этажей; Сельскохозяйственные здания; Здания с кратковременным пребыванием людей, находящиеся на расстоянии более полутора высот от зданий или мест с пребыванием людей.							
	2a	Индивидуальные жилые дома 5 этажей; Отели не более 4 этажей; Многokвартирные дома не более 4 этажей; Офисы не более 4 этажей; Промышленные здания не более 3 этажей; Торговые здания не более 3 этажей и площадью этажа не более 1000 м ² ; Учебные здания одноэтажные; Все здания не более 2 этажей, открытые для свободного посещения, с площадью каждого этажа не более 2000 м ²					X		
	2b	Жилые дома и гостиницы от 5 до 15 этажей; Учебные здания от 2 до 15 этажей; Торговые здания от 4 до 15 этажей; Больницы не более 3 этажей; Офисы от 5 до 15 этажей; Все здания, открытые для свободного посещения, с площадью каждого этажа от 2000 до 5000 м ² ; паркинги не более 6 этажей			O	O	X		
	3	Все здания класса 2b с большим числом этажей или площадью этажа; Здания с значительным пребыванием людей; Стадионы более 5000 мест; Здания содержащие опасные материалы или процессы.							X
NYBC		Здания и сооружения 4 уровня важности (госпита-ли, полицейские участки и пожарные депо, здания в сейсмоопасных районах, здания связи и комму-никаций, электростанции, склады токсичных мате-риалов, авиационные сооружения), площадью этажа более 4600 м ² ; Здания с соотношением высоты к ширине более 7; Здания выше 183 метров; Здания площадью более 93 000 м ² ; Здания высотой более 7 этажей, в которых на один несущий элемент опирается более 15% площади здания; Здания, для которых инспектор (commissioner) посчитал необходимым проведение независимой экспертизы (peer review)		X	O	O	X		
UFC		Здания и сооружения любого назначения, в кото-рых могут одновременно находиться более пяти военнослужащих и/или членов их семей	X			X	X		
GSA		Федеральные здания и сооружения США	X				X		

ПРИМЕР РАСЧЕТА ОТ НЕПРОПОРЦИОНАЛЬНОГО ОБРУШЕНИЯ

Для примера выполнены расчеты монолитного каркаса 25-этажного здания (рис.22). Несмотря на то обстоятельство, что для такого здания, в соответствии с действующими нормами, выполнение дополнительных мероприятий против непропорционального и/или прогрессирующего обрушения не требуется, были выполнены расчеты по различным методикам для сравнения результатов по следующим критериям:

- материалоемкость – расход бетона и арматурной стали;
- трудоёмкость – количество затраченного времени молодых инженеров-конструкторов (студентов-дипломников), для которых все методы были одинаково новыми для понимания и освоения.

1. Общие данные

1.1. Уровень ответственности здания

I (повышенный) по ГОСТ 27751-88, СНиП 2.01.07-85*.

Степень огнестойкости – I по СНиП 21-01-97*.

Класс конструктивной пожарной опасности CO по СНиП 21-01-97*.

1.2. Климатические параметры района строительства

Климатический район – 1В по СНиП 23-01-99*.

Ветровой район – II по СНиП 2.01.07-85*.

Снеговой район – III по СНиП 2.01.07-85*.

Расчетная температура наружного воздуха по наиболее холодной пятидневки -35°C.

1.3. Сведения о сейсмическом районировании

Из справки-заключения о предполагаемой сейсмичности участка строительства многоэтажного (25 этажей) жилого дома, со встроенно-пристроенными помещениями и подземным паркингом в квартале улиц Саввы Белых-Шатурская-Онежская-Белинского в Октябрьском районе г. Екатеринбурга, следует, что величина расчетной силы сейсмического воздействия на площадке строительства может быть оценена в 6 баллов по шкале MSK-64.

Интенсивность сейсмического воздействия в районе строительства по карте "В" составляет 6 баллов по СНиП II-7-81* с изменениям №5.

На основании вышеуказанных документов в проекте принято расчетное сейсмическое воздействие в 6 баллов по шкале MSK-64, поэтому требования указанных норм при разработке конструктивной части проекта не учитывались согласно п.1.1. СНиП II-7-81*.



Рис. 23 Фасад здания

2. Нагрузки и воздействия

Нагрузки на здание определены в соответствии с методикой СНиП 2.01.07-85* "Нагрузки и воздействия"

– Тип местности – В.

– Ветровой район – II. Нормативное значение ветрового давления – 30 кг/м².

– Снеговой район – III. Расчетное значение веса снегового покрова – 180 кг/м².

Унифицированные нагрузки на здание

Нагрузки на плиты перекрытия жилых помещений:

	Нормативная	Коэф. надежности	Расчетная
Собственный вес плиты	– 0,500 т/м ²	1,1	0,550 т/м ²
Полезная	– 0,150 т/м ²	1,2	0,195 т/м ²
Пол и перегородки	– 0,230 т/м ²	1,3	0,300 т/м ²
Всего:	– 0,880 т/м ²		1,050 т/м ²

Для расчета по первой группе предельных состояний учитываются следующие воздействия:

– Вертикальные нагрузки от собственного веса конструкций, полезные нагрузки, вес оборудования и материалов в соответствии со СНиП 2.01.07-85*.

– Давление ветра в соответствии со СНиП 2.01.07-85*.

Для расчета по второй группе предельных состояний учитываются следующие ограничения:

– Горизонтальное предельное перемещение верха здания – h/500 при воздействии нормативной ветровой нагрузки в соответствии со СНиП 2.01.07-85* с учетом нелинейной работы бетона

– Вертикальные предельные прогибы элементы конструкций в соответствии со СНиП 2.01.07-85* с учетом нелинейной работы и ползучести бетона.

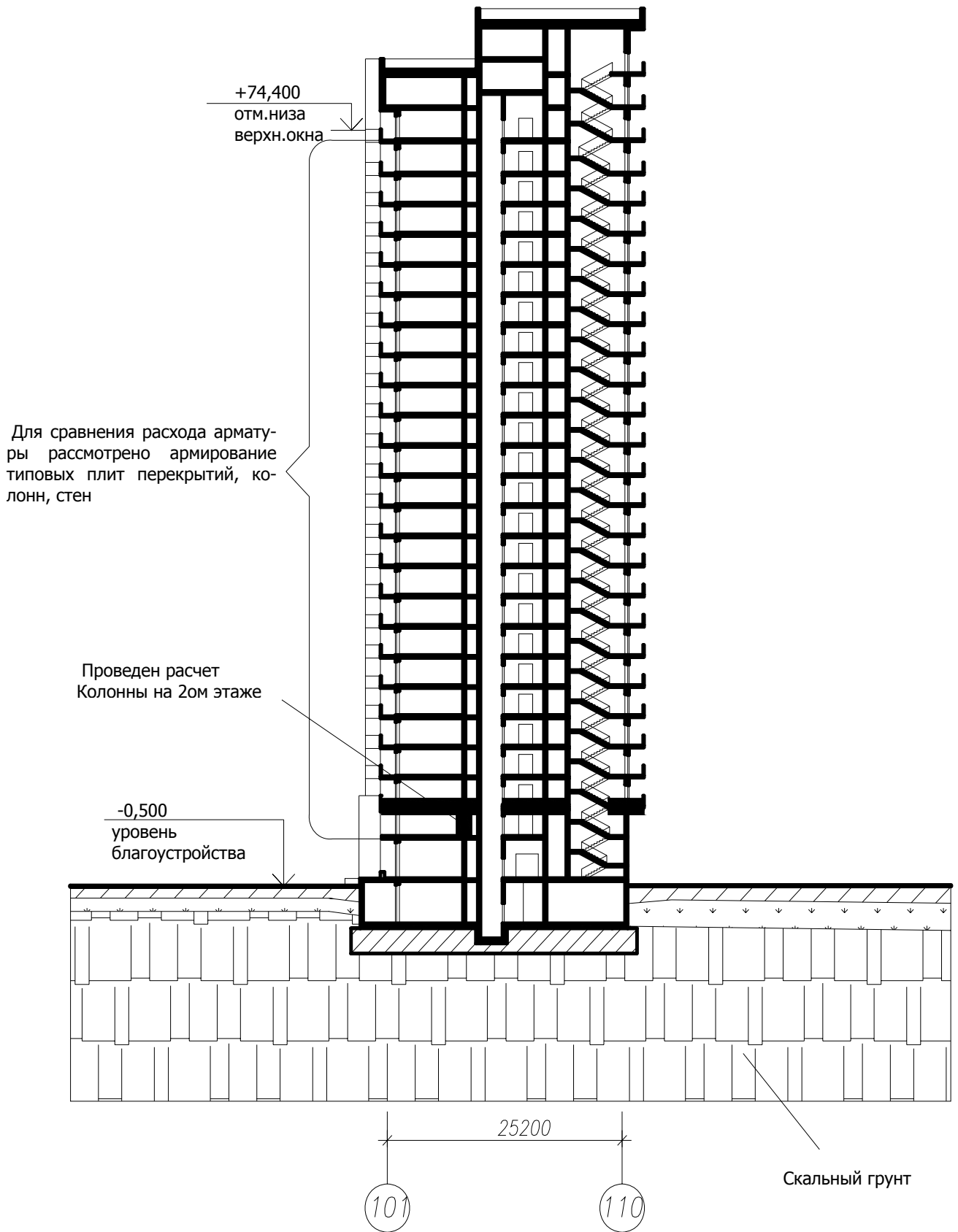


Рис. 24 Разрез здания

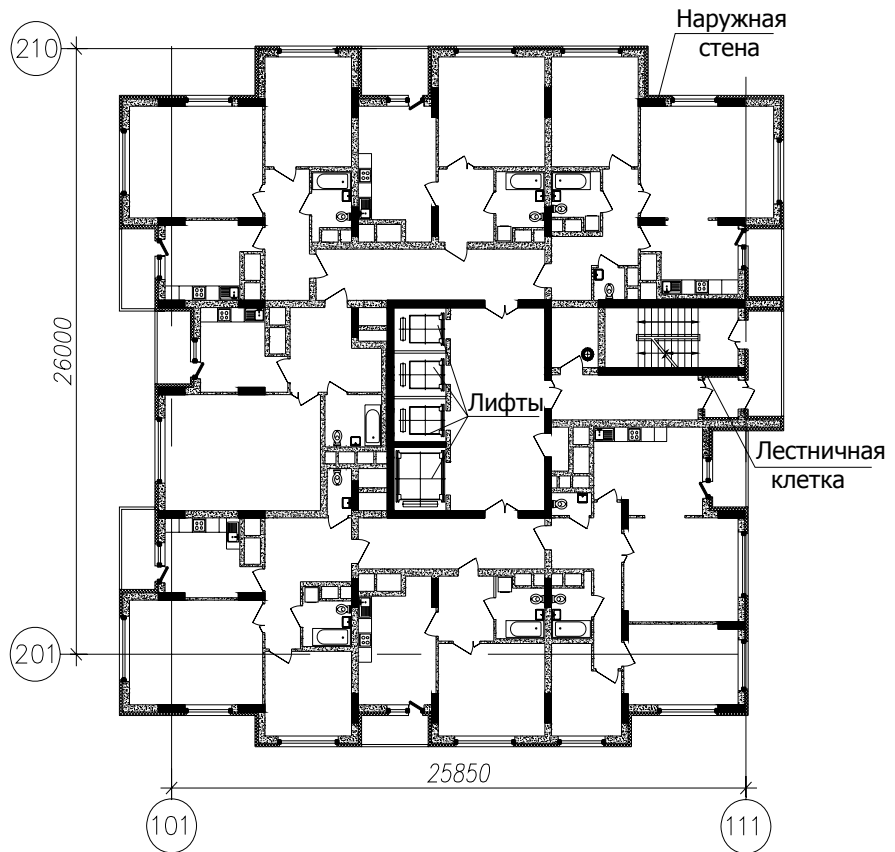


Рис. 25 План типового этажа

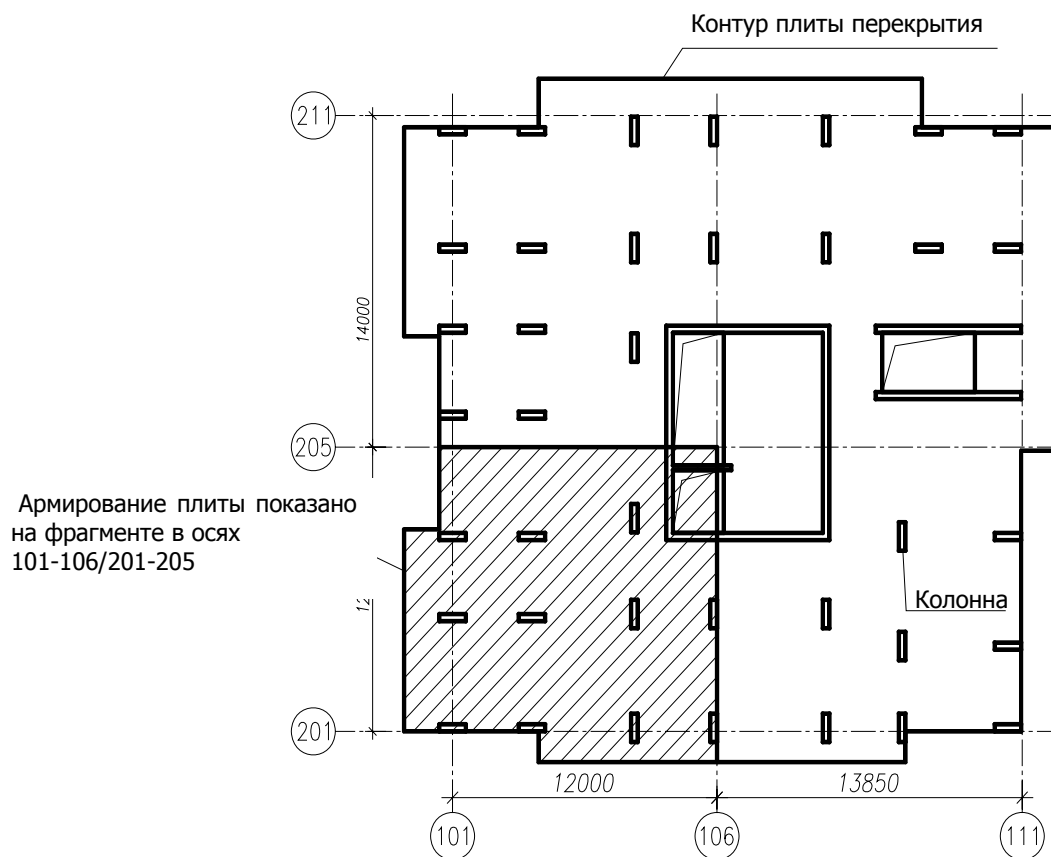


Рис. 26 Типовая плита перекрытия

3. Конструктивная схема здания

- Каркас здания представляет собой рамно-связевую системы, состоящую из монолитных колонн, стен диафрагм жесткости и монолитных плоских плит перекрытия.
- Общая устойчивость и пространственная неизменяемость каркаса здания обеспечивается устройством ядра жесткости замкнутого коробчатого сечения с наружным размером 9х7,4м, работающим как консольный стержень, заземленный в фундаменте.
- Монолитные перекрытия являются жесткими горизонтальными дисками, обеспечивающими совместную работу стен и колонн.
- При высоте каркаса от верха фундамента около 85 м отношение высоты к стороне ядра жесткости составляет 1:11 по короткой стороне и 1:9 по длинной.
- Наружные стены подвала толщиной 300 мм – монолитные ж/б из бетона В20, F50, W6.
- Стены диафрагм жесткости толщиной 300 мм – монолитные ж/б из бетона В30.
- Колонны (простенки) переменной толщины от 500 мм до 200 мм – монолитные железобетонные из бетона В30.
- Плиты перекрытия толщиной 200 мм, 220 мм и 240 мм – плоские монолитные железобетонные из бетона В25.

4. Расчет по методикам против непропорционального обрушения

При расчете по методикам добавочная прочность (ДП), альтернативного пути нагружения (АП), локальная надежность (ЛН) и увеличение связности конструкций (СК) выполнено:

- Расчет и армирование плит перекрытий.
- Расчет и армирование стен и колонн.
- Расчет расхода бетона и арматурной стали
- Определение соизмеримых трудозатрат для непосредственного выполнения расчетов.

Расчет по СНИП

Расчет проведен по двум группам предельных состояний – по группе I (расчет по несущей способности) и по группе II (расчет по деформациям и трещиностойкости). Определяющим фактором армирования по II-ой группе предельных состояний – является расчет по трещиностойкости. Нелинейная работа бетона при определении деформаций учтена введением коэффициента равного 4. Коэффициент определен из предыдущих сравнительных расчетов по линейной и нелинейной схемам.

1. Расчет по I-ой группе предельных состояний

1.1. Расчет плиты перекрытия.

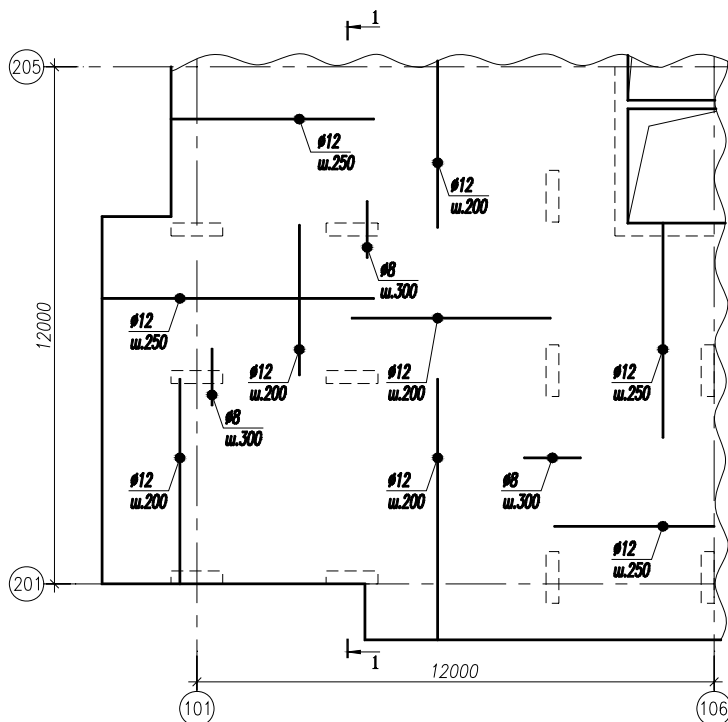


Рис. 27 Фрагмент нижнего армирования плиты перекрытия

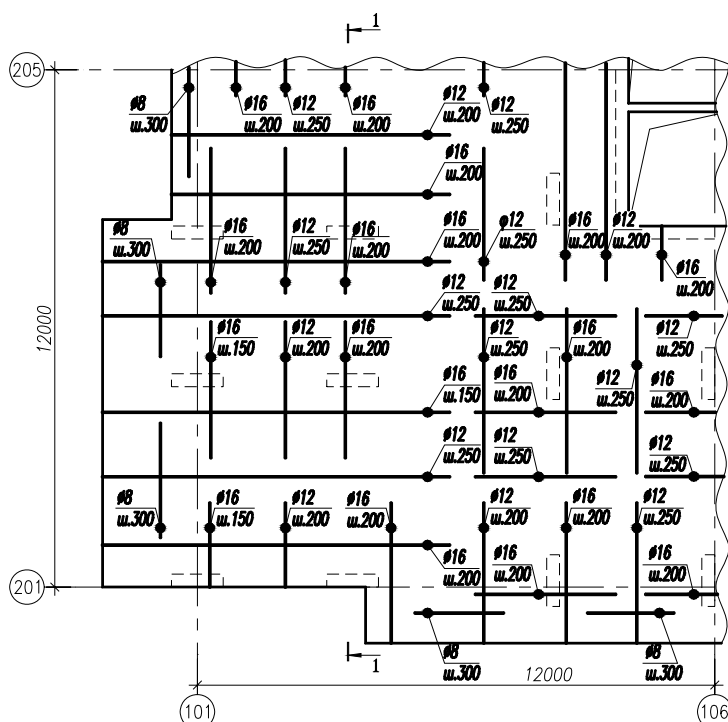
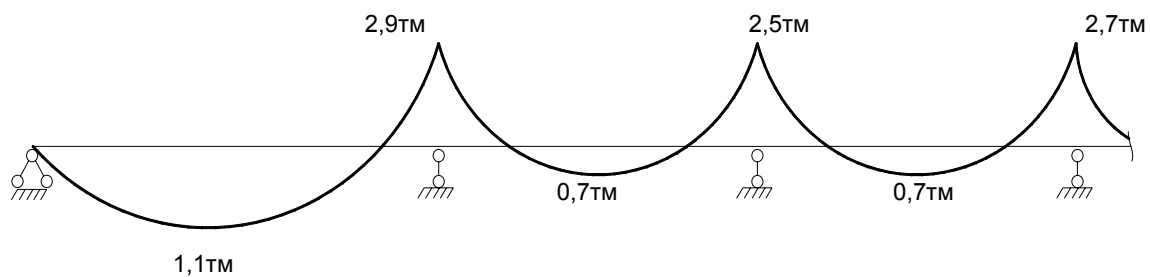
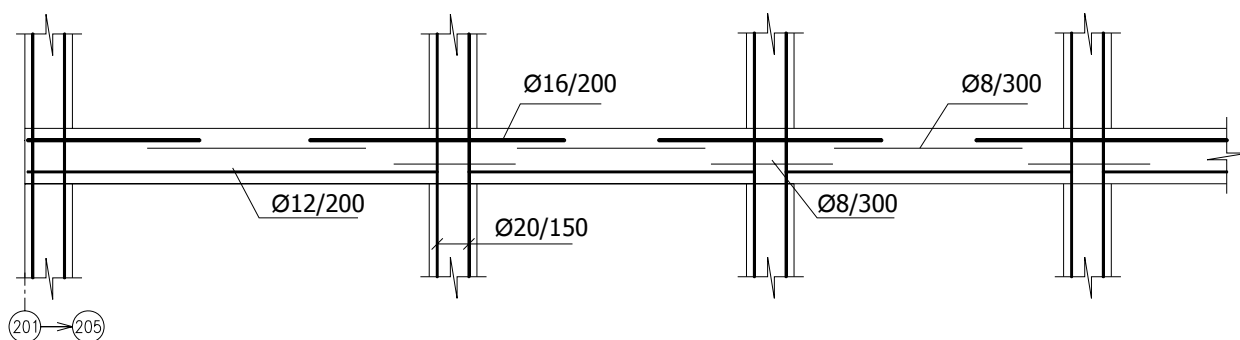


Рис. 28 Фрагмент верхнего армирования плиты перекрытия

Эпюра моментов M_y

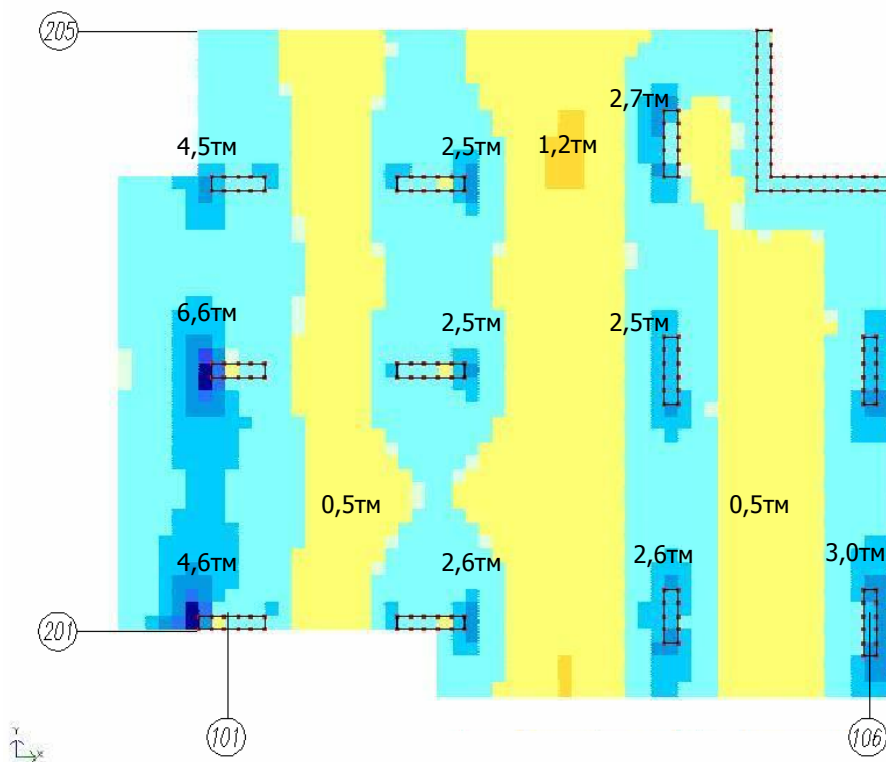


Разрез 1 - 1

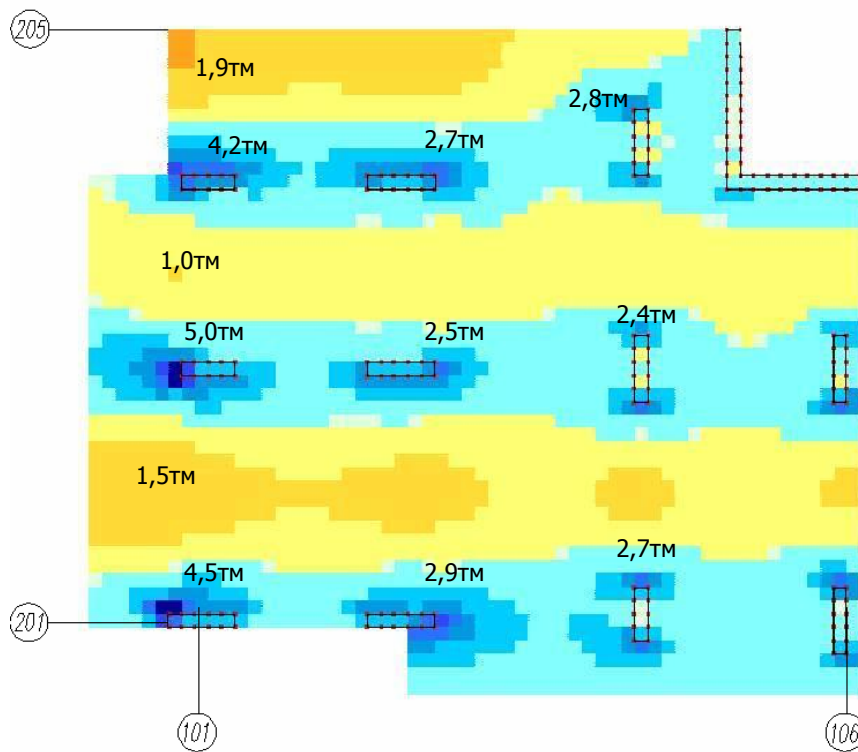


Результаты статического расчета:

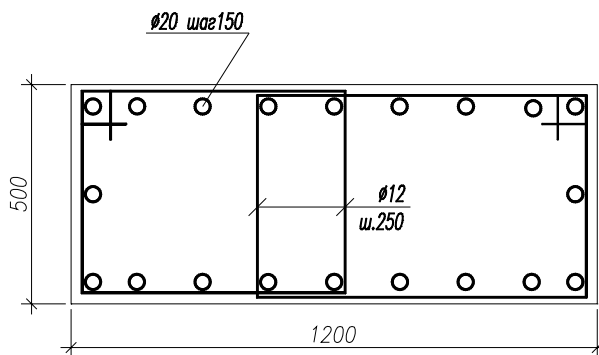
Изополя изгибающих моментов M_x для рассматриваемого фрагмента:



Изополю изгибающих моментов M_u для рассматриваемого фрагмента:



1.2. Армирование колонны.



Нагрузки:
 $N = 870$ Т;
 $M = 9$ Тм.

2. Расчет по II-ой группе предельных состояний
Расчет плиты перекрытия.

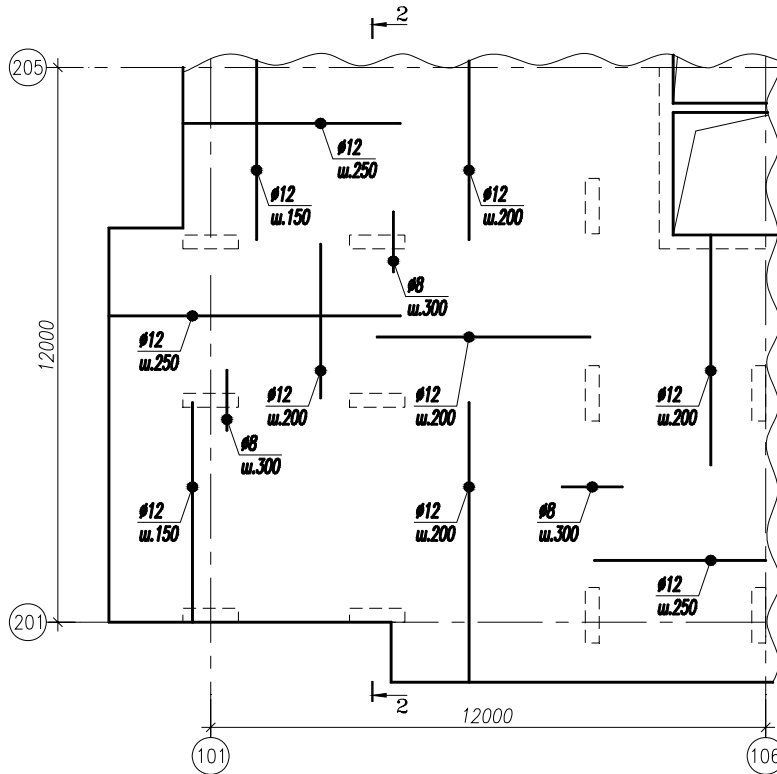


Рис. 29 Фрагмент нижнего армирования плиты перекрытия

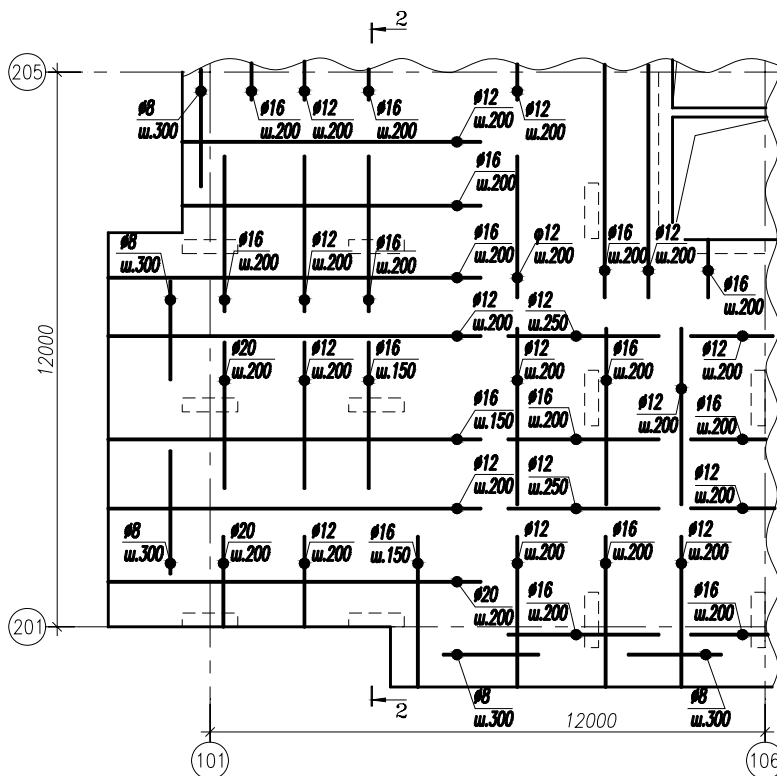
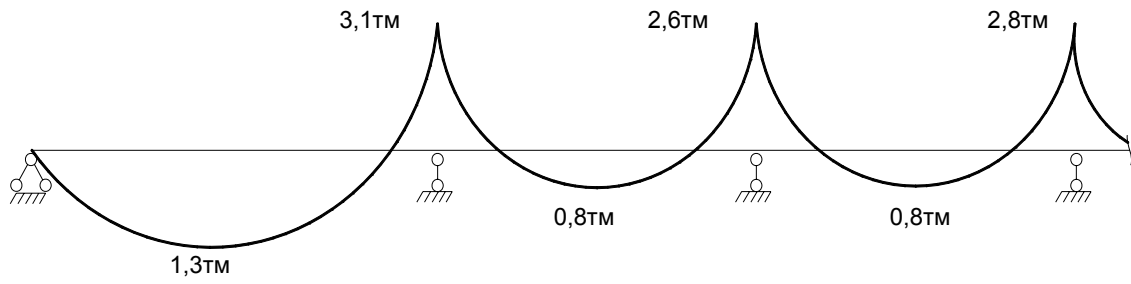
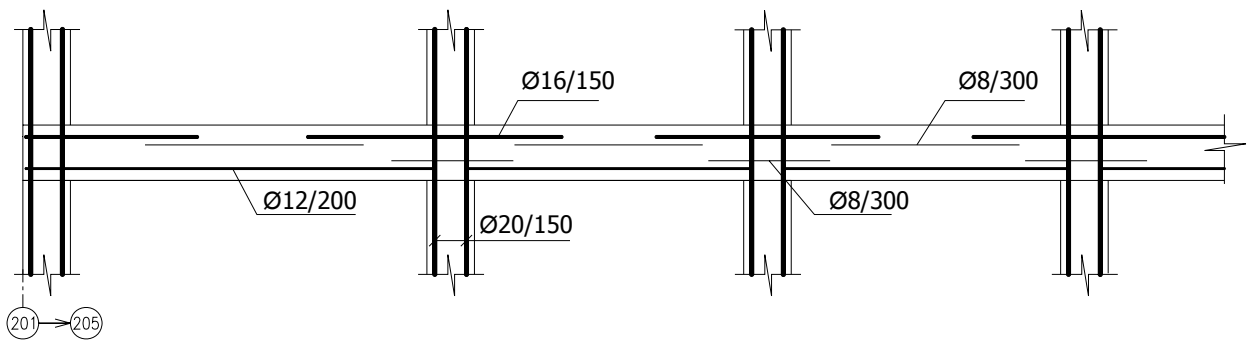


Рис. 30 Фрагмент верхнего армирования плиты перекрытия

Эпюра моментов M_y

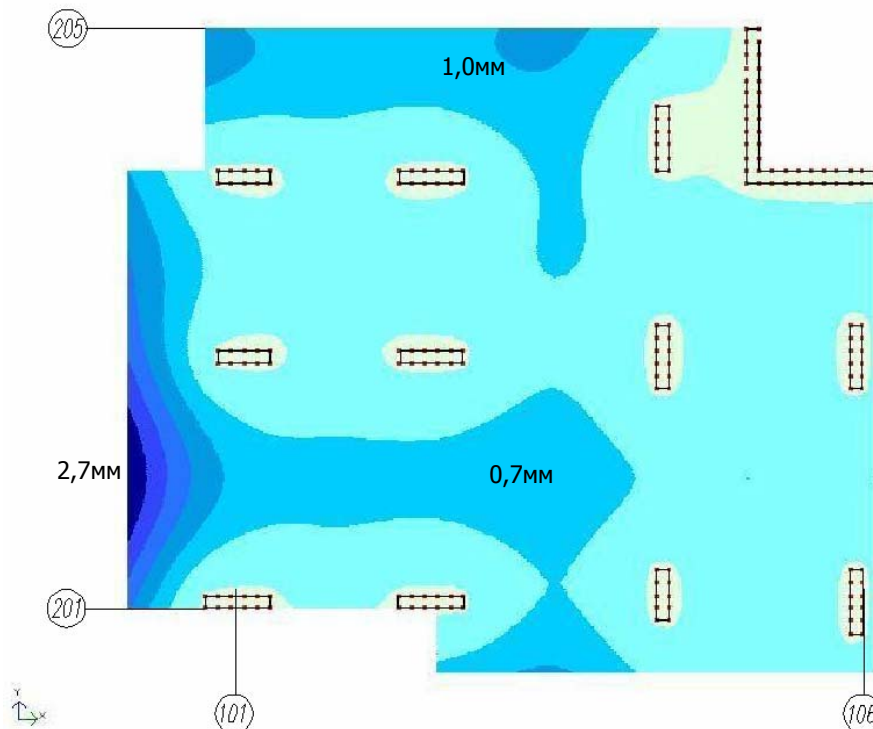


Разрез 2 - 2

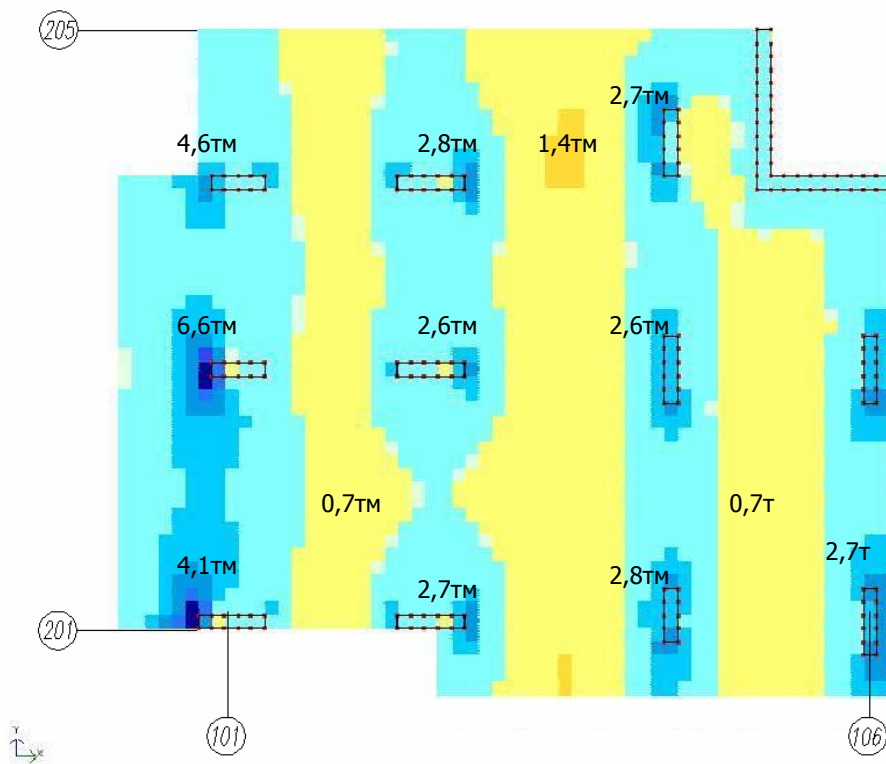


Результаты статического расчета:

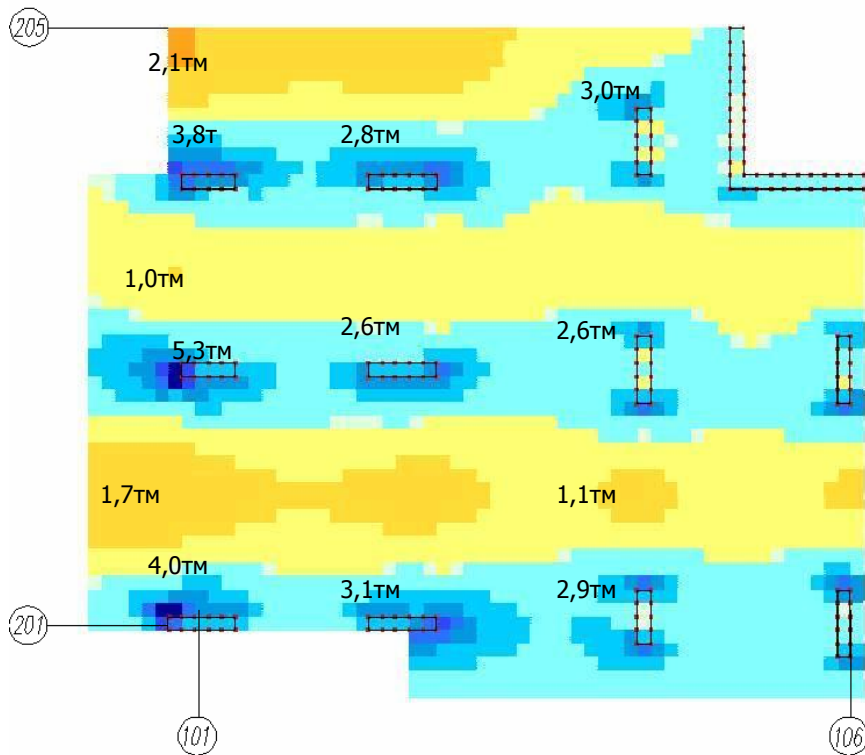
Изополя прогибов для рассматриваемого фрагмента:



Изополю изгибающих моментов M_x для рассматриваемого фрагмента:

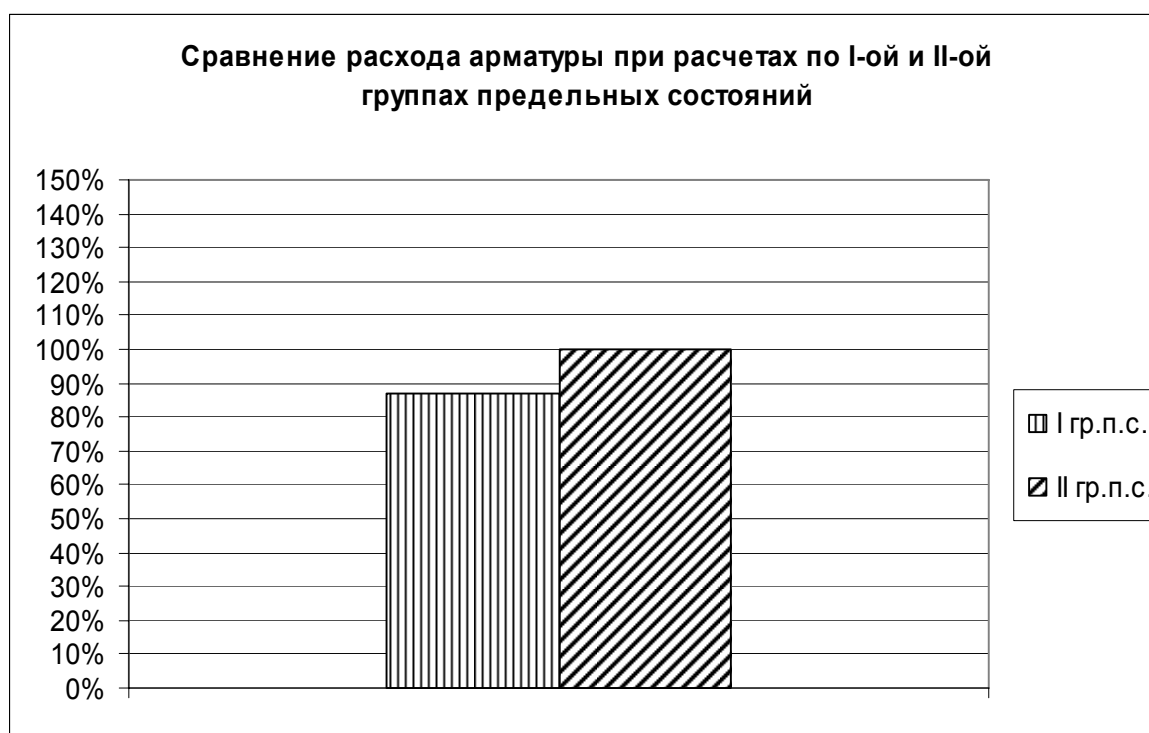


Изополю изгибающих моментов M_y для рассматриваемого фрагмента:



3. Затраты труда и материалов

	Плиты пере- крытия	Стены, ко- лонны	Всего	На все здание	Трудозатраты
	Арматура (т)	Арматура (т)	Арматура (т)	Бетон (м ³)	часов
Расчет по I группе ПС	455(86%)	305	760(91%)	6 670	32
Расчет по II группе ПС	530(100%)	305	835(100%)	6 670	32



Расчет по методу добавочной прочности (ДП)

Расчет по методу ДП проведен согласно методике СНиП (I-ая группа предельных состояний), нагрузка увеличена на 20%.

1. Расчет плиты перекрытия.

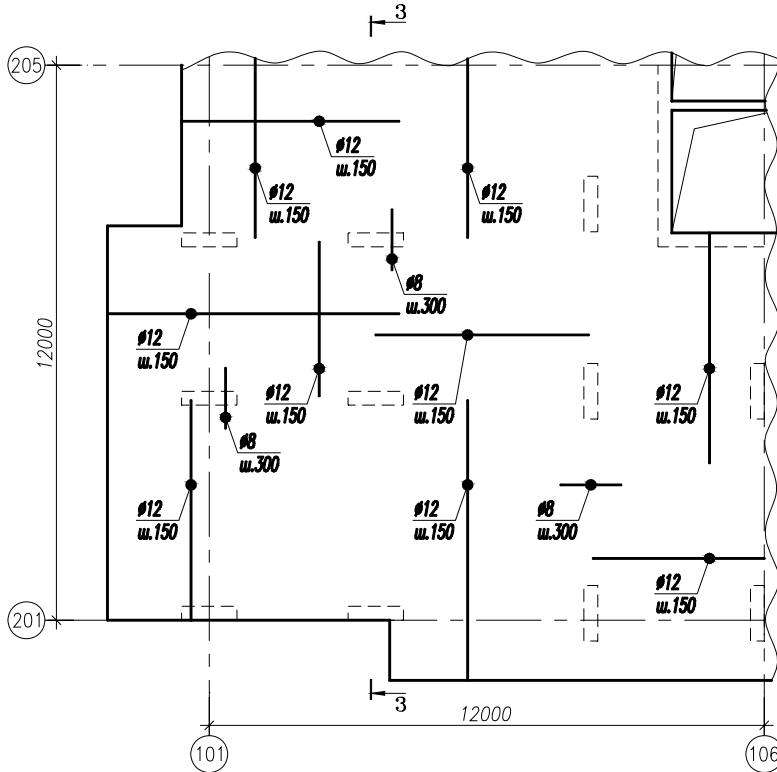


Рис. 31 Фрагмент нижнего армирования плиты перекрытия

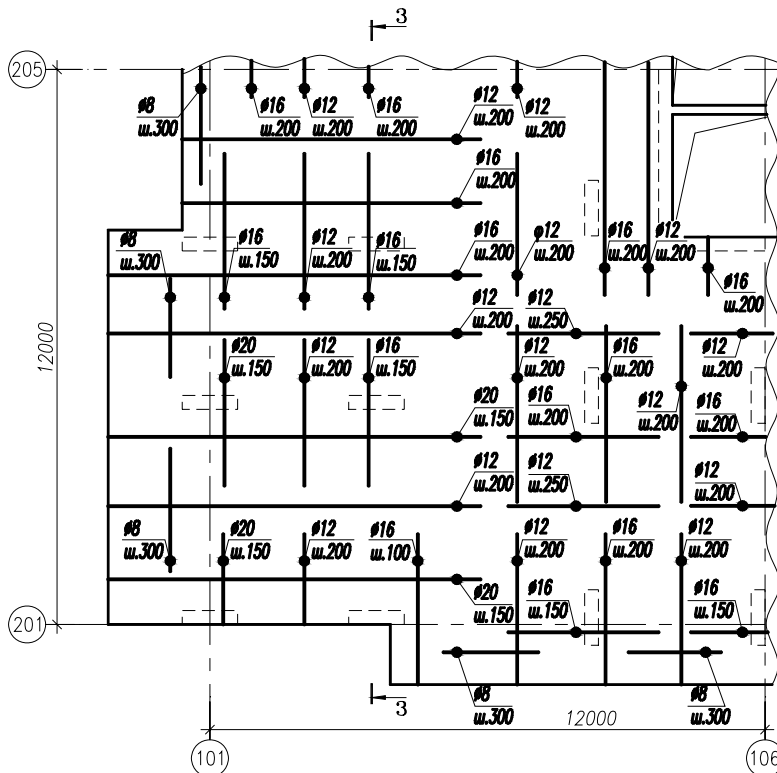
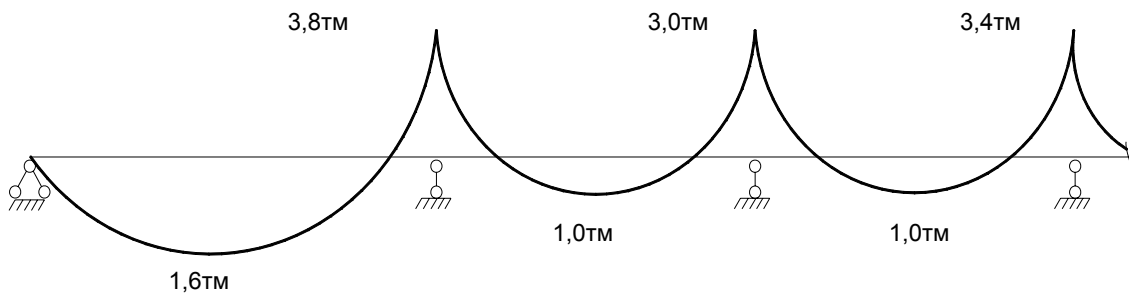
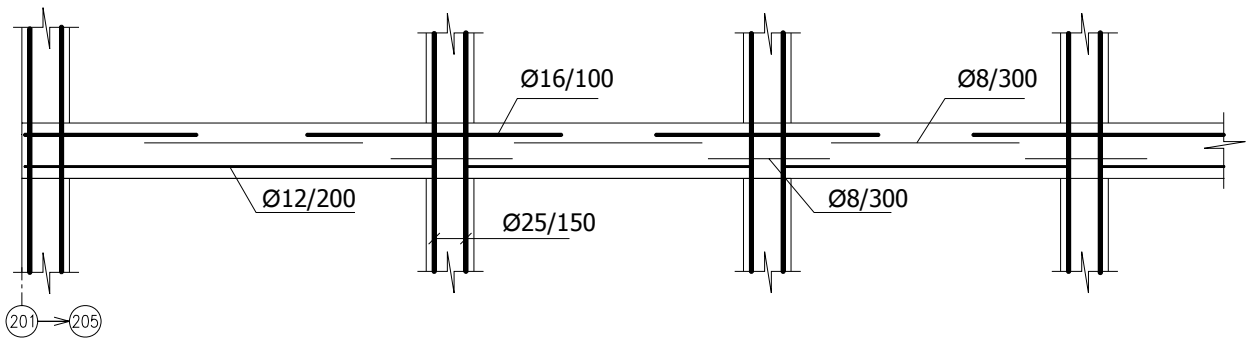


Рис. 32 Фрагмент верхнего армирования плиты перекрытия

Эпюра моментов M_y

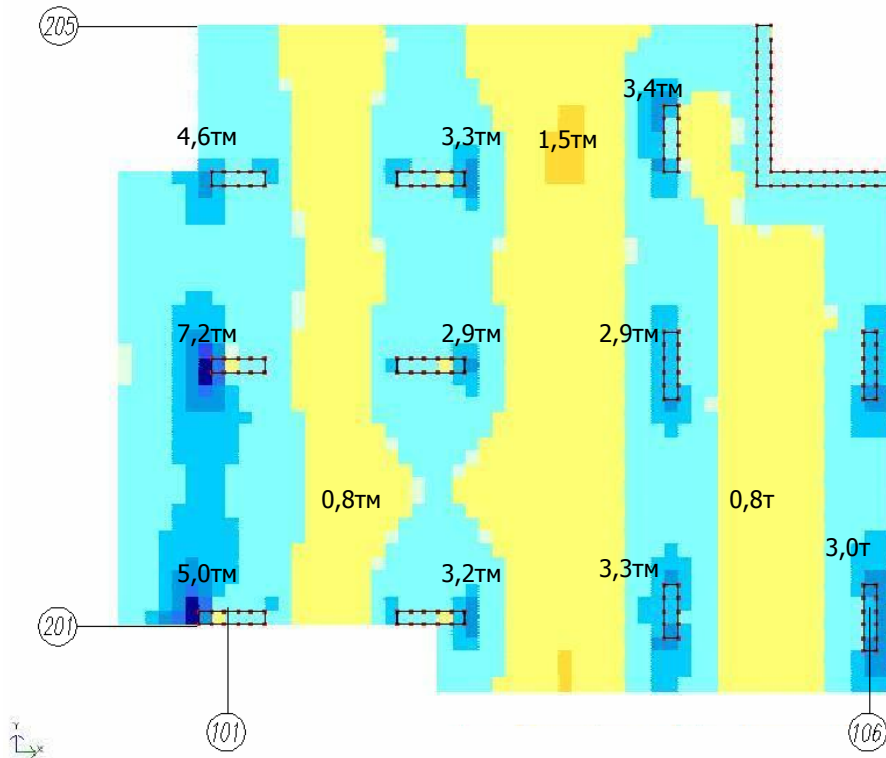


Разрез 3 - 3

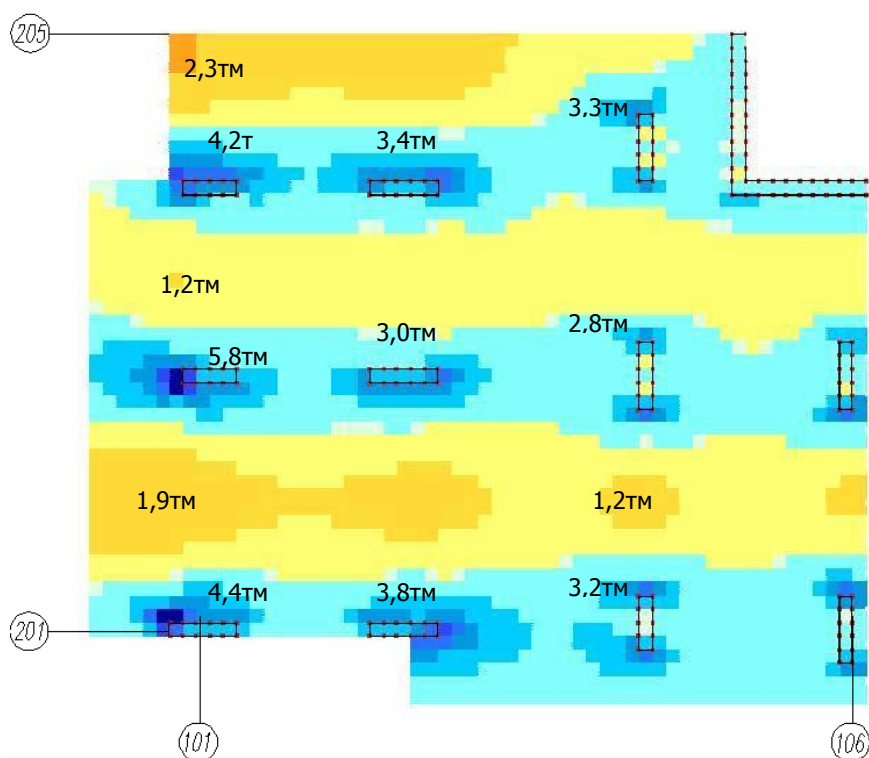


Результаты статического расчета:

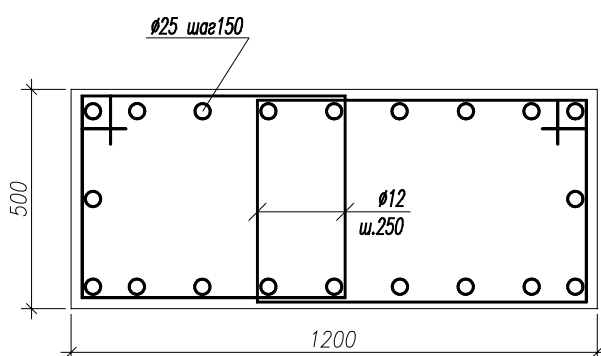
Изополя изгибающих моментов M_x для рассматриваемого фрагмента:



Изополю изгибающих моментов M_y для рассматриваемого фрагмента:



2. Армирование колонны.



Нагрузки:

N = 960 Т;
M = 10 Тм.

3. Затраты труда и материалов

Конструкции	Материалы		Затраченное время, ч
	Бетон, м ³	Арматура, т	
Плиты перекрытия	4 110	560	16
Стены, колонны	2 560	380	16
Итого:	6 670	940	32

Расчет по методу альтернативного пути (АП)

Расчет по методу АП представлен на примере расчета по МГСН.

1. Армирование плиты перекрытия.

Расчет ведется по СНиП (I-ая группа предельных состояний), с учетом выхода из работы одной колонны. Так как из работы может выйти любая колонна, армирование производим сеткой из арматуры $\varnothing 16$ с шагом 150мм – нижнее армирование и сеткой $\varnothing 16$ с шагом 100мм – верхнее армирование.

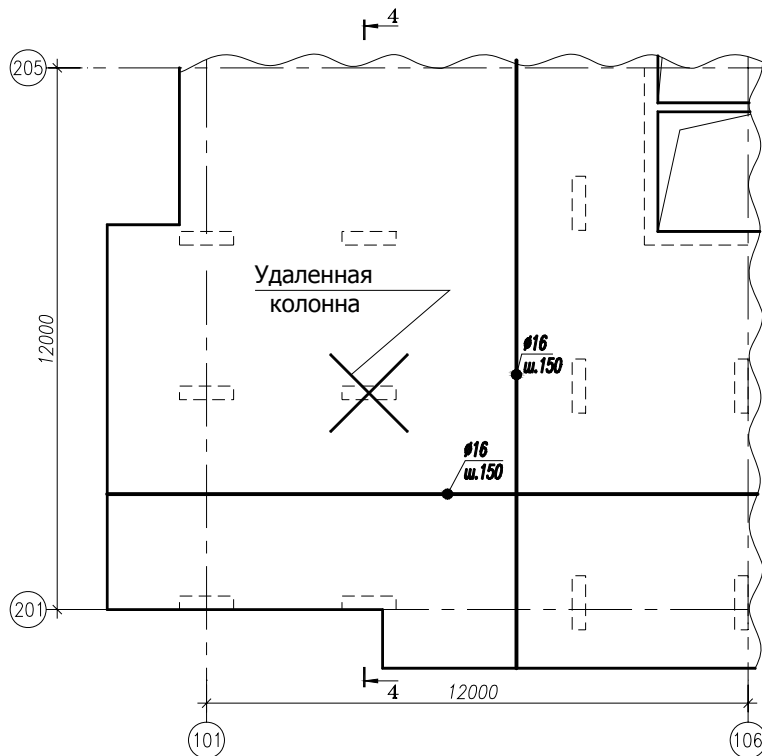


Рис. 33 Фрагмент нижнего армирования плиты перекрытия

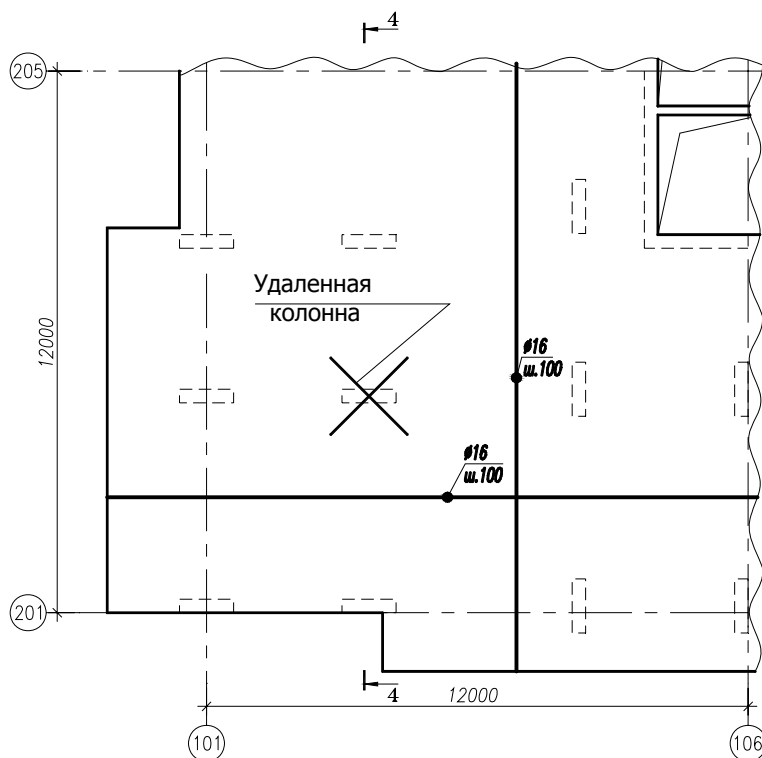
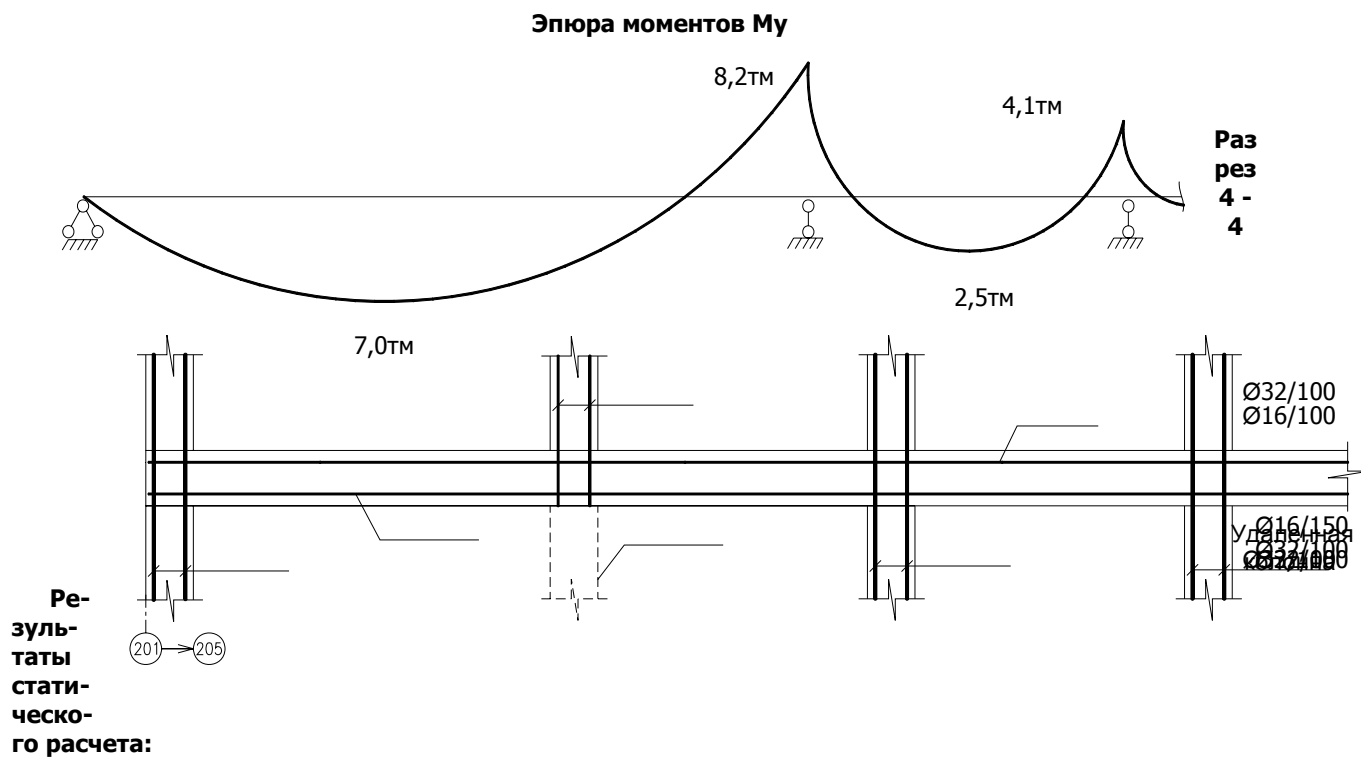
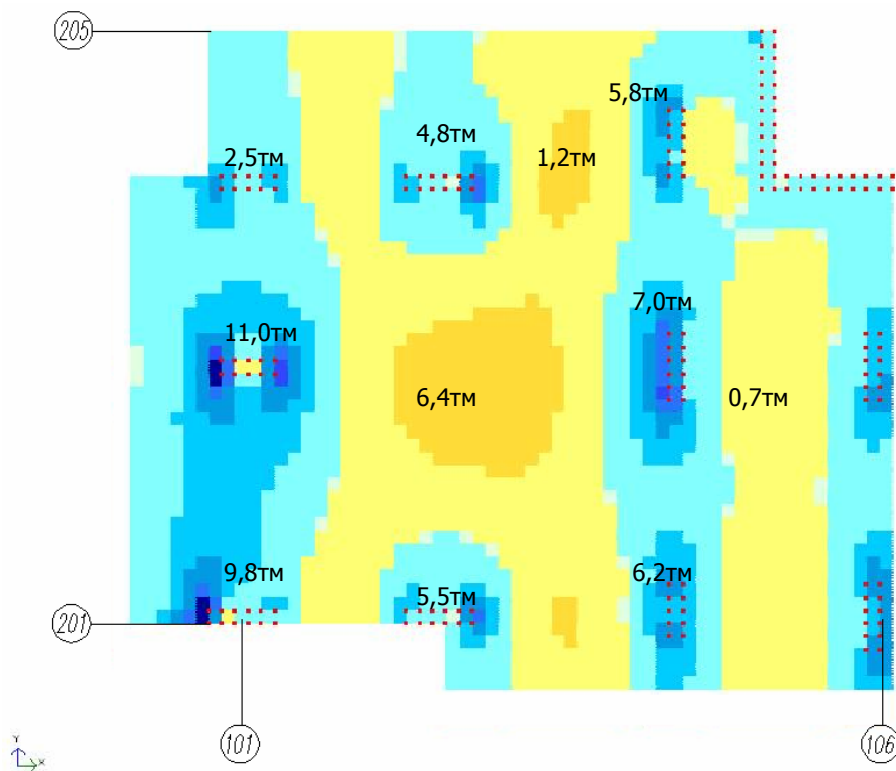


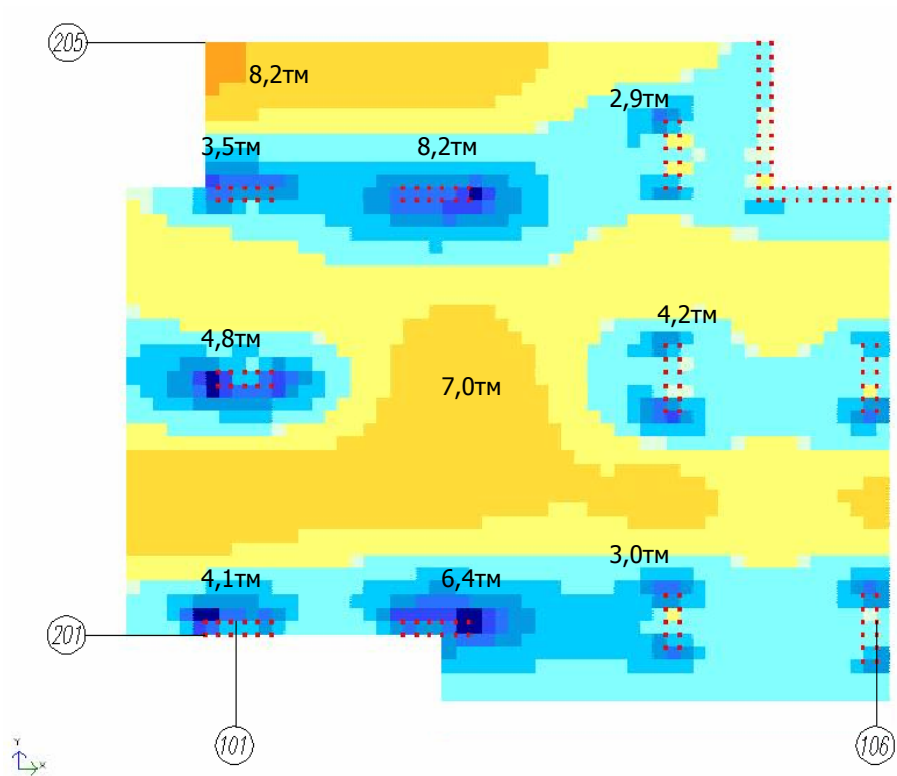
Рис. 34 Фрагмент верхнего армирования плиты перекрытия



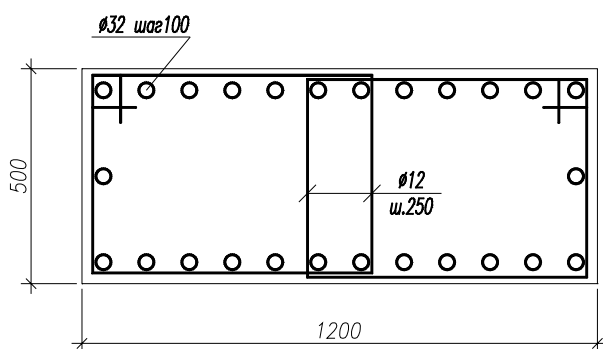
Изополя изгибающих моментов M_x для рассматриваемом фрагменте:



Изополя изгибающих моментов M_y для рассматриваемом фрагменте:



2. Армирование колонны



Нагрузки:

N = 1300 Т;
M = 10 Тм.

3. Затраты труда и материалов

Конструкции	Материалы		Затраченное время, ч
	Бетон, м ³	Арматура, т	
Плиты перекрытия	4 110	745	28
Стены, колонны	2 560	525	20
Итого:	6 670	1270	48

Расчет по методу локальной надежности (ЛН)

Расчет по методу ЛН представлен на примере расчета по строительным нормам Еврокод. Армирование плиты - аналогично расчету по СНиП по II-ой группе предельных состояний. Расчет колонн проведен с учетом их двойной расчетной длины, поскольку в расчетном сценарии допускается возможность разрушения локального участка.

1. Армирование колонны

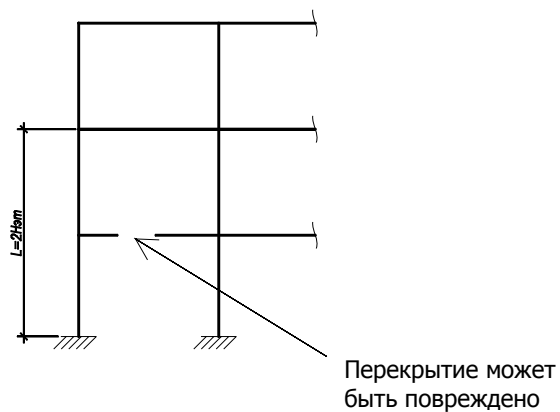
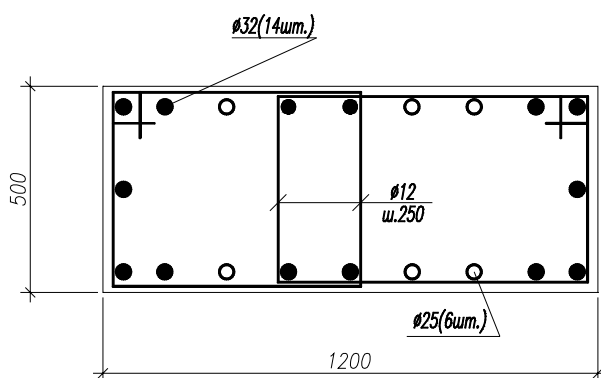


Рис. 35 Расчетная схема



Нагрузки:

$N = 960 \text{ Т};$

$M = 10 \text{ Тм.}$

2. Затраты труда и материалов

Конструкции	Материалы		Затраченное время, ч
	Бетон, м ³	Арматура, т	
Плиты перекрытия	4 110	530	16
Стены, колонны	2 560	450	20
Итого:	6 670	980	36

Расчет по методу усиления связности конструкции (СК)

Расчет по методу СК представлен на примере расчета по UFC.

1. Армирование плиты перекрытия.

В качестве горизонтальных связей предусматриваем внутренние связи-балки в каждой плите перекрытия на растягивающее усилие 38т (требуемое усилие – 30т).

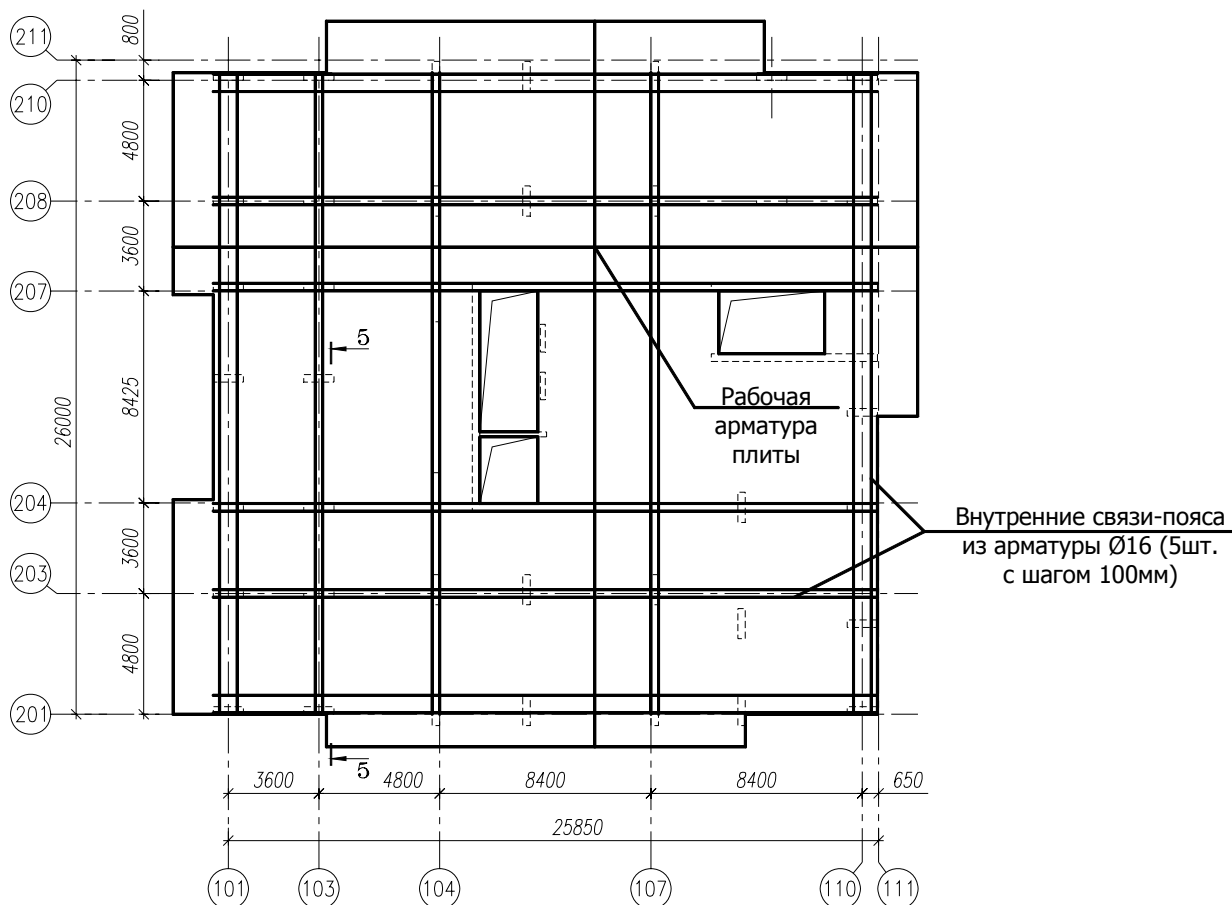
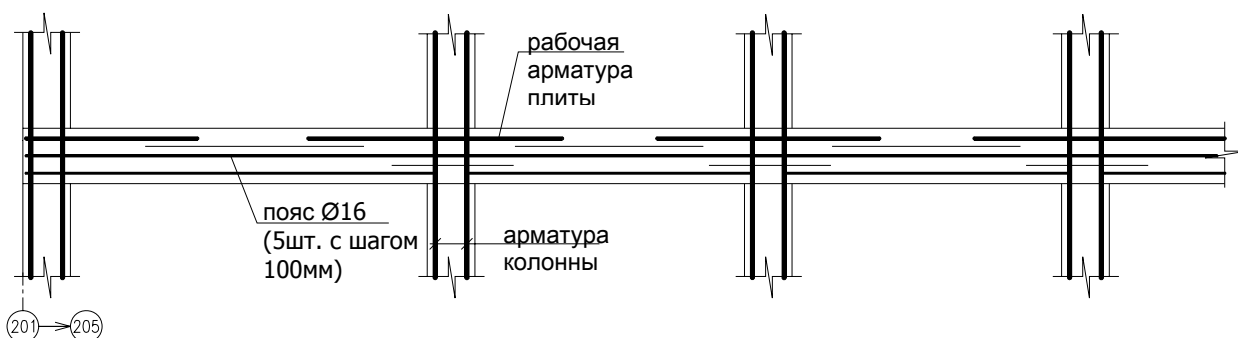


Рис. 36 Усиление горизонтальными связями в плите перекрытия по методу СК.

Разрез 5 - 5



2. Затраты труда и материалов

Конструкции	Материалы		Затраченное время, ч
	Бетон, м ³	Арматура, т	
Плиты перекрытия	4 110	615	24
Стены, колонны	2 560	305	16
Итого:	6 670	920	40

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На примере выполненных условных расчетов каркаса 25-этажного жилого дома на ограничение непропорционального разрушения и устойчивость против прогрессирующего обрушения, можно сделать вывод, что метод альтернативного пути является самым трудоемким из всех рассмотренных методов, и при этом приводит к наибольшим затратам на возведение конструкций зданий и сооружений. При этом следует отметить, что этот метод не является универсальным и не все здания и сооружения можно рассчитать и законструировать таким образом.

В зависимости от специфики различных конструктивных схем и анализа уровня ответственности сооружений, целесообразно использовать наиболее широкий спектр известных в практике методов ограничения непропорционального и прогрессирующего разрушения, как отдельные методы, так и их различные сочетания.

Далее в табличной форме представлено сравнение результатов расчетов по СНиП по I-ой группе предельных состояний (расчет по несущей способности), по СНиП II-ой группе предельных состояний (расчет по деформациям и трещиностойкости, включающий в себя также расчет по несущей способности), с расчетами, выполненными с учетом требований методов против непропорционального разрушения, таких как ДП – добавочная прочность (проведен расчет по СНиП), АП - альтернативный путь (расчет по МГСН), СК – связность конструкций (расчет по UFC) и ЛН – локальная надежность (расчет по Еврокод).

Сравнение методов проектирования против непропорционального разрушения с методикой СНиП

	Плиты перекрытия	Стены, колонны	Всего	Трудозатраты
	Арматура (т)	Арматура (т)	Арматура (т)	часов
СНиП (I-ая гр.п.с.)	455(86%)	305(100%)	760(91%)	32(100%)
СНиП (II-ая гр.п.с.)	530(100%)	305(100%)	835(100%)	32(100%)
ДП (СНиП)	560(106%)	360(118%)	920(110%)	32(100%)
АП (МГСН)	745(140%)	525(172%)	1 270(152%)	48(150%)
СК (UFC)	580(109%)	305(100%)	885(106%)	36(113%)
ЛН (Еврокод)	530(100%)	450(147%)	980(117%)	40(125%)

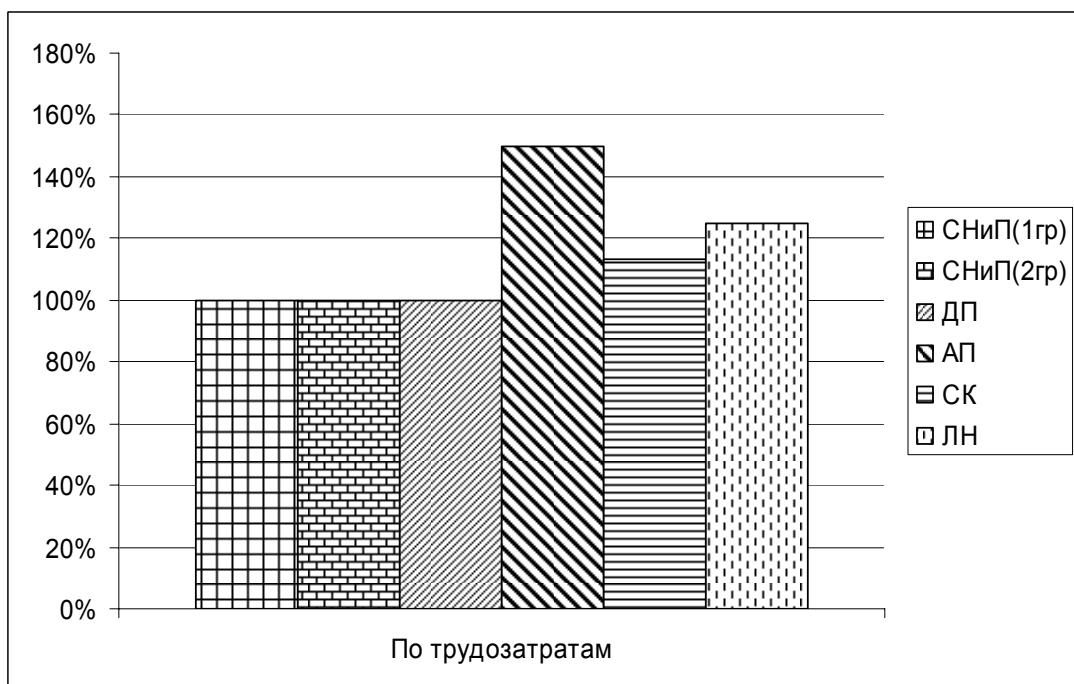
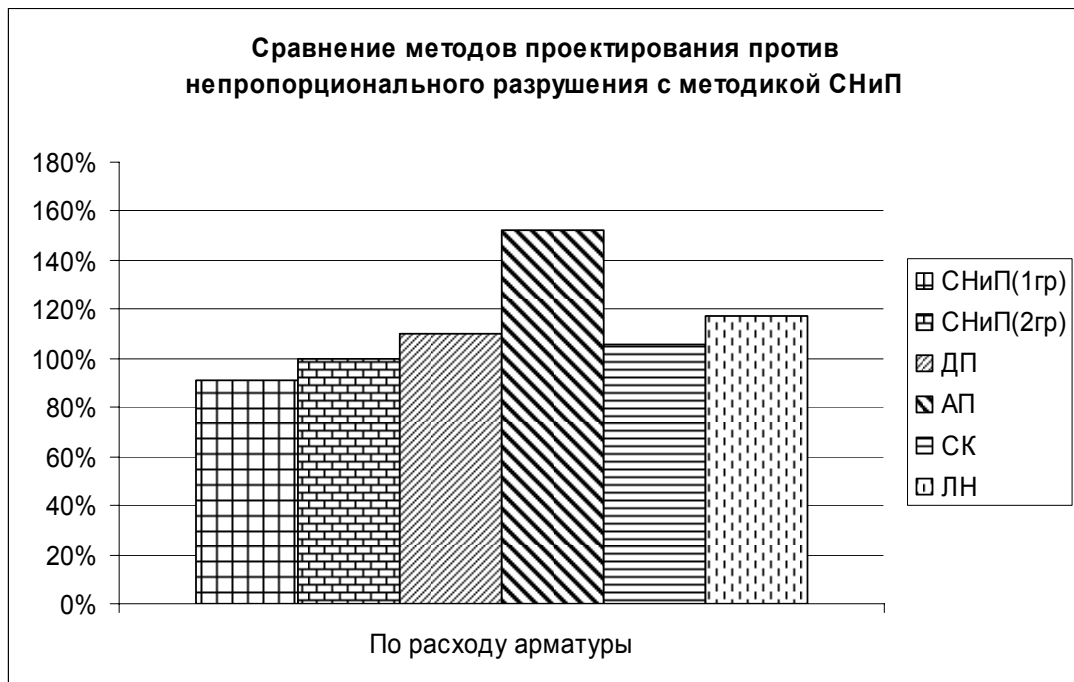


Рис. 37 Диаграммы сравнения методов проектирования против непропорционального разрушения с методикой СНиП

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Федеральный закон РФ: Технический регламент о безопасности зданий и сооружений, 30 декабря 2009
- [2] СНиП 2.01.07-85* Нагрузки и воздействия / Госстрой России. – М.: ГУП ЦПП, 2003. – 44 с.
- [3] ГОСТ 27751-88* Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения по расчету.
- [4] СНиП 52-01-2003 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения / Госстрой России. – М.: ГУП НИИЖБ, 2003. – 24 с.
- [5] СП 52-101-2003 Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения / Госстрой России. – М.: ГУП НИИЖБ, 2003. – 53 с.
- [6] Пособие по проектированию бетонных и железобетонных конструкций из тяжелого бетона без предварительного напряжения арматуры (к СП 52-101-2003) / Госстрой России. – М.: ГУП НИИЖБ, 2005. – 150 с.
- [7] Сергеев Д. Д. Краткий обзор отчета об аварии 22-этажного жилого дома в Лондоне. Обзорная информация № 2. – М.: ГлавАПУ, 1969.
- [8] Рекомендации по защите жилых панельных зданий при чрезвычайных ситуациях / Москомархитектура. М.: МНИИТЭП и НИЦ СтаДиО, 1999
- [9] Рекомендации по защите жилых каркасных зданий при чрезвычайных ситуациях. Москомархитектура. М.: МНИИТЭП и НИЦ СтаДиО, 2002
- [10] Рекомендации по защите высотных зданий от прогрессирующего обрушения. – М.: МНИИТЭП, 2006.
- [11] Рекомендации по защите монолитных жилых зданий от прогрессирующего обрушения / Москомархитектура. М.: МНИИТЭП и НИЦ СтаДиО, НИИЖБ, ЦНИИСК им. Кучеренко, 2005
- [12] МГСН 4.19-05 Временные нормы по проектированию многофункциональных высотных комплексов – М. 2005
- [13] ТСН 31-332-2006 Жилые и общественные высотные здания / Санкт-Петербург, 2006
- [14] МДС 20-2.2008 Временные рекомендации по обеспечению безопасности большепролетных сооружений от лавинообразного (прогрессирующего) обрушения при аварийных воздействиях. М.: ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, 2008
- [15] ISO 2394. General principles on reliability for structures. (Основные принципы надежности сооружений). ISO, 1998
- [16] JCSS Probabilistic Model Code. (Нормы по вероятностному моделированию). JCSS, 2001
- [17] CEB-FIB Model Code. (Типовые нормы). CEB, 1991
- [18] BS EN 1990:2002 Eurocode. Basis of structural design. (Еврокод. Общие положения проектирования конструкций).
- [19] СТБ ЕН 1990-2007. Еврокод. Основы проектирования несущих конструкций.
- [20] BS EN 1991-1-7:2006 Eurocode 1. Actions on structures. General actions. Accidental actions. (Еврокод 1. Нагрузки на конструкции. Основные нагрузки. Случайные воздействия).
- [21] Guide to use of EN 1991-1-7 – Accidental actions. (Руководство по применению норм EN 1991-1-7 – Случайные воздействия). DCLG, London. 2006

- [22] DIN 1055-100 Einwirkungen auf Tragwerke. Teil 100: Grundlagen der Tragwerkspannung - Sicherheitskonzept und Bemessungsregeln. (Воздействия на несущие конструкции. Часть 100: Основы расчета, концепции безопасности и правила определения размеров). DIN, 2001
- [23] Building regulations 2000 (England and Wales). Approved document A. Structure. (Строительные нормы Англии и Уэльса. Свод правил А. Конструкции).
- [24] Progressive collapse analysis and design guidelines for new federal office buildings and major modernisation projects. (Рекомендации по расчету прогрессирующего обрушения и проектированию новых федеральных офисных зданий и крупных реконструкций). GSA, 2003
- [25] International Building Code. (Международные строительные нормы). ICC, 2009
- [26] International Fire Code. (Международные нормы по пожарной безопасности). ICC, 2009
- [27] International Code Council Performance Code for Buildings and Facilities. (Функциональные нормы для зданий и сооружений Совета по международным нормам). ICC, 2009
- [28] NFPA 5000 Building construction and safety code. (Строительные нормы и правила безопасности при строительстве). NFPA, 2009
- [29] A Prestandard Prospectus: robustness and collapse resistance for buildings. (Проект стандарта: надежность зданий и предотвращение прогрессирующего обрушения). SEI, 2006 (www.seinstitute.org/files/pdf/progressivecollapse06.pdf)
- [30] New York Building Code. (Строительные нормы Нью-Йорка).
- [31] National Building Code of Canada 2005. (Национальные строительные нормы Канады).
- [32] UFC 4-023-03 Design of buildings to resist progressive collapse. (Проектирование зданий для предотвращения прогрессирующего обрушения). DoD, 2005
- [33] ANSI A58.1-82 Minimum design loads for buildings and other structures. (Минимальные расчетные нагрузки на здания и сооружения). ANSI, 1982
- [34] ASCE 7-05 Minimum design loads for buildings and other structures. (Минимальные расчетные нагрузки на здания и сооружения). ASCE, 2005
- [35] ACI 318 Building code requirements for structural concrete and commentary. (Строительные нормы по проектированию железобетонных конструкций с комментариями). ACI, 2007
- [36] FEMA 427. Primer for design of commercial buildings to mitigate terrorist attack. (Пособие по проектированию коммерческих зданий для противодействия террористическим атакам). FEMA, 2003
- [37] NISTIR 7396. Best practice for reducing the potential for progressive collapse in buildings. (Передовой опыт снижения вероятности прогрессирующего обрушения зданий). NIST, 2007
- [38] Mitigating the potential for progressive disproportionate structural collapse. ASCE. Journal of Performance of Constructed Facilities. Special issue. November 2006. Volume 20, number 4. (Снижение вероятности непропорционального прогрессирующего обрушения конструкций. Журнал ASCE об эксплуатационных характеристиках построенных сооружений. Специальный выпуск, ноябрь 2006 г., том 20, №4)
- [39] Gulvanessian H., Calgaro J-A., Holicky M. Designers Guide to EN 1990. Eurocode: Basic of structural design (Галванессян Х., Кэлгероу Дж.-Э., Холики М. Руководство для проектировщиков по применению норм EN 1990. Еврокод: Основы проектирования конструкций), 2002
- [40] Ditlevsen O., Madsen H.O. Structural reliability methods. (Дитлевсон О, Мэдсен Х.О. Методы обеспечения надежности конструкций), 1996
- [41] Madsen H. O., Krenk S., Lind N. Methods for structural safety. (Мэдсен Х.О., Кренк С., Линд Н. Методы обеспечения безопасности конструкций), 1986
- [42] Schneider J. Introduction to safety and reliability of structures. (Дж.Шнайдер. Вводный курс по безопасности и надежности конструкций). IASBEE, 1977

- [43] Strarossek U. Progressive collapse of structures. (Староссек Ю. Прогрессирующее обрушение конструкций), 2009
- [44] FEMA 277. The Oklahoma City bombing. Improving building performance through multihazard mitigation. (Подрыв в Оклахома-Сити. Улучшение функционирования здания посредством защиты от различных опасных воздействий).FEMA, 1998
- [45] NCSTAR 1. Final report on the collapse of the World Trade Center towers. (Итоговый отчет по обрушению башен Центра международной торговли). NIST, 2005
- [46] Перельмутер А. В., Сливкер В. И. Расчетные модели сооружения и возможность их анализа, 2007
- [47] Стрелецкий Н.С. Основы статического учета коэффициента запаса прочности сооружений. М.: 1947
- [48] Балдин В. А., Голденблат И. И., Коченов В. М., Пильдиш М. Я., Таль К. Э. Расчет строительных конструкций по предельным состояниям – М, 1951
- [49] Болотин В.В. Статические методы в строительной механике. М.: 1961
- [50] Болотин В.В. Применение методов теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений М.: 1971
- [51] Ржаницин Л. Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность. – М.: Стройиздат, 1978. - 239 с.
- [52] Болотин В.В. Методы теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений. М.: Стройиздат, 1982. -351 с.
- [53] Лужин О. В. Вероятностные методы расчета сооружений. М.: МИСИ им. В.В. Куйбышева, 1983
- [54] Райзер В.Д. Методы теории надежности в задачах нормирования расчетных параметров строительных конструкций. М.: Стройиздат, 1986. – 192 с.
- [55] Райзер В.Д. Расчет и нормирование надежности строительных конструкций. М.: Стройиздат, 1995. – 352 с.