УДК 624.04

© С. В. Осыков, аспирант
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия)
E-mail: osykovvv@gmail.com

DOI 10.23968/1999-5571-2020-17-4-72-79

© S. V. Osykov, post-graduate student
(Saint Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia)
E-mail: osykovvv@gmail.com

УЧЕТ ПРОГРЕССИРУЮЩЕГО ОБРУШЕНИЯ ГРАЖДАНСКИХ ЗДАНИЙ В ЗАРУБЕЖНЫХ И ОТЕЧЕСТВЕННЫХ НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТАХ

TAKING INTO CONSIDERATION THE PROGRESSIVE COLLAPSE OF CIVIL BUILDINGS IN FOREIGN AND DOMESTIC STANDARDS

Выполнен обзор зарубежных и отечественных нормативных документов по проектированию зданий, устойчивых к прогрессирующему обрушению. Показана динамика развития методик расчета конструкций при внезапном удалении несущего элемента. Выделены основные отличия российских норм от зарубежных рекомендаций в части расчета зданий на прогрессирующее обрушение.

Ключевые слова: прогрессирующее обрушение, внезапное удаление элементов, нормы и рекомендации.

The paper presents a review of foreign and domestic design standards for progressive collapse resistant buildings. The development of methods for structural analysis of buildings under a sudden bearing element removal is shown. The main differences between Russian standards and foreign guidelines in terms of progressive collapse analysis of buildings are highlighted.

Keywords: progressive collapse, sudden element removal, standards and guidelines.

Интерес к проблеме прогрессирующего обрушения возник после частичного обрушения бокового фасада 22-этажного панельного дома Ronan Point в 1968 году в Лондоне [1]. После данной аварии в строительные нормы Великобритании было внесено изменение, и в 1968 г. были изданы «Стандарты по недопущению прогрессирующего обрушения в крупнопанельных конструкциях» [2].

Произошедшие после этого другие трагические события [3], для которых общей чертой был фактор диспропорциональности между причиной и величиной конечного повреждения, показали, что здания, спроектированные в соответствии с общепринятыми проектными нормами, могут испытывать недостаток прочности, необходимой для того, чтобы противостоять локальному повреждению, частичному или, в некоторых случаях, полному разрушению. Это привело к появлению в разных странах нормативных документов, регламентирующих стратегии защиты зданий и сооружений от аварийных воз-

действий, вызванных внезапным выключением одного из несущих элементов [4].

В США термин «прогрессирующее обрушение» был впервые введен в 1972 г. в нормах ANSI A58.1-1972 [5]. В дальнейшем было выпущено несколько редакций данных норм, в которых указывались комбинации нагрузок и стратегии проектирования зданий.

Согласно редакции 2002 года (ASCE 7-02)¹, существовало два основных подхода к проектированию для снижения вероятности возникновения прогрессирующего обрушения: косвенный и прямой методы. Общие руководящие принципы косвенного метода предусматривали необходимые планировочные решения, интегрированную систему связей, внутренние диафрагмы жесткости и др.

Подходы прямого проектирования включали в себя явное рассмотрение устойчивости к прогрессирующему обрушению при чрезвычайных воздействиях. К ним относились: метод альтернативного пути, который требовал обеспечения

¹ ASCE 7-02. Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, Reston, VA 20191-4400, 2000.

восприятия нагрузки от элементов, потерявших опору, за счет других элементов и способности работать при изменившейся расчетной схеме, и метод особой локальной прочности.

В 2000 г. в США выходят «Рекомендации по проектированию и расчету на прогрессирующее обрушение для новых государственных зданий и проектов крупных реконструкций». Затем в эти нормы, изначально ориентированные преимущественно на железобетонные конструкции, были внесены изменения в части расчета и проектирования стальных рамных конструкций, и в 2003 г. вышла обновленная редакция — GSA 2003².

В качестве основного метода расчета предлагалось использовать статический линейный упругий расчет. Допускалось применять нелинейный метод, подразумевавший использование статических или динамических методов анализа на основе метода конечных элементов, которые учитывают как физическую, так и геометрическую нелинейности.

При выполнении статического расчета применялась следующая комбинация нагрузок:

$$2(DL + 0,25LL), \quad (1)$$

где DL — постоянная нагрузка; LL — временная нагрузка.

При этом увеличенная нагрузка прикладывалась равномерно на всю конструкцию. В случае динамического расчета использовалась эта же комбинация, но без коэффициента 2.

В нормах GSA 2003 отмечалось, что удаление элементов должно быть мгновенным. Так, при выполнении динамического расчета промежуток времени, за который вертикальный элемент должен быть удален, составляет не более 1/10 периода колебаний расчетной модели конструкции, поврежденной в результате аварийного воздействия, по форме колебаний, ассоциируемой с реакцией конструкции на удаление элемента.

Для оценки прочности элементов конструкций и их соединений вводились коэффициенты требуемой прочности DCR, которые определялись по следующей формуле:

$$DCR = \frac{Q_{UD}}{Q_{CE}}, \quad (2)$$

где Q_{UD} — действующая сила, определенная в элементе или соединении (момент, продольная сила, поперечная сила и совместное действие сил); Q_{CE} — предельная прочность элемента или соединения.

Алгоритм выполнения линейного расчета допускал последующие отказы элементов, а нелинейная работа в этом случае имитировалась с помощью установки пластических шарниров на концах элементов, для которых значение коэффициента по моменту превышало предельно допустимое. При выполнении нелинейных расчетов развитие деформаций ограничивалось. В рекомендациях были приведены определенные эмпирическим путем максимально допустимые пределы пластичности и углов поворота для различных конструктивных элементов.

В 2005 году в США выходят унифицированные требования к зданиям и сооружениям «Проектирование зданий, устойчивых к прогрессирующему обрушению» — UFC 2005³. В данных нормах были подробнее рассмотрены как конструктивные, так и расчетные мероприятия для защиты от прогрессирующего обрушения.

Использовались два метода проектирования: метод связывающих сил и метод альтернативного пути. Первый метод по большей части был конструктивным методом защиты зданий от прогрессирующего обрушения и его смысл в том, что здание механически связывается, тем самым усиливается непрерывность и пластичность конструкции.

В методе альтернативного пути было возможно применение трех способов расчета: линейного статического, нелинейного статического и нелинейного динамического. В линейном расчете материал рассматривался как линейно упругий. В целом процедура расчета была схожа с описанной в нормах GSA 2003.

В нелинейном статическом и динамическом расчетах учитывались физическая и геометрическая нелинейности. Образование пластических шарниров должно было учитываться программным комплексом. Нагрузки прикладывались к модели пошагово, предлагалось разбивать загрузку минимум на 10 шагов. Одним из возможных способов учета нелинейной работы ма-

² Progressive Collapse Analysis and design guidelines for new federal office Buildings and major modernization projects, June 2003, U.S. General Service Administration and Applied Research Associates.

³ UFC-4-023-03. Unified Facilities Criteria. Design of Building to Resist progressive collapse, January, 2005.

териала было использование в расчетной модели нелинейных шарниров.

По сравнению с нормами GSA 2003, для статических методов следовало использовать иную комбинацию нагрузок:

$$2,0 [(0,9 \text{ or } 1,2) D + (0,5L \text{ or } 0,2S)] + 0,2W, \quad (3)$$

где D — постоянная нагрузка; L — временная нагрузка; S — снеговая нагрузка; W — ветровая нагрузка.

Увеличенная нагрузка прикладывалась согласно схеме, изображенной на рисунке.

Расчет конструктивных элементов и их соединений следовало выполнять не только по прочности, но и по деформациям. В отличие от рекомендаций GSA 2003, в данных нормах проверка деформаций проводилась вне зависимости от выбранного метода расчета (в рекомендациях GSA 2003 она была необходима только при использовании нелинейных методов).

В 2009 г. выходит обновленная редакция данных норм — UFC 2009⁴. Наибольшие изменения коснулись метода альтернативного пути. Авторы этого документа начали частичное совмещение норм по прогрессирующему обрушению и сейсмостойкому строительству. В итоге в обновленной редакции часто приводятся ссылки на американские нормы по сейсмостойкости ASCE 41-06⁵.

⁴ UFC-4-023-03. Unified Facilities Criteria. Design of Building to Resist progressive collapse, July, 2009.

⁵ Seismic Rehabilitation of Existing Buildings (41-06).

Согласно ASCE 41-06, в зависимости от конструктивной системы параметры НДС подразделялись на проверяемые по деформациям — пластические параметры и проверяемые по усилиям — непластические, хрупкие параметры. Первые приводили к возникновению в элементах конструкции пластических деформаций, вторые — к хрупкому разрушению.

Исходя из этого, при выполнении линейного расчета существовало два типа несущей способности: несущая способность пластического параметра Q_{CE} и несущая способность хрупкого параметра Q_{CL} . Значение Q_{CE} определялось как среднее значение предела прочности Q (предела текучести, растяжения, сжатия и т. д., в зависимости от случая) для совокупности аналогичных элементов. При вычислении Q_{CE} учитывались резервы несущей способности за счет работы в пластической стадии. Значение Q_{CL} определялось как среднее значение предела прочности Q минус одно среднеквадратическое отклонение. Значения этих двух параметров были приведены в документе ASCE 41-06.

В соответствии с вышесказанным, в нормах UFC 2009 для расчета конструкции с удаленным элементом использовались две различные комбинации нагрузок. При использовании линейного статического метода для анализа пластическо-

Схема приложения нагрузок согласно UFC 2005

го параметра, применялась следующая комбинация вертикальных нагрузок:

$$G_{LD} = \Omega_{LD} [(0,9 \text{ or } 1,2) D + (0,5L \text{ or } 0,2S)], \quad (4)$$

где G_{LD} — увеличенная вертикальная нагрузка для параметров, проверяемых по деформации; Ω_{LD} — коэффициент увеличения нагрузки для параметров, проверяемых по деформации; D — постоянная нагрузка; L — временная нагрузка; S — снеговая нагрузка.

Воздействие горизонтальных нагрузок учитывалось формулой

$$L_{LAT} = 0,002\Sigma P, \quad (5)$$

где L_{LAT} — горизонтальная нагрузка; ΣP — сумма вертикальных нагрузок.

При анализе хрупкого параметра в формуле (4) использовался коэффициент Ω_{LF} .

Коэффициенты DCR определялись соответственно для двух случаев:

$$DCR = \frac{Q_{UD}(Q_{UF})}{Q_{CE}(Q_{CL})}. \quad (6)$$

Основным нововведением по сравнению с предыдущими редакциями стало разделение единого коэффициента динамичности по нагрузке, равного 2, на коэффициенты LIF и DIF (Load Increase Factor и Dynamic Increase Factor соответственно). Данное изменение было основано на результатах исследований, проведенных группой ученых и представленных в окончательном виде в работе [6].

Первый коэффициент, LIF (Ω_{LD}), использовался в линейном расчете и включал в себя значение параметра m_{LIF} , с помощью которого учитывалась пластическая работа конструкции при внезапном удалении элемента. Параметр m_{LIF} — это минимальное значение из всех m , вычисленных для горизонтальных конструктивных элементов (балок, элементов стен) и их соединений, которые непосредственно примыкают к верхнему узлу удаляемого элемента и к вертикальной цепочке элементов, расположенной над удаляемым элементом. По предложенной в нормах методике проектировщик вычислял значение m_{LIF} и определял коэффициент LIF. После выполнения расчета значения коэффициентов DCR в случае оценки пластического параметра сравнивались с наименьшим значением m -фактора (m_{LIF}), в случае оценки хрупкого параметра значения DCR должны были быть меньше 1. При оценке

хрупкого параметра m -фактор не применялся и $\Omega_{LF} = 2$.

При использовании нелинейного статического метода расчета к конструкции прикладывались те же комбинации нагрузок, что и в линейном методе, но с коэффициентом DIF (Ω_N). Коэффициент Ω_N включал в себя отношение θ_{pra}/θ_y , где θ_{pra} — угол пластического поворота, θ_y — угол предельного упругого поворота. Предельные значения углов пластического поворота θ_{lim} были приведены в нормах UFC 2009, но допускаемая величина θ_{pra} задавалась на усмотрение проектировщика, так чтобы соблюдалось условие $\theta_y \leq \theta_{pra} \leq \theta_{lim}$. Значения углов предельного упругого поворота определялись в соответствии с требованиями UFC 2009 и ASCE 41-06.

Процедура выполнения расчетов была аналогична описанной в предыдущей редакции норм 2005 года. Мгновенное удаление элемента в динамическом методе расчета моделировалось согласно методике, описанной в редакции GSA 2003. Любые повреждения конструкций, расположенных над удаляемым элементом, в данной версии норм не допускались.

После 2009 г. было выпущено несколько актуализированных редакций норм UFC 2009 и GSA 2003. Последними являются версии 2016 г. (UFC-4-023-03 и GSA 2016)^{6,7}. Методика расчета в них осталась прежней. Изменения коснулись комбинаций нагрузок, в которых теперь не учитывается горизонтальная составляющая, и допустимости использования линейного статического расчета. Теперь такой метод можно было использовать, только если в здании не более 10 этажей и если значение DCR не превышает 2 в зданиях с нерегулярной конструктивной формой. Параметры нерегулярности приведены там же, в UFC-4-023-03 и GSA 2016.

В европейских нормах стратегии и правила защиты зданий от действия особых воздействий приведены в Еврокоде EN 1991-1-7 «Воздействия на конструкции. Особые воздействия»⁸, вышедшем в 2006 г.

⁶ UFC-4-023-03 (Including Change 3, 1 November 2016). Unified Facilities Criteria. Design of Building to Resist progressive collapse, July, 2009.

⁷ GSA. Alternate path analysis & design guidelines for progressive collapse resistance, October 2016.

⁸ BS 8110-2:1985 (Reprinted, incorporating Amendments Nos. 1, 2 and 3). Structural use of concrete. Part 2: Code of practice for special circumstances. 2005.

Основное внимание в нормах EN 1991-1-7 уделено расчету сооружений на особые воздействия, проектированию определенных элементов конструкции как ключевых и конструктивным методам защиты, таким как метод связывающих сил. Проектирование конструкций, сохраняющих устойчивость при локальном повреждении, требует условного удаления каждой опорной колонны или балки, поддерживающей колонну, либо любой секции несущей стены и выполнения расчета без удаленного элемента.

Несмотря на то что в рассмотренном нормативном документе указана расчетная комбинация нагрузок, а также оговорены допустимые пределы повреждений, описание самой процедуры расчета конструкций, в отличие от американских и отечественных норм, не приведено. Способы учета внезапного выключения элемента из работы также не указаны.

Кроме Еврокода, требования к устойчивости против прогрессирующего обрушения приведены в британских стандартах по конструктивному применению железобетона BS 8110-2:1985⁹. В этом документе, в разделе «Живучесть», указаны упомянутые выше требования по устройству горизонтальных и вертикальных связей (метод связывающих сил), конструированию и расчету ключевых элементов и метод альтернативного пути. Опять же, для данного метода процедура расчета не описана.

В отечественных нормативных документах термин «прогрессирующее обрушение» был впервые введен в «Пособии по проектированию жилых зданий к СНиП 2.08.01–85. Вып. 3»¹⁰ от 1986 г. В нем были даны рекомендации по обеспечению устойчивости к прогрессирующему (цепному) разрушению крупнопанельных зданий различных конструктивных схем. Требования к защите зданий из монолитного и сборного железобетона, а также зданий из других материалов при аварийных воздействиях в пособии не были указаны, т. е. сам термин «прогрессирующее обрушение» применялся исключительно к панельным зданиям.

⁹ BS 8110-2:1985 (Reprinted, incorporating Amendments Nos. 1, 2 and 3) Structural use of concrete. Part 2: Code of practice for special circumstances. 2005.

¹⁰ Пособие по проектированию жилых зданий. Вып. 3. Конструкции жилых зданий (к СНиП 2.08.01–85). ЦНИИЭП жилища. М., 1986.

В рассматриваемом документе приводились возможные сценарии возникновения наиболее опасных локальных разрушений, описывались механизмы прогрессирующего обрушения применительно к панельным зданиям, давалась характеристика расчетных моделей. Расчет следовало проводить на особое сочетание нагрузок, включающее постоянные и временные длительные нагрузки, а также воздействие возможных локальных разрушений. Коэффициенты сочетаний и надежности принимались равными единице. Расчетные характеристики для бетонных и железобетонных элементов предлагалось повышать за счет использования коэффициентов надежности.

Основным методом расчета зданий, описанным в документе, являлся кинематический метод теории предельного равновесия. Согласно ему для каждого из выбранных механизмов прогрессирующего обрушения работа внешних нагрузок U на возможных перемещениях не должна превышать работу внутренних сил W . Применение данного метода было возможно только при обеспечении пластичной работы отдельных панелей и связей между ними в предельном состоянии. Конкретных указаний по построению упругой модели, так же как и способов учета внезапного выключения элементов из работы, в пособии не приводилось. Ограничения деформаций в данном документе не нормировались.

В период с 1999 по 2006 г. методики расчета на прогрессирующее обрушение для различных типов зданий были изложены в серии рекомендаций^{11,12,13,14,15}. Основное внимание в них уделялось проектированию конструктивных мер защиты против прогрессирующего обрушения.

Для монолитных высотных зданий был указан коэффициент динамичности к постоянной

¹¹ Рекомендации по предотвращению прогрессирующих обрушений крупнопанельных зданий / Москомархитектура. Введ. 1999-08-24. М.: ГУП НИИАЦ, 1999. 35 с.

¹² Рекомендации по защите зданий с несущими кирпичными стенами при чрезвычайных ситуациях / Москомархитектура. Введ. 2002-10-18. М.: ГУП НИИАЦ, 2002. 14 с.

¹³ Рекомендации по защите жилых каркасных зданий при чрезвычайных ситуациях / Москомархитектура. Введ. 2002-10-18. М.: ГУП НИИАЦ, 2002. 20 с.

¹⁴ Рекомендации по защите монолитных жилых зданий от прогрессирующего обрушения / Москомархитектура. Введ. 2005-07-11. М.: ГУП НИИАЦ, 2005. 24 с.

¹⁵ Рекомендации по защите высотных зданий от прогрессирующего обрушения. М.: ГУП НИИАЦ, 2006. 34 с.

и длительной нагрузкам, равный $k_f = 1,5$, при расчете перекрытий на восприятие веса обрушившегося участка перекрытия вышележащего этажа. Основными методами расчета были кинематический метод теории предельного равновесия и статический расчет зданий с измененной конструктивной схемой в результате локального разрушения. Выключение элементов из работы предлагалось моделировать путем снижения модуля упругости удаленных элементов таким образом, чтобы усилия в них были практически равными нулю. Расчетные прочностные и деформационные характеристики материалов при этом принимались равными их нормативным значениям.

Следующим этапом развития нормативной базы в части защиты зданий от ЧС является выход в 2008 г. временных рекомендаций МДС 20-2.2008¹⁶, регламентирующих проблему для большепролетных сооружений, а также выход двух стандартов организаций — СТО 36554501-014-2008¹⁷ и СТО-008-02495342-2009¹⁸.

В рекомендациях МДС 20-2.2008 впервые в отечественных нормативных документах появляется третий метод расчета на прогрессирующее обрушение, называемый нелинейным динамическим. Этот метод предполагал учитывать геометрическую и физическую нелинейность, а также выполнять расчет на мгновенное удаление элементов и анализировать работу системы с учетом затухания колебаний, т. е. учитывать демпфирование. Статический метод расчета в рекомендациях был разделен на линейный и нелинейный.

В стандарте СТО-008-02495342-2009 для монолитных конструкций были конкретизированы расчетные схемы: они подразделялись на первичные, принятые для условий нормальной эксплуатации, и вторичные, полученные из первич-

ных путем выключения вертикальных несущих элементов при локальном разрушении. В данном СТО были указаны нагрузки, учитываемые при расчете на прогрессирующее обрушение, тем не менее стандарт не давал рекомендаций по учету внезапности выключения элементов из работы.

Стоит также отметить, что в период с 2001 по 2012 г. необходимость проведения расчета на аварийное воздействие фигурировала в ряде других нормативных документов^{19,20,21}.

В 2018 г. выходит первый в России свод правил по защите зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения — СП 385.1325800.2018²². В этом документе, а также в методическом пособии к нему²³, обобщается весь накопленный в отечественных источниках материал по расчету зданий и сооружений на прогрессирующее обрушение и даются более подробные характеристики расчетных моделей, методов расчета и учета особенностей работы материалов.

Первичные и вторичные расчетные схемы теперь подразделяются на схемы первого и второго уровня. Схема второго уровня получается из схемы первого уровня путем вырезания фрагмента схемы с удаляемым элементом. Отброшенная часть при этом заменяется реакциями. Сами расчетные модели должны учитывать реальную диаграмму работы материала, т. е. проводить расчет необходимо с учетом физической нелинейности.

В отличие от предыдущих норм, в СП 385.1325800.2018 прогибы изгибаемых элементов ограничивались величиной, равной $1/50$ длины пролета. Главным же нововведением стало появление квазистатического метода расчета, в котором мгновенное удаление выключаемого элемента моделируется усилиями (M , N), определенными при расчете по первичной

¹⁹ МГСН 3.01-01. Жилые здания / Правительство Москвы. Введ. 2001-10-02. М.: ГУП НИИАЦ, 2001. 84 с.

²⁰ МГСН 4.19-05. Временные нормы и правила проектирования многофункциональных высотных зданий и зданий-комплексов в городе Москве / Правительство Москвы. Введ. 2005-12-28. М.: ГУП НИИАЦ, 2005. 126 с.

²¹ ТСН 31-332-2006. Жилые и общественные высотные здания. Санкт-Петербург / Правительство Санкт-Петербурга. Введ. 2005-12-23. СПб.: Стройиздат, 2006. 58 с.

²² СП 385.1325800.2018. Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Введ. 05.07.2018. М.: ФГУП «Стандартинформ», 2018. 26 с.

²³ Проектирование мероприятий по защите зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения: метод. пособие. М., 2018. 158 с.

¹⁶ МДС 20-2.2008. Временные рекомендации по обеспечению безопасности большепролетных сооружений от лавинообразного (прогрессирующего) обрушения при аварийных воздействиях / ФГУП «НИЦ «Строительство». Введ. 2008-05-05. М.: ОАО «ЦПП», 2008. 16 с.

¹⁷ СТО 36554501-014-2008. Надежность строительных конструкций. Основные положения / ФГУП «НИЦ «Строительство». Введ. 2008-09-23. М.: ОАО «ЦПП», 2008. 12 с.

¹⁸ СТО-008-02495342-2009. Предотвращение прогрессирующего обрушения железобетонных монолитных конструкций зданий. Проектирование и расчет / ОАО «ЦНИИПромзданий». Введ. 2009-09-07. М.: АСВ, 2009. 20 с.

расчетной схеме и приложенными во вторичной с обратным знаком. Расчет в динамической постановке описан более конкретно: указан промежуток времени удаления элемента из модели — $1/10$ основного периода собственных колебаний удаляемого элемента, представлены значения относительного демпфирования в зависимости от конструктивных особенностей здания, даны критерии отказа элементов, а также критерии стабилизации системы после инициирующего воздействия.

Выводы. В зависимости от способа учета мгновенного выключения элемента из работы в конструкции, в США при расчетах на прогрессирующее обрушение выделяют pushdown-анализ и pulldown-анализ [7]. При pushdown-анализе к поврежденной модели в зоне над удаленным элементом прикладывается увеличенная на коэффициент динамичности вертикальная нагрузка (см. рисунок). При pulldown-анализе в верхний узел удаляемого элемента прикладываются усилия с обратным знаком, полученные при расчете неповрежденной модели. Исходя из этого, а также на основе данного обзора можно выделить определенные отличия зарубежных нормативных документов от отечественных норм по расчету конструкций на прогрессирующее обрушение.

1. Американскими нормами допускается применение линейного метода расчета на прогрессирующее обрушение, в отличие от отечественных, в которых присутствует требование по учету реальной диаграммы работы материала, что делает невозможным использование линейных расчетных моделей.

2. В российском своде правил при выполнении квазистатического расчета применяется схема pulldown-анализа, в то время как в нормах США в статических расчетах описана схема pushdown-анализа.

3. В актуальных на данный момент нормах США коэффициент динамичности к нагрузке не является постоянной величиной и разделяется на коэффициенты LIF и DIF для линейного и нелинейного статического метода расчета соответственно. Значение коэффициентов зависит от пластических свойств горизонтальных конструктивных элементов и их соединений. В отечественном своде правил отсутствуют какие-

либо указания по расчету коэффициента динамичности при выполнении pulldown-анализа.

4. При динамическом методе расчета в американских нормах промежуток времени, за который необходимо удалить поврежденный элемент, определяется исходя из периода колебаний всей поврежденной системы. В отечественных нормах этот промежуток зависит от основного периода собственных колебаний удаляемого элемента.

5. В европейских нормах отсутствуют конкретные описания методов расчета конструкций с удаленным элементом и способов учета динамических эффектов.

Библиографический список

1. Nakao M. Chain reaction collapse of a high-rise apartment due to a gas explosion, May 16, 1968 in Ronan Point, East London, England // Failure Knowledge Database / 100 Selected Cases.
2. Шкинев А. Н. Аварии в строительстве. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1984. 320 с.
3. Russell J. Progressive collapse of reinforced concrete flat slab structures // PhD thesis, University of Nottingham. 2015. 239 p.
4. Емельянов С. Г., Федорова Н. В., Колчунов В. И. Особенности проектирования узлов конструкций жилых и общественных зданий из панельно-рамных элементов для защиты от прогрессирующего обрушения // Строительные материалы. 2017. № 3. С. 23–27.
5. Ellingwood B. R. Load and resistance factor criteria for progressive collapse design // School of Civil and Environmental Engineering. Georgia Institute of Technology, Atlanta. 2002. 16 p.
6. McKay A. Alternate path method in progressive collapse analysis: Variation of dynamic and non-linear load increase factors // Thesis for the degree of master of science in civil engineering. The University of Texas at San Antonio, College of Engineering, Department of Civil and Environmental Engineering. August 2008. 84 p.
7. Liu M., Pirmoz A. Energy-based pulldown analysis for assessing the progressive collapse potential of steel frame buildings // Engineering Structures. 2016. № 123. Pp. 372–378.

References

1. Nakao M. Chain reaction collapse of a high-rise apartment due to a gas explosion, May 16, 1968 in Ronan Point, East London, England. Failure Knowledge Database. 100 Selected Cases.

2. Shkinev A. N. *Avarii v stroitel'stve* [Accidents in construction]. 4-th ed., revised. Moscow, Stroyizdat Publ., 1984, 320 p.

3. Russell J. *Progressive collapse of reinforced concrete flat slab structures*, PhD thesis. University of Nottingham Publ., 2015, 239 p.

4. Emel'yanov S. G., Fedorova N. V., Kolchunov V. I. *Osobennosti proektirovaniya uzlov konstruktsiy zhilykh i obshchestvennykh zdaniy iz panel'no-ramnykh elementov dlya zashchity ot progressiruyushchego obrusheniya* [Design features of structural units of residential and public buildings made of panel-frame elements for protection from progressive collapse]. *Stroitel'nye materialy – Construction materials*, 2017, no. 3, pp. 23–26.

5. Ellingwood B. *Load and resistance factor criteria for progressive collapse design*. School of Civil and Environmental Engineering Publ., Georgia Institute of Technology, Atlanta, 2002, 16 p.

6. McKay A. *Alternate path method in progressive collapse analysis: Variation of dynamic and non-linear load increase factors*. Thesis for the MSC degree in civil engineering. The University of Texas at San Antonio College of Engineering Department of Civil and Environmental Engineering Publ., August 2008, 84 p.

7. Liu M., Pirmoz A. Energy-based pulldown analysis for assessing the progressive collapse potential of steel frame buildings. *Engineering Structures*, 2016, no. 123, pp. 372–378.