

О РАСЧЕТАХ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ НА УСТОЙЧИВОСТЬ К ПРОГРЕССИРУЮЩЕМУ ОБРУШЕНИЮ

Н. С. Быстров¹, И. Г. Овчинников^{1,2}

¹ Уральский государственный университет путей сообщения, Екатеринбург, Россия

² Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

ABOUT CALCULATIONS OF BUILDINGS AND STRUCTURES FOR RESISTANCE TO PROGRESSIVE COLLAPSE

Nikita S. Bystrov¹, Igor G. Ovchinnikov^{1,2}

¹ Ural State University of Railway Transport, Yekaterinburg, Russia

² Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

Аннотация. Рассматривается вопрос расчета зданий и сооружений на устойчивость к прогрессирующему обрушению. Приведен перечень нормативной литературы, которую необходимо использовать при проведении расчетов. Представлена классификация зданий и сооружений по степени ответственности, на основании которой произведен анализ требований к расчету в зависимости от соответствующего уровня. Обозначены задачи, которые проектировщик должен решить перед началом расчета на прогрессирующее обрушение. Представлены этапы расчета зданий и сооружений на прогрессирующее обрушение в квазистатической постановке, на основе данных этапов получен последовательный алгоритм действий, позволяющий выполнить расчет на устойчивость к прогрессирующему обрушению. С учетом проведенного исследования

Abstract. The authors consider the issue of calculating buildings and structures for resistance to progressive collapse. The list of normative literature for making calculations has been given. The classification of buildings and structures according to the degree of responsibility has been presented. Based on it an analysis of the calculation requirements depending on the appropriate level has been made. The tasks that the designer must solve before starting the calculation for progressive collapse have been outlined. The stages of calculating buildings and structures for progressive collapse are presented in a quasi-static setting. Based on these stages, a sequential algorithm of actions that allows to calculate the resistance to progressive collapse has been obtained. Taking into account the results of this research, the concept of "resistance to progressive collapse" has been

уточнено понятие «устойчивость к прогрессирующему обрушению». Сформирован вывод о требованиях, которые должны быть выполнены, чтобы в заключение расчетного обоснования можно было сказать о том, что устойчивость к прогрессирующему обрушению обеспечена.

Ключевые слова: прогрессирующее обрушение, устойчивость против прогрессирующего обрушения, уровень ответственности, пространственная расчетная модель, алгоритм расчета на устойчивость против прогрессирующего обрушения

defined. A conclusion about the requirements that must be met to tell after the calculation that resistance to progressive collapse is ensured, has been formed.

Key words: progressive collapse, stability to progressive collapse, level of responsibility, spatial calculation model, algorithm for calculating the stability to progressive collapse

Для цитирования: Быстров, Н. С. О расчетах зданий и сооружений на устойчивость к прогрессирующему обрушению / Н. С. Быстров, И. Г. Овчинников. – DOI 10.31660/2782-232X-2022-3-32-38. – Текст : непосредственный // Архитектура, строительство, транспорт. – 2022. – № 3 (101). – С. 32–38.

For citation: Bystrov, N. S., & Ovchinnikov, I. G. (2022). About calculations of buildings and structures for resistance to progressive collapse. *Architecture, Construction, Transport*, (3(101)), pp. 32-38. (In Russian). DOI 10.31660/2782-232X-2022-3-32-38.

Введение

В последнее время в результате возросшего числа аварий зданий и сооружений, которые вызваны такими причинами, как проектные ошибки, нарушения технологии возведения, несоблюдение правил эксплуатации и т. д. [1–4], проблеме обеспечения устойчивости зданий и сооружений к прогрессирующему обрушению стали уделять особое внимание как на территории Российской Федерации, так и за рубежом. По информации отечественных исследователей, урон от обрушения объекта оценивается в 693,7 % при 100 % себестоимости [5, 6].

Вследствие введения Федерального закона № 384-ФЗ¹ и ГОСТ 27751-2014² появилась дополнительная потребность в развитии направления противостояния последовательному разрушению зданий и сооружений. Результат применения регламентирующих документов и изучение научных трудов предоставляют возможность предусмотреть свод конструктивных мероприятий, реализация которых позволит повысить безопасность зданий и сооружений. Научные труды, созданные на основе предшествующих исследований конструктивной безопасности зданий и сооружений, дают возможность брать в расчет

¹ Технический регламент о безопасности зданий и сооружений : Федеральный закон № 384-ФЗ : принят Государственной думой 23 декабря 2009 года : одобрен Советом Федерации 25 декабря 2009 года. – Текст : электронный // www.consultant.ru : сайт. – 2022. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_95720/ (дата обращения: 14.08.2022).

² ГОСТ 27751-2014. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения : межгосударственный стандарт : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 11 декабря 2014 г. № 1974-ст : введен впервые : дата введения 2015-07-01 / разработан ОАО «НИЦ «Строительство» – ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко. – Текст : электронный // [docs.cntd.ru](https://docs.cntd.ru/document/1200115736) : сайт. – 2022. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200115736> (дата обращения: 14.08.2022).

разные виды нагрузок и воздействий, применение которых при соблюдении сводов правил и норм обеспечивает безопасность объекта на протяжении всего срока эксплуатации.

При расчете на устойчивость к прогрессирующему обрушению помимо Федерального закона № 384-ФЗ и ГОСТ 27751-2014 используют следующие строительные нормы: СП 20.133330.2016³, СП 385.1325800.2018⁴, СП 296.1325800.2017⁵, приложение 7 к СП 35.13330.2011⁶, СП 22.13330.2016⁷, СТО 008-02495342-2009⁸.

Объект и методы исследования

В начале работы нужно разобраться с терминами и определить, что мы считаем прогрессирующим обрушением и что относится к устойчивости против него. В СП 385.1325800.2018 даны следующие определения: *«прогрессирующее обрушение – последовательное разрушение несущих строительных конструкций, приводящее к обрушению всего здания или сооружения или*

его частей вследствие локального разрушения»; «устойчивость против прогрессирующего обрушения – обеспечение несущей способности как конструктивной системы сооружения в целом, так и примыкающих к зоне локального разрушения конструктивных элементов».

В зависимости от уровня ответственности здания и сооружения должны иметь способность в разной степени противостоять прогрессирующему обрушению. Для реализации данного требования следует обеспечить прочность, жесткость и устойчивость как всей конструктивной системы здания или сооружения, так и локальных несущих элементов в области местного разрушения. Допускается формулирование дополнительных требований к устойчивости к прогрессирующему обрушению от заказчика, которые должны быть прописаны в задании на проектирование.

Здания и сооружения по требованиям устойчивости к прогрессирующему обрушению подразделяют на три уровня ответственности:

³ Нагрузки и воздействия : (СП 20.133330.2016) : официальное издание : утверждено приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации (Минстрой России) от 3 декабря 2016 г. № 891/пр : введено в действие 4 июня 2017 г. – Текст : электронный // docs.cntd.ru : сайт. – 2022. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/456044318> (дата обращения: 14.08.2022).

⁴ Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Правила проектирования. Основные положения : (СП 385.1325800.2018) : официальное издание : утверждено приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 5 июля 2018 г. № 393/пр : введено в действие 6 января 2019 г. – Текст : электронный // docs.cntd.ru : сайт. – 2022. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/551394640> (дата обращения: 14.08.2022).

⁵ Здания и сооружения. Особые воздействия : (СП 296.1325800.2017) : официальное издание : утверждено приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 3 августа 2017 г. № 1105/пр : введено в действие 4 февраля 2018 г. – Текст : электронный // docs.cntd.ru : сайт. – 2022. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/555600219> (дата обращения: 14.09.2022).

⁶ Мосты и трубы : (СП 35.13330.2011) : официальное издание : утверждено приказом Министерства регионального развития Российской Федерации (Минрегион России) от 28 декабря 2010 г. № 822 : введено в действие 20 мая 2011 г. – Текст : электронный // docs.cntd.ru : сайт. – 2022. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200084849> (дата обращения: 14.08.2022).

⁷ Основания зданий и сооружений : (СП 22.13330.2016) : официальное издание : утверждено приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 16 декабря 2016 г. № 970/пр : введено в действие 17 июня 2017 г. – Текст : электронный // docs.cntd.ru : сайт. – 2022. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/456054206> (дата обращения: 14.08.2022).

⁸ Предотвращение прогрессирующего обрушения железобетонных монолитных конструкций зданий. Проектирование и расчет : (СТО 008-02495342-2009) : официальное издание : утверждено и введено в действие приказом Генерального директора ОАО «ЦНИИПромзданий» от 7 сентября 2009 г. № 20. – Текст : электронный // docs.cntd.ru : сайт. – 2022. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200078507> (дата обращения: 14.08.2022).

1. Повышенный уровень ответственности. Необходимо соблюдать следующие условия:

- делать поверочный расчет с применением пространственных моделей по потере несущей способности или непригодности к эксплуатации с выводом из строя одного элемента расчетной схемы. Данный расчет производится при использовании нормативных характеристик материалов конструкций. Также в этом расчете необходимо учитывать физическую, геометрическую и конструктивную нелинейность. Значение коэффициента надежности принимается равным 1,1;
- в задании на проектирование от заказчика дополнительно к основным требованиям могут быть предъявлены дополнительные условия по обеспечению трещиностойкости и деформативности несущих элементов здания и сооружения при локальном разрушении.

К повышенному уровню ответственности относятся опасные и уникальные объекты, например: атомные электростанции, гидроэлектростанции, дамбы, плотины, космодромы, мосты и т. д. Подробный перечень объектов можно посмотреть в ст. 48.1 Градостроительного кодекса Российской Федерации.

2. Нормальный уровень ответственности. При проектировании зданий и сооружений данного уровня необходимо также делать поверочный расчет с применением пространственных моделей по потере несущей способности или непригодности к эксплуатации с выводом из строя одного элемента расчетной схемы. Расчет производится при использовании нормативных характеристик материалов конструкций и с учетом физической, геометрической и конструктивной нелинейности. При этом значение коэффициента надежности принимается равным 1,0;

К нормальному уровню относят промышленные и гражданские здания, например: цеха, производящие какую-либо продукцию, жилые здания высотой до 75 м, цеха по переработке мусора, мосты длиной до 500 м и т. д.

3. Пониженный уровень ответственности. Характеризуется отсутствием требований к устойчивости от прогрессирующего обрушения. К

данному уровню относят: теплицы, парники, мобильные здания и т. д. Важно помнить, что недопустимо относить объекты частного малоэтажного строительства к пониженному уровню ответственности, так как практика строительства и эксплуатации зданий данного типа в сейсмически опасных районах (6 баллов и более) показывает, что часто происходят разрушения.

В начале работы проектировщик должен оценить возможность прогрессирующего разрушения и определиться с методами его предотвращения. К основным задачам, которые необходимо решить, относятся:

- выявление списка стартовых особых нагрузок, приводящих к местному разрушению несущих конструкций;
- выбор методики расчета зданий и сооружений на мгновенное исключение несущего элемента из расчетной модели;
- выявление факторов, влияющих на выключение из работы несущего элемента, перегруженного вследствие особого воздействия;
- формирование конструктивных мер обеспечения устойчивости к особым воздействиям и смягчения последствий от них.

При расчете на прогрессирующее обрушение проверка и конструирование элементов здания выполняется только для первой группы предельных состояний. Перемещения, раскрытие трещин и деформации элементов не учитываются. Свойства материалов принимаются по нормативным величинам, значения которых можно посмотреть в сводах правил или специальных справочных материалах. Также обязательным при расчете на прогрессирующее обрушение является использование объемной расчетной схемы, в которой учитывается пространственная модель грунта, позволяющая производить расчет с учетом работы грунтового основания под фундаментом. При расчете карстовых воронок и провалов основания зданий и сооружений в местах предполагаемого расположения воронки элементам фундамента присваивается коэффициент постели грунта равный нулю. Кроме того, в расчетной модели также нужно учитывать элементы, которые при обычной работе здания или сооружения

не являются несущими. Данные элементы в месте локального разрушения здания или сооружения могут активно включаться в работу схемы, что приведет к перераспределению усилий в элементах системы. Проверку на способность противостоять прогрессирующему обрушению нужно осуществлять для всех возможных прогнозируемых местных разрушений элементов независимо друг от друга. Это означает, что в расчете рассматривается ситуация по выходу из строя только одного несущего элемента. Важно отметить, что при моделировании необходимо учитывать самые неблагоприятные локальные разрушения.

На основании СП 385.1325800.2018, объект обладает способностью противостоять прогрессирующему обрушению, если для несущих конструкций и их связей выполняется следующее условие:

$$F \leq S,$$

где F – внутренние усилия в несущих элементах, усилия в узлах;

S – несущая способность элементов и узлов.

Этапы проверки устойчивости против прогрессирующего обрушения в квазистатической постановке [7, 8]:

1 этап – создается пространственная конечная-элементная модель, по которой определяется напряженно-деформированное состояние конструкций в условиях нормальной эксплуатации. Выполняется нелинейный статический расчет от расчетных значений нагрузок с фиксированием значений перемещений. Данное действие необходимо для дальнейшего формирования напряженно-деформированного состояния системы в начальный момент времени, когда удаляемый элемент присутствует в расчете;

2 этап – определяется несущий элемент системы, в результате удаления которого будет формироваться локальное разрушение. Выключение из работы данного элемента моделируется усилиями, которые были найдены в исходной расчетной схеме при нормальной эксплуатации объекта. Усилия моделируются с противоположным знаком. В случае, если удаление элемента расчетной схемы не приводит к моментальному

догружению конструктивной системы, то дополнительные усилия в удаляемом элементе можно принимать со значением ноль;

3 этап – запускается расчет схемы с влиянием удаленного элемента. В результате расчета определяется напряженно-деформированное состояние конструкций в условиях аварийного воздействия, которое привело к выходу из строя одного из несущих элементов системы. В завершение данного этапа для определения собственной частоты схемы делается модальный анализ;

4 этап – выводятся результаты расчета, производится их анализ. Осуществляется проверка удовлетворения всех узлов и элементов расчетной схемы требованиям первой группы предельных состояний – по потере несущей способности или непригодности к эксплуатации. В ходе расчета следующего локального разрушения необходимо вернуться к первичной расчетной схеме и проделать данные этапы повторно.

Результаты и обсуждения

Обзор научных трудов, посвященных прогрессирующему обрушению, дает возможность выделить следующие тезисы:

- при анализе важно учитывать такие показатели, как значимость объекта и финансовые или социальные последствия в случае его разрушения;
- моделирование производится при условии воздействия особых сочетаний нагрузок, учитывается выход из строя только одного элемента. Коэффициент надежности по нагрузке в расчете для повышенного уровня ответственности равен 1,1, для нормального 1;
- важно продумать условия перераспределения усилий с удаляемого элемента системы на соседние;
- при разработке рабочей документации необходимо основываться на принципах строительства в сейсмических районах [9, 10].

Стоит отметить, что важным этапом является исследование уже произошедших аварий. Разбирая ошибки, которые привели к разрушению зданий или сооружений в прошлом, мы учимся избегать их в будущем. Данные исследования должны

внести вклад в накопление опыта у проектировщиков, инженеров по строительству и работников, обслуживающих здания или сооружения. Выполнение качественного исследования с целью определения настоящих факторов наступления аварийных ситуаций и разрушения позволит в будущем конкретизировать нормативные, расчетные нагрузки и другие факторы, оказывающие разрушающие воздействия. Это даст возможность проектировщикам создавать более корректные расчетные схемы и улучшать методы расчета.

Выводы

Таким образом, устойчивость против прогрессирующего обрушения следует понимать как способность конструктивной системы противостоять разрушению при выходе из строя одного из несущих элементов. При моделировании аварийной ситуации расчетное обоснование должно в обязательном порядке выполнять требования по первой группе предельных состояний, что гарантирует устойчивость к прогрессирующему обрушению.

Библиографический список

1. Котляревский, В. А. Аварии и катастрофы. Предупреждение и ликвидация последствий : учебное пособие в 5 книгах / В. А. Котляревский, А. М. Аверченко, В. И. Заболотских ; под редакцией В. А. Котляревского, А. В. Забегаева. – Москва : Издательство АСВ, 2001. – 2 т. – ISBN 5-87829-071-5. – Текст : непосредственный.
2. Алмазов, В. О. Динамика прогрессирующего разрушения монолитных многоэтажных каркасов / В. О. Алмазов, К. Као Зуй. – Текст : непосредственный // Промышленное и гражданское строительство. – 2010. – № 4. – С. 52–56.
3. Гарькин, И. Н. Анализ причин обрушений промышленных зданий / И. Н. Гарькин. – Текст : непосредственный // Технические науки : проблемы и перспективы : Материалы Международной научной конференции, Санкт-Петербург, 20–23 марта 2011 года. – Санкт-Петербург : Реноме, 2011. – С. 27–29.
4. Еремин, К. И. Причины и последствия аварий зданий и сооружений, произошедших в 2010 году / К. И. Еремин, Н. А. Шишкина. – Текст : электронный // Наука и безопасность : электронный журнал. – 2011. – URL: https://ramag.ru/pressa/causes_conseq-accidents (дата обращения: 20.08.2022).
5. Бондаренко, В. М. К вопросу о конструктивной безопасности и живучести основного строительного фонда России / В. М. Бондаренко. – Текст : непосредственный // Архитектура и строительство Москвы. – 2006. – Т. 526–527. – № 2–3. – С. 12–14.
6. Алмазов, В. О. Проблемы прогрессирующего разрушения строительных объектов / В. О. Алмазов. – Текст : непосредственный // Деловая слава России. – 2008. – № 4(22). – С. 74–77.
7. Бондаренко, В. М. Оценка динамических напряжений и моментов в конструктивных элементах сооружений / В. М. Бондаренко, Е. А. Ларионов. – Текст : непосредственный // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2006. – № 2. – С. 93–98.
8. Расчет динамических усилий в конструктивно-нелинейных элементах стержневых пространственных систем при внезапных структурных изменениях / В. А. Гордон, Н. В. Ключева, Т. В. Потураева, А. С. Бухтиярова. – Текст : непосредственный // Строительная механика и расчет сооружений. – 2008. – № 6(221). – С. 26–30.
9. Снижение рисков в строительстве при чрезвычайных ситуациях природного и техногенного характера / С. Н. Булгаков, А. Г. Тамразян, И. А. Рахман, А. Ю. Степанов. – Москва : Издательство АСВ, 2012. – 304 с. – Текст : непосредственный.
10. Анализ в геометрически, физически и конструктивно нелинейной постановке динамического поведения плоских рам при запроектных воздействиях / И. Н. Серпик, Н. С. Курченко, А. В. Алексейцев, А. А. Лагутина. – Текст : непосредственный // Промышленное и гражданское строительство. – 2012. – № 10. – С. 49–51.

References

1. Kotlyarevskiy, V. A., Averchenko, A. M., & Zabolotskikh, V. I. (2001). Avarii i katastrofy. Preduprezhdenie i likvidatsiya posledstviy. Moscow, Izdatel'stvo ASV Publ. (In Russian).
2. Almazov, V. O., & Kao Zuy Khoy. (2010). Dynamics of progressing destruction of monolithic multistory frames. *Industrial and Civil Engineering*, (4), pp. 52-56. (In Russian).
3. Gar'kin, I. N. (2011). Analiz prichin obrusheniy promyshlennykh zdaniy. *Tekhnicheskie nauki: problemy i perspektivy. Materialy Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii. March, 20-23, Saint-Petersburg, Renome Publ.*, pp. 27-29. (In Russian).
4. Eremin, K. I., & Shishkina, N. A. (2011). Prichiny i posledstviya avariyzdaniy i sooruzheniy, proizoshedshikh v 2010 godu. *Nauka i bezopasnost'*. (In Russian). Available at: https://pamag.ru/prensa/causes_conseq-accidents (accessed 28.08.2022).
5. Bondarenko, V. M. (2006). K voprosu o konstruktivnoy bezopasnosti i zhivuchesti osnovnogo stroitel'nogo fonda Rossii. *Arkhitektura i stroitel'stvo Moskvy*, 526-527(2-3), pp. 12-14. (In Russian).
6. Almazov, V. O. (2008). Problemy progressiruyushchego razrusheniya stroitel'nykh ob"ektov. *Delovaya slava Rossii*, (4(22)), pp. 74-77. (In Russian).
7. Bondarenko, V. M., & Larionov, E. A. (2006). Otsenka dinamicheskikh napryazheniy i momentov v konstruktivnykh elementakh sooruzheniy. *Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruktsiy i sooruzheniy*, (2), pp. 93-98. (In Russian).
8. Gordon, V. A., Klyueva, N. V., Poturaeva, T. V., & Bukhtiyarova, A. S. (2008). Raschet dinamicheskikh usiliy v konstruktivno-nelineynykh elementakh sterzhnykh prostranstvennykh sistem pri vnezapnykh strukturnykh izmeneniyakh. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy*, (6(221)), pp. 26-30. (In Russian).
9. Bulgakov, S. N., Tamrazyan, A. G., Rakhman, I. A., & Stepanov, A. Yu. (2012). Snizhenie riskov v stroitel'stve pri chrezvychaynykh situatsiyakh prirodnoy i tekhnogennogo kharaktera. Moscow, Izdatel'stvo ASV Publ., 304 p. (In Russian).
10. Serpik, I. N., Kurchenko, N. S., Alekseytsev, A. V., & Lagutina, A. A. (2012). Analysis of the dynamic behavior of plane frames at emergency actions considering geometrical, material and structural nonlinearities. *Industrial and Civil Engineering*, (10), pp. 49-51. (In Russian).

Сведения об авторах

Быстров Никита Сергеевич, аспирант кафедры мостов и транспортных тоннелей, Уральский государственный университет путей сообщения, e-mail: bystrov_nikita97@mail.ru

Овчинников Игорь Георгиевич, д-р техн. наук, профессор, профессор базовой кафедры АО «Мостострой-11», Тюменский индустриальный университет, e-mail: bridgesar@mail.ru

Information about the authors

Nikita S. Bystrov, Postgraduate at the Department of Bridges and Transport Tunnels, Ural State University of Railway Transport, e-mail: bystrov_nikita97@mail.ru

Igor G. Ovchinnikov, Doctor of Engineering, Professor at the Base Department JSC "Mostostroy-11", Industrial University of Tyumen, e-mail: bridgesar@mail.ru