

## Особое предельное состояние железобетонных конструкций.

### Актуальное состояние и перспективы развития проблемы.

*А.Б. Чаганов<sup>1</sup>, А.В. Черепанов<sup>1,2</sup>, С.Д. Шмаков<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> ФГБОУ ВО «Вятский Государственный Университет», Киров

<sup>2</sup> АО «Центральный научно-исследовательский и проектно-экспериментальный институт промышленных зданий и сооружений – ЦНИИ Промзданий», Москва

**Аннотация:** В работе представлен обзор исследований по теме особого предельного состояния. В кратком виде представлены результаты основных работ, не утративших актуальность. Доказана актуальность данной темы, выделены перспективные направления развития:

- 1) Учет в расчетах жесткости узловых сопряжений, отдельных элементов конструкций.
- 2) Учет совместности работы сборных и сборно-монолитных конструкций, в том числе сдвиговой жесткости составных сечений.
- 3) Учет временного и пространственного характера воздействия.
- 4) Работа по расширению применения теории вне расчетов на прогрессирующее обрушение.

**Ключевые слова:** Особое предельное состояние, особые воздействия, железобетон, деформативность, критерии особого предельного состояния.

### Введение

В последнее десятилетие отмечается рост случаев особых воздействий на конструкции зданий и сооружений, которые не предусмотрены нормативной документацией. К подобным воздействиям можно отнести террористические акты, взрывы бытового газа, механическое разрушение опор зданий и сооружений вследствие, например, наезда автотранспорта. Развитие требований по повышению безопасности к зданиям и сооружениям повлекло за собой увеличение перечня объектов строительства, для которых требования по защите от прогрессирующего обрушения приобретают особую актуальность. Безопасное восприятие подобных воздействий ранее не учитывалось, однако мировой опыт проектирования и эксплуатации зданий и сооружений, особенно повышенного уровня ответственности, показал необходимость устройства защиты от прогрессирующего обрушения. С целью сохранения жизни находящихся в зданиях и сооружениях людей,

повышения безопасности эксплуатации, а также снижения материальных затрат на возведение объектов строительства, допускается при учете аварийной ситуации с малой вероятностью возникновения использование резервов строительных конструкций, выраженных в допущении возникновения особого предельного состояния. Вместе с тем проектирование зданий и сооружений с учетом защиты от прогрессирующего обрушения приводит к увеличению расхода материалов и удорожанию строительства. Для снижения стоимости, наравне с совершенствованием конструктивных решений, актуально развитие методов и методик расчета железобетонных конструктивных элементов на стадии близкой к максимальной несущей способности и стадии разрушения (разгрузки), т.е. совершенствование особого предельного состояния.

Термин «особое предельное состояние» в нормативных документах Российской Федерации определяется в ГОСТ 27751-2014: «Особые предельные состояния – состояния, возникающие при особых воздействиях и ситуациях и превышение которых приводит к разрушению сооружений с катастрофическими последствиями». При этом, документ не содержит критериев для определения этого состояния.

Единственный действующий нормативный документ, который содержит критерии особого предельного состояния – СП 385.1325800 «Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения» в качестве критериев особого предельного состояния для железобетона приводится ограничение деформаций сжатого бетона и растянутой арматуры. Также СП 385.1325800 содержит свое собственное определение особого предельного состояния – «состояние конструкций, возникающее после превышения их несущей способности и деформативности, при котором они не соответствуют функциональным требованиям, а дальнейшее увеличение нагрузок и (или) воздействий приводит к их разрушению».

---

Рассмотренные определения не противоречат друг другу. Определение из конкретизирует термин «особое предельное состояние».

Фактически понятие особого предельного состояния сейчас используется исключительно в рамках расчетов на прогрессирующее обрушение, хотя имеются предпосылки для расширения сферы применения и на другие особые воздействия.

Так СП 14.13330.2018 «Строительство в сейсмических районах» вводит в расчеты коэффициент допускаемых повреждений зданий и сооружений. Аналогичный подход с понятиями допустимых повреждений можно встретить в зарубежных нормах (GB 50011-2010 National Standards of the People's Republic of China. Code for Seismic Design of Buildings; FEMA 273. Federal Emergency Management Agency. NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings). Однако в настоящий момент изученность механизмов достижения предельных состояний всей конструкции в целом недостаточна и требует апробации [1].

### **Актуальные исследования**

Значительный вклад в текущее развитие теории особого предельного состояния в России внесли Колчунов В.И., Колчунов Вл.И., Федорова Н.В., Травуш В.И., Кодыш Э.Н., Трекин Н.Н. и др.

Об интересе к вопросу особого предельного состояния свидетельствует рост публикационной активности исследователей со всего мира. Работы, представляющие интерес для уточнения и расширения данного понятия, представлены ниже.

Так, например, в работе [2] показано, что на стадии снижения несущей способности (разгрузки) изгибаемого элемента, критерии особого предельного состояния, записанные в действующей редакции СП 385.1325800, представлены с некоторым запасом.

Эта же статья обращает внимание на другие факторы:

---

1) Наличие продольной сжатой арматуры. Согласно [3], наличие продольной арматуры в сжатой зоне нормального сечения повышает деформативность и способность сопротивляться нагрузке после начала разрушения сжатой зоны бетона перед превращением балочной конструкции в механизм, чему соответствуют значения прогибов  $1/40$  от пролета. Показано на рис.1.

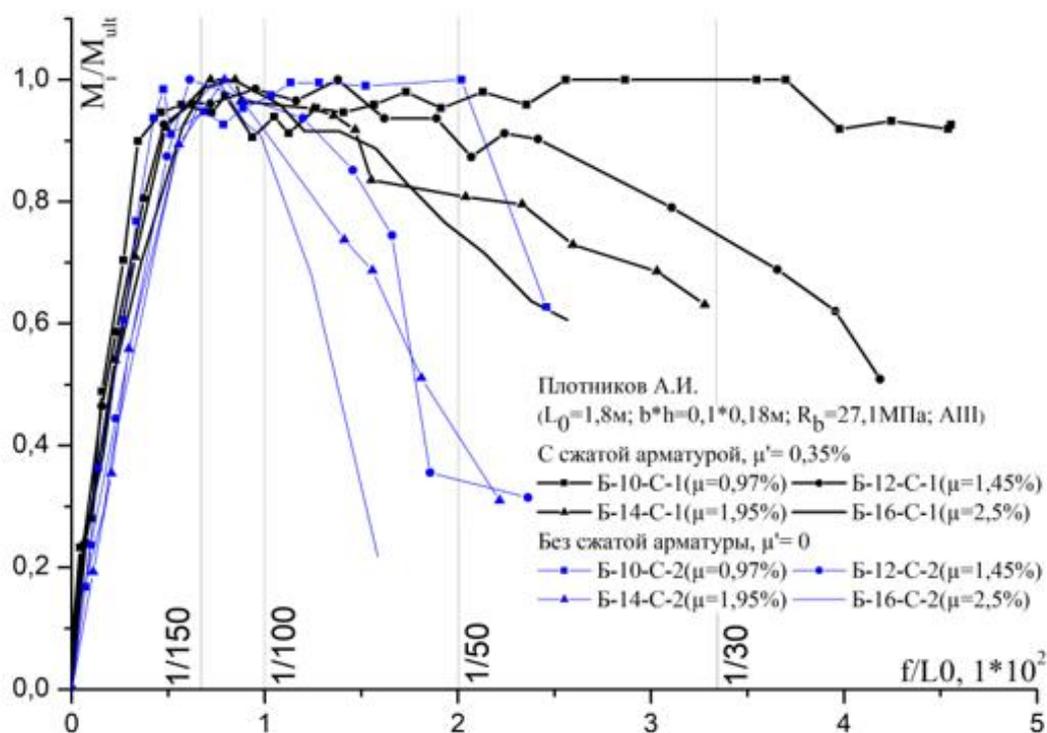


Рис. 1. – Графики деформирования изгибаемых элементов с различным количеством продольного армирования по материалам Плотникова А.И.

2) Использование термоупрочненной арматуры. При использовании термически упрочненной растянутой арматуры класса АIV деформативность конструкции в пластической стадии работы уменьшается до 30% в сравнении с аналогичными конструкциями с обычной арматурой класса АIV [4]. Графики представлены на рис.2.

3) Предварительное напряжение растянутой арматуры конструкций, помимо общего повышения их жесткости и трещиностойкости, также приводит к снижению максимальных значений прогибов до 15 % в сравнении

с аналогами без предварительного напряжения [4]. Графики представлены на рис.2.

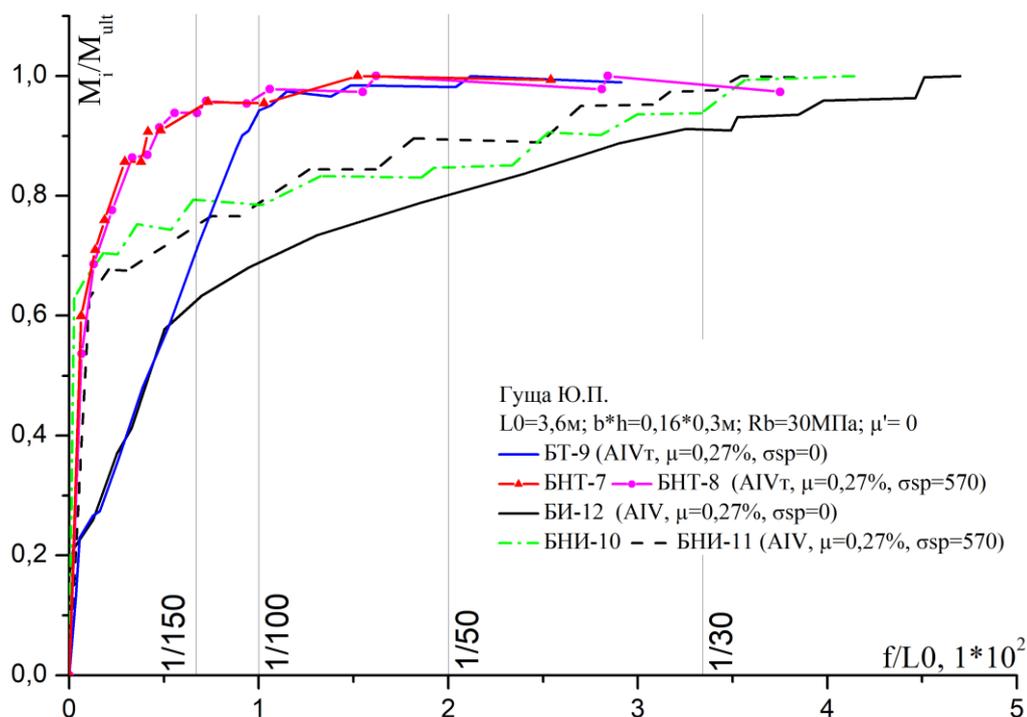


Рис. 2. – Графики деформирования изгибаемых элементов с обычной и термически упрочненной растянутой арматурой класса AIV, с преднапряжением и без него. По материалам Гуща Ю.П.

4) Скорость нагружения. При увеличении скорости нагружения наблюдается увеличение способности восприятия динамической нагрузки на 15% [5].

В работе [6] рассмотрено влияние косвенного армирования на поведение железобетонных конструкций на стадии особого предельного состояния. Экспериментально установлено, что введение косвенного армирования в элементы железобетонной изгибаемой конструкции положительно сказывается на деформативных свойствах бетона. На рис.3 показано более чем трехкратное увеличение значения  $\epsilon_{b2}$  и дополнительный рост прочности железобетонных элементов за счет увеличения площади растянутой арматуры.

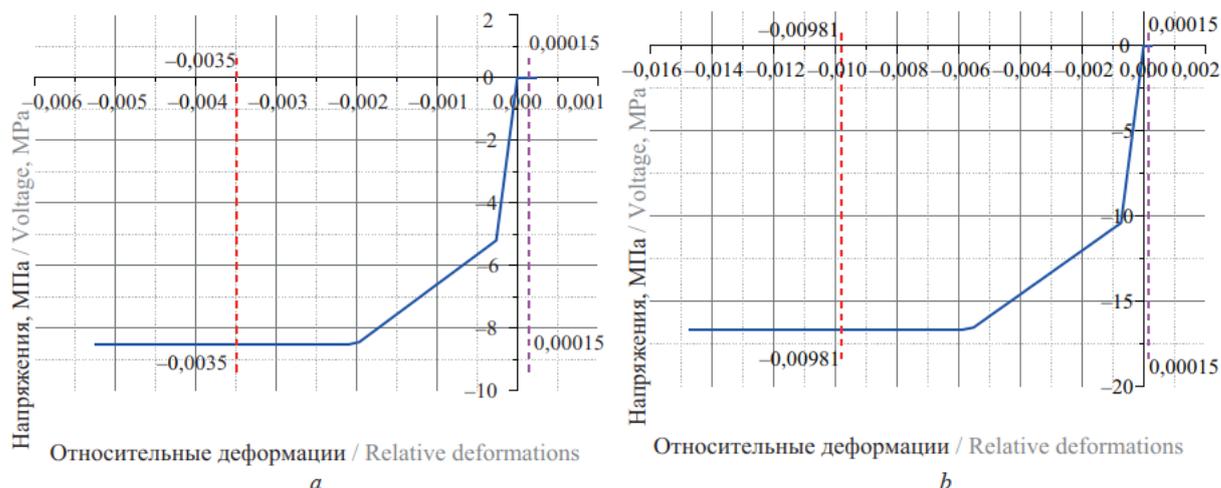


Рис.3. – Диаграммы «напряжения-деформации» бетона класса В15: а - обычного; б – усиленного сетками косвенного армирования. По материалам Колчунова В.И., Коренькова П.А., Гуок Ф.Д.

В работе [7] автор обращает внимание на специфический характер нагружения конструкций при некоторых особых воздействиях. А именно, статико-динамическое догружение, обусловленное тем, что конструкция, подвергающаяся особым воздействиям, предварительно находится в нормальном эксплуатационном режиме. Автор приводит экспериментальные данные зависимости напряженно-деформированного состояния бетона при статико-динамическом догружении от уровня предварительного статического нагружения. Графики представлены на рис.4.

Также на важность учета сценария нагружения обращает внимание работа [8]. В статье исследован вопрос прогрессирующего обрушения балочного монолитного перекрытия. Сделан вывод о том, что знакопеременные воздействия, например, при взрывном сценарии разрушения несущей колонны оказывают значительное воздействие на развитие особого предельного состояния в конструкциях перекрытия.

В работе [9] сделана попытка применения теории пластичности Г.А.Гениева к расчетным случаям, характерным для прогрессирующего

обрушения. Показано удовлетворительное согласование расчетных и экспериментальных данных.

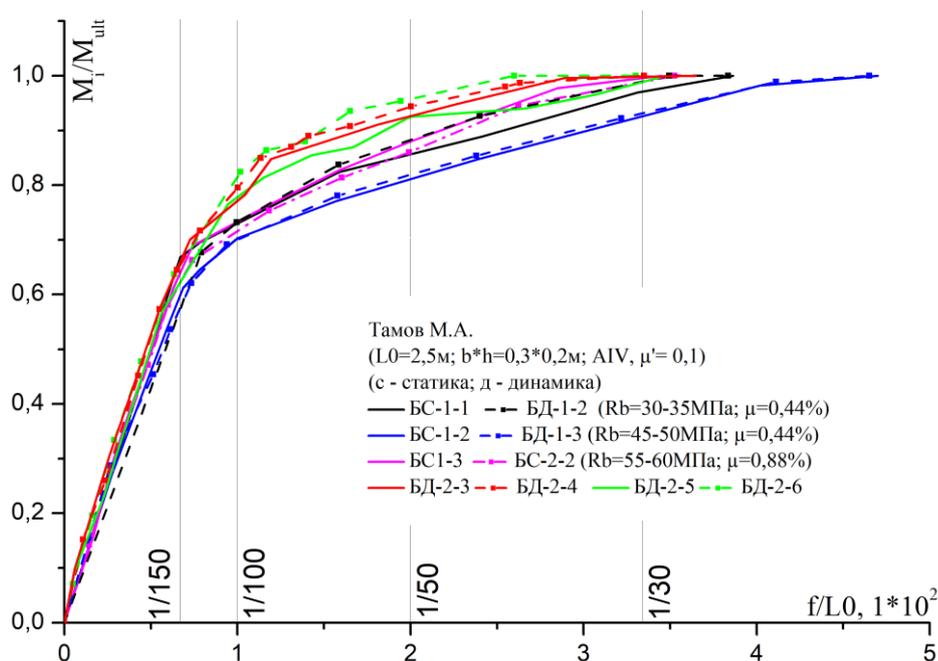


Рис. 4. – Графики деформирования изгибаемых элементов с различной прочностью бетона и количеством продольного армирования, при статическом и кратковременном динамическом нагружении по материалам Тамова М.А.

Работа [10], развивая метод оценки допустимого уровня повреждений на основе коэффициента пластичности  $\mu$  [11], проводит численные исследования монолитных безбалочных перекрытий. В работе выявлено, что образование разрушенной околоопорной зоны (разрушение продавливанием) происходит при значительно меньших поперечных силах, чем при сравнении по критерию изгибающего момента. Показано на рис.5.

Похожие выводы относительно безбалочных перекрытий содержатся в работе [12]. Автор сообщает, что разрушение вследствие прогиба в целом маловероятно на фоне разрушения от продавливания.

В работе [13] проведены исследования работы пространственной монолитной рамы на сценарий прогрессирующего обрушения. Особенностью

исследования является то, что в балках рамы был симитирован горизонтальный шов бетонирования.

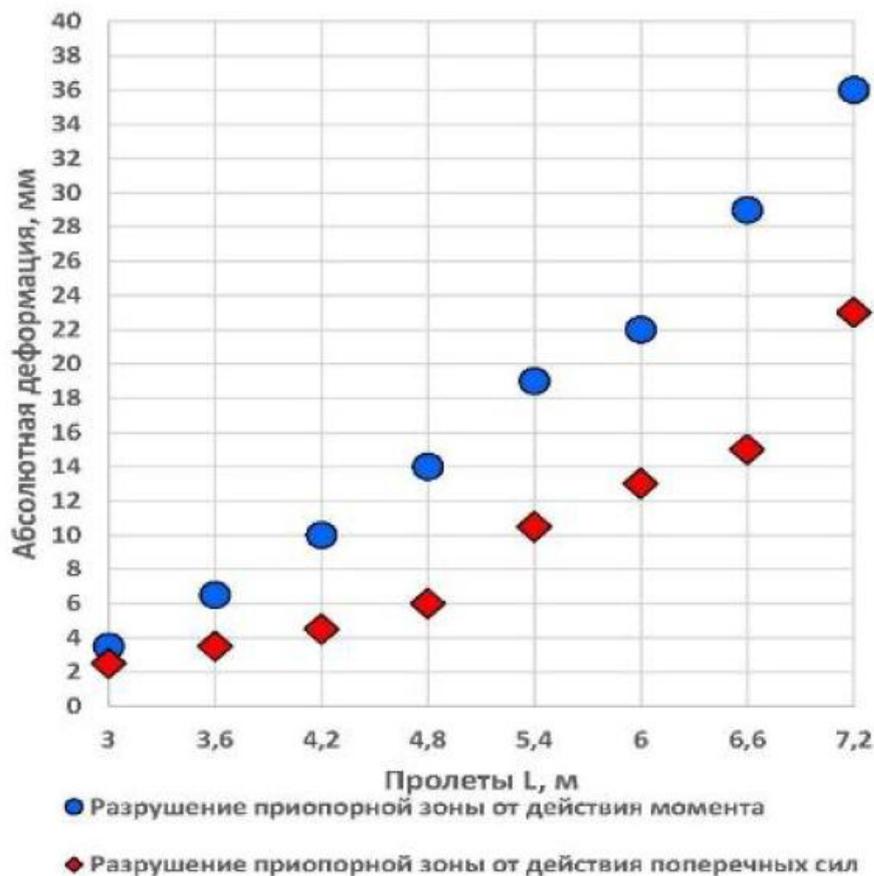


Рис. 5. – Значения "допустимых" смещений для различных критериев формирования околоопорной зоны перекрытия (для средней колонны). По материалам Кабанцева О.В., Митровича Б.

Усилие сдвига в данной раме целиком воспринималось поперечным армированием. Исследованы особенности деформирования и разрушения конструкции (особенности достижения особого предельного состояния балками составных сечений), проведено сравнение с численным моделированием.

## Перспективные направления

Систематизируя рассмотренные выше исследования, можно выделить несколько направлений в исследовании особого предельного состояния железобетонных конструкций:

1) Учет в расчетах жесткости узловых сопряжений, отдельных элементов конструкций. Большое влияние данного фактора на характер работы несущих конструкций показана в работе [14]. В настоящий момент проведены исследования как существующих решений [6, 15, 16], так и предложенных новых вариантов исполнения [17, 18, 19].

2) Учет совместности работы сборных и сборно-монолитных конструкций, в том числе сдвиговой жесткости составных сечений. Данное направление будет актуально для развития расчетной теории сборно-монолитных конструкций. Важность вопроса показана [13, 14, 20].

3) Учет временного и пространственного характера воздействия. Важность данного направления можно проследить по работам [5, 7, 8, 12].

Отдельно можно выделить направление, лежащее вне развития теории особого предельного состояния, а заключающееся в расширении его применения за пределами темы прогрессирующего обрушения.

## Выводы

Анализ публикаций позволяет сделать вывод, что особое предельное состояние, относительно недавно введенное в нормативные документы, имеет потенциал к уточнению критериев, позволяющих наиболее полно использовать запасы прочности и деформативности, заложенные в действующие нормативные документы, обеспечивая необходимый уровень надежности конструкций зданий и сооружений. Вопрос уточнения критериев особого предельного состояния сдерживается отсутствием необходимого количества экспериментальных данных. Проведение дополнительных исследований позволит уточнить положения теории железобетона.

---

## Литература

1. Перельмутер А.В., Кабанцев О.В. О концептуальных положениях норм проектирования сейсмостойкого строительства // Вестник МГСУ. 2020. Том 15. Выпуск 12. С. 1673–1684
  2. Trekin N.N., Kodysh E.N., Shmakov S.D., Terekhov I.A., Kudyakov K.L., Determination of the criteria of deformation in a special limiting stat // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2021. Vol. 17, pp. 108–116 URL: doi.org/10.22337/2587-9618-2021-17-1-108-116 (published: 24.03.2017)
  3. Плотников А.И. Динамика упругопластических железобетонных балок при действии интенсивных кратковременных нагрузок аварийного характера: диссертация кандидата техн. наук. М.: 1994. 375 с.
  4. Гуца Ю.П. Исследование изгибаемых железобетонных элементов при работе стержневой арматуры в упруго-пластической стадии: диссертация доктора техн. наук. М.: 1967. 401с.
  5. Тамов М.А. Исследование железобетонных изгибаемых конструкций, армированных сталями повышенной прочности, при кратковременном динамическом нагружении: диссертация кандидата техн. наук. М.: 1981. 150с.
  6. Колчунов В.И., Кореньков П.А., Гуок Ф.Д. Особое предельное состояние в железобетонных каркасах с узлами, усиленными косвенным армированием при аварийных воздействиях //Вестник МГСУ. 2021. №11. С. 1462-1472.
  7. Медянкин М.Д. Деформирование бетона при статико-динамическом нагружении железобетонных конструкций: диссертация кандидата техн. наук: М.: 2021. 163с.
  8. Qian Kai, Wang Dong-Fang, Huang Ting, Weng Yun-Hao Initial damage and residual behavior of RC beam-slab structures following sudden column
-

removal - numerical study // Research Journal of The Institution of Structural Engineers. 2022. Vol. 36. pp. 650–664. URL: [doi.org/10.1016/j.istruc.2021.12.036](https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.12.036)

9. Федорова Н.В., Ву Нгок Туен, Яковенко И.А. Критерий прочности плосконапряженного железобетонного элемента при особом воздействии // М.: Вестник МГСУ. 2020. №11. С. 1513-1522

10. Kabantsev O.V., Mitrovich B. Justification of the special limit state characteristics for monolithic reinforced concrete bearing systems in the progressive collapse mode// IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 456 012002 URL: [researchgate.net/publication/329604538\\_Justification\\_of\\_the\\_special\\_limit\\_state\\_characteristics\\_for\\_monolithic\\_reinforced\\_concrete\\_bearing\\_systems\\_in\\_the\\_progressive\\_collapse\\_mode](https://researchgate.net/publication/329604538_Justification_of_the_special_limit_state_characteristics_for_monolithic_reinforced_concrete_bearing_systems_in_the_progressive_collapse_mode)

Justification\_of\_the\_special\_limit\_state\_characteristics\_for\_monolithic\_reinforced\_concrete\_bearing\_systems\_in\_the\_progressive\_collapse\_mode

11. Попов Н.Н., Расторгуев Б.С., Забегаев А.В. Расчет конструкций на динамические стальные нагрузки// М.: Высш. шк., 1992. 319 с.

12. Russell J. Progressive Collapse of Reinforced Concrete Flat Slab Structures // Nottingham. 2015. 219 p.

13. Alkadi S.A., Fedorova N.V., Osovskiyh O.E. Analysis of reinforced concrete space frame deformation with composite sections elements // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 456. URL: [researchgate.net/publication/330026713\\_Analysis\\_of\\_reinforced\\_concrete\\_space\\_frame\\_deformation\\_with\\_composite\\_sections\\_elements](https://researchgate.net/publication/330026713_Analysis_of_reinforced_concrete_space_frame_deformation_with_composite_sections_elements)

14. Трекин Н.Н. Пространственная работа несущих элементов каркасной системы с учетом нелинейности и податливости узловых сопряжений: диссертация доктора техн. наук. М.: 2003. 421с.

15. Thonstad Travis, Weigand Jonathan, Bao Yihai, Main Joseph A. New Connections for Enhancing Robustness of Precast Concrete Frame Structures // Convention and National Bridge Conference. Denver. 2018. URL:

researchgate.net/publication/335368557\_New\_Connections\_for\_Enhancing\_Robustness\_of\_Precast\_Concrete\_Frame\_Structures

16. Lew H.S., Main J.A., Bao Y., Sadek F., Chiarito V.P., Robert S.D., Torres J.O. Performance of precast concrete moment frames subjected to column removal: Part 1, experimental study // PCI Journal. 2017. Volume: 62. №5. pp. 35-52.

17. Колчунов В.И., Бушова О.Б. Деформирование железобетонных каркасов многоэтажных зданий в запредельных состояниях при особых воздействиях // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2022. №4. С.297-306.

18. Колчунов В.И., Бушова О.Б., Кореньков П.А. Деформирование и разрушение железобетонных рам с ригелями, армированными наклонными стержнями, при особых воздействиях // Строительство и реконструкция. 2022. №1. С. 18-28. URL: doi.org/10.33979/2073-7416-2022-99-1-18-28

19. Taheri M., Sani H.P. Investigation of nonlinear behavior of reinforced concrete moment frames retrofitted with steel haunch bracing under progressive collapse // Journal of Structural and Construction Engineering. 2021. №8. pp. 296-313.

20. Краснощеков Ю.В., Саунин В.И. Влияние трения на взаимодействие элементов сборных железобетонных перекрытий // Вестник СибАДИ. 2017. выпуск 1. С. 97-103. URL: doi.org/10.26518/2071-7296-2017-1(53)-97-103

### References

1. Perel'muter A.V., Kabantsev O.V. Vestnik MGSU. 2020. Volume 15. Issue 12. pp. 1673–1684.

2. Trekin N.N., Kodysh E.N., Shmakov S.D., Terekhov I.A., Kudyakov K.L., International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2021. Vol. 17, pp. 108–116 URL: doi.org/10.22337/2587-9618-2021-17-1-108-116 (published: 24.03.2017)

---

3. Plotnikov A.I. Dinamika uprugoplasticheskikh zhelezobetonnykh balok pri deystvii intensivnykh energeticheskikh proyavleniy rezkogo kharaktera: dissertatsiya kandidata tekhnicheskikh nauk [Dynamics of elastoplastic reinforced concrete beams under the action of intense energy manifestations of a sharp nature: dissertation of a candidate of technical sciences]: M.: 1994. 375 p.

4. Gushcha YU.P. Issledovaniye izgibayemykh zhelezobetonnykh elementov pri rabote sterzhnevoy armatury v uprugo-plasticheskoy stadii: dissertatsiya doktora tekhn. nauk [Investigation of bent reinforced concrete elements during operation of bar reinforcement in the elastic-plastic stage: dissertation of Doctor of Engineering] M.: 1967. 401 p.

5. Tamov M.A. Issledovaniye zhelezobetonnykh izgibayemykh konstruktsiy, armirovannykh stalyami povyshennoy prochnosti, pri kratkovremennom dinamicheskom nagruzhении: dissertatsiya kandidata tekhn. nauk [Study of reinforced concrete bending structures reinforced with high strength steels under short-term dynamic loading: dissertation of a candidate of technical sciences]: M.: 1981. 150 p.

6. Kolchunov V.I., Koren'kov P.A., Guok F.D. Vestnik MGSU. 2021. №11. pp. 1462-1472.

7. Medyankin M.D. Deformirovaniye betona pri statiko-dinamicheskom nagruzhении zhelezobetonnykh konstruktsiy: dissertatsiya kandidata tekhn. nauk [Deformation of concrete under static-dynamic loading of reinforced concrete structures: dissertation of a candidate of technical sciences]: M.: 2021. 163 p.

8. Qian Kai, Wang Dong-Fang, Huang Ting, Weng Yun-Hao. Research Journal of The Institution of Structural Engineers. 2022. Vol. 36. pp. 650–664. URL: [doi.org/10.1016/j.istruc.2021.12.036](https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.12.036)

9. Fedorova N.V., Vu Ngok Tuyen, Yakovenko I.A. M.: Vestnik MGSU. 2020. №11. pp. 1513-1522.

---

10. Kabantsev O.V., Mitrovich B. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 456 012002. URL: [researchgate.net/publication/329604538\\_ustification\\_of\\_the\\_special\\_limit\\_state\\_characteristics\\_for\\_monolithic\\_reinforced\\_concrete\\_bearing\\_systems\\_in\\_the\\_progressive\\_collapse\\_mode](https://researchgate.net/publication/329604538_ustification_of_the_special_limit_state_characteristics_for_monolithic_reinforced_concrete_bearing_systems_in_the_progressive_collapse_mode)

11. Popov N.N., Rastorguyev B.S., Zabegayev A.V., Raschet konstruktsiy na dinamicheskiye stal'nyye nagruzki [Calculation of structures for dynamic steel loads] M.: Vyssh. shk., 1992. 319 p.

12. Russell J. Progressive Collapse of Reinforced Concrete Flat Slab Structures. Nottingham. 2015. 219 p.

13. Alkadi S.A., Fedorova N.V., Osovskiyh O.E. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 456. URL: [researchgate.net/publication/330026713\\_Analysis\\_of\\_reinforced\\_concrete\\_space\\_frame\\_deformation\\_with\\_composite\\_sections\\_elements](https://researchgate.net/publication/330026713_Analysis_of_reinforced_concrete_space_frame_deformation_with_composite_sections_elements)

14. Trekin N.N. Prostranstvennaya rabota nesushchikh elementov karkasnoy sistemy s uchetom nelineynosti i podatlivosti uzlovykh sopryazheniy: dissertatsiya doktora tekhn. nauk [Spatial work of the load-bearing elements of the frame system, taking into account the nonlinearity and compliance of nodal conjugations: thesis of a doctor of technical sciences]: M.: 2003. 421 p.

15. Thonstad Travis, Weigand Jonathan, Bao Yihai, Main Joseph A. Convention and National Bridge Conference. Denver. 2018. URL: [researchgate.net/publication/335368557\\_New\\_Connections\\_for\\_Enhancing\\_Robustness\\_of\\_Precast\\_Concrete\\_Frame\\_Structures](https://researchgate.net/publication/335368557_New_Connections_for_Enhancing_Robustness_of_Precast_Concrete_Frame_Structures)

16. Lew H.S., Main J.A., Bao Y., Sadek F., Chiarito V.P., Robert S.D., Torres J.O. PCI Journal. 2017. Volume: 62. №5. pp. 35-52.

17. Kolchunov V.I., Bushova O.B. Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruktsiy i sooruzheniy. 2022. №4. pp. 297-306.



18. Kolchunov V.I., Bushova O.B., Koren'kov P.A. Stroitel'stvo i rekonstruktsiya. 2022. №1. pp. 18-28. URL: [doi.org/10.33979/2073-7416-2022-99-1-18-28](https://doi.org/10.33979/2073-7416-2022-99-1-18-28)

19. Taheri M., Sani H.P. Journal of Structural and Construction Engineering. 2021. №8. pp. 296-313.

20. Krasnoshchekov Yu.V., Saunin V.I. Vetnik SibADI. 2017. Vypusk 1. pp. 97-103 URL: [doi.org/10.26518/2071-7296-2017-1\(53\)-97-103](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-1(53)-97-103)