

## МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ КОРРОЗИОННО-ПОВРЕЖДЕННЫХ КОЛОНН ПРИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

*М.В. Кудрявцев, k.m.v.29.12.96@yandex.ru*

*А.Г. Тамразян, tamrazian@mail.ru*

*Московский государственный строительный университет, Москва, Россия*

**Аннотация.** При эксплуатации зданий и сооружений может возникнуть коррозия железобетонных несущих конструкций из-за различных факторов (ошибки на стадии проектирования, воздействия внешних агрессивных сред, недостаточный строительный контроль и др.). Таким образом, возникает необходимость в разработке определенных методик расчета конструкций, которые учитывают влияние повреждений на несущую способность и устойчивость. На сегодняшний день существуют инженерные методы расчета коррозионно-поврежденных железобетонных элементов при действии статических и динамических нагрузок. Однако существует потребность в оценке несущей способности коррозионно-поврежденных конструкций при сейсмических воздействиях как при проведении поверочных расчетов существующих зданий, так и на стадии проектирования зданий, подверженных коррозии арматуры за счет повышенной агрессивности окружающей среды или иных негативно воздействующих факторов. В данной статье рассматривается разработанная методика и программа испытаний для оценки сейсмостойкости железобетонных колонн при различных уровнях повреждений арматуры. Данная методика испытаний разработана с рекомендациями ГОСТ 27751, для обеспечения надежности и механической безопасности зданий и сооружений необходимо выполнять расчёты с использованием данных экспериментальных исследований реальных строительных конструкций или моделей строительных объектов, узлов соединений.

**Ключевые слова:** сейсмостойкость, железобетон, коррозия, экспериментальные исследования, испытания

**Для цитирования.** Кудрявцев М.В., Тамразян А.Г. Методика определения несущей способности коррозионно-поврежденных колонн при сейсмических воздействиях // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». 2024. Т. 24, № 1. С. 20–27. DOI: 10.14529/build240103

Original article  
DOI: 10.14529/build240103

## METHODOLOGY FOR DETERMINING THE BEARING CAPACITY OF CORROSION-DAMAGED COLUMNS UNDER SEISMIC EFFECTS

*M.V. Kudryavtsev, k.m.v.29.12.96@yandex.ru*

*A.G. Tamrazyan, tamrazian@mail.ru*

*National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia*

**Abstract.** During building and construction maintenance, corrosion of reinforced concrete bearing structures may occur due to various factors (errors at the design stage, exposure to external aggressive media, insufficient construction control, etc.). Thus, there is a need to develop certain methods of calculation of structures which take into account the effect of damage on load-bearing capacity and stability. To date, there are engineering methods for calculating corrosion-damaged reinforced concrete elements under the action of static and dynamic loads. However, there is a need to assess the bearing capacity of corrosion-damaged structures under seismic effects, both in verification calculations of existing buildings and at the design stage of buildings subject to corrosion of reinforcement due to increased aggressiveness of the environment or other negatively influencing factors. The paper discusses the developed methodology and test program for evaluating the seismic resistance of reinforced concrete columns at various levels of reinforcement damage. This test methodology is developed with the recommendations of GOST 27751. To ensure the reliability and mechanical safety of buildings and constructions, it is necessary to perform calculations using data from experimental studies of real building structures or models of construction sites and connection nodes.

**Keywords:** earthquake resistance, reinforced concrete, corrosion, experimental studies, tests

**For citation.** Kudryavtsev M.V., Tamrazyan A.G. Methodology for determining the bearing capacity of corrosion-damaged columns under seismic effects. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture*. 2024;24(1):20–27. (in Russ.). DOI: 10.14529/build240103

### Введение

Большая часть существующих зданий и сооружений построены из железобетона. При несоблюдении технических требований нормативной документации на стадии проектирования нарушения мер по защите от коррозии на строительной площадке, отсрочка капитальных ремонтов при эксплуатации и другие виды пренебрежительного характера пагубно влияют на железобетонные конструкции, что может привести к коррозии бетона и арматуры вследствие внешнего воздействия агрессивных сред [1]. Данное упущение приводит к деградации свойств материалов и последующему разрушению конструктивных элементов и сооружений в целом [2].

Среди имеющихся механизмов износа коррозии арматуры, вероятно, является наиболее важным, который может привести к ухудшению механических свойств арматуры, бетона и нарушению сцепления между ними [3]. Вышеупомянутое ухудшение свойств материала из-за коррозии арматуры может привести к значительному снижению конструктивных характеристик железобетонных конструкций при землетрясениях.

Железобетонные колонны являются основными элементами каркаса здания, воспринимающими как вертикальные, так и горизонтальные нагрузки, которые играют ключевую роль в сейсмостойкости здания.

В настоящее время актуальной проблемой является оценка сейсмостойкости существующих зданий с накопленными повреждениями [4]. Необходимо проверка несущей способности конструкций зданий и узлов их соединений при заданном сейсмическом воздействии. Фактический уровень несущей способности в целом и отдельных узлов соединений существующих зданий и сооружений определяет ряд факторов: учёт фактических физико-механических свойств материалов конструкции; детализировка конструктивных элементов узлов сопряжения; уточнение фактических нагрузок на каркас здания; учёт наличия внутренних и внешних дефектов, повреждений, возникших за период эксплуатации.

Таким образом, расчёт коррозионно-поврежденных железобетонных конструкций при сейсмическом воздействии представляет собой

совокупность расчётов общей сейсмостойкости здания в целом с последующей оценкой несущей способности локальных узлов сопряжения элементов с коррозионными повреждениями [5].

Теория сейсмостойкости представляет собой самостоятельный раздел динамики сооружений, который характеризуется специфическими задачами и методами исследований. На сегодняшний день существует несколько основных методик определения сейсмостойкости конструкций, рассмотрим некоторые из них.

Известно, что оценки сейсмостойкости зданий и сооружений основываются на принципах допущения пластических деформаций при землетрясении. Для зданий и сооружений последствия землетрясения зависят от характеристик сейсмического воздействия, свойств грунтов основания площадки строительства и качества строительства [6].

#### 1. Спектральная теория сейсмостойкости

В основу отечественных норм положена формула определения инерционных сейсмических нагрузок с рядом эмпирических поправочных коэффициентов. Данный метод расчёта сейсмостойкости базируется на коэффициентах динамичности в зависимости от частот и форм собственных колебаний конструкции.

При расчёте по ЛСМ за нелинейную работу конструкции отвечает коэффициент  $K_1$  – коэффициент допускаемых повреждений, значения которого колеблются в пределах от 1 (повреждения не допускаются) до 0,12 (возможные значительные деформации и повреждения) зданий и сооружений, значения которого принимаются в диапазоне от 0,12 до 1,0 [7].

При решении простейшей системы с одной степенью свободы под действием повторяющейся нагрузки к ней  $n$  раз можно применить метод равенства энергии при упругой работе и упругопластической (рис. 1).

Анализируя графики упругой и упругопластической работы, на основе равенства энергий  $W_y = W_n$  выражаем коэффициент редукции  $R$ :

$$R = \frac{P_y}{P_T} = \sqrt{2\mu - 1}. \quad (1)$$

В отечественных нормах приведён аналог коэффициента редукции  $R$  – коэффициент допускае-

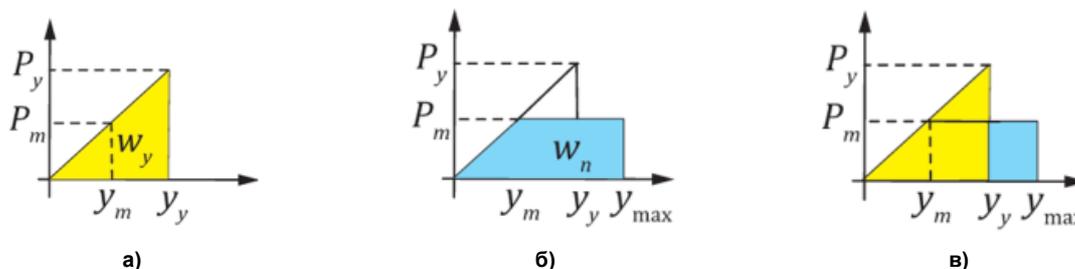


Рис. 1. К определению энергии при упругой и упругопластической работе: а – график упругой работы; б – график упругопластической работы; в – график равенства энергии при упругой и упругопластической работе

мых повреждений  $K_1$ , который обратно пропорционален коэффициенту редукации:

$$K_1 = \frac{1}{R} = \frac{1}{\sqrt{2\mu-1}}, \quad (2)$$

где  $\mu$  – коэффициент пластичности, который равен отношению пластических деформаций к упругим.

*2. Метод Push Over – упрощённый метод упругопластического динамического анализа (нелинейный статический метод)*

Современная теория сейсмостойкости предлагает два основных метода расчета: спектральный метод (инженерный) и прямой динамический. Существует еще один метод, называемый нелинейным статическим (Pushover Analysis), который, с одной стороны, является инженерным, с другой – позволяет в той или иной степени учесть нелинейные свойства конструкций не в виде коэффициента к инерционным силам (как это сделано в спектральном методе), а непосредственно из запасов сооружения.

Метод Push Over позволяет оценить поведение конструкции при сейсмических воздействиях за пределом упругости, связывая несущую способность, представленную как зависимость перемещения верха здания от силы сдвига в основании, с сейсмическим требованием, представленным в виде спектра реакции (рис. 2) [8, 9].

Основными параметрами в данном методе являются период колебаний (3) конструкции и коэффициент затухания (4).

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{S_{dt}}{S_{at}}} \quad (3)$$

$$\xi_s = 0.05 + k \frac{E_d}{4\pi E_E} \quad (4)$$

На основе полученных величин вычисляется точка пересечения кривых несущей способности и спектра реакции – динамического равновесия, по которой определяется ожидаемое поведение конструкции.

*3. Прямой динамический метод*

Динамический расчёт берёт своё начало с конца 70-х годов и основывается на методе прямого интегрирования уравнения движения во времени. Расчёт заключается в том, что при интегрировании уравнений движения применяются инструментальные или синтезированные акселерограммы [10].

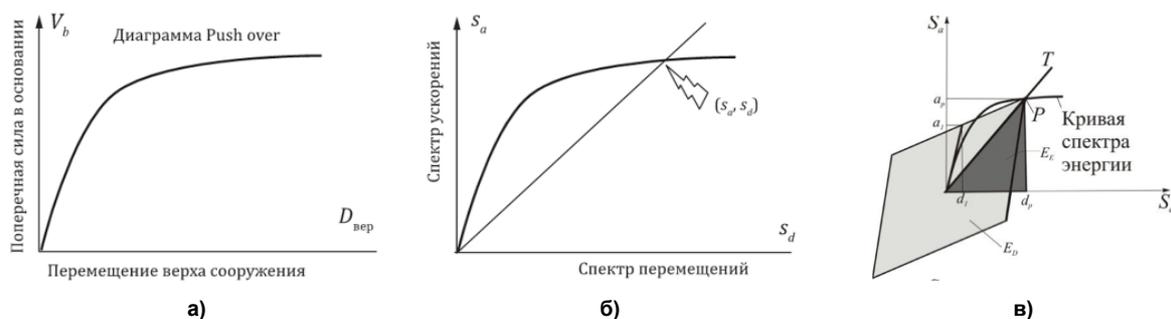


Рис. 2. Диаграммы к расчёту по методу Push Over: а) диаграмма Push Over « $V_b - D_{\text{верх}}$ »; б) диаграмма характеристики; в) определение параметров диссипации энергии ( $E_d, E_E$ )

В основе реализации прямого динамического метода лежит дифференциальное уравнение движения системы. Данное уравнение в матричной форме для системы с конечным числом степеней свободы имеет следующий вид (5):

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = F^a, \quad (5)$$

где  $u$  – вектор узловых перемещений,  $\dot{u}$  – вектор узловых скоростей,  $\ddot{u}$  – вектор узловых ускорений,  $M$  – матрица масс системы,  $C$  – матрица демпфирования,  $K$  – матрица жесткости,  $F^a$  – вектор действующих на систему нагрузок.

Применение этого метода допускает учесть все виды нелинейностей (физическую, геометрическую и конструктивную) и иметь решение задачи в нелинейной постановке.

**Метод исследования**

Коррозия арматурной стали является наиболее часто встречающимся дефектом, который приводит к преждевременному разрушению железобетонных конструкций. Снижение прочности железобетонных конструкций из-за коррозии не всегда приводит к разрушению под действием эксплуатационных нагрузок. Но при экстремальных нагрузках, таких как землетрясения, пораженные коррозией конструкции могут подвергнуться катастрофическому разрушению. Следовательно, крайне важно оценить сейсмические характеристики существующих железобетонных конструкций, пораженных коррозией.

Для оценки несущей способности зданий с приобретенными повреждениями рабочей арматуры в виде её коррозии предлагается экспериментальная методика определения прочности, деформативности и общей сейсмостойкости таких зданий.

**1. Экспериментальные образцы**

В качестве образца принята железобетонная колонна с размерами  $100 \times 100 \times 700$  мм ( $\lambda_h = 14$ ), схема закрепления – жёсткая заделка – шарнир ( $l_0 = 1,4$  м). Схемы армирования и закрепления показаны на рис. 3, 4.

Армирование выполняется в виде вязанного каркаса (рис. 5, 6): поперечная арматура класса А240 Ø6 мм и продольная арматура класса А500 Ø6 мм. Был выполнен подбор состава для бетона

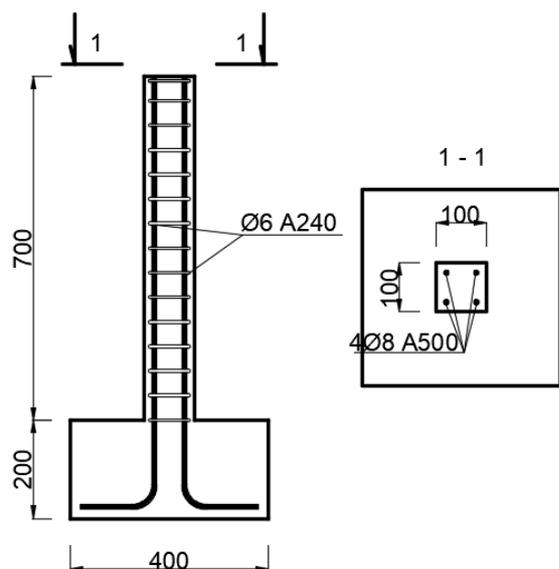


Рис. 3. Армирование опытного образца

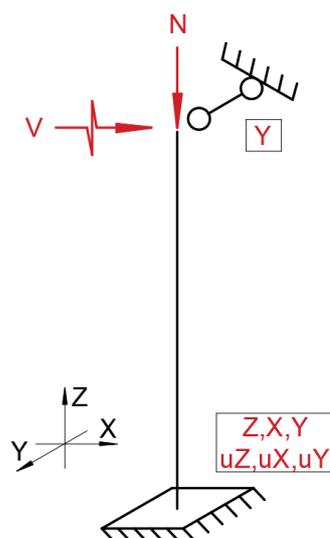


Рис. 4. Схема закрепления



Рис. 5. Железобетонная колонна



Рис. 6. Каркас для образца

класса В25, пропорции компонентов составляют (на 1 м<sup>3</sup>): цемент М500 (ЦЕМ II – 42,5) – 317 кг, щебень (фракция 5–10) – 1050 кг, песок речной – 864 кг, вода – 190 л.

Образцы были разделены на 2 вида испытаний с разными режимами нагружения – квазистатическое малоцикловое нагружение и динамическое (сейсмическое). Сводная таблица образцов представлена в таблице.

## 2. Электрокоррозия арматуры

Для корродирования стальной арматуры внутри образцов колонн применяется метод ускоренной электрокоррозии. Суть метода заклю-

чается в потере массы арматуры вследствие влияния постоянного тока. Для количественной оценки уровня коррозии используется средний процент потери массы проржавевшей арматуры, который определяется соотношением между потерей массы поврежденной коррозией арматуры и некорродировавшей.

Перед бетонированием образцов на расстоянии 200–250 мм по длине стержня к нему подвешивается электрический провод и выводится за пределы опалубки, все выведенные провода связываются, затем образец бетонируют.

В лабораторных условиях образцы помещаются в герметичную ёмкость в 5%-ный раствор

Образцы колонн

Коррозия, %	Малоцикловое нагружение			Динамическое нагружение
	$N/N_{ult} = 0,3$	$N/N_{ult} = 0,8$	$N/N_{ult} = 1,0$	0,1
0	1	1	1	1
15	2	2	1	2
30	2	2		2

NaCl. К заранее выведенным проводам подключается положительный заряд от блока питания, отрицательный заряд соединяется с пластиной из нержавеющей стали, которая размещается в 5%-ном растворе NaCl. Схема стенда представлена на рис. 7.

Потерю массы арматуры можно посчитать по закону Фарадея (6):

$$t = \frac{F \cdot n_s \cdot \rho_s \cdot \mu \cdot A_s}{M \cdot i \cdot C_s}, \quad (6)$$

где  $t$  – время коррозии,  $F$  – постоянная Фарадея (96 485 Кл/моль),  $n_s$  – валентность железа после реакции потери электронов ( $n_s = 2$ ),  $\rho_s$  – плотность железа ( $\rho_s = 7,85$  г/см<sup>3</sup>),  $\mu$  – коэффициент коррозии,  $A_s$  – поперечная площадь стержня,  $M$  – атомная масса железа ( $M = 56$  г/моль),  $i$  – плотность электрического тока ( $i = A/cm^2$ ),  $C_s$  – длина окружности поврежденной арматуры.

Решая обратную задачу, задав все параметры и время, получаем силу тока на источнике питания для необходимого процента коррозии по потере массы.

### 3. Методика проведения испытаний и обработка результатов

Испытания проводятся в 3 этапа:

1) статическое осевое нагружение колонн с коррозией и без неё для определения фактической несущей способности ( $N_{ult}$ );

2) испытание на малоцикловое знакопеременное горизонтальное нагружение с осевым пригрузом образцов с коррозией и без неё;

3) динамические испытания образцов с коррозией и без неё по схеме осциллятора с одиночной массой на действие заданных вынужденных ускорений и частот.

Испытание на малоцикловое знакопеременное горизонтальное нагружение рекомендуется проводить по диаграмме (рис. 8). Нагружение производится ступенями по перемещениям до достижения пластических деформаций в образце, далеекратно увеличивая их. Испытание проводится до полного исчерпания несущей способности колонны.

Динамическое испытание образцов колонн с сосредоточенной массой на свободном крае при действии заданного эквивалентного сейсмического воздействия проводится по ГОСТ Р ИСО 7626–2 [11].

Результатами экспериментальных данных являются определение и сравнение несущей способности железобетонных колонн, подвергнутых коррозии арматуры при действии горизонтальной нагрузки (моделирующей сейсмические нагрузки), а также определение ряда параметров, влияющих на общую сейсмостойкость зданий.

При проведении испытаний по методике 3 экспериментально можно определить основные динамические характеристики колебательной системы: период и частоту колебаний. При изучении гармонических колебаний диаграмма деформирования системы выглядит в виде замкнутой кривой, имеющей эллиптический вид. Один замкнутый цикл называется петля гистерезиса, которая характеризует рассеивание энергии за счёт внутрен-

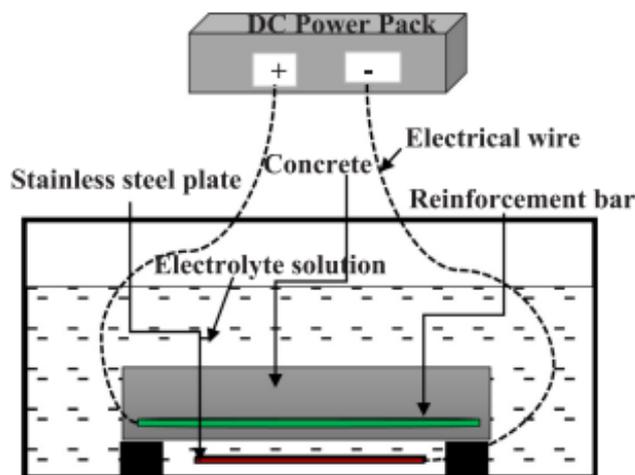


Рис. 7. Схема коррозии арматуры в теле бетона

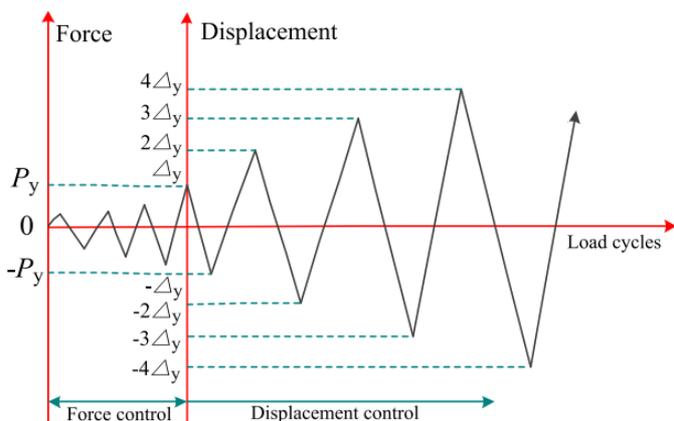


Рис. 8. Диаграмма нагружения

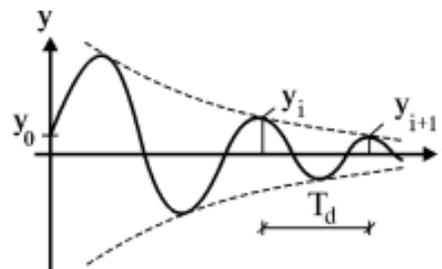


Рис. 9. К определению декремента колебаний

них сил трения и определяется четвертью площади петли. Таким образом, коэффициент поглощения энергии определяется по формуле

$$\psi = \frac{\Delta W}{W}, \quad (7)$$

где  $\Delta W$  – изменение площади петли гистерезиса,  $W$  – работа упругих сил за четверть петли гистерезиса.

Экспериментально получив коэффициент поглощения энергии, можно ввести ещё один параметр – коэффициент неупругого сопротивления  $\gamma$ :

$$\gamma = \frac{\psi}{2\pi}. \quad (8)$$

При проведении динамических расчетов важной характеристикой является коэффициент затухания –  $\alpha$ . Существует связь между коэффициентом затухания и коэффициентом неупругого сопротивления, которая выражается в виде

$$\gamma = \frac{2\alpha}{\omega} \Rightarrow \alpha = \frac{\gamma\omega}{2}. \quad (9)$$

Для оценки затухания системы вводится логарифмический декремент колебания –  $\delta$ . Быстрота затухания (рис. 9) определяется как натуральный логарифм отношения амплитуд колебаний через один период:

$$\delta = \ln \frac{y_i}{y_{i+1}} = \alpha T. \quad (10)$$

### Выводы

По требованиям обязательной к исполнению нормативной документации, такой как ФЗ-384 [12] и ГОСТ 27751 [1], необходимо обновлять и совершенствовать методики расчета строительных конструкций, зданий и сооружений. Одним из методов подтверждения несущей способности являются научно-экспериментальные исследования.

Для оценки фактической сейсмостойкости зданий и сооружений, находящихся в длительной эксплуатации, необходимо уточнять изменившиеся прочностные, жесткостные и динамические характеристики здания за счёт накопления повреждений. В современной литературе часто подвергаются обсуждениям проблемы обеспечения несущей способности коррозионно-поврежденных железобетонных зданий, однако степень разработанности недостаточна и требует уточнения. Наиболее точные результаты при разработке методик расчета могут дать экспериментальные методы исследования [13].

Разработанная программа и методика проведения испытаний поможет уточнить и дополнить знания о сейсмостойкости поврежденных железобетонных зданий с коррозионными повреждениями.

### Список литературы

1. ГОСТ 27751–2014. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения. М.: Стандартинформ, 2019. 16 с.
2. Тамразян А.Г., Попов Д.С. Напряженно-деформированное состояние коррозионно-поврежденных железобетонных элементов при динамическом нагружении // Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 2. С. 19–26. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.02.19–26
3. Тамразян А.Г., Мацевич Т.А. Анализ надежности железобетонной плиты с корродированной арматурой. // Строительство и реконструкция. 2022. № 1 (99). С. 89–98. DOI: 10.33979/2073-7416-2022-99-1-89-98
4. Tamrazyan A.G., Avetisyan L.A. Experimental and Theoretical Study of Reinforced Concrete Elements under Different Characteristics of Loading at High Temperatures In: XXV Polish – Russian – Slovak Seminar

“*Theoretical Foundation of Civil Engineering*”, Chelyabinsk, 19–20 may 2016. Chelyabinsk: Elsevier Ltd.; 2016. P. 721–725. DOI 10.1016/j.proeng.2016.08.232

5. Kabantsev O.V., Tamrazyan A.G. Allowing for changes in the calculated scheme during the analysis of structural behaviour. *Magazine of Civil Engineering*. 2014;5(49):15–26. (in Russ.) DOI: 10.5862/MCE.49.2.

6. Kalandarbekov I.K., Sharipov Sh.Sh., Kalandarbekov I.I. On estimation of the dependence between the coefficients of permissible damage and plasticity in the framework of the spectral theory of seismic resistance. *Polytechnic Newsletter: Series Engineering Studies*. 2021;1(53):141–146. (in Russ.)

7. Mkrtychev O.V., Andreev M.I. Estimation of the value of the coefficient of permissible damages for a frame-bonded reinforced concrete frame under earthquake. *Industrial and Civil Engineering*. 2020;9:34–40. (in Russ.) DOI: 10.33622/0869-7019.2020.09.34-40

8. Sosnin A.V. Infobase and formula of a two-step-state computation technique of rc earthquake-resistance frame systems using the pushover analysis conception. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2017;12:37–49 (in Russ.)

9. Sosnin A.V. About a refinement procedure of seismic-force-reduction factor K1 using a pushover curve for earthquake-resistance estimation of Rc LSC frame buildings. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2017. № 1–2. (in Russ.)

10. Perelmuter A.V., Kabantsev O.V. On conceptual provisions of design standards for earthquake-resistant construction. *Vestnik MGSU*. 2020;15(12):1673-1684. (in Russ.) DOI: 10.22227/1997-0935.2020.12.1673-1684

11. *GOST R ISO 7626–2—16 Vibratsiya i udar. Eksperimental'noe opredelenie mekhanicheskoy podvizhnosti. Izmereniya, ispol'zuyushchie odnotochechnoe postupatel'noe vozbuzhdenie prisoedinennym vibrovobuditelem*. [GOST R ISO 7626-2-16 Vibration and shock. Experimental determination of mechanical mobility. Measurements using single-point translational excitation by an attached vibration exciter]. Moscow: Standartinform Publ.; 2019. 24 p. (in Russ.)

12. *FZ №384 Tekhnicheskiiy reglament o bezopasnosti zdaniy i sooruzheniy*. [Federal Law No. 384 Technical Regulations on the safety of buildings and structures]. Moscow; 2009. 33 p. (in Russ.)

13. Tamrazyan A.G., Avetisyan L.A. Experimental research in eccentrically compressed reinforced concrete elements during short-term dynamic loadings under fire conditions. *Industrial and Civil Engineering*. 2014;4:24–28. (in Russ.)

#### References

1. *GOST 27751–2014. Nadezhnost' stroitel'nykh konstruksiy i osnovaniy. Osnovnye polozheniya*. [GOST 27751-2014 “Reliability of building structures and foundations. Basic provisions”]. Moscow: Standartinform Publ.; 2019. 16 p. (in Russ.)

2. Tamrazyan A.G., Popov D.S. Stress-strain state of corrosion-damaged reinforced concrete elements under dynamic loading. *Industrial and Civil Engineering*. 2019;2:19-26. (in Russ.) DOI: 10.33622/0869-7019.2019.02.19-26

3. Tamrazyan A.G., Matseevich T.A. Reliability analysis of reinforced concrete slabs with corroded reinforcements. *Construction and Reconstruction*. 2022;1(99):89–98. (in Russ.) DOI: 10.33979/2073-7416-2022-99-1-89-98

4. Tamrazyan A.G., Avetisyan L.A. Experimental and Theoretical Study of Reinforced Concrete Elements under Different Characteristics of Loading at High Temperatures In: *XXV Polish – Russian – Slovak Seminar “Theoretical Foundation of Civil Engineering”, Chelyabinsk, 19–20 May 2016*. Chelyabinsk: Elsevier Ltd.; 2016. P. 721–725. DOI 10.1016/j.proeng.2016.08.232

5. Kabantsev O.V., Tamrazyan A.G. Allowing for changes in the calculated scheme during the analysis of structural behaviour. *Magazine of Civil Engineering*. 2014;5(49):15–26. (in Russ.) DOI: 10.5862/MCE.49.2.

6. Kalandarbekov I.K., Sharipov Sh.Sh., Kalandarbekov I.I. On estimation of the dependence between the coefficients of permissible damage and plasticity in the framework of the spectral theory of seismic resistance. *Polytechnic Newsletter: Series Engineering Studies*. 2021;1(53):141–146. (in Russ.)

7. Mkrtychev O.V., Andreev M.I. Estimation of the value of the coefficient of permissible damages for a frame-bonded reinforced concrete frame under earthquake. *Industrial and Civil Engineering*. 2020;9:34–40. (in Russ.) DOI: 10.33622/0869-7019.2020.09.34-40

8. Sosnin A.V. Infobase and formula of a two-step-state computation technique of rc earthquake-resistance frame systems using the pushover analysis conception. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2017;12:37–49 (in Russ.)

9. Sosnin A.V. About a refinement procedure of seismic-force-reduction factor K1 using a pushover curve for earthquake-resistance estimation of Rc LSC frame buildings. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2017. № 1–2. (in Russ.)

10. Perelmuter A.V., Kabantsev O.V. On conceptual provisions of design standards for earthquake-resistant construction. *Vestnik MGSU*. 2020;15(12):1673–1684. (in Russ.) DOI: 10.22227/1997-0935.2020.12.1673-1684

11. GOST R ISO 7626-2—16 *Vibratsiya i udar. Eksperimental'noe opredelenie mekhanicheskoy podvizhnosti. Izmereniya, ispol'zuyushchie odnotochechnoe postupatel'noe vozбуzhdenie prisoedinennym vibrovzbuditelem.* [GOST R ISO 7626-2-16 Vibration and shock. Experimental determination of mechanical mobility. Measurements using single-point translational excitation by an attached vibration exciter]. Moscow: Standartinform Publ.; 2019. 24 p. (in Russ.)

12. FZ №384 *Tekhnicheskij reglament o bezopasnosti zdaniy i sooruzheniy.* [Federal Law No. 384 Technical Regulations on the safety of buildings and structures]. Moscow; 2009. 33 p. (in Russ.)

13. Tamrazyan A.G., Avetisyan L.A. Experimental research in eccentrically compressed reinforced concrete elements during short-term dynamic loadings under fire conditions. *Industrial and Civil Engineering.* 2014;4:24–28. (in Russ.)

**Информация об авторах:**

**Кудрявцев Максим Владимирович**, аспирант кафедры «Железобетонные и каменные конструкции», Московский государственный строительный университет, Москва, Россия, k.m.v.29.12.96@yandex.ru

**Тамразян Ашот Георгиевич**, заведующий кафедрой «Железобетонные и каменные конструкции», доктор технических наук, профессор, Московский государственный строительный университет, Москва, Россия, tamrazian@mail.ru

**Information about the authors:**

**Maksim V. Kudryavtsev**, Postgraduate student of the Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia, k.m.v.29.12.96@yandex.ru

**Ashot G. Tamrazyan**, Head of the Department of Reinforced Concrete Construction, Doctor of Technical Sciences, Professor, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia, tamrazian@mail.ru

**Статья поступила в редакцию 16.11.2023, принята к публикации 24.11.2023.**

**The article was received on 16.11.2023 and was accepted for publication on 24.11.2023.**