УДК 692 DOI: 10.33622/0869-7019.2020.11.99-104

Возможный подход к определению коэффициентов значимости строительных конструкций

Николай Геннадьевич КЕЛАСЬЕВ[1], кандидат технических наук, e-mail: kelasyev@mail.ru

Эмиль Наумович КОДЫШ[1], доктор технических наук, профессор, e-mail: otks@yandex.ru

Николай Николаевич ТРЕКИН[1], доктор технических наук, профессор, e-mail: otks@yandex.ru

Иван Александрович ТЕРЕХОВ[1,2], кандидат технических наук, e-mail: terekhov-i@mail.ru

Александр Викторович РЭУЦУ[1], аспирант, e-mail: otzs@yandex.ru

Сергей Дмитриевич ШМАКОВ[1], аспирант, e-mail: otks@yandex.ru

[1] АО «Центральный научно-исследовательский и проектно-экспериментальный институт промышленных зданий и сооружений» (ЦНИИПромзданий), 127238 Москва, Дмитровское ш., 46, корп. 2

[2] ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта» (МИИТ), 127994 Москва, ул. Образцова, 9, стр. 9

Аннотация. *Авторы продолжают исследования в части уточнения коэффициентов значимости для элементов зданий. Представлено продолжение работы, опубликованной в статье «Определение срока службы конструкций, зданий и сооружений» (см. журнал «Промышленное и гражданское строительство». 2020. № 2. С. 12—17). В публикации приводятся предложения по разработке дифференцированного подхода к определению коэффициентов значимости, учитывающего местоположение строительных конструкций, путем проведения численных исследований методом конечных элементов. Внедрение дифференцированного подхода может способствовать более целесообразному расходованию ресурсов на протяжении всего жизненного цикла зданий и сооружений, что особенно актуально при проектировании защиты от прогрессирующего обрушения, а также в вопросах определения остаточного срока службы зданий и сооружений. Предложения по разработке методики экспериментально проверены и представлены на примере пробного расчета. Авторами представлен к обсуждению наиболее простой и понятный алгоритм определения коэффициентов значимости, заключающийся в сопоставлении объемов затрат, необходимых для восстановления несущей способности поврежденных конструкций после удаления одного конструктивного элемента с объемом затрат при удалении другого аналогичного конструктивного элемента. Анализ коэффициентов значимости проведен на примере сборного железобетонного здания, защищенного от прогрессирующего обрушения. Коэффициенты значимости для элементов зданий могут быть использованы для уточнения коэффициентов надежности по ответственности, совершенствования нормативных документов по защите от прогрессирующего обрушения, определения остаточного срока службы при создании нового нормативного документа или при совершенствовании действующих нормативов. Рассмотренные вопросы по разработке методики дифференцированного подхода к определению коэффициентов значимости и полученные результаты численного эксперимента, выполненного согласно данной методике, будут актуальны для проектных организаций.*

Ключевые слова: *коэффициент значимости, остаточный срок службы, техническое состояние, капитальный ремонт, деформации, дифференцированный подход, методика, прогрессирующее обрушение, сборное железобетонное здание.*

POSSIBLE APPROACH TO DETERMINING THE SIGNIFICANCE FACTORS OF BUILDING STRUCTURES

Nikolay G. KELASYEV[1], e-mail: kelasyev@mail.ru, **Emil N. KODYSH**[1], e-mail: otks@yandex.ru

Nikolai N. TREKIN[1], e-mail: otks@yandex.ru, **Ivan A. TEREKHOV**[1,2], e-mail: terekhov-i@mail.ru

Aleksandr V. REUTSU[1], e-mail: otzs@yandex.ru, **Sergey D. SHMAKOV**[1], e-mail: otks@yandex.ru

[1] Central Scientific Research and Project Experimental Institute of Industrial Buildings and Constructions, Dmitrovskoe shosse, 46, korp. 2, Moscow 127238, Russian Federation

[2] Russian University of Transport (MIIT), ul. Obraztsova, 9, str. 9, Moscow 127994, Russian Federation

Abstract. *The authors continue research in terms of clarifying the coefficients of significance for building elements. The continuation of the work published in the article "Determination of the service life of structures, buildings and structures" is presented (see the journal "Industrial and Civil Engineering", 2020, no. 2, pp. 12—17). The publication provides proposals for the development of a differentiated approach to determining the significance factors, taking into account the location of building structures, by conducting numerical studies by the finite element method. The introduction of a differentiated approach can contribute to a more rational use of resources throughout the entire life cycle of buildings and structures, which is especially important when designing protection against progressive collapse, as well as in determining the residual life of buildings and structures. Proposals for the development of a methodology are experimentally verified and presented on the example of a trial calculation. The authors presented for discussion the simplest and most understandable algorithm for determining the significance coefficients, which consists in comparing the volume of costs required to restore the bearing capacity of damaged structures after removing one structural element with the volume of costs when removing another similar structural element. The analysis of the coefficients of significance was carried out*

© КЕЛАСЬЕВ Н. Г., КОДЫШ Э. Н., ТРЕКИН Н. Н., ТЕРЕХОВ И. А., РЭУЦУ А. В., ШМАКОВ С. Д., 2020

on the example of a prefabricated reinforced concrete building protected from progressive collapse. Significance coefficients for building elements can be used to clarify the reliability coefficients for liability, improve regulatory documents for protection against progressive collapse, determine the residual service life when creating a new regulatory document or when improving existing standards. The considered issues on the development of a methodology for a differentiated approach to determining the significance coefficients and the results of a numerical experiment performed according to this methodology will be relevant for design organizations.
***Key words**: significance coefficient, residual service life, technical condition, overhaul, deformations, differentiated approach, methods, progressive collapse, precast concrete building.*

Введение

Использование обоснованных расчетом коэффициентов значимости строительных конструкций в здании и сооружении будет способствовать применению дифференцированного экономичного подхода к расходованию ресурсов при проектировании, возведении и эксплуатации объектов строительства в течение проектного срока службы. В настоящее время вопрос дифференцированного подхода к назначению коэффициентов значимости конструкций особенно важен при проектировании защиты от прогрессирующего обрушения. История развития вопроса определения остаточного срока службы, а также обзор наиболее часто применяемых при определении остаточного срока службы методик рассмотрены авторами в статье [1]. Необходимо отметить, что главным подходом, обеспечивающим необходимый проектный срок службы объектов строительства, стал метод снижения уровня риска. Его суть заключается в уточнении коэффициента надежности по ответственности, зависящего от категории ответственности здания или сооружения, которая приведена в ГОСТ 27751—2014 «Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения». Коэффициенты надежности по ответственности достигают значения 1,2, т. е. прочность и, следовательно, несущая способность горизонтальных и вертикальных элементов должны быть увеличены на 20 %.

Основной метод расчета защиты зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения — ситуационный подход к расчету с поочередным удалением одного несущего элемента здания или сооружения. При этом независимо от местоположения удаляемого элемента конструкции объекта строительства рассматриваются с одинаковыми характеристиками, без учета различной вероятности обеспечения сохранности здания.

Развитие методики дифференцированного подхода к определению коэффициентов значимости позволит создавать и совершенствовать нормативные документы в области определения остаточного срока службы строительных конструкций зданий и сооружений, существенно повысив их достоверность. Изучение механизмов обрушения зданий и сооружений даст возможность снизить издержки строительства при проектировании защиты зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения, определяя наиболее значимые с точки зрения сохранения здания элементы строительных конструкций. Несущие конструкции разных этажей здания могут иметь различную надежность. Так, последствия от разрушения колонны нижнего этажа отличаются от последствий разрушения колонны верхнего этажа. Аналогичным образом следует рассмотреть и другие элементы, например в перекрытии — ригели и плиты.

Методика дифференцированного подхода

Авторами представлены предложения по разработке методики дифференцированного подхода к определению коэффициентов значимости, учитывающей месторасположение строительных конструкций, путем проведения численных исследований методом конечных элементов.

Суть методики заключается в моделировании последствий при поочередном удалении одного из элементов строительной конструкции с последующей оценкой деформаций и повреждений конструкций в здании, выходящих за границы первого и второго предельных состояний и частично не соответствующих своим функциональным требованиям (особое предельное состояние).

Коэффициент значимости определяется на основе сопоставления объема затрат, необходимых для восстановления поврежденных конструкций после удаления одного конструктивного элемента, с объемом затрат после удаления другого аналогичного конструктивного элемента.

В рамках численных исследований целесообразно применять подход к оценке объема повреждения, аналогичный оценке при защите зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Оценку объектов строительства согласно данной методике производят для зданий и сооружений, запроектированных с учетом защиты от прогрессирующего обрушения.

Определение дифференцированного коэффициента значимости происходит в такой последовательности:

1. Формирование в нелинейной постановке первичной расчетной схемы здания или сооружения, запроектированного с

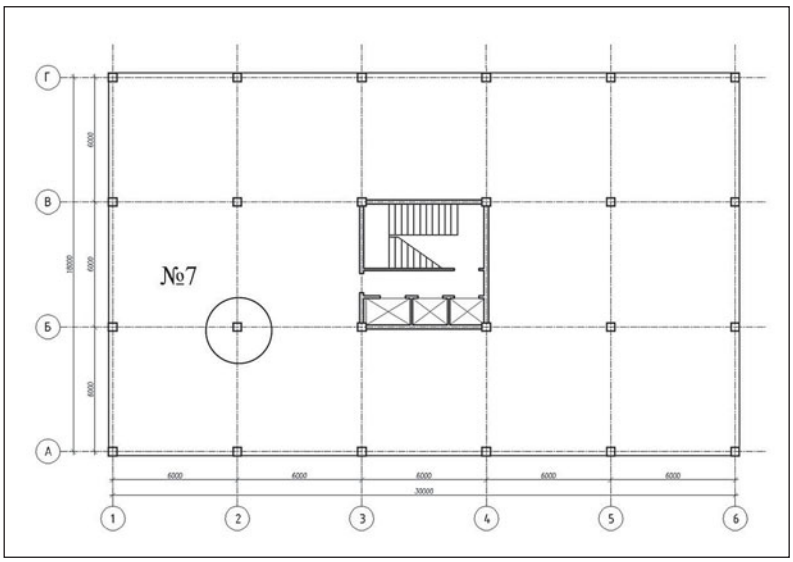

Рис. 1. *План исследуемого здания (кружком отмечена колонна № 7)*

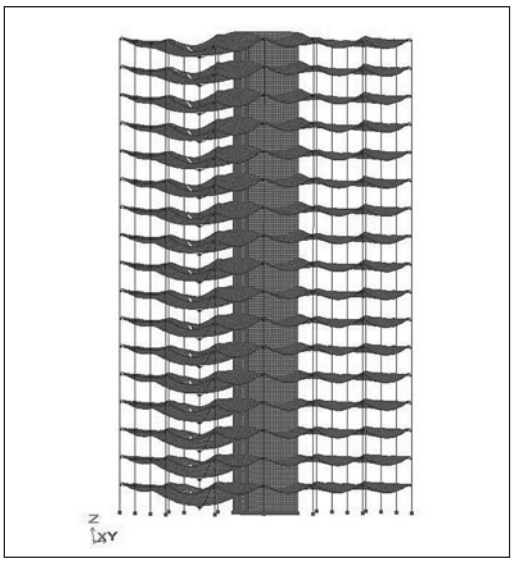

Рис. 2. *Деформированная расчетная схема здания после удаления колонны № 7*

учетом защиты от прогрессирующего обрушения.

2. Преобразование во вторичную схему путем удаления одного из элементов несущих конструкций каркаса здания. Расчет вторичной схемы выполняют на особое сочетание нагрузок с учетом особого предельного состояния согласно СП 385.1325800.2018 «Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Правила проектирования. Основные положения (с изменением № 1)», а также физической нелинейности бетона и арматуры, геометрической и конструктивной (для объектов строительства со сборным каркасом) нелинейности конструкций. Использование графиков деформирования бетона и арматуры, представленных в СП 385.1325800, позволяет достаточно приближенно отражать реальную работу конструкции, обеспечивая минимальный гарантированный запас прочности.

3. Моделирование множества аварийных сценариев с последующей оценкой объема разрушения строительных конструкций при поочередном удалении одной несущей конструкции объекта строительства. На основании этого, сопоставляя объемы затрат, необходимых для восстановления несущей способности поврежденных конструкций после удаления одного конструктивного элемента, с объемом затрат при удалении другого аналогичного конструктивного элемента, определяют коэффициенты значимости.

Численный эксперимент по расчету каркаса сборного железобетонного здания

Проведен численный эксперимент по расчету каркаса сборного железобетонного здания в нелинейной постановке, учитывающей фактическую податливость основных узловых сопряжений. При проверке возможности установления коэффициентов значимости принимали во внимание податливость наиболее часто встречаемых в сборном каркасе здания стыков — ригеля с колонной или с плитой перекрытия.

Исследовали здание административного назначения, конструктивные решения которого предусматривали защиту от прогрессирующего обрушения. Размеры в плане 18×30 м *(рис. 1)*. Несущие конструкции из сборного железобетона, класс бетона В20, класс арматуры А500с, начальный модуль упругости бетона E_b = 27 500 МПа. Высота здания от уровня чистого пола составляет 56,1 м, сетка колонн — 6×6 м, высота этажа — 3,3 м, сечение колонн с первого по девятый этаж — 600×400 мм, с девятого по семнадцатый — 400×400 мм, ригель таврового сечения с полкой в растянутой зоне, перекрытие сборное из ребристых плит. Колонны каркаса жестко защемлены на уровне верха фундаментов. Район строительства — Москва, ветровой район I (тип местности В), снеговой район III.

Физическую нелинейность бетона и арматуры учитывали с помощью упрощенных диаграмм напряженно-деформированного состояния. Жесткость железобетонных элементов на начальном участке диаграмм определялась как для упругого тела, в дальнейшем рассматривалось напряженное состояние по принятой диаграмме в соответствии с разд. 6 СП 63.13330.2018 «СНиП 52-01-2003 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения (с изменением № 1)».

Податливость сборного пере-

крытия из ребристых плит учитывали введением в расчетную схему следующих связей между конструктивными элементами:

• сопряжение продольных ребер плит и ригеля с помощью закладных деталей и связевой арматурой, соединяющей монтажные петли;

• сопряжение между продольными ребрами плит;

• растворные швы между торцами плит и ригелем.

Для моделирования этих связей, учитывающих физическую и конструктивную нелинейность в сборном перекрытии, применяли специальные конечные элементы 255-го типа (КЭ-255).

Под податливостью стыка железобетонных элементов понимается повышенная деформативность их соединения на малом по отношению к высоте сечения участке длины стыка по сравнению с деформативностью стыкуемых элементов.

Для учета податливости опирания сборного перекрытия в расчет вводятся:

• *коэффициент сдвиговой жесткости* C_{sh}, равный сдвигающему усилию Q, вызывающему единичные перемещения δ

$$C_{sh} = Q/\delta;$$

• *коэффициент линейной жесткости*, равный отношению усилия растяжения—сжатия N к соответствующему значению линейного перемещения Δ

$$C_x = N_x/\Delta_x; C_y = N_y/\Delta_y;$$
$$C_z = N_z/\Delta_z;$$

• *коэффициент угловой жесткости*, равный отношению момента M в узле к соответствующему углу φ взаимного поворота осей в этом узле

$$C_\varphi = M/\varphi.$$

Жесткостные характеристики элемента принимались по рекомендациям СП 355.1325800.2017 «Конструкции каркасные железобетонные сборные одноэтажных зданий производственного назначения. Правила проектирования» и по результатам исследований [2—11].

Конструктивная схема здания была преобразована во вторичную путем удаления колонны № 7 первого этажа *(рис. 2)*.

На основании полученных предварительных результатов можно видеть, что деформации, превышающие критерии второго предельного состояния, появляются на шести вышележащих этажах от этажа удаления колонны. Оценивая зоны с повышенными деформациями, требующие восстановления и усиления, можно утверждать, что наименьшие последствия при удалении колонны для 17-этажного здания будут фиксироваться начиная с 11-го этажа ввиду отсутствия расположенных выше этажей.

Коэффициент значимости строительных конструкций для колонн с 1-го по 11-й этажи будет максимальным, а для вышележащих колонн этот коэффициент может быть дифференцирован с коэффициента 1 до 0,9.

Анализ произошедших аварий, проведенный авторами в рамках работ по совершенствованию нормативных документов по защите зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения, подтвердил, что вероятность разрушения верхних этажей значительно ниже, чем конструкций, расположенных на первых этажах, вероятность запроектных воздействий на которые максимальная.

Необходимо отметить трудности в обоснованном определении жесткостных характеристик стыков сборных железобетонных элементов на основе ограниченного количества проведенных экспериментальных работ, а также многофакторность при получении коэффициентов значимости, зависящих от конструктивной схемы, характеристик материалов, количества этажей, приложенных к ним нагрузок и других параметров.

Выводы

1. Проведенные пробные расчеты при подготовке предложений по разработке методики определения коэффициентов значимости строительных конструкций, дифференцированных по месторасположению на объекте строительства, показали, что, например, рассмотренное 17-этажное каркасное здание, запроектированное с учетом защиты от прогрессирующего обрушения, можно разделить на части. Размеры последних определяются зонами с различными деформациями конструкций в пределах критериев особого предельного состояния, возникающими при удалении одной колонны, расположенной в середине здания. Зона деформаций, превышающих второе предельное состояние и нуждающихся в восстановлении, составила шесть этажей.

2. Основываясь на предварительных данных и при учете вероятности возникновения аварийной ситуации, можно сделать вывод о возможности дифференцированного назначения коэффициентов надежности по ответственности, применяемых к конструкциям с пониженным коэффициентом значимости до нормального уровня ответственности.

3. Дальнейшее проведение численных и натурных экспериментов, уточнение жесткостных характеристик узлов сопряжения, а также системный анализ результатов позволят предложить к использованию в практике проектирования дифференцированный подход по назначению коэффициентов значимости вводимых в расчет строительных конструкций и их узловых сопряжений, а впоследствии назначение диф-

ференцированных коэффициентов надежности по ответственности для конструкций с соответствующими коэффициентами значимости. Результаты исследования также могут быть использованы при выполнении расчетов по определению остаточного срока службы и при развитии метода проектирования строительных конструкций на заданный срок службы.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Келасьев Н. Г., Кодыш Э. Н., Трекин Н. Н., Терехов И. А., Шмаков С. Д., Чаганов А. Б.* Определение срока службы конструкций, зданий и сооружений // Промышленное и гражданское строительство. 2020. № 2. С. 12–17.
2. *Трекин Н. Н.* Пространственная работа несущих элементов каркасной системы с учетом нелинейности и податливости узловых сопряжений: дис. д-ра техн. наук. М., ОАО «ЦНИИПромзданий», 2003. С. 232–243.
URL: https://search.rsl.ru/ru/record/01002625361 (дата обращения: 11.11.2020).
3. *Трекин Н. Н.* Рекомендации по расчету каркасов многоэтажных зданий с учетом податливости узловых сопряжений сборных железобетонных конструкций. М. : ГУП ЦПП, 2002. С. 24–43.
4. *Мамин А. Н., Трекин Н. Н.* Экспериментальные исследования узлов сопряжений сборных железобетонных конструкций промышленных зданий // Экспериментальные исследования инженерных сооружений (методы, приборы, оборудование, метрологическое обеспечение): тезисы докл. VII Всесоюз. конф. (ЭИИС–91). Сумы, 1991. С. 31–32.
5. *Байков В. Н., Фролов А. К.* Анализ деформируемости узлового соединения ригелей с колоннами // Бетон и железобетон. 1978. № 2. С. 26–28.
6. *Кащеев Г. В., Володин Н. М., Коровкин В. С.* Податливость стыков сборных железобетонных перекрытий каркасно-панельных зданий // Исследование зданий как пространственных систем. М. : ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко, 1975. Вып. 49. С 131–139.
7. *Котляр Н. Л., Соловьев-Холмогоров Б. В.* Исследование деформаций стыков соединений каркасных конструкций // Исследование прочности и расчет конструкций многоэтажных зданий: сб. статей. М. : МНИИТЭП, 1970. С. 171–185.
8. *Васильков Б. С., Володин Н. М.* Расчет сборных конструкций зданий с учетом податливости соединений. М. : Стройиздат, 1985. 144 с.
9. *Серпик И. Н., Курченко Н. С., Алексейцев А. В., Лагутина А. А.* Анализ в геометрически, физически и конструктивно нелинейной постановке динамического поведения плоских рам при запроектных воздействиях // Промышленное и гражданское строительство. 2012. № 10. С. 49–51.
10. *Трекин Н. Н., Кодыш Э. Н.* Особое предельное состояние железобетонных конструкций и его нормирование // Промышленное и гражданское строительство. 2020. № 5. С. 4–9.
11. *Кодыш Э. Н.* Проектирование защиты зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения с учетом возникновения особого предельного состояния // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 10. С. 95–101.

REFERENCES

1. Kelasiev N. G., Kodysh E. N., Trekin N. N., Terekhov I. A., Shmakov S. D., Chaganov A. B. Determination of the service life of structures, buildings and structures. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*, 2020, no. 2, pp. 12–17. (In Russian).
2. Trekin N. N. *Prostranstvennaya rabota nesushchikh elementov karkasnoy sistemy s uchetom nelineynosti i podatlivosti uzlovykh sopryazheniy* [*Spatial work of the supporting elements of the frame system, taking into account the non-linearity and flexibility of nodal interfaces.* The dissertation for the degree of doctor of technical sciences]. Moscow, TSNIICK named after V. A. Koucherenko Research Center of Construction, 2003, pp. 232–243. (In Russian).
Avialable at: https://search.rsl.ru/ru/record/01002625361 (accessed 11.11.2020).
3. Trekin N. N. *Rekomendatsii po raschetu karkasov mnogoetazhnykh zdaniy s uchetom podatlivosti uzlovykh sopryazheniy sbornykh zhelezobetonnykh konstruktsiy* [Recommendations for the calculation of skeletons of multi-storey buildings, taking into account the flexibility of the nodal interfaces of precast concrete structures]. Moscow, Unitary Enterprise TsPP Publ., 2002, pp. 24–43. (In Russian).
4. Mamin A. N., Trekin N. N. Experimental studies of junctions of precast concrete structures of industrial buildings. *Eksperimental'nyye issledovaniya inzhenernykh sooruzheniy (metody, pribory, oborudovaniye, metrologicheskoye obespecheniye)*, tezisy VII Vsesoyuznoy konferentsii (EIIS-91) [Experimental research of engineering structures (methods, instruments, equipment, metrological support): abstracts of the VII all-Union conference (EIIS-91)]. Sumy, 1991, pp. 31–32. (In Russian).
5. Baykov V. N., Frolov A. K. Analysis of the deformability of the nodal connection of crossbars with columns. *Beton i zhelezobeton*, 1978, no. 2, pp. 26–28. (In Russian).
6. Kashcheyev G. V., Volodin N. M., Korovkin B. C. Flexibility of joints of precast concrete floors of frame-panel buildings. *Issledovaniye zdaniy kak prostranstvennykh sistem* [Research of buildings as spatial systems]. Moscow, TSNIISK Publ., 1975, no. 49, pp. 131–139. (In Russian).

7. Kotlyar N. L., Solov'yov-Kholmogorov B. V. Investigation of joint deformations of frame structures. *Issledovaniye prochnosti i raschet konstruktsiy mnogoetazhnykh domov. Sbornik statey* [Study of strength and calculation of structures of multi-storey buildings. Collection of articles]. Moscow, MNIITEP Publ., 1970, pp. 171–185. (In Russian).
8. Vasil'kov B. S., Volodin N. M. *Raschet sbornykh konstruktsiy zdaniy s uchetom podatlivosti soyedineniy* [Calculation of prefabricated buildings taking into account the flexibility of the joints]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1985. 144 p. (In Russian).
9. Serpik I. N., Kurchenko N. S., Alekseytsev A. V., Lagutina A. A. Analysis of the dynamic behavior of plane frames at emergency actions considering geometrical, material and structural nonlinearities. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*, 2012, no. 10, pp. 49–51. (In Russian).
10. Trekin N. N., Kodysh E. N. The special limit state of reinforced concrete structures and its rationing. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*, 2020, no. 5, pp. 4–9. (In Russian).
11. Kodysh E. N. Designing the protection of buildings and structures against progressive collapse in view of the emergence of a special limiting state. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, 2018, no. 10, pp. 95–101. (In Russian).

Для цитирования: *Келасьев Н. Г., Кодыш Э. Н., Трекин Н. Н., Терехов И. А., Рэуцу А. В., Шмаков С. Д.* Возможный подход к определению коэффициентов значимости строительных конструкций // Промышленное и гражданское строительство. 2020. № 11. С. 99–104.
DOI: 10.33622/0869-7019.2020.11.99-104.

For citation: Kelasyev N. G., Kodysh E. N., Trekin N. N., Terekhov I. A., Reutsu A. V., Shmakov S. D. Possible Approach to Determining the Significance Factors of Building Structures. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering], 2020, no. 11, pp. 99–104. (In Russian).
DOI: 10.33622/0869-7019.2020.11.99-104.