

- sanne Institut de Structures Laboratoire de Construction en Béton. – June 2008. – 58 p.
6. Regan, P.E. Symmetric punching of reinforced concrete slabs / P.E. Regan // Magazine of Concrete Research. – 1986. – Vol. 38. – P. 115–128.
 7. Gardner, N. Relationship of the Punching Shear Capacity of Reinforced Concrete Slabs with Concrete Strength / N. Gardner // ACI Structural Journal. – 1990. – Vol. 87. – № 1. – P. 66–71.
 8. Тамкович, С.Ю. К учету влияния процента продольного армирования на прочность железобетонных элементов на местный срез / С.Ю. Тамкович // Проблемы современного бетона и железобетона: материалы III Международного симпозиума (Минск, 9-11 ноября 2011 г.): в 2 т. – Т.1: Бетонные и железобетонные конструкции. – Минск: Минсктиппроект, 2011. – С. 367–374.
 9. Рак, Н.А. Анализ методов расчета прочности элементов из тяжелого бетона без поперечной арматуры при продавливании / Н.А. Рак, С.Ю. Тамкович // Вестник ПГУ – 2010. – №12. – С. 64–72.
 10. Еврокод. Основы проектирования несущих конструкций: СТБ ЕН 1990-2007 / МАиС РБ. – Минск, 2008. – 64 с.

Материал поступил в редакцию 02.05.12

RAK N.A., TAMKOVICH S.Yu. Estimation of reliability of calculation of reinforced-concrete elements punching strength at use of linear dependence for the account of influence of longitudinal reinforcing ratio

For the account of influence of longitudinal reinforcing ratio on a punching strength of reinforced-concrete elements it is offered to use linear dependence. The accuracy and reliability estimation and comparison of offered linear dependence to the dependence presented in domestic design code is executed. On the basis of the received results conclusions are drawn and recommendations about application of offered linear dependence at calculation of punching strength of reinforced concrete elements are made.

УДК 624.012.45.042

Клюева Н.В., Бухтиярова А.С., Колчунов В.И.

К ОЦЕНКЕ ЖИВУЧЕСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ РАМНО-СТЕРЖНЕВЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ВЫКЛЮЧАЮЩИМИСЯ ЛИНЕЙНЫМИ СВЯЗЯМИ

Решение проблем обеспечения безопасности при проектировании, строительстве и реконструкции зданий и сооружений, а также поддержания в надежном состоянии объектов недвижимости всегда было и остается одним из важнейших направлений деятельности научно-исследовательских, проектных и строительных организаций. К объектам недвижимости вне зависимости от тех или иных технических решений предъявлялись требования функционального и конструктивного соответствия ожидаемым силовым или средовым воздействиям. В последние годы в связи с техническим состоянием основных фондов страны возникла новая проблема – обеспечение уровня конструктивной безопасности и живучести зданий и сооружений, отвечающего новым вызовам природного, техногенного и даже террористического характера. Подтверждением этому является и то, что в принятом новом законе № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» должна быть учтена аварийная расчетная ситуация, в том числе предельные состояния при этой ситуации, возникающие в связи со взрывом, ударным воздействием нагрузки, с аварией, пожаром, а также непосредственно после отказа одной из несущих строительных конструкций. Однако нормативная база для решения таких задач отсутствует. В мировой практике научных исследований по этому направлению также не имеется значимых достижений в решении этой проблемы.

Исследованиями [1–4] и др. установлено, что одним из наиболее эффективных подходов для анализа живучести зданий и сооружений при запроектных воздействиях может стать обобщение и развитие базовых положений метода расчета строительных конструкций по предельным состояниям. В отмеченных работах и исследованиях других ученых определено направление в решении проблемы конструктивной безопасности и решены отдельные задачи живучести физически и конструктивно нелинейных строительных систем, в том числе задачи по анализу деформирования и разрушения балочных и рамно-стержневых конструкций с элементами сплошного и составного сечения в запредельных состояниях при структурных перестройках в них, вызванных внезапными выключениями моментных связей. Дальнейшее развитие этих исследований связано с решением задач живучести сложных пространственных конструктивных систем из железобетона, например, каркасов многоэтажных зданий, пространственных конструкций покрытий и перекрытий и других сооружений. Отдельные работы этого направления носят пока еще постановочный характер.

В связи с этим целью настоящих исследований явилось развитие основ теории живучести железобетонных рамно-стержневых про-

странственных конструктивных систем каркасов зданий и сооружений в запредельных состояниях, а также совершенствование методов экспериментальных исследований по определению параметров конструктивной безопасности и живучести конструкций при внезапных запроектных воздействиях. В задачи экспериментальных исследований включалось: изучение особенностей деформирования, трещинообразования и разрушения пространственных узлов сопряжения железобетонного каркаса многоэтажного здания при динамических догружениях, вызванных внезапным выключением линейных связей и установление количественных параметров влияния эффекта пространственной работы и фактора времени на параметры живучести конструктивной системы. Общий вид опытного фрагмента каркаса здания и схема армирования ригелей и стоек пространственной рамы показана на рисунке 1, а конструкции опытных образцов и методика проведения испытаний детально описаны в работе [5].



а)

Клюева Наталья Витальевна, доктор технических наук, профессор кафедры «Городское строительство и хозяйство» ФГБОУ ВПО «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс», г. Орел, Россия.

Бухтиярова Анастасия Сергеевна, старший преподаватель кафедры «Строительные конструкции и материалы» ФГБОУ ВПО «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс», г. Орел, Россия.

Колчунов Виталий Иванович, академик РААСН, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Строительные конструкции и материалы» ФГБОУ ВПО «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс», г. Орел, Россия.

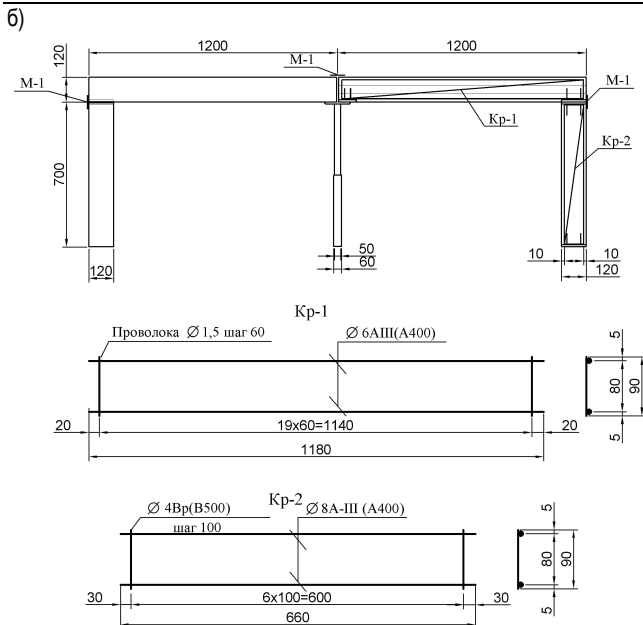


Рис. 1. а) общий вид опытного фрагмента конструктивной системы в виде перекрестных рам; б) конструкция и схема армирования опытных образцов

Анализом полученных опытных данных установлено, что деформирование, трещинообразование и разрушение конструкций фрагментов при рассматриваемом запроектном воздействии имеет свои особенности. Внезапное приложение к нагруженной статически неопределимой системе запроектной нагрузки вызывает динамические догружения всех элементов системы. При этом главными параметрами, определяющими интенсивность догружения железобетонных конструкций, являются уровень нагружения проектной нагрузкой и структура конструктивной системы.

Расчет опытных конструкций выполнен на энергетической основе без привлечения аппарата динамики сооружений с использованием деформационной физической модели железобетона стержневых систем [4]. По полученным указанным способом расчетным данным построены диаграммы «момент-кривизна» («М-ε») для опорных сечений 1-1 фрагментов рамной системы обеих серий (рис. 2,а). Здесь же, для сопоставления, приведены опытные графики этих диаграмм.

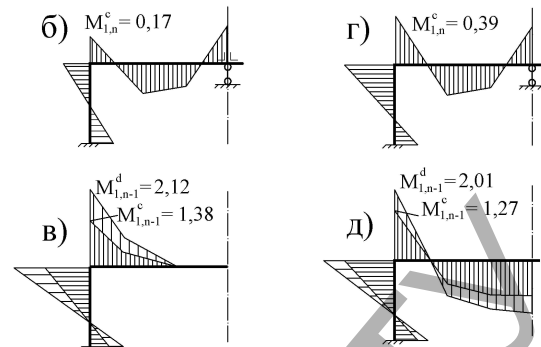
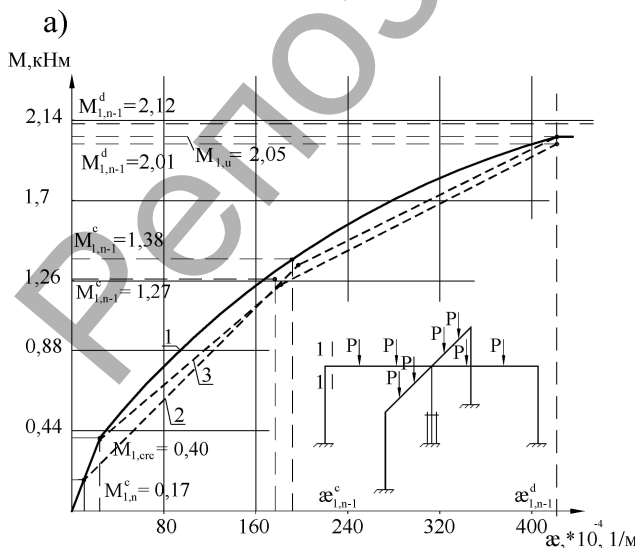


Рис. 2. Расчетные (1) и опытные (2, 3) графики деформирования опорного сечения ригеля первой (2) и второй серий (3) при нагружении проектной нагрузкой и запроектным воздействием: а – диаграммы «М-ε» и схема проектной нагрузки; б, в – расчетные значения моментов, соответственно, при проектной нагрузке и после запроектного воздействия для фрагмента первой серии; г, д – то же, для фрагмента второй серии

Анализируя расчетные (1) и опытные (2, 3) графики «момент-кривизна» для опорного сечения 1-1 фрагментов рамных систем, можно отметить следующее. На первом этапе нагружения исходной n раз статически неопределимой системы проектной нагрузкой в виде сосредоточенных сил P характер деформирования носил упругопластический характер с незначительно выраженной нелинейностью (рис. 2,а). Значение рассчитанных в рассматриваемом сечении по максимальной проектной нагрузке изгибающих моментов в ригелях (рис. 2,б-д), например, в ригеле первой серии равного 0,17 кН·м, не превысило момента трещинообразования ригеля ($M_{cr} = 0,4$ кН·м). Хрупкое выключение из работы центральной стойки привело к внезапному уменьшению степени статической неопределимости конструктивной системы на единицу и, соответственно, внезапному динамическому догружению всех элементов фрагмента пространственной рамы.

Коэффициент динамического догружения рассматриваемого сечения, равный отношению $M_{1,n-1}^d / M_{1,n-1}^c$, составил 1,53, а момент в рассматриваемом сечении после внезапного изменения степени статической неопределимости рамы на единицу по отношению к усилию в исходной n раз статически неопределимой раме увеличился с учетом динамического догружения в 12,5 раз (см. рис. 2,а).

Сопоставляя графики деформирования для опорного сечения 1-1 обеих серий проведенных испытаний, можно отметить следующее. Значение динамического момента в рассматриваемом сечении системы $n-1$ второй серии (после выключения из работы центральной опоры) с жестким узлом над центральной опорой составило 2,01 кН·м, а в системе первой серии (с односторонними моментными связями) – 2,12 кН·м. Испытанием первого фрагмента на рассматриваемое запроектное воздействие установлено прогрессирующее обрушение ригелей пространственной системы (рис. 3,а). Это полностью согласовывалось с полученными теоретическими значениями коэффициента динамического догружения и значениями изгибающих моментов в рассматриваемом сечении ($n-1$) раз статически неопределимой рамы.

Несмотря на значительное раскрытие нормальных трещин и частичное раздробление бетона сжатой зоны в середине пролета, хрупкого прогрессирующего разрушения рамы второй серии с внезапным выключением центральной опорой как в конструкции первой серии не произошло (см. рис. 3,б). Из приведенного анализа следует, что варьируя структурой (топологией), конструктивным армированием элементов и классом бетона можно управлять параметрами живучести железобетонного каркаса здания.

Построение расчетной схемы для анализа живучести конструктивной системы в запредельных состояниях выполнено с использованием принципа многоуровневых расчетных схем. При этом верхний уровень соответствует пространственной расчетной схеме всей конструктивной системы, нижний – позволяет оперировать параметрами сложного напряженного состояния отдельных зон фрагментов рассматриваемой конструктивной системы, выходные интегральные параметры которого «замыкаются» на расчетную схему верхнего уровня.



Рис. 3. Общий вид разрушения фрагмента первой (а) и второй серий (б)

Для критериальной оценки живучести рассматриваемых физически и конструктивно нелинейных пространственных систем из железобетона предложен обобщенный параметр λ . Критерий живучести – параметр λ_m – определяется таким значением параметра внешней нагрузки, приложенной к конструктивной системе, при которой внезапный отказ «слабого звена» приводит к отказу одного или большего количества связей.

Расчетное определение этого параметра для пространственных рамно-стержневых систем при внезапных структурных изменениях, вызванных выключением линейных связей, выполнено с использованием неординарного смешанного метода. Система канонических уравнений смешанного метода представлена в виде следующего матричного уравнения:

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{M} \\ \bar{Z} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \bar{\Delta}_q \\ \bar{R}_q \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ \bar{r}_p \end{pmatrix} \cdot \lambda = 0, \quad (1)$$

где $A, B, \bar{\Delta}_p, \bar{\delta}_p, C, D, \bar{R}_q, \bar{r}_p$ – матрицы и коэффициенты неизвестных M_j и Z_m смешанного метода, которые в развернутом виде представлены в работе [6].

Задача расчета заключается в определении предельного значения динамического усилия в j -ой выключающейся связи, для которой должна удовлетворяться система неравенств:

$$|M_j| \equiv |M_{jq} + m_{jp} \cdot \lambda| \geq M_{j,пр}^d \quad (j = 1, 2, \dots, k), \quad (2)$$

где $M_{j,пр}^d$ – предельное значение динамического усилия в j -ой связи, определяемое по заданной геометрии и армированию сечения элемента с учетом динамического упрочнения бетона сжатой зоны и растянутой арматуры от внезапного запроектного воздействия.

Из множества решений исходной системы неравенств находится такое минимальное значение параметра $\lambda = \lambda_m$, при котором достигается предельное значение момента M_j в одном из наиболее напряженных сечений, т.е. происходит внезапное выключение j -ой связи системы. Если после внезапного хрупкого разрушения одного из элементов системы критерий прочности для динамических усилий в оставшихся сечениях конструктивной системы окажется выполненным, процесс разрушения системы прекратится. Если же указанный критерий прочности окажется невыполненным, то произойдет разрушение следующих элементов системы и, возможно, прогрессирующее обрушение всей конструкции.

При реализации проектного и запроектного расчетов по определению параметров живучести с использованием рассматриваемого расчетного аппарата одним из ключевых элементов является определение предельного значения динамического усилия в узле сопряжения перекрестных ригелей (рис. 4). Здесь необходим учет сложного силового сопротивления железобетона и, соответственно, концентрации напряжений в узле, которая, безусловно, вызовет появление трещин, распространяющихся вдоль граней центральной колонны сверху вниз, что приведет к повышенной деформативности узлового сопряжения. В расчетной схеме это предложено учесть с помощью податливых шарниров – заделок, примыкающих с обеих сторон к узлу (рисунок 5, а-в), как в направлении оси x , так и в направлении оси y .

Таким приемом представляется возможным учесть податливость в узле сопряжения. При этом дополнительные углы поворота $\Delta\phi_{cpc}$ определяются в соответствии с рисунком 5, г по формуле:

$$\Delta\phi_{cpc} = a_{cpc,u} / (h_0 - x_{cpc}). \quad (3)$$

Располагая дополнительными углами поворота $\Delta\phi_{cpc}$, их необходимо учесть при составлении традиционных уравнений строительной механики для соответствующих связей и направлений. Например, применительно к методу перемещений соответствующее условие равновесия m -го узла с податливой заделкой примет вид:

$$Z_1 r_{m1} + Z_2 r_{m2} + \dots + Z_k r_{mk} + \dots + Z_n r_{mn} + R_{mp} + R_{m\Delta\phi} = 0, \quad (4)$$

где $R_{m\Delta\phi}$ – опорная реакция в m -ом узле от поворота этого узла на угол $\Delta\phi_{cpc}$, которая определяется обычным расчетом рам методом перемещений с заменой в соответствующих формулах параметра ϕ на $\Delta\phi_{cpc}$.

Таким образом, учитывается перераспределение моментов в пространственном каркасе здания при эксплуатационной нагрузке, относительно которого затем уже выполняется анализ и расчет в запроектной стадии. При этом можно учесть и влияние наличия трещин в соответствующих зонах пространственного узла, которые закрываются при качественной смене напряженного состояния, т.е. смене знака моментов в запроектной стадии.

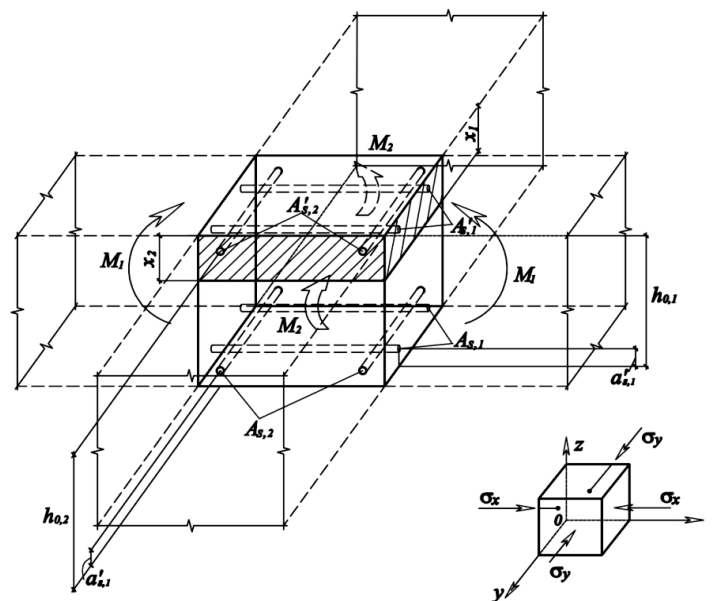


Рис. 4. Схема сопротивления пространственного узла после внезапного выключения средней стойки сверху и снизу узла: а – расчетная схема; б – напряженное состояние бетона сжатой зоны

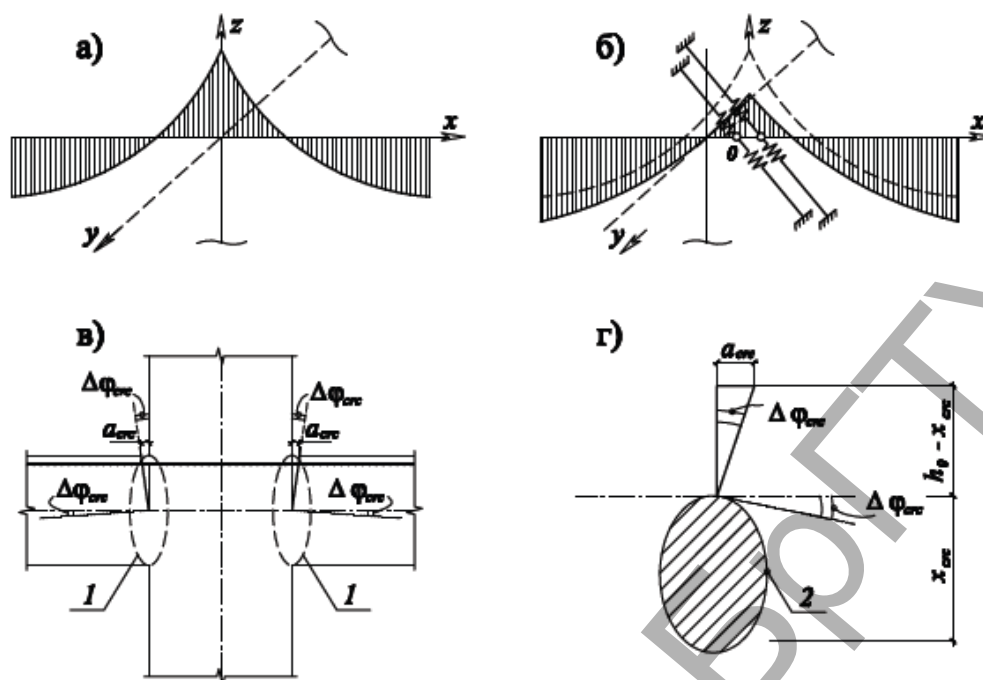


Рис. 5. К учету повышенной деформативности узлового сопряжения рамного железобетонного узла (эпюры моментов вдоль оси y условно не показаны): а – расчетная схема с жестким сопряжением; б – то же, при учете податливости сопряжения; в – схема трещин в углах узла, вызванных концентрацией напряжений; г – к определению дополнительного угла поворота $\Delta\varphi_{crc}$: 1 – зоны повышенной деформативности; 2 – зоны кинематического поворота в сжатом бетоне

Предельный внутренний изгибающий момент определяется из уравнения равновесия моментов всех сил, действующих в поперечном сечении:

$$M_{i,пр}^d \leq k_{\sigma,x} \cdot R_b \cdot b \cdot x \cdot (h_0 - 0,5 \cdot x) + R_{sc} \cdot A'_s \cdot (0,5x - a'_s). \quad (5)$$

Значение коэффициента $k_{\sigma,x}$, равного отношению максимального напряжения σ_x в области двухосного сжатия к напряжению в направлении рассматриваемой оси i ($k_{\sigma,x} = \sigma_x / \sigma_i$), определяется с использованием зависимостей механики твердого деформируемого тела, модифицированных применительно к сложнонапряженному бетону в работе [7].

Заключение. Экспериментально-теоретическими исследованиями определены параметры живучести, количественные значения динамических догрузений и схемы разрушения фрагментов железобетонных пространственных рамно-стержневых конструкций с выключением линейными связями при двух вариантах опирания и сопряжения перекрестных ригелей над центральной опорой. Предложены методика расчета податливости и критерий прочности пространственного узла сопряжения ригелей и колонн при качественных изменениях напряженного состояния в этом узле, вызванного внезапным выключением линейной связи.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Гениев, Г.А. Прочность и деформативность железобетонных конструкций при запроектных воздействиях [Текст] / Г.А. Гениев, В.И. Колчунов, Н.В. Клюева [и др.] – М.: АСВ, 2004. – 216 с.

2. Бондаренко, В.М. К расчету сооружений, меняющих расчетную схему вследствие коррозионных повреждений [Текст] / В.М. Бондаренко, Н.В. Клюева // Известия ВУЗов. Строительство. – 2008. – №1. – С. 4-12.

3. Гордон, В.А. Расчет динамических усилий в конструктивно-нелинейных элементах стержневых пространственных системах при внезапных структурных изменениях [Текст] / В.А. Гордон, Н.В. Клюева, Т.В. Потураева, А.С. Бухтиярова // Строительная механика и расчет сооружений. – 2008. – №6. – С. 26-30.

4. Клюева, Н.В. Предложения к расчету живучести коррозионно повреждаемых железобетонных конструкций [Текст] / Н.В. Клюева // Бетон и железобетон. – 2008 – №3. – С. 22-26.

5. Клюева, Н.В. Метод экспериментального определения параметров живучести железобетонных стержневых систем [Текст] / Н.В. Клюева, А.С. Бухтиярова, А.А. Дорофеев // Материалы Международной научно-технической конференции «Строительная наука – 2010: теория, практика и инновации Северо-арктическому региону». – Архангельск: Северный (Арктический) Федеральный Университет, 2010. – С. 191-200.

6. Клюева, Н.В. Алгоритм расчета живучести статически неопределимых железобетонных балок [Текст] / Н.В. Клюева, Н.Б. Андросова, А.С. Бухтиярова // Известия ОрелГТУ. Серия «Строительство. Транспорт». – Орел: ОрелГТУ. – 2007. – №3. – С. 14-22.

7. Колчунов, Вл.И. Сопротивление пространственных узлов сопряжения железобетонных каркасов многоэтажных зданий при запроектных воздействиях [Текст] / Вл.И. Колчунов, Н.В. Клюева, А.С. Бухтиярова // Строительство и реконструкция. Орел: Госуниверситет – УНПК. – 2011. – №5. – С. 21-32.

Материал поступил в редакцию 02.05.12

KLYUYEVA N.V., BUKHTIYAROVA A.S., KOLCHUNOV V.I. To the assessment of survivability of ferro-concrete spatial frame and rod designs with switching-off linear communications

In article results of experimental and theoretical researches of ferro-concrete spatial frame and rod systems with switching-off linear communications are presented. Survivability parameters, quantitative values of dynamic dogruzheniye and the scheme of destruction of fragments of a ferro-concrete spatial frame are defined. The design procedure of a pliability and criterion of durability of spatial knot of interface is offered.