



УДК 624.074.5, 624.046.2

Алексейцев А.В. – кандидат технических наук, доцент
E-mail: aalexw@mail.ru

Серпик И.Н. – доктор технических наук, профессор
E-mail: iserpik@online.debryansk.ru

Брянская государственная инженерно-технологическая академия

Адрес организации: 241037, Россия, г. Брянск, пр. Станке-Димитрова, д. 3

Бутенко А.В. – аспирант

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1

Анализ ударного запроектного воздействия на пространственные рамные системы*

Аннотация

Приводится методика исследования напряженно-деформированного состояния рамных стержневых конструкций при неупругих ударных воздействиях. Анализ динамического поведения рассматриваемых объектов выполняется с учетом геометрической и физической нелинейности. Задача решается путем прямого интегрирования дифференциальных уравнений, описывающих движение конструктивной системы, на основе предпосылок метода Ньюмарка. При построении конечно-элементной модели рассматривается геометрия конструкции в деформированном состоянии. Принимается во внимание упруго-пластическое поведение материала. Учитывается конструкционное демпфирование колебаний по схеме Релея. Рассматривается пример расчета пространственной рамы с помощью предлагаемой вычислительной процедуры.

Ключевые слова: запроектное воздействие, неупругий удар, динамика, пространственные рамы, демпфирование, физическая и геометрическая нелинейность.

В последнее время в строительной науке большое внимание уделяется проблеме проектирования зданий и сооружений с учетом возможности локальных разрушений отдельных несущих элементов вследствие воздействий, не предусмотренных нормальной эксплуатацией конструкций [1-4]. Среди причин, приводящих к таким авариям, преобладают техногенные факторы, и их доля постоянно растет [1, 2]. К этим факторам можно отнести взрывные воздействия, пожары, транспортные аварии, нагрузки, связанные с нарушениями технологических процессов, и др.

Для каждого типа здания устанавливается свой перечень рекомендуемых для учета локальных воздействий. Так, для крупнопанельных зданий предписывается рассматривать разрушение двух пересекающихся стен любого этажа на участках от их вертикального стыка до ближайшего проема в каждой стене или до следующего вертикального стыка со стеной перпендикулярного направления. Для жилых каркасных зданий предлагается учитывать следующие локальные воздействия:

- карстовую воронку диаметром 6 м, расположенную в любом месте под фундаментом здания (для карстоопасных районов);
- повреждение перекрытия общей площадью до 40 м^2 ;
- неравномерные осадки основания;
- горизонтальную нагрузку в пределах одного этажа величиной 35 кН на вертикальные стержневые несущие элементы и интенсивностью 10 кН/м² – на вертикальные пластинчатые элементы.

Для зданий с несущими кирпичными стенами рекомендуется принимать следующие размеры локальных повреждений:

- карстовую воронку (по той же схеме, что и для жилых каркасных зданий);
- разрушение двух пересекающихся стен любого этажа на участках от места их

*Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы (проект 2012-1.4-12-000-1004-006).

сопряжения до ближайшего проема в каждой стене или до следующего пересечения со стеной перпендикулярного направления, но на длине не более 3 м;

- исключение из работы любого из простенков наружной стены;
- исчезновение любого из участков стены одного этажа шириной 3 м;
- повреждение сборного или монолитного перекрытия общей площадью до 40 м^2 .

При проектировании монолитного здания, устойчивого против прогрессирующего обрушения, надлежит рассматривать следующие разрушения вертикальных конструкций любого этажа здания:

- двух пересекающихся стен на участках от места их пересечения до ближайшего проема в каждой стене или до следующего вертикального стыка со стеной другого направления, но на длине не более 7 м;

- отдельно стоящей колонны или пилона;
- колонны или пилона с участками примыкающих стен на их длине не более 7 м.

Для высотных зданий нормируются в качестве локальных разрушений удаление следующих вертикальных конструкций любого этажа, ограниченных кругом площадью до 80 м^2 для зданий высотой до 200 м и до 100 м^2 для зданий выше 200 м:

- двух пересекающихся стен на участках от места их пересечения до ближайшего проема в каждой стене, или до следующего вертикального стыка со стеной другого направления, или на участке всего круга;

- отдельно стоящих колонн или колонн с примыкающими к ним участками стен, в том числе навесных ограждающих панелей;

- перекрытия.

Нормативные документы [2-4] рекомендуют использовать пространственные расчетные модели. При этом могут учитываться элементы, которые в нормальных эксплуатационных условиях являются ненесущими, а при возникновении локальных повреждений активно участвуют в перераспределении усилий в конструктивной системе. Выделяют два типа неповрежденных в результате локального воздействия несущих элементов. В элементах первого типа локальные разрушения не вызывают качественного изменения напряженного состояния, а могут приводить лишь к увеличению усилий и напряжений. В элементах второго типа при таком воздействии на здание качественно меняется напряженное состояние. В связи с тем, что элементы первого типа при нормальных эксплуатационных воздействиях подвергаются нагрузкам, которые, как правило, в два-три раза ниже разрушающих, основной задачей проектирования является обеспечение прочности и устойчивости элементов второго типа.

В работах [2-4] отмечается, что основными средствами защиты зданий от прогрессирующего обрушения являются: резервирование прочности несущих элементов, создание неразрезности перекрытий, повышение пластических свойств связей между элементами и обеспечение пространственной работы системы несущих элементов.

Исследование запроектных воздействий целесообразно выполнять на основе математических моделей, описывающих динамическое поведение объектов. Прежде всего, изучается динамика конструктивных систем зданий и сооружений при внезапных отказах несущих элементов, вызывающих прогрессирующие обрушения. Вместе с тем, часто возникает задача оценки ударного запроектного воздействия на конструктивную систему. В частности, можно рассматривать падение на конструкцию грузов или столкновение с несущей системой машин и оборудования. В данной работе предлагается методика исследования напряженно-деформированного состояния рамных стержневых конструкций при неупругих ударных воздействиях.

Считаем, что движение системы, подверженной неупругому ударному воздействию, можно приближенно описать уравнениями динамического равновесия ее конечно-элементной модели:

$$[M(\{Z\})]\{\ddot{Z}\} + [C(\{Z\})]\{\dot{Z}\} + \{R(\{Z\})\} = \{F(t)\}_0 + \{G\}\chi(t), \quad (1)$$

где $[M(\{Z\})]$, $[C(\{Z\})]$, $\{R(\{Z\})\}$, $\{Z\}$ – матрица масс, матрица демпфирования, векторы узловых реакций и обобщенных узловых перемещений; $\{F(t)\}_0$ – вектор действующих на систему нормативных нагрузок; $\{G\}$ – вектор, определяемый силами тяжести ударяющего

тела; $\chi(t)$ – функция Хевисайда ($\chi=0$, если время $t < t_0$, или; $\chi=1$, если $t \geq t_0$).

Здесь t_0 – момент времени, начиная с которого необходимо учитывать вектор $\{G\}$. Задачу (1) будем решать при следующих начальных условиях: $\{\{Z(0)\}=0; \{\dot{Z}(0)\}=\{V\}\}$, где $\{V\}$ – вектор начальных скоростей.

Рассмотрим решение этой начальной задачи на основе предпосылки метода Ньюмарка о постоянных значениях ускорений на каждом шаге интегрирования. Для реализации такого подхода строим конечно-элементные модели, учитывая геометрию системы в деформированном состоянии [5].

Полагаем, что на каждом шаге Δt численного интегрирования решается линейная задача. Для начального времени t_{n-1} некоторого шага n рассматривается матрица масс $[M(t_{n-1})]$, матрица демпфирования $[C(t_{n-1})]$ и касательная матрица жесткости $[K_\tau(t_{n-1})]$.

Исследования ударных воздействий [6] показали, что для описания демпфирующих свойств стальной рамной системы матрицу $[C(t_{n-1})]$ следует представлять в виде:

$$[C(t_{n-1})]=\beta [K_\tau(t_{n-1})], \quad (2)$$

где β – коэффициент конструкционного демпфирования.

Вектор $\{R(\{Z\})\}$ для момента времени окончания n -го шага интегрирования может быть приближенно определен по формуле:

$$\{R(\{Z_n\})\}=\sum_{k=1}^n [K_\tau(t_{n-1})]\{\Delta Z_{n-1}\}, \quad (3)$$

где $\{\Delta Z_{n-1}\}$ – вектор приращений перемещений на $(n-1)$ -м шаге интегрирования.

В соответствии с подходом метода Ньюмарка [14] имеем:

$$\{\dot{Z}(t_n)\}=a_1(\{Z(t_n)\}-\{Z(t_{n-1})\})-\{\ddot{Z}(t_{n-1})\}, \quad (4)$$

$$\{\ddot{Z}(t_n)\}=a_0(\{Z(t_n)\}-\{Z(t_{n-1})\})-a_2\{\dot{Z}(t_{n-1})\}-\{\ddot{Z}(t_{n-1})\}, \quad (5)$$

где параметры интегрирования $a_0=4/\Delta t^2$; $a_1=2/\Delta t$; $a_2=4/\Delta t$.

Подставив равенства (4), (5) в уравнение (1), нетрудно получить систему уравнений:

$$[K_\vartheta]\{\Delta Z_n\}=\{R_\vartheta\}, \quad (6)$$

где

$$[K_\vartheta]=a_0[M(t_{n-1})]+a_1[C(t_{n-1})]+[K_\tau(t_{n-1})]; \quad (7)$$

$$\begin{aligned} [R_\vartheta]=&\{F(t_n)\}+\{G\}\chi(t)-\sum_{k=1}^{n-1}[K_\tau(t_{n-1})]\{\Delta Z_n\}+\left(a_2[M(t_{n-1})]+[C(t_{n-1})]\right)\times \\ &\times\{\dot{Z}(t_{n-1})\}+[M]\{\ddot{Z}(t_{n-1})\}. \end{aligned} \quad (8)$$

После выполнения шага n вектор перемещений определяется зависимостью

$$\{Z(t_n)\}=\{Z(t_{n-1})\}+\{\Delta Z_n\}, \quad (9)$$

а вектор внутренних усилий в элементах конструкций – выражением:

$$\{S(t_n)\}=\{S(t_{n-1})\}+\{\Delta S_n\}, \quad (10)$$

где $\{\Delta S_n\}$ – вектор приращений усилий, вычисляемый с использованием вектора $\{\Delta Z_n\}$ и касательных коэффициентов упругости.

Произведение $[M(0)]\{\ddot{Z}(0)\}$ целесообразно находить из выражения:

$$[M(0)]\{\ddot{Z}(0)\} = \{F(0)\} + \{G\}\chi(t) - [K_\tau(0)]\{Z(0)\} - [C(0)]\{\dot{Z}(0)\}. \quad (11)$$

Касательная матрица жесткости $[K_\tau]$ для конечно-элементной модели системы формируется на основании матриц $[K_{e\tau}]$. Касательная матрица жесткости конечного элемента в этом случае может быть представлена в виде:

$$[K_{e\tau}] = [K_{eo}] + [K_{e\sigma}], \quad (12)$$

где $[K_{e\sigma}]$ – матрица начальных напряжений или геометрическая матрица [7]; $[K_{eo}]$ – построенная для деформированного состояния матрица жесткости с учетом физически нелинейной работы материала [7].

При анализе физической нелинейности использовался критерий текучести, определяющий пластическое деформирование материала на основе введения поверхности текучести [7]:

$$\tilde{F}(\{\sigma\}, \tilde{\chi}) = 0, \quad (13)$$

где F – уравнение поверхности; $\{\sigma\}$ – напряжения, определяемые на этой поверхности; $\tilde{\chi}$ – параметр упрочнения.

На основе выражения (12) приращение пластических деформаций $\{d\varepsilon\}$ определяем с использованием ассоциированного закона течения [7].

$$\{d\varepsilon\} = \lambda \frac{\partial \tilde{F}}{\partial \{\sigma\}}, \quad (14)$$

где λ – неопределенный коэффициент пропорциональности.

В алгоритме расчета использовалась поверхность текучести Мизеса [15].

Таким образом, процесс численного интегрирования должен предусматривать выполнение следующих основных этапов:

1. Определяются векторы $\{S_0\}$ и $\{Z_0\}$.
2. Строятся матрицы $[M(0)]$, $[C(0)]$ и $[K_\tau(0)]$.
3. С помощью равенства (11) вычисляется произведение $[M(0)]\{\ddot{Z}(0)\}$.
4. С использованием выражений (7) и (8) определяется матрица $[K_3(0)]$ и вектор $\{R_3(0)\}$.
5. Путем решения системы уравнений (6) для $t = 0$ находится вектор $\{Z_1\} = \{\Delta Z_1\}$.
6. Вычисляется вектор $\{\Delta S_1\}$.
7. В соответствии с формулами (9), (4), (10), (5) находятся векторы $\{Z(t_1)\}$, $\{\dot{Z}(t_1)\}$, $\{\ddot{Z}(t_1)\}$ и $\{S(t_1)\}$.
8. Далее в каждой итерации $n > 1$ выполняются такие действия:
 - а) вычисляются матрицы $\{M(t_n)\}$, $\{C(t_n)\}$, $\{K_\tau(t_n)\}$;
 - б) определяется матрица $[K_3(t_n)]$ и вектор $\{R_3(t_n)\}$;
 - в) решается система уравнений (6) и определяется $\{\Delta Z_n\}$;
 - г) вычисляются векторы $\{\Delta S_n\}$, $\{Z(t_n)\}$, $\{\dot{Z}(t_n)\}$, $\{\ddot{Z}(t_n)\}$, $\{S(t_n)\}$, $\{Z(t_n)\}$.

Пример расчета на ударное воздействие. Рассматривалась пространственная рама с жесткими узлами соединения стержней, имеющих сечение в виде стальных прямоугольных труб 30x20x1,5 по ГОСТ 8645-68 (см. рис. 1) с модулем упругости $2,06 \cdot 10^6$ МПа. Предел текучести для стали принимался равным 580 МПа.

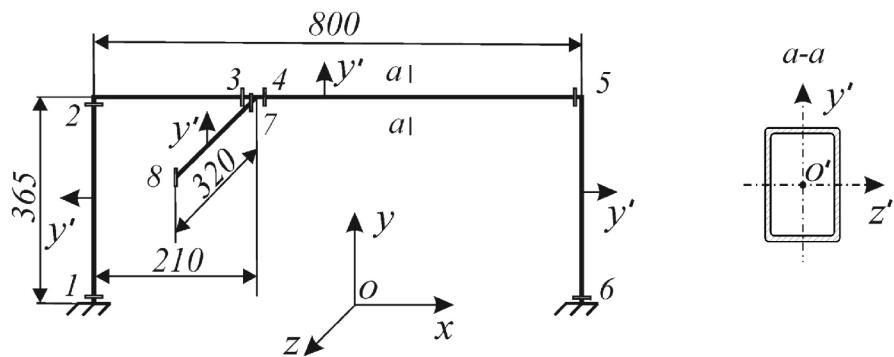


Рис. 1. Расчетная схема рамы: 1-8 номера рассматриваемых сечений

На основе результатов исследований работы [6] для стальных рам принималось $\beta = 0,02$. Время анализа системы при возникновении ударного воздействия принималось равным 1 с. Ударное воздействие осуществлялось на конец консольного стержня рамы (сечение 8).

Проводился анализ рамы при ударе телом массой 25 кг, свободно падающим с высоты $h=0,5$ м (случай А). Кроме этого, рассматривался удар телом массой 35 кг, действующим с начальной скоростью 4 м/с. $\{V_x\} = \{V_y\} = \{V_z\} = -2,3094$ м/с (случай Б).

В результате расчетов рамы на удар в случае А установлено, что максимальные напряжения в раме в течение 23 мс с начала воздействия достигают предела текучести в сечении 1 (рис. 1), а далее рама деформируется с заметным развитием пластических деформаций. На рис. 2а и 2б показан характер изменения вертикального прогиба рамы в сечении 8 и напряжений в сечении 1 во времени. В табл. 1 приведены значения перемещений рамы в момент времени 0,5271 с, когда колебания конструкции, вызванные ударом, затухли. В табл. 2 показаны результаты расчета рамы на удар в случае Б в момент времени, соответствующий разрушению системы.

Таблица 1

Векторы $\{Z(0,5271)\}$ деформаций сечений 1-8 рамы при вертикальном ударе

№ сеч.	Δx , м	Δy , м	Δz , м	$\Delta\varphi_{xy}$, рад	$\Delta\varphi_{xz}$, рад	$\Delta\varphi_{yz}$, рад
1	0	0	0	0	0	0
2	0.9964E-04	0.9286E-06	0.3195E-02	0.1745E-01	-0.3684E-03	-0.1041E-02
3	0.9863E-04	0.3632E-03	0.2980E-02	0.3255E-01	-0.1552E-02	-0.2982E-02
4	0.9871E-04	0.4702E-03	0.2908E-02	0.3113E-01	-0.1613E-02	-0.2260E-02
5	0.9826E-04	0.1272E-05	0.2116E-02	0.1126E-01	-0.6694E-03	0.2392E-02
6	0	0	0	0	0	0
7	0.7983E-05	-0.9801E-03	0.2977E-02	0.3470E-01	-0.9306E-04	-0.1728E-01
8	-0.9680E-03	-0.8755E-02	0.2985E-02	0.4143E-01	-0.2335E-03	-0.3705E-01

При анализе рамы в случае удара в случае Б установлено, что система деформируется в течение 0,022 с, а затем разрушается. Пластическому деформированию здесь подвергаются стержни в сечениях 1-4, 7. Кроме того, в сечениях 1-3, 7 характер распространения этих деформаций по сечению соответствует схеме образования пластического шарнира. На рис. 2г показано, что вертикальный прогиб рамы в сечении 8 достигает величины 2,78 см менее чем за 20 мс, при этом система практически не совершает колебаний. На рис. 2в иллюстрируется, что по истечении 22 мс сечение 1 разрушается.

Таблица 2
Векторы $\{Z(0,022)\}$ деформаций сечений 1-8 рамы при пространственном ударе

№ сеч.	Δx , м	Δy , м	Δz , м	$\Delta\phi_{xy}$, рад	$\Delta\phi_{xz}$, рад	$\Delta\phi_{yz}$, рад
1	0	0	0	0	0	0
2	-0,3831E-01	-0,2774E-02	-0,2571E-02	0,9587E-02	-0,4890E-02	-0,1269
3	-0,3899E-01	0,1421E-01	-0,1600E-02	0,4007E-01	0,3936E-01	0,2536
4	-0,3884E-01	0,1772E-01	-0,3079E-02	0,4015E-01	0,1271E-01	-0,8547E-01
5	-0,3930E-01	-0,2426E-02	-0,9314E-03	0,3203E-02	0,8769E-02	0,4401E-02
6	0	0	0	0	0	0
7	-0,4059E-01	0,1111E-01	-0,1349E-02	-0,6292E-01	-0,2591	0,2463071
8	-0,4436E-01	-0,2782E-01	-0,5880E-02	0,1831	-0,4893	0,7289146

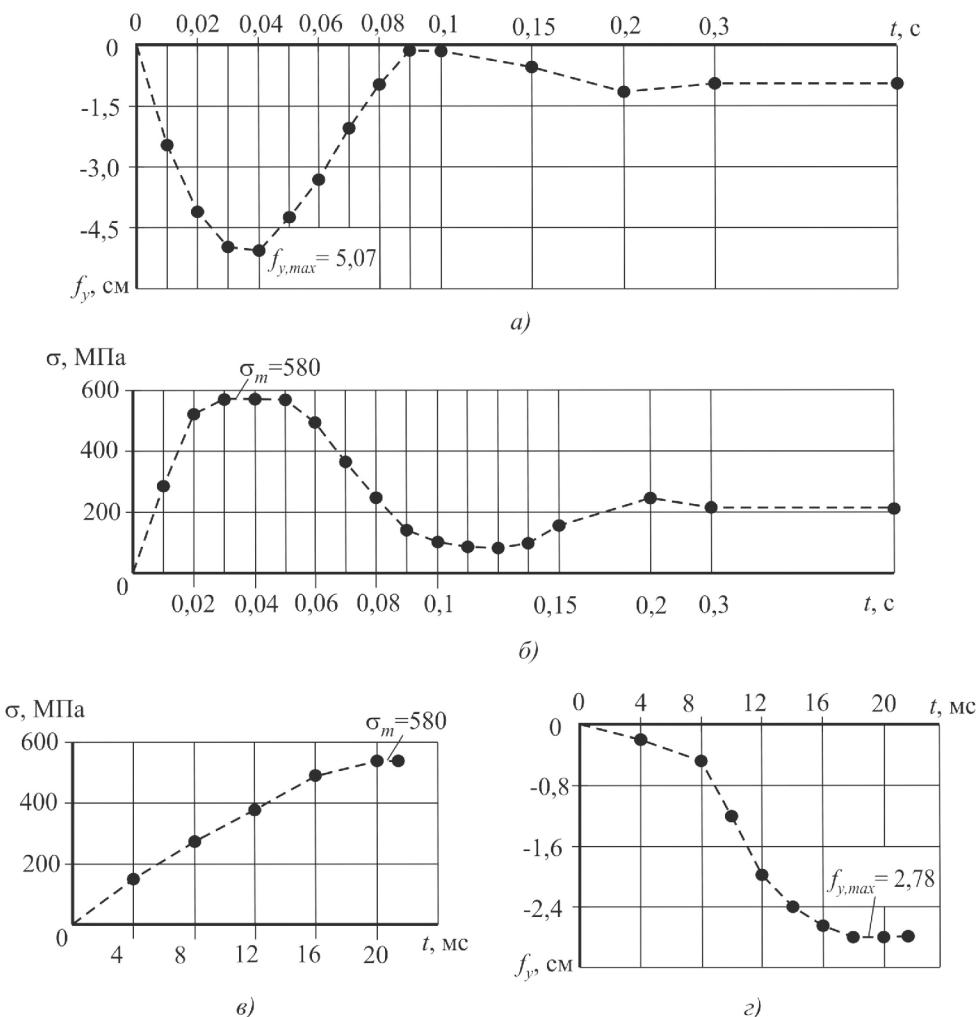


Рис. 2. Графики зависимости вертикальных прогибов и напряжений от времени при вертикальном ударе (а-б) и пространственном ударе (в-г)

На рис. 3 приведены деформированные схемы рамы при вертикальном и пространственном ударе. Здесь T , T_1-T_3 , – места образования пластических деформаций. Масштаб перемещений в 20 раз превышает масштаб изображения конструкции.

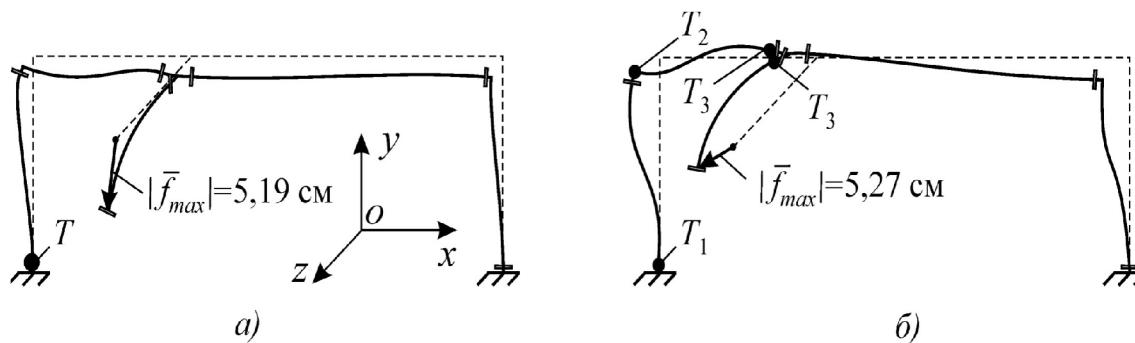


Рис. 3. Деформированные схемы рам при ударе в случае А (а) и при ударе в случае Б (б)

Анализ деформированных схем показывает, что характер ударного воздействия существенным образом влияет на работоспособность конструкции. На рис. 3б показан характер разрушения рамы. Через 20 мс после начала воздействия образовалась зона пластических деформаций T_1 , далее приблизительно через 1 мс зона T_2 , затем, по прошествии около 0,5 мс, практически одновременно образовались зоны T_3 .

Вывод. Разработана методика оценки напряженно-деформированного состояния стержневых систем при ударных запроектных воздействиях. Используется прямое интегрирование уравнений динамического равновесия системы на основе модификации метода Ньюмарка, которая учитывает геометрию конструкции в деформированном состоянии. Расчеты выполняются с учетом физической нелинейности на основе ассоциативного течения материала. Приведенный пример расчета пространственных рам на запроектные ударные воздействия показывает работоспособность данного алгоритма. Предлагаемые расчетные процедуры могут быть использованы для решения задач идентификации запроектных воздействий на стержневые системы.

Список литературы

1. Тамразян А.Г., Зодьбинов Д.В. Анализ риска прогрессирующего обрушения зданий при аварийных ударных воздействиях вышележащих конструкций // Предотвращение аварий зданий и сооружений: Межвузовский сборник научных трудов. Вып. 4, 2005. – С. 24-30.
2. Стругацкий Ю.М., Шапиро Г.И., Эйсман Ю.А. Рекомендации по предотвращению прогрессирующих обрушений крупнопанельных зданий // Москкомархитектура, 1999. – 55 с.
3. Шапиро Г.И., Коровкин В.С., Эйсман Ю.А., Стругацкий Ю.М. Рекомендации по защите жилых каркасных зданий при чрезвычайных ситуациях // Москкомархитектура, 2002. – 20 с.
4. Шапиро Г.И., Эйсман Ю.А., Залесов А.С. Рекомендации по защите монолитных жилых зданий от прогрессирующего обрушения // Москкомархитектура, 2005. – 59 с.
5. Серпик И.Н., Курченко Н.С. Геометрически и конструктивно нелинейная динамика плоских рам при внезапных структурных перестройках // Интеграция, партнерство и инновации в строительной науке и образовании: Сборник трудов международной научной конференции, посвященной 90-летию МГСУ-МИСИ, МГСУ, 2011. – С. 273-277.
6. Papageorgiou A.V., Gantes C.J. Equivalent uniform damping ratios for irregular in height concrete // Eurosteel 2008. – P. 1485-1490.
7. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L. The finite element method. Fifth edition: The basic. – Oxford: Butterworth-Heinemann, Vol. 1, 2000. – 689 p.

Alexeytsev A.V. – candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: aalexw@mail.ru

Serpik I.N. – doctor of technical sciences, professor

E-mail: iserpik@online.debryansk.ru

Bryansk State Engineering-Technological Academy

The organization address: 241037, Russia, Bryansk, etc. Stanke-Dimitrov, 3

Butenko A.V. – post-graduate student

Kazan State University of Architecture and Engineering

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

Analysis of emergency collision actions on the spatial frames

Resume

The technique of investigation of the stress-strain state of frame structures with inelastic collision effects is adduced. Analysis of the dynamic behavior of the objects is performed taking into account the geometrical and physical nonlinearity. The problem was solved by direct integration of the differential equations described the motion of the structural systems with use the Newmark method presuppositions. The finite element model is constructed for the geometry of structures in the deformed state. It takes into account the elastic-plastic material behavior. The structural damping of the Rayleigh oscillation scheme is used. An example of calculation of the spatial frame using the proposed computational process is considered. The calculations are performed with the physical nonlinearity based on the associative flow of the material. The above example of the calculation of spatial frames on extradesign Shock shows performance of this algorithm. The proposed design procedure can be used to solve the problems of identification of design basis impacts on core system.

Keywords: emergency actions, inelastic collision, dynamics, spatial frames, damping, physical and geometric nonlinearity.

References

1. Tamrazjan A.G., Zotbinov D.V. Analysis of risk of progressive collapse of buildings under emergency shock influences the overlying structures // Preventing accidents buildings: Interuniversity collection of scientific papers, V. 4, 2005. – P. 24-30.
2. Strugatskiy Y.M., Shapiro G.I., Eisman Y.A. Recommendations for preventing progressive collapse of large buildings // Moskomarhitectura, 1999. – 55 p.
3. Shapiro G.I., Korovkin V.S., Eisman Y.A., Strugatskiy Y.M. Recommendations for the protection of residential frame buildings in emergencies // Moskomarhitectura, 2002. – 20 p.
4. Shapiro G.I., Eisman Y.A., Zalesov A.S. Recommendations for the protection of residential solid progressive collapse // Moskomarhitectura, 2005. – 59 p.
5. Serpik I.N., Kurchenko N.S. Geometrically and structurally nonlinear dynamics of plane frames with sudden structural changes // Integration, partnership and innovation in construction science and education: Proceedings of the International Conference on the 90th Anniversary MGSU-MISI, 2011. – P. 273-277.
6. Papageorgiou A.V., Gantes C.J. Equivalent uniform damping ratios for irregular in height concrete // Eurosteel, 2008. – P. 1485-1490.
7. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L. The finite element method. Fifth edition: The basic. – Oxford: Butterworth-Heinemann, Vol. 1, 2000. – 689 p.