

**РАБОТОСПОСОБНОСТЬ КАМЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ
С КОРРОЗИОННЫМИ ПОВРЕЖДЕНИЯМИ
ПРИ КРАТКОВРЕМЕННЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ
ВОЗДЕЙСТВИЯХ**

УДК 624.07.012.82.046:620.193.4+
+699.841

Попеско Антонина Ивановна
ООО «Инженерно-консультационная
фирма «Альтернатива»,
доктор технических наук, профессор

Морозов Валерий Иванович
ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный
университет», доктор технических наук, профессор

Анцыгин Олег Иванович
ООО «Инженерно-консультационная фирма «Альтернатива»,
кандидат технических наук, доцент

Дайлов Александр Алексеевич
Старший научный сотрудник ФГУП «26 ЦНИИ Минобороны России»,
кандидат технических наук

Макаренко Сергей Валерьевич
ГОУ ВПО «Комсомольский-на-Амуре государственный
технический университет», инженер

Многие строительные конструкции, запроектированные и построенные для условий действия статических нагрузок, при эксплуатации могут подвергаться действию однократно прилагаемых усилий, способных вызвать разрушение в очень короткие промежутки времени. Такой характер нагружения может возникнуть при сейсмических воздействиях на здание, взрывах пылегазовоздушных смесей, паровых котлов, при ударах, вызываемых падением или обрушением каких-либо масс на несущие конструкции, действием на них взрывной волны и т.п.

Расчет конструкций при указанных видах нагружения состоит в том, чтобы определить, какую кратковременную динамическую нагрузку они способны выдерживать без обрушения. Этот расчет по действующим СНиП осуществляется приближенно. Не учитывается изменение скорости нагружения по высоте поперечного сечения элемента. Предполагается, что все волокна поперечного сечения испытывают одинаковую скорость нагружения, которая остается постоянной во весь период работы конструкции под импульсивной нагрузкой. Не учитывается влияние скорости нагружения на начальный модуль упругости и предельную деформацию материалов конструкций. Влияние скорости нагружения на пределы прочности учитывают путем введения в расчет коэффициента динамического упрочнения. Значение такого коэффициента определяется по усредненным скоростям нагружения, которые намного ниже той ско-

рости, при которой происходит разрушение конструкции. В действительности скорость нагружения элементов конструкций меняется по высоте поперечного сечения и при удалении от нейтральной оси увеличивается, достигая своего максимума в крайних фибрах сечения.

В большинстве случаев с целью упрощения расчета динамическая зависимость $\sigma - \varepsilon$ принимается в идеализированном виде: упругом, упругопластическом и т.п. Действительные же диаграммы динамического деформирования являются криволинейными. Данные упрощения в конечном итоге приводят к занижению несущей способности конструкции.

Нормативные методы расчета зданий и сооружений на сейсмические воздействия разработаны с учетом предельных состояний конструкций, при формулировании которых принимаются во внимание такие факторы, как безопасность людей, сохранность ценного оборудования, возможность ремонта и т.п. Это связано с тем, что обеспечение сейсмостойкости зданий и многих сооружений вследствие увеличения их прочности и жесткости считается экономически нецелесообразным и поэтому допускаются работа конструкций за пределами упругости и их повреждение при сильных сейсмических воздействиях.

Для оценки технического состояния конструкции на основе предыдущей эксплуатации в окружающей агрессивной среде необходимо выявить действительную несущую способность ее элементов во времени и с учетом внешних воздействий окружающей среды. Важным остается вопрос установления процента понижения несущей способности элементов конструкции вследствие коррозионных повреждений конструкций.

До настоящего времени еще не создано общего метода расчета конструкций, подвергающихся разрушению в агрессивных средах. Свидетельством этого является отсутствие в СНиП указаний по расчету таких конструкций. Поэтому накопление экспериментальных данных для выявления функциональных зависимостей прочностных и деформативных характеристик материалов от внешних агрессивных воздействий и нагрузки для будущей нормативной методики расчета таких конструкций является актуальным.

В данной статье предлагается методика расчета несущей способности каменных конструкций с коррозионными повреждениями при динамических воздействиях сейсмического типа.

Построение методики расчета осуществляется на основе подхода нелинейной теории железобетона Р.С. Санжаровского. При решении используются следующие теоретические предпосылки.

Расчетная схема элемента принимается в виде внецентренно сжатого стержня с шарнирно опертыми концами. Изогнутая ось стержневого элемента аппроксимируется косинусоидой

$$y = f \cdot \cos \frac{\pi \cdot x}{l_0},$$

где y, x – координаты точки оси стержня;

f – максимальный прогиб;

l_0 – расчетная длина стержня.

Для определения кривизны используется приближенное выражение.

Закон изменения нагрузки в зависимости от параметра времени действия t принимается в виде

$$N(t) = N_0 + at.$$

Исследование параметров напряженно-деформированного состояния (НДС) осуществляется для наиболее нагруженного сечения стержня с использованием условий равновесия.

Наиболее нагруженное сечение элемента рассматривается по высоте (h) в виде совокупности n -участков. Считается справедливой гипотеза плоских сечений, которая позволяет выразить деформации элемента на участках (ε_i) через краевые (фибровые) деформации:

$$\varepsilon_i = \frac{n-i}{4} \cdot \varepsilon_0 + \frac{i-1}{4} \cdot \varepsilon_n,$$

где $i=1 \dots n-1$.

Прогиб в рассматриваемом сечении определяется по формуле

$$f = k \cdot (\varepsilon_0 - \varepsilon_n),$$

где $k = \frac{l_0^2}{\pi^2 \cdot h}$.

Влияние агрессивной среды на кирпичную кладку рассматривается как фактор, изменяющий её деформативно-прочностные свойства. Принимается допущение о существовании границы между участком кладки с измененными свойствами и нормальным, сохранившим свои прочностные и деформативные свойства. Корродирующая и нормальная части сечения кладки связаны между собой условием совместности деформаций.

Количественной характеристикой процесса коррозии кладки является глубина проникания коррозионной среды в тело кладки:

$$L(\tau) = (K_b \cdot \tau)^m,$$

где K_b, m – коэффициенты агрессивности конкретной среды к определенному типу кирпичной кладки;

τ – время действия коррозионной среды.

В диаграммах $\sigma - \varepsilon$ по высоте элемента каждому значению скорости $\dot{\varepsilon}$ по высоте сечения сжатой зоны соответствует своя кривая $\sigma - \varepsilon$.

Для решения задачи рассматривается часть стержня, отделенная от остальной части в наиболее нагруженном сечении (рис.1). Применение принципа Германа–Эйлера–Даламбера позволяет записать уравнения

равновесия метода кинестатики при импульсивной нагрузке для отсеченной части стержня. Согласно рис. 1, получаем:

$$N(t) - P_{\text{вн}} = 0; \quad Q = P_{\phi 1} = 0;$$

$$N(t)(e + f) - M_{\phi 1} - M_{\text{вн}} = 0,$$

где $P_{\phi 1}$ – главный вектор поперечных сил инерции, действующих на отсеченную половину стержня;

$M_{\phi 1}$ – главный момент сил инерции.

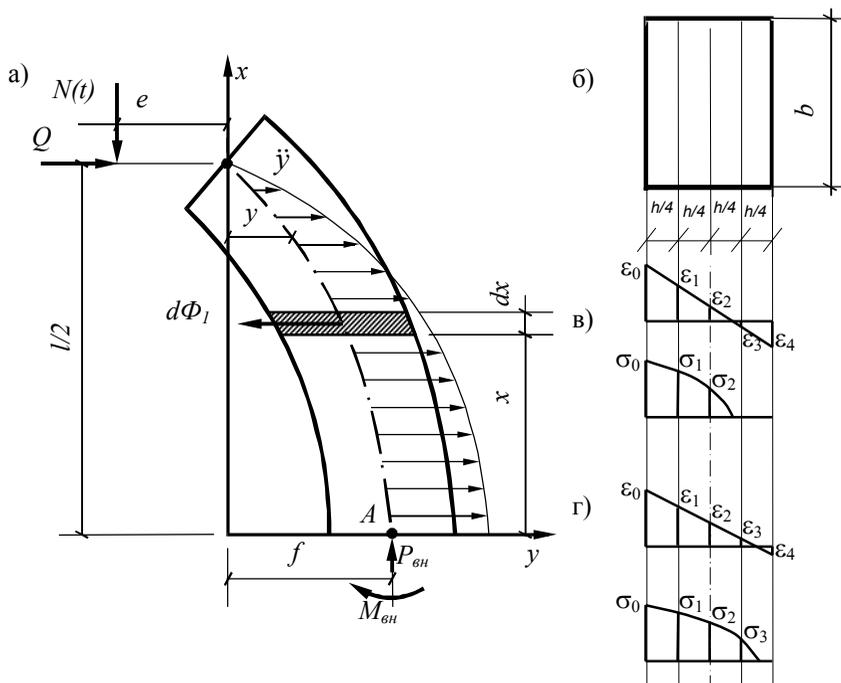


Рис. 1. Схема усилий, действующих на отсеченную часть стержня

Значение элементарной силы инерции, действующей на отрезок стержня длиной dx (см.рис.1), определяется выражением

$$d\Phi_1 = \ddot{y}Fdx, \quad (1)$$

где γ – плотность кирпичной кладки;

F – площадь поперечного сечения стержня.

Интегрируя (1) по длине с учетом приближенного выражения для кривизны находим:

$$Q = P_{\phi 1} = \int_0^{l/2} F\gamma \ddot{f} \cos \frac{\pi \cdot x}{l} dx = \frac{F\gamma l}{\pi} \ddot{f},$$

$$M_{\phi 1} = \int_0^{l/2} F\gamma \ddot{f} \cos \frac{\pi \cdot x}{l} x dx - Q \frac{l}{2} = \frac{F\gamma l^2}{\pi^2} \ddot{f}.$$

Величины главного вектора $P_{вн}$ и главного момента $M_{вн}$ находим из эпюры нормальных напряжений и относительных удлинений в среднем сечении. Так, для схемы, приведенной на рис. 1, г, получим:

$$P_{вн} = \frac{bh}{8} \left[\sigma_0 + \sigma_1 \left(1 + \frac{3\varepsilon_0 - \varepsilon_4}{\varepsilon_0 + \varepsilon_4} \right) \right];$$

$$M_{вн} = \frac{bh^2}{96} \left[5\sigma_0 + 4\sigma_1 \left(1 + \frac{\varepsilon_4(3\varepsilon_0 - \varepsilon_4)}{(\varepsilon_0 + \varepsilon_4)^2} \right) \right].$$

Система дифференциальных уравнений движения стержня имеет вид:

$$\begin{cases} C_1 \ddot{\varepsilon}_0 + C_2 \ddot{\varepsilon}_4 + C_3 \ddot{\sigma}_0 + C_4 \ddot{\sigma}_1 = C_5; \\ C_6 \ddot{\varepsilon}_0 + C_7 \ddot{\varepsilon}_4 = C_8; \\ C_9 \ddot{\varepsilon}_0 + C_{10} \ddot{\sigma}_0 = C_{11}; \\ C_{12} \ddot{\varepsilon}_0 + C_{13} \ddot{\varepsilon}_4 + C_{14} \ddot{\sigma}_1 = C_{15}. \end{cases} \quad (2)$$

Система уравнений (2) приводится к нормальному виду

$$\dot{\varepsilon}_0 = x_1;$$

$$\dot{x}_1 = \left. \begin{aligned} & [(C_5 C_{10} - C_3 C_{11}) C_{14} - C_4 C_{10} C_{15}] C_7 C_{10} C_{14} - \\ & - (C_2 C_{10} C_{14} - C_4 C_{10} C_{13}) C_8 C_{10} C_{14} \\ & [(C_1 C_{10} - C_3 C_9) C_{14} - C_4 C_{10} C_{12}] C_7 C_{10} C_{14} - \\ & - (C_2 C_{10} C_{14} - C_4 C_{10} C_{13}) C_6 C_{10} C_{14} \end{aligned} \right\};$$

$$\dot{\varepsilon}_4 = x_2;$$

$$\dot{x}_2 = \frac{[(C_5 C_{10} - C_3 C_{11}) C_{14} - C_4 C_{10} C_{15}] C_6 C_{10} C_{14} - [C_{14} (C_1 C_{10} - C_3 C_9) - C_4 C_{10} C_{12}] C_8 C_{10} C_{14}}{(C_2 C_{10} C_{14} - C_4 C_{10} C_{13}) C_6 C_{10} C_{14} - [C_{14} (C_1 C_{10} - C_3 C_9) - C_4 C_{10} C_{12}] C_7 C_{10} C_{14}};$$

$$\dot{\sigma}_0 = x_3;$$

$$\dot{x}_3 = \frac{C_{11}}{C_{10}} - \frac{C_9}{C_{10}} \left\{ \frac{[(C_5 C_{10} - C_3 C_{11})C_{14} - C_4 C_{10} C_{15}]C_7 C_{10} C_{14} - (C_2 C_{10} C_{14} - C_4 C_{10} C_{13})C_8 C_{10} C_{14}}{[C_{14}(C_1 C_{10} - C_3 C_9) - C_4 C_{10} C_{12}]C_7 C_{10} C_{14} - (C_2 C_{10} C_{14} - C_4 C_{10} C_{13})C_6 C_{10} C_{14}} \right\};$$

$$\dot{\sigma}_1 = x_4;$$

$$\dot{x}_4 = \frac{C_{15}}{C_{14}} - \frac{C_{13}}{C_{14}} \left\{ \frac{[(C_5 C_{10} - C_3 C_{11})C_{14} - C_4 C_{10} C_{15}]C_6 C_{10} C_{14} - [C_{14}(C_1 C_{10} - C_3 C_9) - C_4 C_{10} C_{12}]C_8 C_{10} C_{14}}{(C_2 C_{10} C_{14} - C_4 C_{10} C_{13})C_6 C_{10} C_{14} - [C_{14}(C_1 C_{10} - C_3 C_9) - C_4 C_{10} C_{12}]C_7 C_{10} C_{14}} \right\} -$$

$$- \frac{C_{12}}{C_{14}} \left\{ \frac{[(C_5 C_{10} - C_3 C_{11})C_{14} - C_4 C_{10} C_{15}]C_7 C_{10} C_{14} - (C_2 C_{10} C_{14} - C_4 C_{10} C_{13})C_8 C_{10} C_{14}}{[C_{14}(C_1 C_{10} - C_3 C_9) - C_4 C_{10} C_{12}]C_7 C_{10} C_{14} - (C_2 C_{10} C_{14} - C_4 C_{10} C_{13})C_6 C_{10} C_{14}} \right\}.$$

Начальные условия для решения системы уравнений определяются из расчета стержня на нагрузку N_0 . В качестве критерия потери устойчивости стержня используется равенство вариаций моментов внешних и внутренних сил (при условии равенства нулю вариации продольной силы):

$$\begin{cases} Nk(\delta\varepsilon_1 + \delta\varepsilon_2) = \frac{\partial M_{вн}}{\partial \varepsilon_1} \delta\varepsilon_1 + \frac{\partial M_{вн}}{\partial \varepsilon_2} \delta\varepsilon_2; \\ \frac{\partial P_{вн}}{\partial \varepsilon_1} \delta\varepsilon_1 + \frac{\partial P_{вн}}{\partial \varepsilon_2} \delta\varepsilon_2 = 0. \end{cases}$$

Приравняв нулю определитель системы, составленный из коэффициентов при вариациях, получают функционал потери устойчивости

$$\Phi = \left(Nk - \frac{\partial M_{вн}}{\partial \varepsilon_1} \right) \frac{\partial P_{вн}}{\partial \varepsilon_2} - \left(Nk - \frac{\partial M_{вн}}{\partial \varepsilon_2} \right) \frac{\partial P_{вн}}{\partial \varepsilon_1} = 0. \quad (3)$$

Таким образом, поставленная задача распадается на две части:

- 1) определение кинематических уравнений движения;
- 2) проверка условия критического состояния.

Первая часть задачи реализуется на ЭВМ. Одновременно просчитывается функционал потери устойчивости (вторая часть задачи).

Если в какой-то момент t^* функционал (3) обращается в нуль, то этот момент является в данной ситуации критическим временем. Так как функция $N = N(t)$ задается, то, подставляя в нее значение t^* , получают продольную силу в момент исчерпания несущей способности стержня.

Построение расчетной модели элемента с коррозионными повреждениями при воздействии динамической нагрузки осуществляется следующим образом. Коррозионная среда действует на элемент в течение времени τ (рис. 2). Влияние среды проявляется в изменении физико-механических свойств кирпичной кладки по периметру сечения элемента на глубину $L(\tau)$. Поперечное сечение стержня представляется состоящим из двух участков с разными физико-механическими характеристиками: участка кладки без коррозионных повреждений и участка кладки с коррозионными повреждениями.

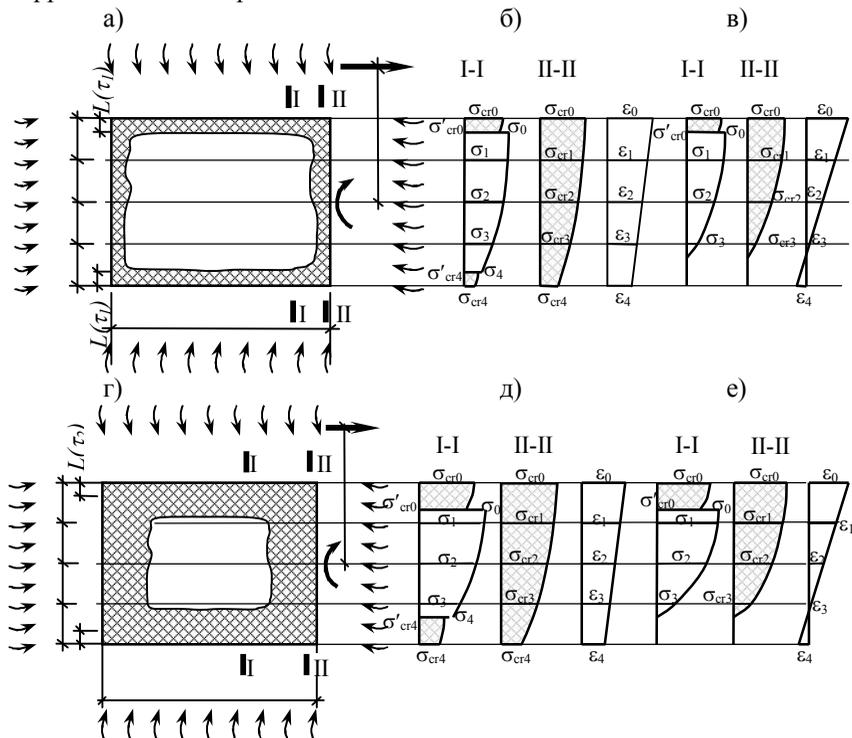


Рис. 2. Распределение напряжений и деформаций по сечению элемента в зависимости от времени действия коррозионной среды и уровня нагружения

Главный вектор $P_{вн}$ и главный момент $M_{вн}$ определяются из эпюры распределения напряжений и деформаций в среднем сечении и описываются выражениями:

$$P_{вн}(\tau) = P_{II}^{6H}(\tau) = P_{hb}^{6H}(\tau) + 2P_{cr}^{6H}(\tau);$$

$$M_{вн}(\tau) = M_{II}^{6H}(\tau) = M_{hb}^{6H}(\tau) + 2M_{cr}^{6H}(\tau).$$

Развернутые формулы для определения $P_{\text{вн}}$ и $M_{\text{вн}}$, например, для схемы на рис. 2, д и числе разбиения $n = 5$ имеют вид:

$$\begin{aligned}
 P_{hb}^{\text{вн}}(\tau_2) &= \frac{L(b-2L)}{2} \cdot [\sigma_{cr0} + \sigma'_{cr0} + \sigma'_{cr4} + \sigma_{cr4}] + \frac{(b-2L)}{8} \times \\
 &\times [(h-4L)(\sigma'_0 + \sigma'_4) + 2h\sigma_2 + 2(h-2L)(\sigma_1 + \sigma_3)]; \\
 M_{hb}^{\text{вн}}(\tau_2) &= \frac{L(b-2L)}{12} [(3h-2L)(\sigma_{cr0} - \sigma_{cr4}) + \\
 &+ (3h-4L)(\sigma'_{cr0} - \sigma'_{cr4})] + \frac{(b-2L)(h-4L)}{96} \times \\
 &\times [(5h-8L)(\sigma_0 + \sigma_4) - 4(h-L)(\sigma_1 + \sigma_3)] + \\
 &+ \frac{h^2(b-2L)}{48} \cdot [\sigma_1 - \sigma_3]; \\
 P_{cr}^{\text{вн}}(\tau) &= \frac{L \cdot h}{8} \cdot [\sigma_{cr0} + 2(\sigma_{cr1} + \sigma_{cr2} + \sigma_{cr3}) + \sigma_{cr4}]; \\
 M_{cr}^{\text{вн}}(\tau) &= \frac{L \cdot h^2}{96} \cdot [5 \cdot (\sigma_{cr0} - \sigma_{cr4}) + 6 \cdot (\sigma_{cr1} - \sigma_{cr3})].
 \end{aligned}$$

Система дифференциальных уравнений движения стержня с коррозийными повреждениями имеет вид:

$$\begin{cases}
 C_1^* \ddot{\varepsilon}_0 + C_2^* \ddot{\varepsilon}_4 + C_3^* \ddot{\sigma}_0 + C_4^* \ddot{\sigma}_1 = C_5^*; \\
 C_6^* \ddot{\varepsilon}_0 + C_7^* \ddot{\varepsilon}_4 = C_8^*; \\
 C_9^* \ddot{\varepsilon}_0 + C_{10}^* \ddot{\sigma}_0 = C_{11}^*; \\
 C_{12}^* \ddot{\varepsilon}_0 + C_{13}^* \ddot{\varepsilon}_4 + C_{14}^* \ddot{\sigma}_1 = C_{15}^*.
 \end{cases} \quad (4)$$

Коэффициенты при неизвестных в (4) имеют следующие значения:

$$\begin{aligned}
 C_1^* &= \frac{bh}{2} \sigma_1 \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_4 + \varepsilon_4^2}{(\varepsilon_0 + \varepsilon_4)^3}; \quad C_2^* = -\frac{bh}{2} \sigma_1 \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_4 + \varepsilon_0^2}{(\varepsilon_0 + \varepsilon_4)^3}; \\
 C_3^* &= \frac{bh}{8}; \quad C_4^* = \frac{bh}{8} \left(1 + \frac{3\varepsilon_0 - \varepsilon_4}{\varepsilon_0 + \varepsilon_4} \right); \\
 C_5^* &= -bh \left\{ \sigma_1 \left[\frac{\dot{\varepsilon}_0 \dot{\varepsilon}_4 (\varepsilon_0 - \varepsilon_4) + (\varepsilon_0 \dot{\varepsilon}_4^2 - \varepsilon_4 \dot{\varepsilon}_0^2)}{(\varepsilon_0 + \varepsilon_4)^3} \right] + \dot{\sigma}_1 \left[\frac{\varepsilon_4 \dot{\varepsilon}_0 - \varepsilon_0 \dot{\varepsilon}_4}{(\varepsilon_0 + \varepsilon_4)^2} \right] \right\}; \\
 C_6^* &= 1; \quad C_7^* = 1; \quad C_8^* = \frac{(0,25N(t)l - M_{\text{вн}})\pi^2}{(F_{cr} + F_n)\gamma Kl^2};
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}C_9^* &= A_1^* - 2A_2^* \varepsilon_0; C_{10}^* = -1; C_{11}^* = 2A_2^* \varepsilon_0^2; \\C_{12}^* &= 0,75A_1^* - 1,5A_2^*(0,75\varepsilon_0 - 0,25\varepsilon_4); \\C_{13}^* &= 0,5A_2^*(0,75\varepsilon_0 - 0,25\varepsilon_4) - 0,25A_1^* \\C_{14}^* &= -1; C_{15}^* = 2A_2^*(0,75\varepsilon_0 - 0,25\varepsilon_4)^2.\end{aligned}$$

Далее система уравнений (4) приводится к нормальному виду и решается на ЭВМ, как задача Коши методом Рунге-Кутты.

Методика расчета реализована в пакете прикладных программ «PARKK», ориентированный на ПЭВМ IBM PC/AT на базе процессора Intel-80286 со стандартным техническим обеспечением.

Разработанная феноменологическая модель расчета параметров напряженно-деформированного состояния и несущей способности конструкций каменных зданий с коррозионными повреждениями при воздействии динамических нагрузок сейсмического типа позволяет оценить проектные решения элементов конструкций с учетом их физической и геометрической нелинейности. Для численной реализации модели разработаны алгоритм и программа расчета на ПЭВМ.