

О КРИТЕРИЯХ ЖИВУЧЕСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОРРОЗИОННО ПОВРЕЖДАЕМЫХ КОНСТРУКТИВНЫХ СИСТЕМ В ЗАПРЕДЕЛЬНЫХ СОСТОЯНИЯХ

УДК 624.041.4:624.072.2:624.078.342

Клюева Наталья Витальевна

*Доцент кафедры городского строительства
и хозяйства архитектурно-строительного факультета
ГОУ ВПО «Орловский государственный технический университет»,
кандидат технических наук*

Андросова Наталья Борисовна

*Ассистент кафедры строительных конструкций
и материалов архитектурно-строительного факультета
ГОУ ВПО «Орловский государственный технический университет»*

Рассматриваются элементы новой концепции создания и эксплуатации зданий и сооружений. В ее основу положена современная модель защиты объектов недвижимости, базирующаяся на понятиях *конструктивной безопасности* зданий и сооружений как характеристики неразрушимости в течение расчётного эксплуатационного периода и *живучести* как характеристики неразрушимости при запредельных внешних воздействиях в течение расчётного эвакуационного промежутка времени. В качестве фрагмента разрабатываемой теории приводится решение задачи о критериях живучести железобетонных коррозийно повреждаемых конструктивных систем в запредельных состояниях.

Внезапные изменения структуры конструкции при запроектных воздействиях являются одним из основных факторов, определяющих не только картину ее напряженно-деформированного состояния и характер выключения связей и отдельных элементов, но и картину разрушения конструктивной системы в целом. Иными словами по характеру структурных изменений можно оценивать степень конструктивной нелинейности системы и, как следствие, ее живучесть.

В настоящей статье приведены некоторые результаты исследования по формированию критериев живучести железобетонных балочных и рамных конструкций от воздействий, вызывающих внезапные структурные изменения в этих конструкциях.

В работах [1; 2] были представлены расчетные зависимости для оценки живучести равно-стержневых конструктивных систем при внезапных структурных изменениях в таких системах от накопления в них коррозийных повреждений. Квазистатический расчет рассматриваемых конструкций выполнен с использованием неординарного смешанного метода расчета статически неопределимых систем.

Особенностью рассматриваемого варианта смешанного метода является то, что основная система неразрезной балки (рис. 1) или рамы (рис. 2) выбирается в виде шарнирного полигона с удаленными в местах возможного выключения связями и заменой их неизвестными $M_i (i=1, 2, \dots, k)$. Если при удалении связей образуется геометрически изменяемая основная система, то накладываются дополнительные связи $Z_m (m=k+1, \dots, n)$.

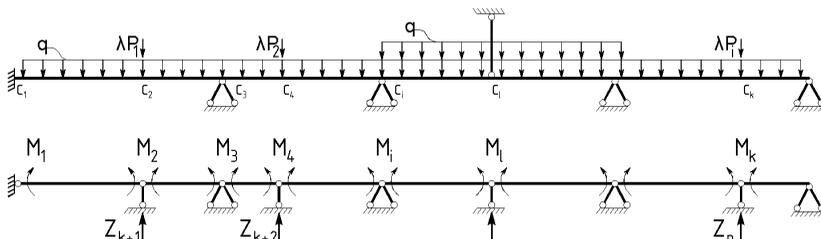


Рис. 1. Заданная (а) и основная (б) системы смешанного метода при расчете неразрезных балок

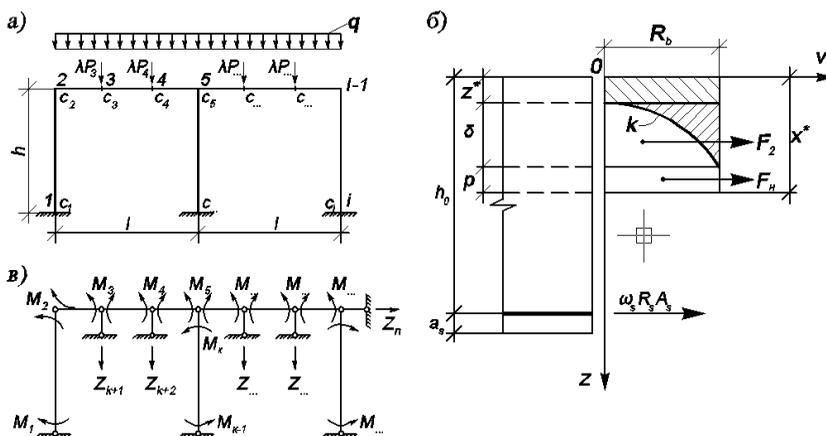


Рис. 2. Заданная (а), основная (в) системы рамы и расчетная схема поперечного сечения железобетонного элемента (б)

Пусть при значении параметра нагрузки $\lambda = \lambda_m$ в системе выключится i -я связь. Выключение связи произойдет в том случае, когда усилие в ней достигнет предельного значения. На рис.2,а эти сечения обозначены соответственно c_1, c_2, \dots, c_l . Найти значение параметра λ_m можно, используя канонические уравнения смешанного метода:

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

где $\bar{A}, \bar{B}, \bar{\Delta}_q, \bar{C}, \bar{D}, \bar{R}_q, \bar{r}_p$ – матрицы коэффициентов неизвестных M_j и Z_m смешанного метода.

В развернутом виде система уравнений (1) имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} \sum_{j=1}^{j=k} \delta_{ij} \cdot M_j + \sum_{j=1}^{j=k} \delta'_{ij} \cdot Z_j + \sum_{i=1}^{j=k} \Delta_{iq} + \sum_{i=1}^{j=k} \delta_{ip} \cdot \lambda = 0, (j = 1, 2, \dots, k) \\ \sum_{j=k+1}^{j=n} r'_{ji} \cdot M_j + 0 + \sum_{j=k+1}^{j=n} R_{iq} + \sum_{i=k+1}^{i=n} r_{ip} \cdot \lambda = 0, (i = k+1, \dots, n) \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

где $\delta_{ij}, \delta'_{ij}, r'_{ji}$ – коэффициенты при неизвестных (единичные перемещения и реакции) смешанного метода расчета статически неопределимых систем;

Δ_{iq} и R_{iq} – грузовые коэффициенты (перемещение и реакции соответственно) от постоянной нагрузки;

δ_{ip} – перемещение по направлению i -й удаленной связи от внешней параметрической нагрузки при $\lambda=1$;

r_{ip} – реакция в i -й наложенной связи основной системы от внешней параметрической нагрузки при $\lambda=1$.

За критерий живучести системы принимается величина действующей на нее нагрузки, равная величине нагрузки, при которой рассматриваемая система переходит в изменяемую систему (без лишних связей). Для превращения n -раз статически неопределимой системы в геометрически изменяемую систему необходимо исключить из нее не менее $(n+1)$ связей. Методами строительной механики определяется величина нагрузки, которая вызывает изменяемость системы. При внезапном приложении запроектной нагрузки в условиях чрезвычайных ситуаций природного или техногенного характера в конструктивной системе возникают динамические догружения и при расчете к величине статической нагрузки должна добавляться динамическая составляющая. На начальном этапе часть нагрузки q , при действии которой не происходит выключения связей (например, собственный вес), считается постоянной. Остальная часть – переменная нагрузка или коррозионное повреждение, изменяется пропорционально одному параметру $\lambda_{(m)}$, т.е. параметрически. Причем изменение переменной нагрузки происходит пропорционально этому параметру.

Таким образом, в данном случае постановка задачи расчета рамы на первом этапе сводится к определению предельной величины параметра $\lambda_{(m)}$, при котором в раме образуется m -й шарнир, нагруженный стати-

ческой нагрузкой, в условиях внезапного аварийного динамического догружения [3; 4].

Формализация представленного критерия живучести рассматриваемых конструктивных систем может быть выполнена решением системы уравнений (1):

$$\left\| \begin{matrix} \bar{M} \\ \bar{Z} \end{matrix} \right\| = \left\| \begin{matrix} \bar{M}_q \\ \bar{Z}_q \end{matrix} \right\| + \left\| \begin{matrix} \bar{m}_p \\ \bar{z}_p \end{matrix} \right\| \cdot \lambda_{(m)}. \quad (3)$$

Для принятой двучленной формы записи грузовых коэффициентов, значения усилий в выключающихся связях от суммарного воздействия заданной и параметрической нагрузок определяются по формуле

$$M_j = M_{jq} + m_{jp} \cdot \lambda (j = 1, 2, \dots, k), \quad (4)$$

где M_{jq} и m_{jp} – соответственно j -е элементы матриц-столбцов \bar{M}_q и \bar{m}_p .

Выключение связи произойдет в том случае, когда усилие в ней достигнет предельного значения. Тогда для всех усилий в выключающихся связях должна удовлетворяться система неравенств:

$$|M_j| \equiv |M_{jq} + m_{jp} \cdot \lambda| \leq M_{j,np}^0 (j = 1, 2, \dots, k), \quad (5)$$

где $M_{j,np}^0$ – предельное значение динамического момента в j -й связи опеределенное по значению ресурса силового сопротивления сечения элемента с учетом динамической прочности бетона сжатой зоны.

Ресурс силового сопротивления, например, для изгибаемого элемента по нормальному сечению (рис. 2,б), оцениваемый по предельному усилию в сжатом бетоне, для поврежденного коррозией бетона определяется из выражения [3]:

$$M^* = F_2 \cdot r_{S,2} + F_H \cdot r_{S,H}, \quad (6)$$

где F_2, F_H и $r_{S,2}, r_{S,H}$ – действующие в переходной и неповрежденной областях сжатого бетона силы и соответствующие им моментные плечи относительно центра тяжести растянутой арматуры, выраженные как функции толщины поврежденной, частично поврежденной и неповрежденной областей сжатого бетона высотой x^* .

Используя предложенную профессором В.М. Бондаренко слоистую расчетную модель сжатого бетона для поврежденного коррозией железобетонного элемента, значение предельной глубины повреждения может быть определено с помощью так называемой функции повреждений, которая записывается в форме полинома:

$$k(z) = \sum_{i=0}^{i=2} a_i z_i. \quad (7)$$

Из геометрических условий (см. рис. 2,б) находим:

- при $z = 0, k = 0$;
- при $z = \delta, k = 1$ и $\frac{dk}{dz} = 0$.

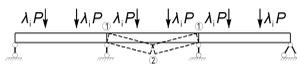
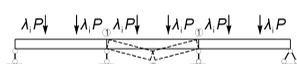
Отсюда находим значение коэффициента $a_i (i = 0, 1, 2)$:

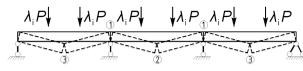
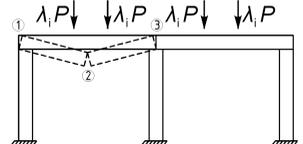
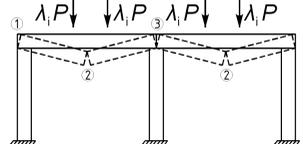
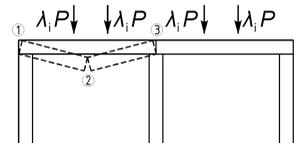
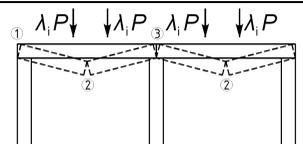
$$a_0 = 0; a_1 = \frac{2}{\delta}; a_2 = -\frac{1}{\delta^2}. \quad (8)$$

Поскольку a_i при $z^* > 0$ находится только из геометрических условий, то функция повреждений k остается единой для всех характеристик силового сопротивления поврежденного бетона: прочности, модуля мгновенной деформации, ползучести и т.п.

Численная реализация представленного критерия живучести (λ_m) железобетонных рамно-стержневых систем выполнена применительно к конструкциям неразрезных балочных и рамных систем, экспериментальные исследования которых выполнены ранее Г.А. Гениевым, Н.В. Ключевой, А.И. Демьяновым [5; 6], О.А. Ветровой, Е.А. Скобелевой [7; 8]. Результаты расчетов по определению параметра живучести λ_m опытной и расчетной схем разрушения для рассматриваемых конструктивных систем приведены в таблице.

**Расчетные схемы разрушения конструктивных систем
и значения критерия живучести λ_m**

№ п/п	Шифр опытной конст- рукции	Схема разрушения и последовательность образования пластических шарниров (или швов сдвига)	Значение λ_m при			Характер разрушения конструктивной схемы
			i=1	i=2	i=3	
1	2	3	4	5	6	7
1	ОБ - I		4,39	7,37	—	Хрупкое по бетону во 2-м пролете
2	ОБ-II		2,59	4,35	4,35	То же в 1-м, 2-м и 3-м пролетах
3	ОБС - I		6,29	10,5	—	По шву сдвига в 1-м пролете, затем по норм. сечению во 2-м пролете

№ п/п	Шифр опытной конструкции	Схема разрушения и последовательность образования пластических шарниров (или швов сдвига)	Значение λ_m при			Характер разрушения конструктивной схемы
			i=1	i=2	i=3	
1	2	3	4	5	6	7
4	ОБС-II		5,76	9,84	9,84	То же в 1-м, 2-м и 3-м пролетах
5	P-I		4,09	7,14	8,01	Хрупкое разрушение ригеля по бетону в 1-м пролете
6	P-II		3,6	6,28	7,04	То же в 1-м и 2-м пролетах
7	OP-I		4,05	6,93	7,76	Разрушение ригеля по шву сдвига, а затем по нормальному сечению в 1-м пролете
8	OP-II		4,05	6,96	7,79	То же в 1-м и 2-м пролетах

Проиллюстрируем расчет критерия живучести λ_m на примере разрушения опытной конструкции ОБ-I (рис. 3,а,б).

Опытная конструкция трехпролетной неразрезной балки была рассчитана и заармирована таким образом, чтобы при загрузении всех ее пролетов проектной нагрузкой в виде распределенной (собственный вес), сосредоточенных сил и при внезапном выключении моментной связи над первой промежуточной опорой произошло локальное разрушение только одного пролета балочной системы. Сечение балки принято сплошное с размерами 120×40 мм, бетон класса В25. Армирование плоскими сварными каркасами: продольная рабочая нижняя арматура диаметром 8 мм, продольная верхняя арматура диаметром 6 мм; поперечная арматура – проволока диаметром 1,5 мм с шагом 60 мм.

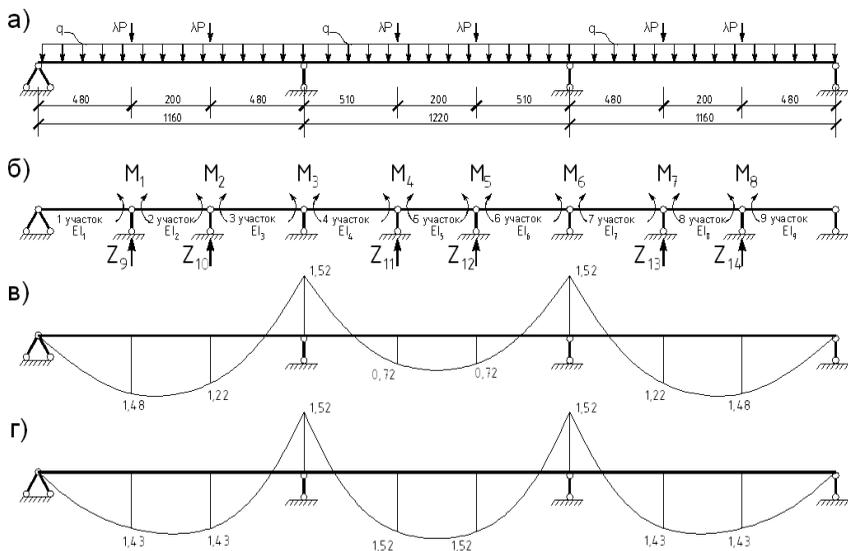


Рис. 3. Расчетная схема 3-пролетной балки (а), основная система смешанного метода (б), эпюры моментов при $\lambda = 4,39 \text{ кН}$ (в) и $\lambda = 7,37 \text{ кН}$ (г)

Решение

1. На основе феноменологической модели развития повреждений железобетона [3] остаточный ресурс силового сопротивления по нормальному сечению определяется следующим образом (рис. 4).

Если принять, что область разрушенного бетона занимает всю высоту z^* , то высота поврежденной сжатой зоны бетона в соответствии с [3] будет равна:

$$x^* = \omega_S \cdot x_0 + z^* + \frac{1}{3} \delta = 0,031 + 0 + 0 = 0,031 \text{ м},$$

где $x_0 = \frac{A_S \cdot \sigma_S}{b \cdot R_b} = \frac{0,503 \cdot 10^{-4} \cdot 355}{0,040 \cdot 14,5} = 0,031 \text{ м}$ – высота сжатой зоны непо-

врежденного бетона ($\sigma_S = R_S$ при условии

$$\xi = \frac{x^*}{h_0} = 0,31 \text{ м} \leq \xi_R = 0,594 \text{ м});$$

ω_S – коэффициент коррозионного повреждения рабочей арматуры (в данном расчете условно принят 1).

Остаточный ресурс силового сопротивления сечения определяем по формуле (6):

$$M^* = F_H \cdot r_{S,2} + 0 = 17,98 \cdot 0,0845 = 1,52 \text{ кН} \cdot \text{м},$$

где $F_H = p \cdot b \cdot R_b = 0,031 \cdot 0,004 \cdot 14,5 \cdot 10^3 = 17,98 \text{ кН}$;

p – высота неразрушенной области сжатого бетона, в рассматриваемом примере $p = x^*$ (см. рис. 4);

$$r_{S,H} = h_0 - \left(z^* + \delta + \frac{1}{2} p \right) = 0,1 - \frac{1}{2} \cdot 0,031 = 0,0845 \text{ м}.$$

Остаточный ресурс силового сопротивления элементов балочной системы для всех трех образцов балок: ОБ-I-1; ОБ-I-2; ОБ-I-3 – $M^* = 1,52 \text{ кН} \cdot \text{м}$. Изгибная жесткость балок, работающих в стадии с трещинами, вычисляется по методике [8], при $M^* = 1,52 \text{ кН} \cdot \text{м}$ составила $B = 79 \text{ кН} \cdot \text{м}^2$.

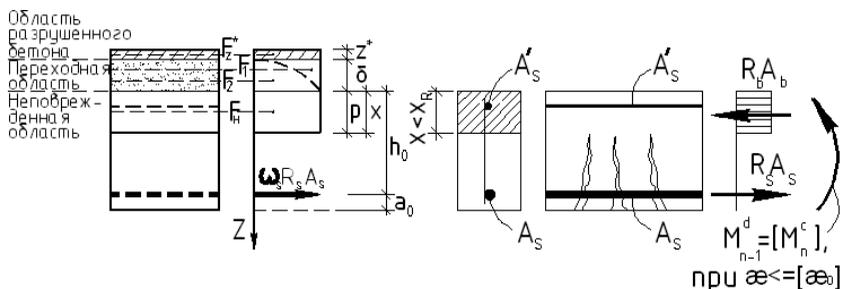


Рис. 4. Схема расчетной модели сечения железобетонного элемента балки в запредельном состоянии при пластическом «мягком» случае разрушения

2. Формируем систему линейных алгебраических уравнений смешанного метода (2) для решаемой задачи:

$$\begin{cases} \delta_{11} \cdot M_1 + \dots + \delta_{18} \cdot M_8 + \delta'_{19} \cdot Z_9 + \dots + \delta'_{114} \cdot Z_{14} + \Delta_{1q} + \lambda \cdot \delta_{1p} = 0 \\ \vdots \\ r'_{91} \cdot M_1 + \dots + r'_{98} \cdot M_8 + r_{99} \cdot Z_9 + \dots + r_{914} \cdot Z_{14} + R_{9q} + \lambda \cdot r_{9p} = 0 \\ \vdots \\ r'_{141} \cdot M_1 + \dots + r'_{148} \cdot M_8 + r_{149} \cdot Z_9 + \dots + r_{1414} \cdot Z_{14} + R_{14q} + \lambda \cdot r_{14p} = 0 \end{cases}$$

Например, матрица \vec{A} имеет вид:

$$\vec{A} = \begin{vmatrix} \delta_{11} & \delta_{12} & \dots & \delta_{18} \\ \vdots & & & \vdots \\ \delta_{81} & \delta_{82} & \dots & \delta_{88} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 2,87 \cdot 10^{-3} & 4,22 \cdot 10^{-4} & \dots & 0 \\ \vdots & & & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 2,87 \cdot 10^{-3} \end{vmatrix}.$$

Из множества решений системы неравенств (5) определяем минимальное значение λ , при котором в наиболее нагруженной выключающей связи достигается предельное значение, т.е. произойдет ее выключение:

$$\lambda_{(1)} = \min \left(\frac{M_i^* \mp |M_{iq}|}{m_{ip}} \right), \quad (i=1,2,\dots,k).$$

Решая систему неравенств, получим, что первым ($m-1$) образуется шарнир в сечениях 3 и 6 (рис. 3,в):

$$\lambda_{(1)} = \frac{1,52 - 0,002}{0,346} = 4,39 \text{ кН}.$$

Аналогичным образом получаем, что образуются шарниры ($m-2$) в сечениях 4 и 5 (рис. 3,г):

$$\lambda_{(2)} = \lambda_{(1)} + \Delta\lambda_{(2)} = 4,39 + 2,98 = 7,37 \text{ кН}.$$

На следующем этапе нагружения определитель матрицы системы (2) обращается в ноль – признак окончания расчета.

Библиографический список

1. Гениев Г.А. Прочность и деформативность железобетонных конструкций при запроектных воздействиях [Текст] / Г.А. Гениев, В.И. Колчунов, Н.В. Клюева, А.И. Никулин, К.П. Пятикрестовский. Научное издание. – М.: Изд-во АСВ, 2004. – 216 с.
2. Клюева Н.В. Расчет живучести коррозионно повреждаемых железобетонных рам с односторонними связями [Текст] / Н.В. Клюева // Бетон и железобетон. – 2008. – №2. – С. 19-21.
3. Бондаренко В.М. К расчету сооружений, меняющих расчетную схему вследствие коррозионных повреждений [Текст] / В.М. Бондаренко, Н.В. Клюева // Известия вузов. Серия «Строительство». – 2008. – №1. – С. 4-12.
4. Бондаренко В.М. Оптимизация живучести конструктивно нелинейных железобетонных рамно-стержневых систем при внезапных структурных изменениях [Текст] / В.М. Бондаренко, Н.В. Клюева, А.Н. Дегтярь, Н.Б. Андросова // Известия ОрелГТУ. Серия «Строительство. Транспорт». - №4, 2007. – С.5-10.

5. Гениев Г.А. Экспериментально-теоретические исследования неразрезных балок при аварийном выключении из работы отдельных элементов [Текст] / Г.А. Гениев, Н.В. Ключева // Известия ВУЗов. Строительство. – 2000. – №10. – С.21-26.
6. Ключева. Н.В Экспериментальные исследования железобетонных балок сплошного и составного сечения в запредельных состояниях [Текст] /. Н.В. Ключева, А.И. Демьянов // VII Международный научно-методический семинар «Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь». – Брест. –2001. – С. 167-172.
7. Ветрова, О.А. Экспериментальные исследования рамно-стержневых железобетонных конструкций в запредельных состояниях [Текст] / О.А. Ветрова, Н.В. Ключева // Изв. Орел ГТУ. Серия «Строительство. Транспорт». – Орел: Орел ГТУ. – 2005. – №3-4. – С. 10-15.
8. Колчунов Вл.И. Экспериментальные исследования деформативности и трещиностойкости железобетонных конструкций составного сечения [Текст] / Вл.И. Колчунов, Е.А. Скобелева, Н.В. Ключева, С.И. Горностаев// Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2008. – №1. – С.54-60.