

**О СВЯЗИ МЕЖДУ УРОВНЕМ СИЛОВОГО НАГРУЖЕНИЯ
И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ПОТЕРЯМИ ПРИ ДЕФОРМИРОВАНИИ
ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

В.М. БОНДАРЕНКО, *д-р тех. наук, профессор*

Б.А. ЯГУПОВ, *канд. техн. наук, профессор*

НИИСФ РААСН, 127238, Москва, Локомотивный пр-д, д. 21

С учетом анизотропии, нелинейности, необратимости и неравновестности силового сопротивления железобетона и кинематических особенностей его коррозионных повреждений вводится алгебраизированная методика оценки гистерезисных потерь энергии при знакопеременном нагружении. Для этого используются квазилинейные формы реологических уравнений механического сопротивления бетона, общепринятые связи кривизны железобетонных элементов с их жесткостью изгибающими моментами; а также линеаризация поиска с помощью N -моментной квадратичной минимизации отклонений по высоте сечений между точными и приближенными значениями временных модулей деформаций и коэффициентами сохранения силового сопротивления поврежденных коррозией бетонной арматуры.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: железобетон, необратимость деформирования, энергетический гистерезис, знакопеременное нагружение, коррозионные повреждения.

Железобетонные конструкции, воспринимающие многократные знакопеременные (статические или динамические) нагрузки, традиционно рассчитываются по общим признакам силового сопротивления; в частности, по предельным состояниям. 1-ой, 2-ой групп, с учетом специфики деформирования и условия работы компонент железобетона-бетона и арматуры, включая нелинейность, необратимость и неравновесность деформации, длительная прочность, выносливость, виброползучесть, особенности предыстории существования, коррозионных повреждений; кроме того возможна энергетическая оценка строительных решений. Повторные знакопеременные нагружения могут иметь как статический, так и динамический, в т.ч. вибрационный характер. Отличие состоит в разном поведении материалов во времени. В частности, при вибрационном нагружении время воздействия усилий одного знака очень мало и обычная ползучесть не проявляется.

При силовом деформировании конструкционных материалов происходят потери энергии [1,7,8,10]; при многократном знакопеременном нагружении эти энергетические потери накапливаются [5,6]. Очевидно, что стоимость этих энергетических потерь входит в стоимость продукции предприятий. Это актуализируют поиски снижения указанных потерь, а с учетом сопутствующих дополнительных затрат по энергопотреблению приводит к задаче энергооптимизации строительных конструкций промышленных и транспортно - коммуникационных зданий и сооружений.

При нагружении железобетона стальная арматура деформируется упруголинейно, и поэтому потери энергии при знакопеременном деформировании арматуры малы и могут не учитываться. Бетон, напротив, деформируется нелинейно и необратимо, потери энергии при деформировании бетона значительны (рис. 1). На рис. 1 нелинейная ветвь нагружения сжатием OK (без учета нисходящего участка): тоже при нагружении растяжением OK_t ; линии разгрузки 12 после нагружения сжатием и $1_t, 2_t$ - после нагружения растяжением. Фигуры 013 и $01_t 3_t$ - соответствуют работе на деформирование единичного объема образцов при нагружении \vec{W} и \vec{W} , фигуры 123 и $1_t 2_t 3_t$ - частичном восстановлении исходных размеров образцов при разгрузке \vec{W} и \vec{W}_t ; фигуры 013 и $01_t 3_t$, образующие TH петли гистерезиса отражающие потери энергии при однократном нагружении - разгрузке единицы объема образца $\Delta W = \vec{W} - \vec{W}$; при этом линии разгрузки 13 и $1_t 3_t$ параллельны начальной модульной линии nn_t между собою (признак Энгессера-Ясинского)

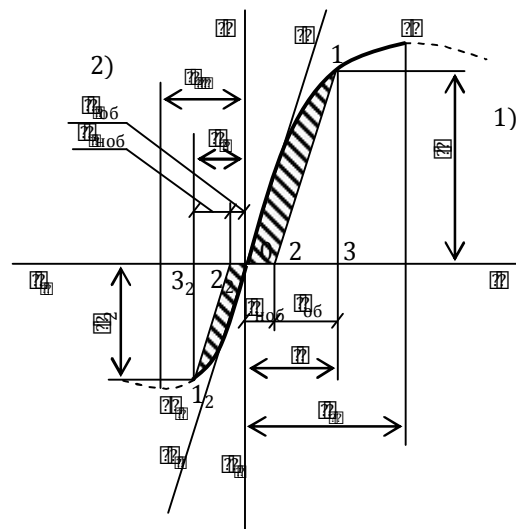


Рис. 1. Диаграммы (к времени t)

- 1. $\sigma - \epsilon$ при сжатии и разгрузке
- 2. $\sigma_t - \epsilon_t$ при растяжении и разгрузке

соответствуют работе, совершенной при размерах образцов при разгрузке \vec{W} и \vec{W}_t ; фигуры 013 и $01_t 3_t$, образующие TH петли гистерезиса отражающие потери энергии при однократном нагружении - разгрузке единицы объема образца $\Delta W = \vec{W} - \vec{W}$; при этом линии разгрузки 13 и $1_t 3_t$ параллельны начальной модульной линии nn_t между собою (признак Энгессера-Ясинского)

Деформации, накопленные при нагружении ϵ и ϵ_t после разгрузки восстанавливаются частично - $\epsilon_{об}$ и $\epsilon_{t,об}$, а остальные деформации являются необратимыми $\epsilon_{ноб}$ и $\epsilon_{t,ноб}$. Это оценивается коэффициентами обратимости и необратимости соответственно:

$$K_{об} = \frac{\epsilon_{об}}{\epsilon}; K_{t,об} = \frac{\epsilon_{t,об}}{\epsilon_t}; K_{ноб} = \frac{\epsilon_{ноб}}{\epsilon}; K_{t,ноб} = \frac{\epsilon_{t,ноб}}{\epsilon_t}, \quad (1)$$

при этом

$$K_{об} + K_{ноб} = 1; K_{тоб} + K_{тноб} = 1,$$

а потери энергии деформирования оцениваются коэффициентами поглощения энергии:

$$\Psi = \frac{\Delta W}{\bar{W}} \text{ или } \Psi_c = \frac{\Delta W}{\bar{W}}; \Psi_t = \frac{\Delta W_t}{\bar{W}_t} \text{ или } \Psi_{tc} = \frac{\Delta \bar{W}_t}{\bar{W}}, \quad (2)$$

причем

$$\Psi = \frac{\Psi_c}{1 + \Psi_c}; \Psi_c = \frac{\Psi}{1 - \Psi}.$$

В связи с тем, что коэффициент поглощения энергии Ψ определяется отношением площади петли гистерезиса ΔW и площади \bar{W} и \bar{W}_t , непосредственно не связаны с очертанием самой петли гистерезиса, в ряде публикаций, например [8,10] очертания петли гистерезиса принимаются в формах, удобных в дальнейших разработках, но отличающиеся от рис.1, не отражающих явление необратимости.

Ветви нагружения OK и OK_t , в общем случае, описываются нелинейными уравнениями силового сопротивления типа

$$\varepsilon(\sigma, t) = \frac{\sigma(t)}{E_{ep}(\sigma, t, t_0)}, \quad (3)$$

где E_{ep} - временный модуль деформации С.Е.Ф. Райфельда – Н.Н. Буданова, зависящий от уровня напряжения [2,4]

Заметим, что ползучесть (и виброползучесть), увеличивая статический прогиб, существенно не влияют на энергопотери при знакопеременном деформировании.

Уравнения (1) удобно заменить квазилинейными уравнениями типа

$$\varepsilon = \frac{S(\sigma)}{E_{epл}}, \quad (4)$$

где $E_{epл} = \frac{E_{мгн}}{1 + E_{мгн}C(t, t_0)}$ [3], $S(\sigma)$ функция напряжений; например по П.И. Васильеву:

$$S(\sigma) = \sigma \left[1 + \bar{V} \left(\frac{\sigma}{R} \right)^{\bar{m}} \right], \quad (5)$$

или по Графу
$$\varepsilon = a\sigma^b; \sigma = \left[\frac{\varepsilon}{a} \right]^{1/b}, \quad (6)$$

параметры которых вычисляются использованием традиционных реологических уравнений:

$$\varepsilon = \varepsilon_{мгн} + \varepsilon_{кр.пол} + \varepsilon_{р.пол} \quad (7)$$

или
$$\varepsilon = \frac{\sigma(t) \left[1 + V_{мгн} \left(\frac{\sigma}{R} \right)^{m_{мгн}} \right]}{E_{epл}(t, t_0)} + \sigma(t) \left[1 + V_{пол} \left(\frac{\sigma}{R} \right)^{m_{пол}} \right] C(t, t_0) - \int_{t_0}^t \sigma(\tau) \left(1 + V_{пол} \left[\frac{\sigma(\tau)}{R} \right]^{m_{пол}} \right) \frac{dC(\tau, t_0)}{dE} d\tau, \quad (8)$$

где σ - напряжения, ε - полные относительные деформации, t_0, τ, t - время начала наблюдения, текущее время, время окончания наблюдения, $\varepsilon_{мгн}$ - частные мгновенные относительные деформации, $\varepsilon_{кр.пол}$ - частные относительные деформации кратковременной ползучести (быстро натекающей ползучести), $\varepsilon_{р.пол}$ - частные относительные деформации режимно-накапливаемой ползучести [2,4], $C(t, t_0)$ - мера ползучести, $E_{мгн}$ - модуль упругомгновенной деформации, $V_{мгн}, m_{мгн}, V_{пол}, m_{пол}$ - эмпирические параметры нелинейности [2,9], значения параметров деформирования по таблице из [2].

Знак Нагрузки	Мгновенные деформации		Деформации ползучести	
	$V_{мгн}$	$m_{мгн}$	$V_{пол}$	$m_{пол}$
Сжатия	37,5/R	5,0 – 0,05R	45,0/R	5,0 – 0,007R
растяжения	0,3 + 0,37R	0,8 + 0,32R	1,5	1,0
R-призменная прочность бетона на сжатие				

Значения параметров деформирования при сжатии (при $t_0 = 28, t = \infty$) для тяжелых бетонов):

№	параметры	Единицы измерения	Класс бетона				
			15	20	30	40	50
1	$R_{b_0}(\infty)$	Мпа	15,6	20,1	28,6	36,7	44,5
2	$E_{мгн}(\infty)$	$10^{-3} МПа$	23,0	27,0	32,5	36,0	39,0
3	$C(\infty, 28)$	$10^6 МПа^{-6}$	128	102	74	59	50
4	$E_{врл}(\infty, 28)$	$10^{-3} МПа$	5,6	6,84	9,0	11,4	13,3
5	$\varphi = E_{мгн} \cdot C(t, t_0)$		3,10	2,95	2,48	2,17	1,93
6	$V_{мгн}$		2,6	2,0	1,3	1,0	0,8
7	$m_{мгн}$		5,0	4,7	4,3	3,8	3,4
8	$V_{пол}$		3,11	2,35	1,6	1,22	1,22
9	$m_{пол}$		4,0				
10	\bar{V}		2,9	2,2	1,51	1,34	1,08
11	\bar{m}		4,22	4,12	3,95	3,80	3,65

Примечание: Параметры квазилинейного уравнения (5) \bar{V} и \bar{m} вычисляются из условий равенства величин ε уравнений (5) и (8) для $\sigma = \gamma R$ и $\sigma = R$ (при $\gamma = 0,7$) [3,4]

Аналогично вычисляются параметры a и a_t ; b и b_t для уравнений типа (4):

A. при статическом нагружении:

$$a = \frac{(1+\bar{V})R^{1-b}}{E_{врл}}; a_t = \frac{(1+\bar{V}_t)R_t^{1-b_t}}{E_{врл}}; \quad (9)$$

$$b = 1 + \frac{1}{\ln \frac{1}{\gamma}} \ln \frac{1+\bar{V}}{1+\bar{V}\gamma^m}; b_t = 1 + \frac{1}{\ln \frac{1}{\gamma}} \ln \frac{1+\bar{V}_t}{1+\bar{V}_t\gamma^{m_t}}; \quad (10)$$

Б. при вибрационном нагружении:

$$a_{дн} = \frac{1+V_{мгн}}{E_{мгн}} R_{вын}^{1-b_{дн}}; b_{дн} = 1 + \frac{1}{\ln \gamma} \ln \frac{1+V_{мгн}}{1+V_{мгн}\gamma^{m_{дн}}}, \quad (11)$$

где $R_{вын}$ - предел выносливости

Величина потери при осевом одноцикловом нагружении-разгрузке единицы объёма образца – площадь петли гистерезиса ΔW определяется как разность между работой, затраченной на силовое деформирование образца (фигура 013 рис.1):

$$\vec{W} = \int_{\partial}^{\varepsilon} \sigma d\varepsilon = \int_{\partial}^{\varepsilon} \left(\frac{\varepsilon}{a}\right)^{1/b} d\varepsilon = \frac{\varepsilon^{(1+1/b)}}{(1+1/b)a^{1/b}} \quad (12)$$

и работы, произведенной на деформациях восстановления размеров образца при разгрузке (т.к. потенциал «отпорности»¹ – площадь фигуры 123):

$$\overleftarrow{W} = E_{врл} \int_0^{\varepsilon} \varepsilon d\varepsilon = E_{врл} \varepsilon^2 / 2, \quad (13)$$

т.е. $\Delta W = \vec{W} - \overleftarrow{W}$ - площадь петли гистерезиса и коэффициент поглощения энергии (2):

$$\Psi = 1 - \overleftarrow{W} / \vec{W}. \quad (14)$$

Аналогичная энергетическая конструкция при неоднородном напряженно-деформированном состоянии, например, изгибе требует предварительного построения функции напряжений в бетоне ее поперечных сечений.

¹ Связь между напряжением и деформациями при разгрузке, как отмечено выше, принимается линейной.

Функция нормальных напряжений в бетоне неповрежденных коррозией (или других внешних факторов) конструкций расписывается в виде [2,4]:

$$\sigma(x, z) = \sigma_{cp}(x) \left(\frac{z}{x}\right)^\eta \quad \text{при } \eta = 1 - \frac{M(x)}{M_{np}(x)}, \quad (15)$$

где σ_{cp} – фибровые напряжения, x - абсцисса сечения, X - высота жатой зоны сечения, z - ордината, отсчитываемая от нулевой оси напряжений, $M(x)$ - действующий изгибающий момент, зависящий от статических и динамических нагрузок, $M_{np}(x)$ - предельный для сечения изгибающий момент, для чего используются квазилинейные уравнения (6),

уравнение кривизны бруса:

$$1/\rho = M/D, \quad (16)$$

гипотеза плоских сечений:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{\varepsilon}{z}; \quad \varepsilon = \frac{1}{\rho} z; \quad \varepsilon = \frac{M}{D} z. \quad (17)$$

Затем, приравнявая (6) и (16)

$$a\sigma^b = Mz/D,$$

находим [5]:

$$\sigma_{cp}(x) = \left[\frac{M(x)}{D_{np}(x)}\right]^{1/b} R \quad (18)$$

и, следовательно,

$$\sigma(x, z) = \left[\frac{M(x)}{M_{np}(x)}\right]^{1/b} R \left(\frac{z}{x}\right)^{\eta(x)}. \quad (19)$$

Далее, в интересах упрощения алгоритмов вычисления величины потерь энергии, происходящих при изгибе и разгрузке железобетонного бруса (железобетонной балки) целесообразно разделить его пролет на участки с неизменным знаком моментов и назначить неизменные в пределах каждого i -того участка момента $M_i = const$ установить на каждом участке высоту сжатой зоны X , предельный изгибающий момент $M_{i, np}(x)$ и момент образования трещин $M_{i, тр}$, а также значение параметра η

Потери энергии при однократном нагружении - разгрузении, сопровождающие силовое деформирования железобетонной балки, определяются как сумма потерь на всех i -тых участках:

$$\Delta W = \sum_1^n \Delta W_i. \quad (20)$$

В растянутой зоне балки в результате появления трещин потери энергии непосредственно в бетоне могут уменьшаться, однако за счет трения в трещинах появляются другие потери. Потери энергии на каждом участке равны сумме потерь в бетоне сжатой и в бетоне растянутой части сечения:

$$\Delta W_i = (\bar{W}_i - \bar{W}_i) + (\bar{W}_{ti} - \bar{W}_{ti}) \quad (21)$$

при

$$\bar{W}_i = b_0 l_i \int_0^x R \left(\frac{M_i}{M_{i, np}}\right)^{1/b} \frac{M_i}{D_i} Z \left(\frac{Z}{X_i}\right)^{M_i} dz = \frac{b_0 l_i \cdot M_i}{(2 + \eta_i) D_i} \left(\frac{M_i}{M_{i, np}}\right)^{1/b} R x_i^2 \quad (22)$$

и аналогично

$$\bar{W}_{ti} = \frac{b_0 l_i \cdot M_i}{(2 + \eta_{ti}) D_i} \left(\frac{M_i}{M_{i, np}}\right)^{1/b} R_t (h - x_i)^2, \quad (23)$$

$$\bar{W}_i = \frac{b_0 l_i \cdot M_i}{3 D_i} \left(\frac{M_i}{M_{i, np}}\right)^{1/b} R x_i^2, \quad (24)$$

$$\bar{W}_{ti} = \frac{b_0 l_i \cdot M_i}{3 D_i} \left(\frac{M_i}{M_{i\text{нр}}} \right)^{1/b_t} R_t (h - x_i)^2, \quad (25)$$

где b_0 - ширина бруса прямоугольного сечения, l_i - длина i -того участка.

Подстановка (22)-(25) в (21) дает:

$$\Delta W_i = \frac{b_0 l_i \cdot M_i}{D_i} \left[R \left(\frac{M_i}{M_{i\text{нр}}} \right)^{1/b} \left(\frac{1}{2t\eta} - \frac{1}{3} \right) x_i^2 + R_t \left(\frac{M_i}{M_{i\text{нр}}} \right)^{1/b_t} \left(\frac{1}{2+\eta} - \frac{1}{3} \right) (h - x_i)^2 \right]. \quad (26)$$

При многократном знакопеременном нагружении общая величина потерь энергии оценивается по формуле:

$$\Delta \bar{W}_i = n \Delta W_i, \quad (27)$$

где n - число нагружения

Анализ полученных результатов подтверждает ожидаемые выводы.

В линейной постановке при $\eta = 1$ будет $\Delta W_i = 0$; в полной нелинейной постановке при $\eta = 0$ будет $\Delta W_i = \frac{1}{3} \bar{W}$ (т.е. коэффициент поглощения станет равным $\theta = 1/3$); уменьшение потерь энергии при знакопеременном нагружении может быть получено уменьшением уровня нагружения сечений конструкции $\left(\frac{M_i}{M_{i\text{нр}}} \right)$, осуществляемом как изменением граничных условий или рационализации расположения нагрузок в пролете, так и с помощью увеличения несущей способности и жесткости пролетов.

Последнее можно проиллюстрировать сравнением расчетных потерь энергии при знакопеременном нагружении двух балок, отличающихся друг от друга величинами $M_{\text{нр}}$ и D . Для упрощения указанного сравнения балки принимаются прямоугольного сечения, выполненных из одинакового материала, условно на-деляемого одинаковой полной нелинейностью силового сопротивления при $R = R_t$; $E_1 = E_2$; $b = b_t = 2$.

Балка 1 имеет ширину b_0 высоту h , высоту сжатой зоны $h/2$. Балка 2 имеет ширину b_0 высоту $2h$, высоту сжатой зоны h_i ; отсюда балка 1 имеет

$$M_{1\text{нр}} = \frac{b_0 h^2}{4} R, \quad D_1 = \frac{b_0 h^3}{12} E,$$

балка 2:

$$-X - M_2 = b_0 h^2 R; \quad D_2 = \frac{8 b_0 h^3}{12} E \quad (28)$$

и, следовательно,

$$M_2 = 4 M_{1\text{нр}} \text{ и } D_2 = 8 D_1 \quad (29)$$

вычисление потерь ΔW_1 и ΔW_2 по (26) дает

$$\Delta W_{i2} / \Delta W_{i1} = 4. \quad (30)$$

Результат (30) показывает, что в данном случае 2-ух кратное увеличение объема, следовательно, стоимости балки, снижает потери энергии за счет силового деформирования материала в 4 раза.

При современном соотношении цен на строительные конструкции и энергию это приводит к очень быстрой компенсации дополнительной стоимости балки, а в дальнейшем за относительно короткий период времени окупает стоимость всего здания или сооружения. В целом это способствует снижению себестоимости продукции предприятия и энергосбережению в целом.

Л и т е р а т у р а

1. Бондаренко В.М. О назначении оптимальных поперечных сечений строительных конструкций при колебаниях// Вестник академии строительства и архитектуры УССР, № 4, Киев, 1959. – С. 34-39.

2. *Бондаренко В.М.* Некоторые вопросы нелинейной теории железобетона. – Изд. Харьковского университета, Харьков, 1968. – 323 с.
3. *Бондаренко С.В., Санжаровский Р.С.* Усиление железобетонных конструкций при реконструкции зданий. – М.: Стройиздат, 1990. – 352 с.
4. *Бондаренко В.М., Римшин В.И.* Диссипативная теория силового сопротивления железобетона. – Студент, Москва, 2015. – 111 с.
5. *Бондаренко В.М.* Управление энергопотерями несущих строительных конструкций// ПП, № 1, 1995.
6. *Бондаренко В.М.* К проблемам энергетической оптимизации строительных решений промышленных зданий и сооружений. – Научная школа-семинар молодых ученых и студентов с международным участием «Современные проблемы механики, энергоэффективность сооружений и ресурсосберегающие технологии»: Сб. трудов. – М.: Изд-во РУДН, 2015. – С. 72-81.
7. *Давиденков Н.П.* О рассеивании энергии при вибрациях// ЖТФ, Т.8 вып 6, 1938.
8. *Писаренко Г.С.* Колебания механических систем с учетом несовершенной упругости материалов. – Киев: Изд. «Научная мысль», 1970. – 380 с.
9. Рекомендации по учету ползучести и усадки бетона при расчете бетонных и железобетонных конструкций. – НИИЖБ Госстроя СССР, М.: Стройиздат, 1988. – 122 с.
10. *Сорокин Е.С.* Внутренние и внешние сопротивления при колебаниях твердых тел. – М.: Стройиздат, 1957. – 66 с.

References

1. *Bondarenko, V.M.* (1959). O naznachenii optimal'nyh poperechnyh sechenij stroitel'nyh konstrukcij pri kolebanijah, *Vestnik Akademii Stroitel'stva i Arhitektury Ussr*, № 4, Kiev, p. 34-39.
2. *Bondarenko, V.M.* (1968). *Nekotorye Voprosy Nelinejnoj Teorii Zhelezobetona*, Izd. Har'kovskogo universiteta, Har'kov, 323 p.
3. *Bondarenko, S.V., Sanzharovskij, R.S.* (1990). *Usilenie Zhelezobetonnyh Konstrukcij pri Rekonstrukcii Zdanij*, Moskva: Stroizdat, 352 p.
4. *Bondarenko, V.M., Rimshin, V.I.* (2015). *Dissipativnaja Teorija Silovogo Soprotivlenija Zhelezobetona*, Student, Moskva, 111 p.
5. *Bondarenko, V.M.* (1995). Upravlenie energopoterjami nesushhijh stroitel'nyh konstrukcij, *PP*, № 1.
6. *Bondarenko, V.M.* (2015). K problemam energeticheskoj optimizacii stroitel'nyh reshenij promyshlennyh zdaniy i sooruzhenij, *Nauchnaya Shkola-Seminar Molodyh Uchenyh i Studentov s Mezhd. Uchastiem "Sovremennije Problemy Mehaniki, Energoeffektivnost Sooruzhenij. i Resursosberegayuschie Tehnologii"*: Sb. trudov, Moscow: RUDN, pp. 72-82.
7. *Davidenkov, N.P.* (1938). O rasseivanii energii pri vibracijah, *ZhTF*, T. 8 vyp 6.
8. *Pisarenko, G.S.* (1970). *Kolebanija Mehanicheskijh Sistem s Uchetom Nesovershennoj Uprugosti Materialov*, Izd. «Nauchnaja mysl'», Kiev.
9. *Rekomendacii po Uchetu Polzuchesti i Usadki Betona pri Raschete Betonnyh i Zhelezobetonnyh Konstrukcij*, NIIZhB Gosstroja SSSR, Moskva, Stroizdat, 1988.
10. *Sorokin, E.S.* (1957). Vnutrennie i vneshnie soprotivlenija pri kolebanijah tvjordyh tel. – Moskva: Stroizdat.

ON COMMUNICATION BETWEEN THE LEVEL OF FORCE LOADING AND POWER LOSSES UNDER DEFORMATION OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES

V.M. BONDARENKO, B.A. YAGUPOV
NIISF RAASN, Moscow, Russia

Taking into account anisotropy, nonlinearity, irreversibility, and non-equilibrium force resistance of reinforced concrete and kinematic features of its corrosion damages, the technique of an assessment of the hysteresis losses of energy under sign-variable loading is entered. Quasilinear forms of the rheological equations of mechanical resistance of concrete, the standard communications of curvature of reinforced concrete elements with their rigidity and the bending moments, and also linearization of searching by means of N-moment square minimization of deviations along the height of the sections between exact and approximate values of temporary modules of the deformations and coefficients of preservation of force resistance of steel fittings damaged by corrosion are used.

KEYWORDS: reinforced concrete, irreversibility of deformation, power hysteresis, sign-variable loading, corrosion damages of steel fittings.