

**МЕТОД ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ОЦЕНКИ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ
ПРИ ЗНАКОПЕРЕМЕННОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ
СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

В.М. БОНДАРЕНКО, *д-р тех. наук, профессор*
НИИСФ РААСН,
127238, Москва, Локомотивный пр-д, д.21

В теорию прогноза внутренних энергетических потерь, неизбежно сопровождающих силовое знакопеременное нагружение конструктивных строительных материалов, вводится альтернативный метод «перемещений». Этот метод, в отличие от ранее предложенных автором приемов оценки таких энергопотерь по уровню напряженного состояния разыскивает разницу работ сил нагружения и разгрузки по перемещениям конструкций.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: гистерезисные энергопотери, работа деформирования материалов.

Изучение знакопеременного деформирования железобетонных конструкций позволило автору сформулировать и решить задачу энергетической оптимизации строительно-конструктивных решений для промышленных зданий и сооружений [1,2,4]. В частности были предложены способы управления такими энергопотерями и метод оптимизации суммарных расходов на возведение и технологическое энергопотребление предприятий [5]. Сущность этих предложений состоит в суммировании по координатам конструкции гистерезисных энергопотерь в элементарных объемах деформируемого твердого тела, однозначно определяемых диаграммой напряжения – относительные деформации материала. Вместе с тем, возможен другой, альтернативный метод количественной оценки таких энергопотерь, использующий общеизвестный объективный факт того, что деформации твердых тел при нагружении всегда больше деформации восстановления при разгрузке, т.е. после разгрузки имеют место, так называемые, остаточные (не компенсируемые) деформации.

Поскольку разгрузка представляет собою приложение к тому же телу равных по величине, но противоположных по направлению сил, постольку искомая величина энергопотерь равна разности работ нагружения и разгрузки:

$$\Delta W = \vec{W} - \overleftarrow{W}, \quad (1)$$

где \vec{W} – энергия (работа) нагружения, \overleftarrow{W} – энергия (работа) разгрузки.

Бетонная колонна при осевом нагружении показана на рис. 1. Здесь

$$\vec{W} = P \cdot \overrightarrow{\Delta h}; \quad \overrightarrow{\Delta h} = \bar{\epsilon} h, \quad (2)$$

$$\overleftarrow{W} = P \cdot \overleftarrow{\Delta h}; \quad \overleftarrow{\Delta h} = \bar{\epsilon} h, \quad (3)$$

$P = A\sigma$, где σ – нормальные напряжения.

Далее, вводится квазилинейная запись уравнения силового сопротивления с учетом нелинейности деформирования по П.И. Васильеву:

при нагружении:

$$\bar{\epsilon}(t, t_0) = \frac{\sigma(t)(1 + \sqrt[m]{\frac{\sigma(t)}{R(t)}})}{E_{врл}(t, t_0)} = \frac{\sigma(t)}{E_{врл}(t, t_0)} + \sqrt[m]{\frac{[\sigma(t)]^{(1+m)}}{E_{врл}(t, t_0) R^m}}; \quad (4)$$

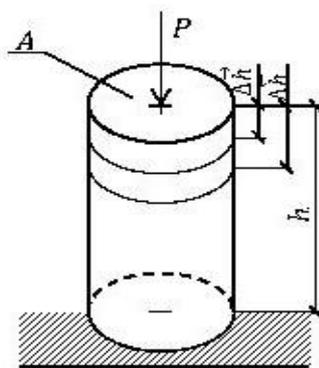


Рис. 1. Эскиз нагружения колонны (P – внешняя сила, A – площадь поперечного сечения колонны, h – высота колонны, $\overrightarrow{\Delta h}$ – перемещение торца колонны при нагружении, $\overleftarrow{\Delta h}$ – перемещение торца колонны при разгрузке)

при разгрузении (соответственно признаку Энгессера-Ясинского):

$$\bar{\varepsilon}(t, t_0) = \frac{\sigma(t)}{E_{врл}(t, t_0)},$$

где $E_{врл} = \frac{E_{мгн}}{1+\varphi(t, t_0)}$; $\varphi(t, t_0) = E_{мгн}(t)C(t, t_0)$. (5)

Отсюда коэффициент обратимости деформации:

$$K_{об} = \frac{\bar{\varepsilon}}{\varepsilon} = \frac{1}{1+\bar{V}\left(\frac{\sigma}{R}\right)^{\bar{m}}} \quad (6)$$

Коэффициент необратимости деформации:

$$K_{ноб} = \frac{\bar{\varepsilon}-\varepsilon}{\varepsilon} = 1 - \frac{\bar{\varepsilon}}{\varepsilon} = 1 - K_{об}. \quad (7)$$

Значения параметров нелинейности \bar{V} и \bar{m} вычисляются с помощью традиционного нелинейного уравнения силового сопротивления бетона при нагружении [3]:

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

Здесь ε – полные относительные деформации, $\sigma(\tau)$ - напряжения, $E_{мгн}(t)$ -модуль упругомгновенных деформаций, $C(t_0, t)$ - мера простой ползучести, $E_{врл}(t, t_0)$ - временный линейный модуль деформации; t, τ, t_0 - время начала нагружения, текущее время, время окончания наблюдений; R - расчетная прочность бетона; $V_{мгн}, m_{мгн}$ - параметры нелинейности мгновенных деформаций при нагружении, $V_{пол}, m_{пол}$ - параметры нелинейности ползучести при нагружении (табл. 1 или табл. 2).

Для этого в двух характерных точках диаграммы $\sigma = \gamma R$ и $\sigma = R$ приравняются величины полных относительных деформаций (4) и (6) откуда:

$$\bar{V} = \frac{E_{врл}}{R} \bar{\varepsilon}_{нл}(R) - 1, \bar{m} = \frac{1}{\ln\left(\frac{1}{\gamma}\right)} \ln \left\langle \frac{1}{\gamma \bar{V}} \left[(1 + \bar{V}) \frac{\bar{\varepsilon}_{нл}(\gamma R)}{\bar{\varepsilon}_{нл}(R)} - 1 \right] \right\rangle^{-1}, \quad (9)$$

при этом заметим, что удобно принимать

$$0,7 \leq \gamma \leq 0,9, \quad (10)$$

отсюда для тяжелых бетонов получаем результаты, приведенные в табл. 1 и 2.

Таблица 1

№	Параметры при сжатии	Единицы измерения	Класс бетона				
			15	20	30	40	50
1	$R(\infty)$	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	$\varphi = E_{врл}(\infty)C(\infty, 28)$		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				

Таблица 2

№	По [3]	Мгновенные деформации		Деформации ползучести	
	Знак нагружения	$V_{\text{мгн}}$	$m_{\text{мгн}}$	$V_{\text{пол}}$	$m_{\text{пол}}$
1.	Сжатия	$37,5/R$	$5,0 - 0,05R$	$45,0/R$	$5,0 - 0,007R$
2.	Растяжения	$0,8 + 0,37R$	$0,8 + 0,32R$	1,5	1,0

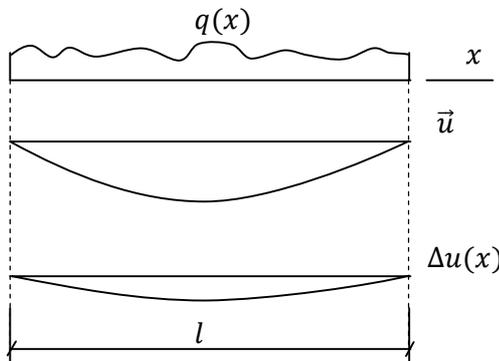
R – призмная прочность бетона на сжатие

В итоге по (9) и (10) получим значения \bar{V} и \bar{m} (табл. 3).

Таблица 3

Параметры при сжатии	Класс тяжелого бетона				
	15	20	30	40	50
\bar{V}	2,9	2,2	1,51	1,34	1,08
\bar{m}	4,22	4,12	3,95	3,80	3,65

Из (3) следует, что $\Delta W = P(\Delta \vec{h} - \Delta \vec{h})$,



$$\Delta W = Ph(\vec{\epsilon} - \vec{\epsilon}), \quad (11)$$

или после подстановки (1-4)

$$\Delta W = \frac{Ah\bar{V}\sigma^{2+m}}{E_{\text{врл}}R^m} \quad (12)$$

Схема изгибаемого бруса приведена на рис. 2.

Аналогично (2) и (3) записываются:

$$\vec{W} = \int_0^l q(x) \cdot \vec{u}(x) dx, \quad (13)$$

$$\bar{W} = \int_0^l q(x) \cdot \bar{u}(x) dx, \quad (14)$$

Рис. 2. Схема перемещений изгибаемого бруса где $q(x)$ – внешняя нагрузка, $\vec{u}(x)$ - функция прогиба под нагрузкой, $\bar{u}(x)$ -функция прогиба при разгрузке, $\Delta u(x)$ - функция остаточного прогиба.

Потери энергии при однократном знакопеременном нагружении

$$\Delta W = \vec{W} - \bar{W} = \int_0^l q(x) \Delta u(x) dx, \quad (15)$$

где

$$\Delta u(x) = \vec{u}(x) - \bar{u}(x) \quad (16)$$

при n -кратном знакопеременном нагружении с ростом n величина Δ постепенно уменьшается, стремясь к некоторому стабильному значению.

Для (15), (16) прогибы $u(x)$ находятся с помощью уравнения кривизны бруса:

$$\frac{1}{P} = \frac{d^2 u(x)}{dx^2} = \frac{M(x)}{D(x)} = M(x)B(x)$$

при

$$B(x) = \frac{1}{D(x)},$$

$$u(x) = \int M(x)B(x)dx + C_1x + C_2,$$

где u - прогибы (перемещение); M - изгибающие моменты, D - жесткости сечений, B - податливость сечений, C_1 и C_2 - произвольные постоянные, определяемые с учетом граничных условий.

Функции податливости $\vec{B}(x)$ и $\vec{B}(x)$ находятся аппроксимизацией частных значений B_i , с учетом влияния значений $M_i(x)$ для нескольких сечений в пролете x . Частные величины $B_i(x)$ определяются по [4], а также могут вычисляться с помощью действующих регламентных документов ((4) и (5)).

Очевидно, что снижение энергетических потерь может быть осуществлено уменьшением действующих моментов и снижением податливости, которые поддаются проектной оптимизации с помощью рационализации технологических, композиционных и конструктивных решений.

Простейшей иллюстрацией этому служит пример увеличения сечения колонны (задача 1) на 20% и обусловленное этим уменьшение в 2,5 раза величин энергетических потерь.

Л и т е р а т у р а

1. *Бондаренко В.М.* О назначении оптимальных поперечных сечений колеблющихся конструкций// Вестник академии строительства и архитектуры. – Киев., 1959. – № 4. – С. 33-40.
2. *Бондаренко В.М.* Вопросы управления гистерезисными энергопотерями строительных конструкций// Бетон и железобетон. – 1995. - № 2. – С. 22-25.
3. *Бондаренко В.М., Римшин В.И.* Диссипативная теория силового сопротивления железобетона. – Москва: Изд-во «Студент», 2015. – 111 с.
4. *Бондаренко В.М.* Вопросы энергетической оптимизации при динамическом нагружении// Строительная механика инженерных конструкций и сооружения. – 2015. - №5. – С. 34-38.
5. *Бондаренко В.М., Ягунов Б.А.* О связи между уровнем силового нагружения и энергетическими потерями при деформировании железобетонных конструкций// Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2016. - № 3. – С. 44-50.
6. Рекомендации по учету ползучести и усадки бетона при расчете бетонных и железобетонных конструкций. НИИЖБ, Стройиздат, Москва. 1988.- 121 с.

References

1. *Bondarenko, V.M.* (1959). O naznachenii optimal'nyh poperechnyh sechenij kolebljushihhsja konstrukcij, *Vestnik Akademii Stroitel'stva i Arhitektury*, Kiev, № 4, p. 33-40.
2. *Bondarenko, V.M.* (1995). Voprosy upravlenija gistereznymi jenergopoterjami stroitel'nyh konstrukcij, *Beton i Zhelezobeton*. № 2, p. 22-25.
3. *Bondarenko, V.M., Rimshin, V.I.* (2015). *Dissipativnaja Teorija Silovogo Soprotivlenija Zhelezobetona*, Moscow: Izd-vo «Student», 111 p.
4. *Bondarenko, V.M.* (2015). Voprosy jenergeticheskoj optimizacii pri dinamicheskom nagruzenii, *Stroitel'naja Mehanika Inzheneryh Konstrukcij i Sooruzhenij*, № 5, p. 34-38.
5. *Bondarenko, V.M., Jagupov, B.A.* (2016). O svjazi mezhdju urovnem silovogo nagruzenija i jenergeticheskimi poterjami pri deformirovanii zhelezobetonnyh konstrukcij, *Stroitel'naja Mehanika Inzheneryh Konstrukcij i Sooruzhenij*, № 3, p. 44-50.
6. *Rekomendacii po uchetu polzuchesti i usadki betona pri raschete betonnyh i zhelezobetonnyh konstrukcij*, NIIZhB, Strojizdat, Moskva. 1988, 121 p.

A METHOD OF DISPLACEMENTS FOR EVALUATION OF ENERGY LOSSES UNDER CONSTRUCTION'S DEFORMATION WITH ALTERNATING SIGNS

Bondarenko V.M.
NIISF, Moscow, Russia

An alternative method of displacements is introduced into the theory of so-called forecast internal energy losses. This theory is inevitably accompanied by the alternating sign of force loading for structural building materials. Previously, the author proposed the methods of evaluation for such energy losses basing on the level of the stress state. In contrast to these methods new method is looking for a difference of work of loading and unloading forces for displacement designs.

KEYWORDS: hysteretic energy loss, the work of materials' deformation.