

УДК 624.016

*Кандидаты техн. наук Ю.П. Китов,
М.А.Веревичева,
асп. И.А. Тимохин*

**СРАВНЕНИЕ РАЗНЫХ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ПРОЧНОСТИ БЕТОНА
ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ СТАЛЬНОЙ ОБОЙМЫ
ТРУБОБЕТОННОГО ЭЛЕМЕНТА**

Представил д-р техн. наук, профессор А.А. Плугин

Введение. В настоящее время в строительстве широко используются сталебетонные конструкции, в частности, бетонные элементы в стальной обойме (например, колонны, элементы ферм, опоры ЛЭП). Заполнение стальной обоймы бетоном повышает ее противокоррозионную стойкость, защищая от

коррозии ее внутреннюю поверхность, уменьшает гибкость элементов, увеличивает местную устойчивость стенок обоймы. Боковое давление трубы препятствует интенсивному развитию микротрещин в бетонном ядре вследствие увеличения прочности бетона за счет его обжатия обоймой. Эти свойства

трубобетона позволяют снизить расход бетона и стали, уменьшить массу конструкции.

Анализ последних исследований и публикаций. Вопросы эффективности обоймы изучаются во многих работах [1-5 и др.]. Наиболее полный анализ различных методик определения эффективности приведен в работе [2], где сделан вывод о том, что наиболее полное совпадение с экспериментом дает методика работы [1], являясь в то же время достаточно теоретически обоснованной. Согласно этой методике, несущая способность элемента оценивается по формуле

$$N_{\text{нес}} = \bar{\sigma}_B A_b + \bar{\sigma}_T A_s, \quad (1)$$

где $\bar{\sigma}_B$ – предельное сжимающее напряжение в бетоне; $\bar{\sigma}_T$ – предельное напряжение в стали (например, по критерию Мизеса [5]); A_b и A_s – площади соответственно бетонного ядра и стальной обоймы.

Эффективность работы элемента оценивается по формуле

$$\beta = N_{\text{нес}} / (R_b A_b + \sigma_T A_s),$$

где R_b – призмная прочность бетона; σ_T – предел текучести стали.

$$E = 9KG / (G + 3K), \quad \nu = (3K - 2G) / 2(G + 3K),$$

где K – секущий модуль относительных объемных деформаций,

$$K = K_0 \left[\frac{(1 + A\sigma_0^2)}{(1 + B\sigma_0^2)} \right] / \left[1 - \left(\frac{\sigma_0}{\bar{\sigma}_B} \right)^n \left(C + \frac{S_I^3}{(\sigma + m)^3} \right) D \right],$$

где σ_0 – среднее главных напряжений, $\sigma_0 = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) / 3$; K_0, A, n, C, m – характеризуют деформативность и не зависят от класса бетона: $K_0 = 13333$ МПа;

Цель работы. Результат, полученный по формуле (1), зависит от значения предельного напряжения $\bar{\sigma}_B$.

В настоящей статье сравниваются некоторые методы оценки повышения прочности бетона (то есть значения $\bar{\sigma}_B$) и, как следствие, увеличения несущей способности трубобетонного элемента.

Постановка задачи. Рассматривается трубобетонный элемент с радиусом ядра D и толщиной обоймы δ . Под действием на элемент осевой нагрузки, близкой к разрушающей, происходит обжатие бетонного ядра стальной обоймой. Это приводит к повышению $\bar{\sigma}_B$. В работе сравниваются два метода определения этого значения: метод А.В. Яшина, требующий расчета напряженно-деформированного состояния элемента, и более близкий к эмпирическому метод Я.П. Семененко.

Метод А.В. Яшина [3]. Зависимость между напряжениями и деформациями в бетоне принимается в форме закона Гука. При этом параметры деформирования: секущий модуль деформаций E бетона при сжатии (растяжении) и коэффициент поперечных деформаций ν зависят от соотношения главных напряжений в точке $\eta_2 = \sigma_2 / \sigma_1$, $\eta_3 = \sigma_3 / \sigma_1$ и принимаются в виде

$A = 0,0002 \text{ 1/(МПа)}^2$; $n = 16$; $C = 5,56$; $m = 0,01 \text{ МПа}$; B, D – характеризують деформативність и определяются в зависимости от класса бетона в соответствии с табл. 1; $\sigma = (1 + \eta_2 + \eta_3)\sigma_1$; G – модуль сдвига,

$$G = \frac{G_0 (1 + aS_I^2)/(1 + bS_I^2)}{1 + C_1 \left(2 + \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} \right) \left(\frac{S_I}{\bar{S}_I} \right)^n},$$

где $G_0 = 11250 \text{ МПа}$; $a = 4 \cdot 10^{-5} \text{ 1/(МПа)}^2$ – не зависят от R_b ; b, C_1 – определяются в соответствии с табл. 1; S_I – инвариант, характеризующий девиатор напряжений,

$$S_I = \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_0)^2 + (\sigma_2 - \sigma_0)^2 + (\sigma_3 - \sigma_0)^2}.$$

Определение предельного напряжения $\bar{\sigma}_B$ сводится к решению уравнения

$$A + (1 - A) \frac{F}{F_c} = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{\bar{\sigma}_B M}{R_c K_\varphi},$$

где

$$F = \lg \left(B + \frac{R_p}{R_c} + \alpha \frac{\bar{\sigma}_B}{R_c} + \beta \frac{\bar{\sigma}_B^2}{R_c^2} \right);$$

$$F_c = \lg \left(B + \frac{R_p}{R_c} + \frac{\alpha}{3} + \frac{\beta}{9} \right); \quad F_p = \lg \left[B + \frac{R_p}{R_c} \left(1 - \frac{\alpha}{3} \right) + \frac{\beta}{9} \left(\frac{R_p}{R_c} \right)^2 \right],$$

$$A = \left(\frac{R_p}{R_c K_{p,\varphi}} - \frac{F_p}{F_c} \right) / \left(1 - \frac{F_p}{F_c} \right);$$

$$K_\varphi = 1 - (a - b \sin 1.5\varphi) \sin 1.5\varphi, \quad K_{p,\varphi} = 1 - a + b \cong 0,7;$$

$$\sin \frac{3}{2}\varphi = \sqrt{\left(1 - \frac{S_{II}}{S_I} \right) / 2};$$

$$S_{II} = \frac{3\sqrt{6}(\sigma_1 - \sigma_0)(\sigma_2 - \sigma_0)(\sigma_3 - \sigma_0)}{S_I^2};$$

$$B = 1,1; \quad \alpha = 1,41; \quad \beta = 0,081; \quad a = 0,55 - R_p/R_c; \quad b = 0,15;$$

где R_c, R_p – соответственно расчетные сопротивления при сжатии и растяжении; φ – угол между инвариантом S_I и направлением проекции σ_1 .

Обозначим $z = (1 + \eta_2 + \eta_3)/3$. Тогда

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}_0 &= \bar{\sigma}_B z; \\ S_I &= \sigma_1 \sqrt{(1-z)^2 + (\eta_2 - z)^2 + (\eta_3 - z)^2} = \sigma_1 M; \\ M &= \sqrt{(1-z)^2 + (\eta_2 - z)^2 + (\eta_3 - z)^2}; \\ \frac{S_{II}}{S_I} &= \xi = \frac{3\sqrt{6}(1-z)(\eta_2 - z)(\eta_3 - z)}{\left(\sqrt{(1-z)^2 + (\eta_2 - z)^2 + (\eta_3 - z)^2}\right)^3} = \\ &= 3\sqrt{6}(1-z)(\eta_2 - z)(\eta_3 - z)/M^3; \\ \lambda &= \sqrt{(1-\xi)/2}; \sin 1.5\varphi = \lambda; K_\varphi = 1 - (a - b\lambda)\lambda. \end{aligned}$$

С учетом обозначений получаем уравнение относительно $\bar{\sigma}_B$:

$$A + (1 - A) \frac{\lg \left(B + \frac{R_p}{R_c} + \alpha \frac{\bar{\sigma}_B z}{R_c} + \beta \frac{(\bar{\sigma}_B z)^2}{R_c^2} \right)}{F_c} = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{\bar{\sigma}_B M}{R_c K_\varphi}.$$

Это уравнение решается одним из численных методов, например, методом половинного деления.

Коэффициенты b, C, B, D определяются по табл. 1 интерполированием, если

R_b находится в пределах $8,5 \div 25$, и экстраполированием, если R_b меньше 8,5 или больше 25.

Таблица 1
Значения коэффициентов b, C_1, B, D для бетонов различной прочности R_b

R_b , МПа	$b, 1/(\text{МПа})^2$	C_1	$B, 1/(\text{МПа})^2$	D	E , МПа
8.5	$32 \cdot 10^{-4}$	1.0	$1.6 \cdot 10^{-3}$	0.36	$23 \cdot 10^3$
14.5	$16 \cdot 10^{-4}$	0.8	$1.0 \cdot 10^{-3}$	0.3	$30 \cdot 10^3$
20	$12.33 \cdot 10^{-4}$	0.54	$0.71 \cdot 10^{-3}$	0.22	$33.9 \cdot 10^3$
25	$9 \cdot 10^{-4}$	0.3	$0.45 \cdot 10^{-3}$	0.15	$37.5 \cdot 10^3$
37.9	$5.5 \cdot 10^{-4}$	0.01	$0.1 \cdot 10^{-3}$	0.1	$45 \cdot 10^3$

Метод Я.П. Семененко [4]. Автор исходит из гипотезы Мора о том, что на срез по наклонным площадкам образца оказывают влияние как касательные, так и нормальные напряжения. Согласно [4], предельное напряжение бетона определяется по формуле

$$\bar{\sigma}_B = R_b + \sigma_T \ln((D + 2\delta)/D) \operatorname{tg}^2 \alpha,$$

где α – угол, под которым происходит срез бетонного образца (см. рисунок).

Для определения угла среза используются данные эксперимента, дающие после сравнения призмной и кубиковой прочностей (см. рисунок) зависимость

$$S = R_b/R = (2 \operatorname{tg} \alpha - 1) / \operatorname{tg}^2 \alpha,$$

где R_b – призмная прочность бетона; R – кубиковая прочность, откуда

$$\operatorname{tg} \alpha = (1 + \sqrt{1 - S}) / S.$$

Соотношение S в работе [4] определяется эмпирической формулой

$$S = R_b/R = (2880 + R)/(3300 + 3R).$$

Эти зависимости отличаются от более современных данных (ДБН [6]).

Значения S и $\operatorname{tg} \alpha$ для различных бетонов согласно [4] и [6] приведены в табл. 2.

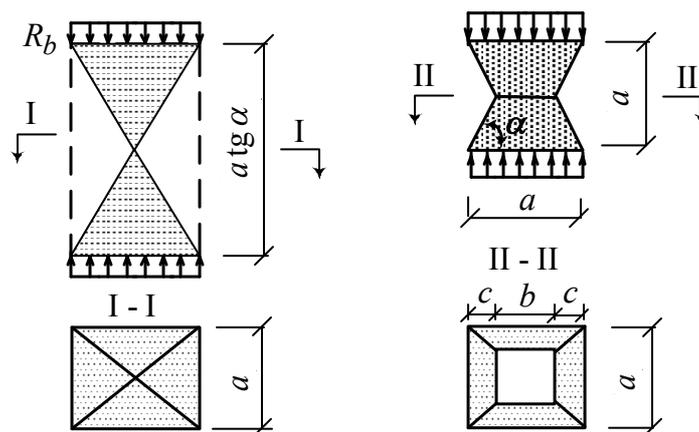


Рис. Схемы разрушения бетонного образца: а – призмы; б – куба

Таблица 2

Значения S и $\operatorname{tg} \alpha$ для различных бетонов

Класс бетона	Призмная прочность, МПа		S		$\operatorname{tg}^2 \alpha$	
	[4]	[6]	[4]	[6]	[4]	[6]
C12/15	15,5	11	0,789	0,733	3,4	4,28
C25/30	28,5	22	0,728	0,733	4,41	4,28
C40/50	44,7	36	0,682	0,720	6,15	4,51
C50/60	50,7	43	0,645	0,717	6,15	4,56

Результаты численных оценок.

Численные оценки проводились для элемента с диаметром ядра $D = 1\text{ м}$ и различными значениями толщины обоймы δ ; $\sigma_T = 221\text{ МПа}$. При оценке $\bar{\sigma}_B$

согласно [3] перемещения и поля напряжений определялись по методике [7]. Результаты оценок эффективности β [1] приведены в табл. 3.

Таблица 3

Значения эффективности β для различных элементов

δ	Метод		β		β		β		β
6 мм	[4], S по [4]	C12/15	1,43	C25/30	1,34	C40/50	1,29	C50/60	1,28
	[4], S по ДБН		1,69		1,41		1,29		1,25
	[6]		1,60		1,38		1,27		1,24
8 мм	[4], S по [4]		1,53		1,43		1,37		1,37
	[4], S по ДБН		1,83		1,48		1,38		1,32
	[6]		1,75		1,45		1,35		1,33
2 см	[4], S по [4]		1,88		1,58		1,58		1,61
	[4], S по ДБН		1,97		1,63		1,54		1,65
	[6]		1,92		1,60		1,55		1,62

Выводы. Как видно, разброс результатов невелик для бетонов более прочных, чем C12/15. Для всех бетонов близки значения β [1], при расчете которых $\bar{\sigma}_B$ определяется согласно [4] с использованием данных [6], и значения β , полученные методом [3]. Таким образом, при оценке несущей способности трубобетонного элемента можно применять

метод [1], используя $\bar{\sigma}_B$ согласно [4]. Если же требуется более глубокий анализ напряженно-деформированного состояния с определением механических характеристик обжатого бетона, для оценки $\bar{\sigma}_B$ целесообразно пользоваться методикой [3] с последующим применением β [1].

Список литературы

1. Стороженко, Л.И. Расчет трубобетонных конструкций [Текст] / Л.И. Стороженко, П.И. Плахотный, А.Я. Черный. – К.: Будівельник, 1991. – 119 с.
2. Стороженко, Л.И. Трубобетон [Текст] / Л.И. Стороженко, Д.А. Єрмоленко, О.І. Лапенко. – Полтава: ТОВ «АСМІ», 2010. – 306 с.
3. Яшин, А.В. Теория деформирования бетона при простом и сложном нагружениях [Текст] / А.В. Яшин // Бетон и железобетон. – 1986. – № 8. – С. 39 – 42.
4. Семенов, Я.П. Определение несущей способности бетонного ядра, заключенного в сплошную стальную обойму [Текст] / Я.П. Семенов // Бетон и железобетон. – 1960. – № 3. – С. 126 – 129.
5. Чихладзе, Э.Д. Расчет сталебетонных элементов прямоугольного сечения на прочность при осевом сжатии [Текст] / Э.Д. Чихладзе, А.Д. Арсланханов // Бетон и железобетон. – 1993. – № 3. – С. 13 – 15.
6. ДБН В.2.6 – 98:2009. Конструкції будинків та споруд [Текст]. – К., 2009. – 71 с.

7. Чихладзе, Э.Д. Расчет бетонных цилиндрических колонн в стальной обойме на силовые и температурные воздействия [Текст] / Э.Д. Чихладзе, М.А. Веревичева, И.А. Жакин: сб. науч. праць. – Харків: УкрДАЗТ. – Вип. 59. – 2003. – С. 318 – 325.

Ключевые слова: бетон, обойма, труботетон, ефективність.

Анотації

Розглядається бетонний елемент круглого перерізу у сталевій обоймі під дією осьового навантаження. Порівнюються різні методики визначення граничного напруження бетону при оцінці ефективності обойми.

Рассматривается бетонный элемент круглого сечения в стальной обойме под действием осевой нагрузки. Сравниваются различные методики определения предельного напряжения бетона при оценке эффективности обоймы.

The concrete circular element with the steel frame under the axial load is considered. The different methods of the evaluation of the limiting stress of the concrete for the estimation of the efficiency of the frame are compared.