

*Канд. техн. наук А.Н. Петров,
інженери А.Г. Красюк (УкрДАЗТ),
А.В. Ігнатенко (ХНАДУ)*

РАБОТА БЕТОННОГО ЯДРА И СТАЛЬНОЙ ОБОЙМЫ В ТРУБОБЕТОНЕ В УПРУГОЙ СТАДИИ

Представил д-р техн. наук, профессор В.П. Кожушко

Введение. В настоящее время в строительстве широкое распространение получили бетонные конструкции с внешним армированием, в частности трубобетонные. Такие конструкции, по сравнению с железобетонными, имеют ряд преимуществ. Бетонное ядро за счет всестороннего обжатия увеличивает свою прочность (эффект обоймы), что повышает несущую способность конструкции в целом.

Анализ последних исследований и публикаций. На сегодня проведено большое количество экспериментальных исследований работы бетона в обойме, в частности [1]. Полученные данные используются в данной статье.

Цель статьи. Целью статьи является рассмотрение работы бетонного ядра и стальной обоймы в упругой стадии, исследование поведения трубобетонных конструкций при малой, по сравнению с разрушающей, нагрузкой.

Работа бетонного ядра и стальной обоймы в трубобетоне в упругой стадии. В [1] отмечено, что первая стадия напряженно – деформированного состояния в трубобетоне происходит до появления трещин в бетоне растянутой зоны, когда напряжения в бетоне меньше временного сопротивления растяжению. При этом растягивающие усилия воспринимаются бетоном и арматурой совместно. Предварительные эксперименты, проведенные в УкрГАЖТ, свидетельствуют о том, что в некоторый

момент загрузки сталебетонного образца продольной нагрузкой обойма отрывается от ядра. Поэтому предпринята попытка аналитически определить горизонтальные перемещения бетонного ядра и стальной обоймы в трубобетоне при осевом его нагружении.

Введем предпосылку, что ядро и обойма работают в упругой стадии и определим горизонтальные перемещения ядра и обоймы от действия центрально приложенной сжимающей силы.

Рассмотрим трубобетонный элемент с наружным диаметром обоймы D и толщиной δ , диаметром ядра d и высотой h , к которому по оси элемента приложена сила F (рис. 1). Высота элемента приблизительно равна диаметру.

Из рис. 1 видно, что

$$D = d + 2\delta, \text{ а } D_{cp} = D - \delta = d + \delta. \quad (1)$$

Площадь бетонного ядра

$$A_b = \frac{\pi \cdot d^2}{4}. \quad (2)$$

Площадь стальной обоймы

$$A_s = \pi \cdot D_{cp} \cdot \delta = \pi(d + \delta)\delta. \quad (3)$$

Сумма сил, действующих на ядро F_b и обойму F_s , равна силе F (рис.2).

$$F = F_b + F_s. \quad (4)$$

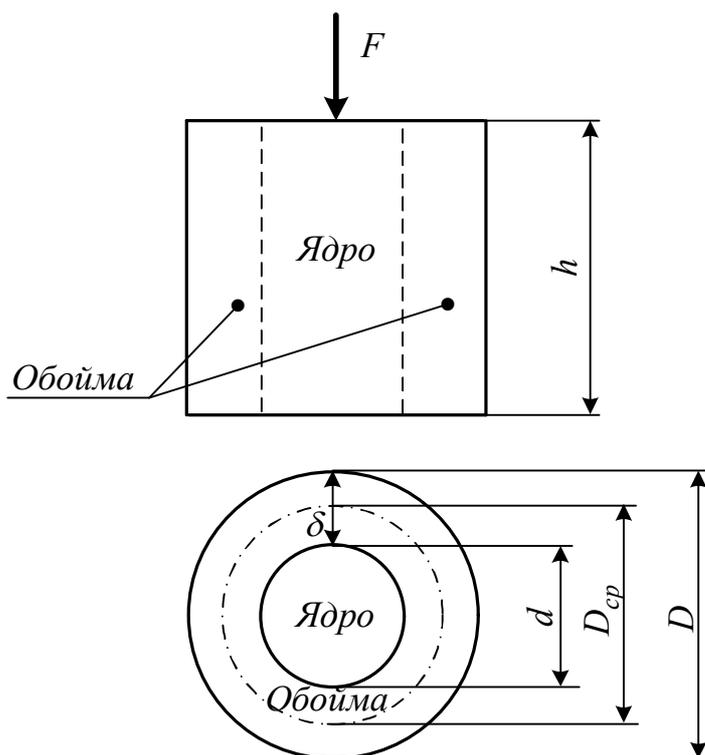


Рис. 1. Трубобетонный элемент

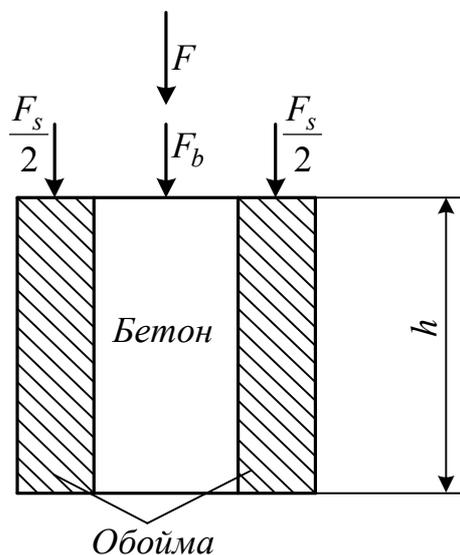


Рис. 2. Нагрузки, действующие на трубобетонный элемент

Если известны силы, действующие на ядро и обойму, то можно определить

продольные удлинения (укорочения) бетонного ядра и обоймы.

Абсолютное удлинение бетонного ядра

$$\Delta h_b = \frac{F_b \cdot h}{E_b \cdot A_b}. \quad (5)$$

Абсолютное удлинение стальной обоймы

$$\Delta h_s = \frac{F_s \cdot h}{E_s \cdot A_s}. \quad (6)$$

Учитывая их совместную работу, т.е. $\Delta h_s = \Delta h_b$, получим

$$\frac{F_b \cdot h}{E_b \cdot A_b} = \frac{F_s \cdot h}{E_s \cdot A_s}.$$

Из этого выражения получим

$$F_s = \frac{n \cdot A_s}{A_b} F_b, \quad (7)$$

где $n = \frac{E_s}{E_b}$ – коэффициент приведения,

представляющий собой отношение модуля упругости стальной обоймы к модулю деформации бетонного ядра.

Используя (4) и (6), определим нагрузки, действующие на бетонное ядро и стальную обойму

$$F_s = \frac{n \cdot A_s}{B} F, \quad (8)$$

$$F_b = \frac{A_b}{B} F. \quad (9)$$

В этих формулах приведенная к бетону площадь

$$B = n \cdot A_s + A_b. \quad (10)$$

Зная усилия, действующие на ядро и обойму, можно определить и напряжения, действующие в них.

Напряжение, действующее в ядре,

$$\sigma_b = \frac{F_b}{A_b} = \frac{A_b \cdot F}{B \cdot A_b} = \frac{F}{B}. \quad (11)$$

Напряжение, действующее в обойме,

$$\sigma_s = \frac{F_s}{A_s} = \frac{n \cdot A_s \cdot F}{B \cdot A_s} = \frac{n \cdot F}{B}. \quad (12)$$

Горизонтальное перемещение обоймы складывается из перемещения обоймы от изменения ее диаметра и перемещения, вызванного изменением ее толщины. Изменение перемещения от изменения диаметра обоймы определим через относительную деформацию ее среднего диаметра D_{cp} .

Относительная продольная деформация обоймы определяется по формуле

$$\varepsilon_s = \frac{\Delta h_s}{h} = \frac{F_s \cdot h}{E_s \cdot A_s \cdot h} = \frac{F_s}{E_s \cdot A_s}. \quad (13)$$

Относительная поперечная деформация

$$\varepsilon'_s = \varepsilon_s \cdot \nu_s = \frac{F_s \cdot \nu_s}{E_s \cdot A_s}. \quad (14)$$

Здесь ν_s – коэффициент Пуассона обоймы.

Относительная поперечная деформация среднего диаметра определяется через абсолютное удлинение по выражению

$$\varepsilon'_s = \frac{\Delta l_{np}}{L_{cp}}, \quad (15)$$

где Δl_{np} – абсолютное удлинение среднего диаметра (D_{cp}) обоймы;

$L_{cp} = \pi \cdot D_{cp}$ – длина среднего диаметра обоймы до приложения продольной силы.

Из формулы (15) и, используя выражения (14) и (8), получим

$$\Delta l_{np} = \varepsilon'_s \cdot L_{cp} = \frac{F_s \cdot v_s}{E_s \cdot A_s} L_{cp} = \frac{n \cdot A_s \cdot F \cdot v_s}{B \cdot A_s \cdot E_s} \pi \cdot D_{cp} = \frac{n \cdot v_s \cdot \pi \cdot F \cdot D_{cp}}{B \cdot E_s}. \quad (16)$$

Средний диаметр увеличился на Δl_{np} и длина окружности стала равной

$$L_1 = L_{cp} + \Delta l_{np} = \pi \cdot D_{cp} + \frac{n \cdot v_s \cdot \pi \cdot F \cdot D_{cp}}{B \cdot E_s}.$$

От воздействия продольной сжимающей силы средний диаметр обоймы увеличился и стал равным D_1 (рис. 3), который определяется по формуле

$$D_1 = \frac{L_1}{\pi} = \frac{\pi \cdot D_{cp}}{\pi} + \frac{n \cdot v_s \cdot \pi \cdot F \cdot D_{cp}}{\pi \cdot B \cdot E_s} = D_{cp} + \frac{n \cdot v_s \cdot F \cdot D_{cp}}{B \cdot E_s}. \quad (17)$$

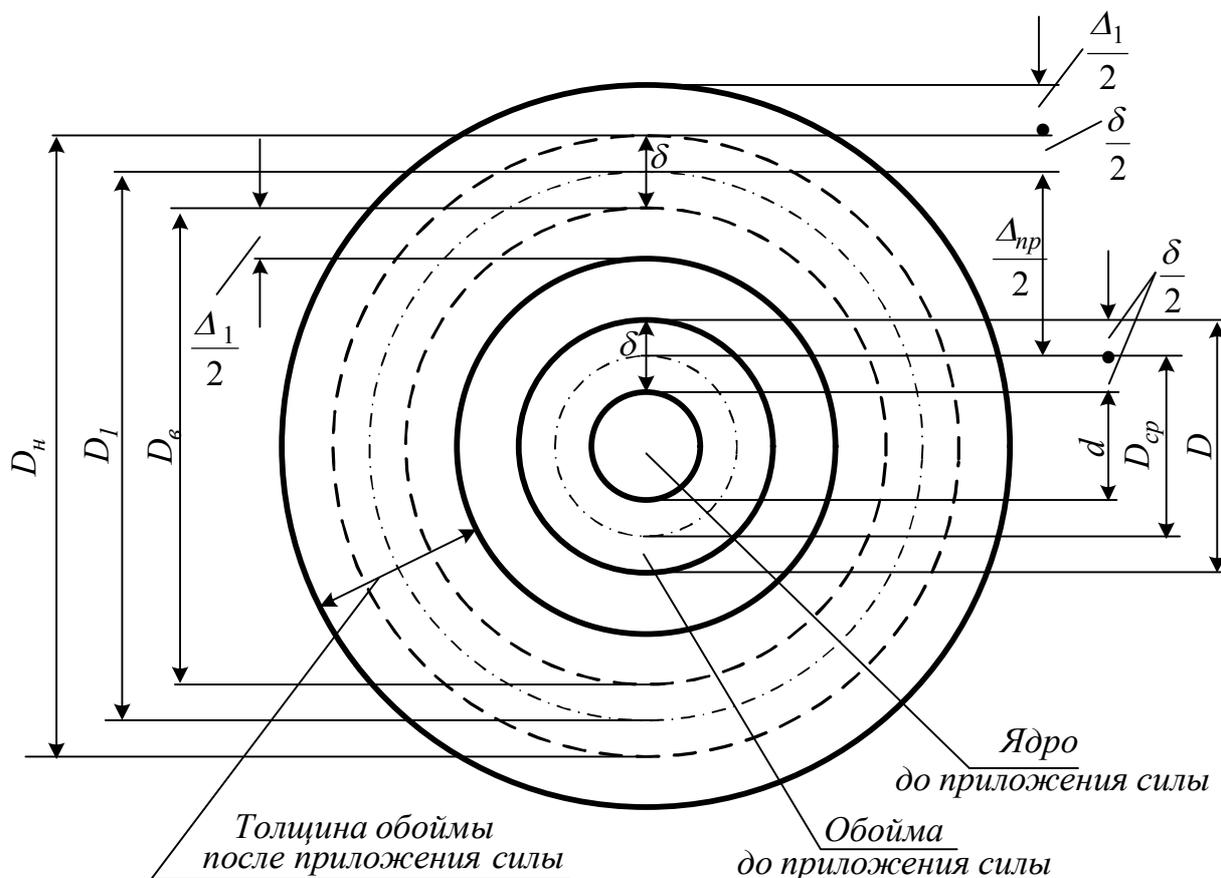


Рис. 3. К определению горизонтального перемещения обоймы

Из рис. 3 видно, что горизонтальное перемещение среднего диаметра обоймы от его удлинения определяется по выражению

$$\Delta_{np} = D_1 - D_{cp} = D_{cp} + \frac{n \cdot v_s \cdot F \cdot D_{cp}}{B \cdot E_s} - D_{cp} = \frac{n \cdot v_s \cdot F \cdot D_{cp}}{B \cdot E_s}. \quad (18)$$

В связи с тем, что обойма представляет собой замкнутое сечение, первоначальной ее толщиной являются две толщины 2δ . Относительная поперечная деформация в этом случае определяется по выражению

$$\varepsilon'_s = \frac{\Delta_{non}}{2\delta},$$

где Δ_{non} – абсолютная поперечная деформация двух ветвей обоймы от изменения ее толщины при действии продольной сжимающей силы F_s .

Отсюда

$$\Delta_{non} = \varepsilon'_s \cdot 2 \cdot \delta = \varepsilon_s \cdot v_s \cdot 2 \cdot \delta = \frac{F_s \cdot v_s \cdot 2 \cdot \delta}{E_s \cdot A_s}. \quad (19)$$

Подставим значения F_s из (8)

$$\Delta_{non} = \frac{n \cdot A_s \cdot F \cdot v_s \cdot 2 \cdot \delta}{B \cdot E_s \cdot A_s} = \frac{F \cdot n \cdot v_s \cdot 2 \cdot \delta}{B \cdot E_s}. \quad (20)$$

Из рис. 3 видно, что

$$\Delta_{non} = 4 \frac{\Delta_1}{2} = 2 \cdot \Delta_1,$$

где Δ_1 – абсолютная поперечная деформация одной ветви обоймы от изменения ее толщины при действии продольной сжимающей силы F_s .

Отсюда

$$\Delta_1 = \frac{\Delta_{non}}{2}.$$

Подставим значение (20)

$$\Delta_1 = \frac{\Delta_{non}}{2} = \frac{2 \cdot F \cdot n \cdot v_s \cdot \delta}{B \cdot E_s \cdot 2} = \frac{F \cdot n \cdot v_s \cdot \delta}{B \cdot E_s}. \quad (21)$$

Контакт ядра с обоймой происходит по внутренней поверхности обоймы. От

увеличения среднего диаметра обоймы перемещение ее внутренней поверхности

происходит от ядра, а от увеличения толщины обоймы перемещение внутренней поверхности происходит к ядру. В этом

случае общее перемещение внутренней поверхности можно определить по рис. 3.

$$\Delta_{s(\epsilon)} = 2 \left[\frac{\Delta_{np}}{2} + \frac{\delta}{2} - \frac{\delta}{2} - \frac{\Delta_1}{2} \right] = \Delta_{np} - \Delta_1. \quad (22)$$

Подставим в (22) значения (18) и (21):

$$\Delta_{s(\epsilon)} = \Delta_{np} - \Delta_1 = \frac{n \cdot v_s \cdot F \cdot D_{cp}}{B \cdot E_s} - \frac{F \cdot n \cdot v_s \cdot \delta}{B \cdot E_s} = \frac{F \cdot n \cdot v_s \cdot d}{B \cdot E_s}. \quad (23)$$

По формуле (23) определяется общее горизонтальное перемещение внутренней поверхности обоймы трубобетонного образца от действия продольной центрально приложенной сжимающей силы.

Общее перемещение наружной поверхности определяется по формуле (согласно рис. 3).

$$\Delta_{s(\eta)} = 2 \left[\frac{\Delta_{np}}{2} + \frac{\delta}{2} - \frac{\delta}{2} + \frac{\Delta_1}{2} \right] = \Delta_{np} + \Delta_1. \quad (24)$$

Подставим в (24) значения (18) и (21)

$$\Delta_{s(\eta)} = \Delta_{np} + \Delta_1 = \frac{n \cdot v_s \cdot F \cdot D_{cp}}{B \cdot E_s} + \frac{F \cdot n \cdot v_s \cdot \delta}{B \cdot E_s} = \frac{F \cdot n \cdot v_s \cdot (d + 2\delta)}{B \cdot E_s}. \quad (25)$$

По формуле (25) определяется общее горизонтальное перемещение наружной поверхности обоймы трубобетонного образца от действия центрально приложенной продольной сжимающей силы.

Относительная поперечная деформация

$$\epsilon'_b = \epsilon_b \cdot v_b = \frac{F_b \cdot v_b}{E_b \cdot A_b}. \quad (26)$$

На бетонное ядро действует сила F_b (рис. 4). Относительная продольная деформация ядра определяется по формуле

$$\text{Но } \epsilon'_b = \frac{\Delta_b}{d}.$$

Отсюда

$$\epsilon_b = \frac{\Delta h_b}{h_b} = \frac{F_b}{E_b \cdot A_b}.$$

$$\Delta_b = \epsilon'_b \cdot d = \frac{F_b \cdot v_b \cdot d}{E_b \cdot A_b}. \quad (27)$$

В (27) подставим значение (9) и получим

$$\Delta_b = \frac{F_b \cdot v_b \cdot d}{E_b \cdot A_b} = \frac{F \cdot A_b \cdot v_b \cdot d}{B \cdot E_b \cdot A_b} = \frac{F \cdot v_b \cdot d}{B \cdot E_b} \quad (28)$$

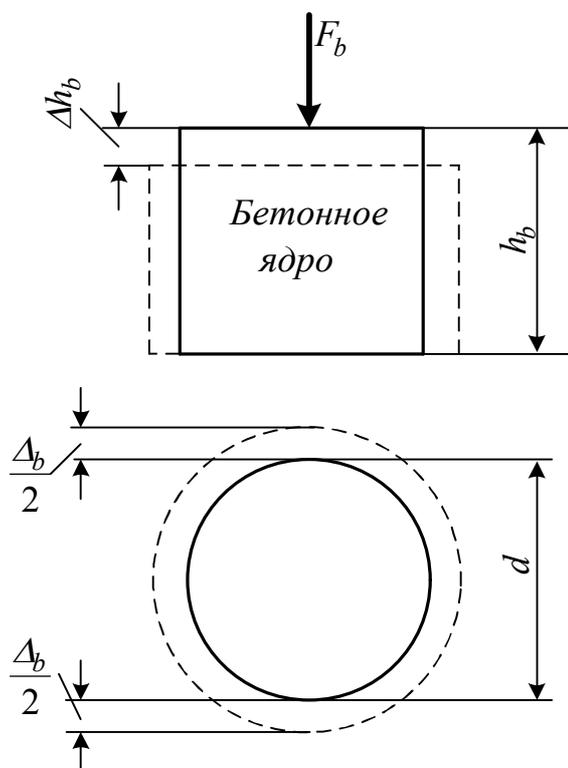


Рис. 4. Бетонное ядро

По формуле 28 определяется общее горизонтальное перемещение граней бетонного ядра трубобетонного образца от действия продольной центрально приложенной сжимающей силы.

Из-за нелинейности зависимости $\sigma_b - \varepsilon_b$ модуль деформации бетона E_b изменяется с ростом нагрузки вследствие развития пластических деформаций. В результате статистической обработки опытных данных в [1] была получена эмпирическая формула для определения теоретического значения E_b в зависимости от напряжений.

$$E_b = E_0 \left[1 - \beta \left(\frac{\sigma_b}{R_b} - 0,2 \right) \right], \quad (29)$$

где E_0 – начальный модуль упругости бетона;

β – коэффициент, зависящий от вида бетона;

R_b – призмная прочность бетона;

σ_b – напряжение в бетоне.

Для удобства ее использования выразим эту формулу через прикладываемую силу, геометрические характеристики поперечных сечений бетона и обоймы, а также через характеристики ядра и обоймы. Для этого используем формулы (10) и (11)

$$E_b = E_0 \left\{ 1 - \beta \left[\frac{F}{\left(\frac{E_s}{E_b} A_s + A_b \right) R_b} - 0,2 \right] \right\}. \quad (30)$$

После несложных преобразований получим квадратное уравнение относительно E_b .

$$A_b R_b E_b^2 + (R_b E_s A_s + \beta E_0 F - E_0 A_b R_b - 0,2 \beta R_b A_b E_0) E_b - (E_0 E_s A_s R_b + 0,2 \beta R_b E_s A_s) = 0.$$

Решая квадратное уравнение относительно E_b получим

$$E_b = \frac{R_b E_s A_s - E_0 A_b R_b + E_0 \beta F - 0,2 \beta R_b E_0 A_b}{2 A_b R_b} \left[\sqrt{1 + \frac{4 A_b R_b^2 E_0 E_s A_s (1 - 0,2 \beta)}{(R_b E_s A_s - E_0 A_b R_b + E_0 \beta F - 0,2 \beta R_b E_0 A_b)} - 1} - 1 \right] \quad (31)$$

Контакт обоймы с ядром происходит по внутренней поверхности обоймы. Сравним общее перемещение внутренней поверхности обоймы с общим перемещением ядра. Обозначим через

$$k = \frac{\Delta_{s(\varepsilon)}}{\Delta_b}.$$

Подставим значения (23) и (28)

$$k = \frac{\Delta_{s(\varepsilon)}}{\Delta_b} = \frac{F \cdot n \cdot v_s \cdot d \cdot B \cdot E_b}{B \cdot E_s \cdot F \cdot v_b \cdot d} = \frac{v_s}{v_b}. \quad (32)$$

В связи с тем, что $v_s > v_b$, то и общее перемещение обоймы будет больше общего перемещения ядра. Это подтверждается экспериментами, проведенными в лабораториях УкрГАЗТ.

Однако эти перемещения составляют сотые доли миллиметров и определялись с помощью индикаторов с коэффициентом увеличения, равным 1000. В этом случае не заметен отрыв стальной обоймы от ядра, но их совместная работа отсутствует. Это явление необходимо учитывать при уточнении методов расчета трубобетонных элементов.

Выводы. В процессе дальнейшего нагружения трубобетонных элементов (за пределами упругости) их совместная работа имеет место, что подтверждается экспериментально. При этом за счет уплотнения бетонного ядра прочность его после потери устойчивости обоймы сохраняется по сравнению с первоначальной прочностью. Но так как обойма перестает работать (обойма теряет устойчивость), ядро быстро разрушается.

Список литературы

1. Стороженко, Л.И. Расчет трубобетонных конструкций [Текст] / Л.И. Стороженко, П.И. Плахотный, А.Я. Черный. – К.: Будівельник, 1991. – 120 с.

Ключевые слова: трубобетон, бетонное ядро, стальная обойма, продольные удлинения, центральное сжатие, эффект обоймы.

Аннотации

Запропоновано теоретичний розрахунок на центральне стискання трубобетонного елемента з визначенням напружень та горизонтальних переміщень в обоймі та ядрі в пружній стадії. Показано випереджаюче горизонтальне переміщення обойми в порівнянні з переміщенням ядра.

Предложен теоретический расчет на центральное сжатие трубобетонного элемента с определением напряжений и горизонтальных перемещений в обойме и ядре в упругой стадии. Показано опережающее горизонтальное перемещение обоймы по сравнению с перемещением ядра.

The authors provide the theoretical evaluation of concrete element under axial compression. The values of compressive stress and horizontal displacement in steel tubing and concrete core were obtained during the elastic stage. Its summarized that steel tubing horizontal displacement advance the concrete core horizontal displacement.