

Рис. 3. Результаты моделирования

**Выводы:**

1. С увеличением потока вложений в ОПФ ускоряется процесс выхода фирмы на заданную потребность.
2. Первоначальный поток вложений в ОПФ должен превышать значение произведения коэффициента выбытия ОПФ на начальную производственную мощность фирмы.
3. С помощью принципа максимума можно более обоснованно принимать решения.

**ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА**

1. Сиразетдинов Т.К. Динамическое моделирование экономических объектов. – Казань: «Фан», 1996. – 223 с.
2. Куршев В.Н. Теория оптимального управления экономическими системами: Учебное пособие. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2003. – 114 с.
3. Куршев В.Н. Теория управления. Техничко-экономические системы: Учебное пособие. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2004. – 134 с.
4. Ершова Н.М. Моделирование динамических процессов экономических систем: Конспект лекций. – Днепропетровск: ПГАСА, 2007. – 112 с.

УДК 624.012.45

**РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА ОПТИМИЗАЦИИ ТРУБОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

зав. каф. архитектуры и градостроительства Ефименко В.И.  
Криворожский технический университет, г. Кривой Рог

**Постановка проблемы.** Известно, что современная теория предельных состояний предлагает многовариантность проектных решений, не давая однозначного ответа в отношении оптимальности того или другого варианта.

Если для железобетонных и металлических конструкций, на основе многолетнего опыта проектирования и многочисленных статистических данных о работе конструкций, найдены проектно-конструкторские решения, близкие к оптимальным – в виде сортамента металла, типовых серий железобетонных конструкций и др., то для трубобетонных элементов этот вопрос остается мало изученным.

**Выделение нерешенных ранее частей общей проблемы** Большинство работ по трубобетону посвящены в основном исследованию напряженно-деформированного состояния и оценки несущей способности [92, 167, 238, 264]. Оптимальному проектированию этих конструкций уделяется недостаточное внимание.

**Анализ последних исследований** Оптимальному проектированию трубобетонных конструкций в целом и centrifугированных трубобетонных конструкций в частности в исследованиях практически не уделяется внимания. Данная проблема усиливается также отсутствием базы статистических данных о работе уже построенных конструкций.

**Формулировка целей статьи** Задачу оптимального проектирования трубобетонных конструкций можно решить следующим образом. В первом приближении задача выбора оптимальных параметров решается на основе комплексного критерия оптимальности методом поэтапной оптимизации. Основными параметрами оптимизации, определяющими несущую способность трубобетонного элемента, являются диаметр бетонного ядра, коэффициент армирования, класс бетона, марка стали.

**Основная часть** На основании разработанной методики оптимизации параметров поперечных сечений сжатых и внецентренно сжатых трубобетонных элементов предлагаются рекомендации по их оптимальному проектированию, которые заключаются в следующем:

1. При проектировании сжатых трубобетонных элементов без учета продольного изгиба ( $l_0/d_e < 5$ , где  $d_e$  – наружный диаметр трубы) необходимо стремиться к применению бетонов высокого класса прочности: В25; В30; В40; В45; В50 и стальных труб с марками стали 09Г2С и 16Г2АФ, что особенно важно при действии на элемент значительного продольного усилия ( $N = 2000...5000$  кН и более). Для таких элементов оптимальный коэффициент армирования  $\mu_{pb,opt}$  следует принимать по табл. 1.

Таблица 1

**Оптимальный коэффициент армирования трубобетонных элементов, принимаемый без учета гибкости**

Марка стали	Оптимальный коэффициент армирования сжатых трубобетонных элементов $\mu_{pb,opt}$ при классе бетона по прочности на сжатие					
	В20	В25	В30	В35	В40	В45

Сталь 15	0,141	0,128	0,120	0,113	0,104	0,096	0,083
09Г2С	0,138	0,124	0,116	0,109	0,101	0,094	0,079
16Г2АФ	0,133	0,117	0,110	0,103	0,096	0,086	0,068

2. При проектировании гибких трубобетонных элементов ( $l_0 / d_e > 5$ ) следует применять бетоны классов по прочности на сжатие В12,5; В15; В20; В25; В30 и стальные трубы с маркой стали ВСтЗпс4, 09Г2С и др., для которых оптимальный коэффициент армирования  $\mu_{pb,opt}$  рекомендуется принимать по табл. 2.

Таблица 2

**Оптимальный коэффициент армирования гибких трубобетонных элементов**

Марка стали	Оптимальный коэффициент армирования сжатых трубобетонных элементов $\mu_{pb,opt}$ при классе бетона по прочности на сжатие			
	В12,5	В15	В20	В25 и выше
ВСтЗпс4 Сталь 15 Сталь 20	0,100	0,088	0,074	0,025
09Г2АС	0,093	0,084	0,071	0,025
16Г2АФ	0,090	0,079	0,067	0,025

3. Оптимальное значение коэффициента армирования  $\mu_{pb,opt}$  следует назначать в пределах  $\mu_{pb,opt} = 0,08...0,12$  – при расчете на прочность и в пределах  $\mu_{pb,opt} = 0,025...0,100$  – при расчете на устойчивость, причем нижний предел обеспечивает минимальный расход стали, а верхний – минимальную массу трубобетонного элемента.

4. Диаметр бетонного ядра (внутренний диаметр трубы)  $d_i$  предлагается определять по формуле 1

$$d_i = \sqrt{\frac{1,273N}{\gamma_{pb2} \varphi_e (R_{b,pb} + \gamma_{s2} \mu_{pb} R_s)}} \quad (1)$$

где,  $N$  – продольное усилие, действующее в элементе;

$\gamma_{pb2}$  – коэффициент длительного сопротивления трубобетона, который учитывает длительность действия нагрузки и определяется в зависимости от коэффициента армирования  $\mu_{pb}$  и относительного эксцентриситета  $\delta_{red}$  изменяется в пределах  $\gamma_{pb2} = 0,55...0,99$  (при кратковременном действии нагрузки  $\gamma_{pb2} = 1$ );

$\varphi_e$  – коэффициент продольного изгиба.

При расчете трубобетонных элементов на прочность уравнение (1) решается однозначно относительно  $d_i$  (см. пример 1). При расчете трубобетонных элементов на устойчивость в уравнении (1) неизвестными являются  $d_i$  и  $\varphi_e$ , которые взаимосвязаны значениями приведенной гибкости  $\lambda_{red}$  и приведенного эксцентриситета  $\delta_{red}$ , т.е. уравнение (1) также решается однозначно методом последовательного приближения.

Таблица 3

**Коэффициент длительного сопротивления трубобетона**

Коэфф и-циент армиро-вания $\mu_{pb}$	Коэффициент длительного сопротивления трубобетона $\gamma_{pb2}$ при приведенном эксцентриситете $\delta_{red}$							
	0,1	0,2	0,4	0,6	1,0	1,2	1,6	2,0
0,200	0,833	0,845	0,860	0,875	0,910	0,958	0,968	0,990
0,150	0,830	0,835	0,850	0,862	0,885	0,900	0,925	0,950
0,125	0,821	0,825	0,835	0,845	0,865	0,880	0,900	0,922
0,100	0,817	0,820	0,822	0,823	0,847	0,855	0,875	0,985
0,075	0,815	0,815	0,815	0,815	0,815	0,815	0,822	0,830
0,050	0,795	0,795	0,790	0,787	0,782	0,780	0,775	0,765
0,025	0,785	0,780	0,767	0,755	0,730	0,712	0,670	0,625
0,010	0,7650	0,757	0,737	0,715	0,670	0,645	0,600	0,550

5. Требуемая толщина стенки трубы-оболочки трубобетонного элемента  $t_{s,req}$  определяется по формуле 2

$$t_{s,req} = 0,5 d_i (\sqrt{1 + \mu_{pb}} - 1) \quad (2)$$

6. С учетом полученных расчетных значений внутреннего диаметра трубы  $d_i$  и требуемой толщины стенки трубы  $t_{s,req}$ , по сортаменту Государственных стандартов или ТУ принимаются основные геометрические

размеры стальной трубы – наружный диаметр  $d_e$  и толщина стенки  $t_s$  ( $d_e = d_i + 2t_s$ ).

7. В заключение проверяется несущая способность принятого поперечного сечения трубобетонного элемента:

– при расчете на прочность по условию 3

$$N_{shl} \leq N_{pb,per} = R_{b,pb} A_b + \gamma_{s2} R_s A_s \quad (3)$$

– при расчете на устойчивость по условию

$$N_{shl} \leq \varphi_e N_{pb,per} = R_{b,pb} A_b + \gamma_{s2} R_s A_s \quad (4)$$

где,  $N_{shl}$  – максимальное продольное усилие от расчетных кратковременных нагрузок, действующих в трубобетонном элементе;  
 $N_{pb,per}$  – наибольшая несущая способность трубобетонного элемента;  
 $\varphi_e$  – коэффициент продольного изгиба, определяемый в зависимости от приведенной гибкости  $\lambda_{red}$  и приведенного эксцентриситета  $\delta_{red}$ ;  
 $R_{b,pb}$  и  $R_s$  – соответственно расчетные сопротивления бетонного ядра и трубы-оболочки;  
 $A_b$  и  $A_s$  – соответственно площади поперечного сечения бетонного ядра и трубы;

$\gamma_{s2}$  – коэффициент, зависящий от прочностных и геометрических характеристик бетонного ядра и трубы.

Значение коэффициента  $\gamma_{s2}$  с достаточной точностью определяется из выражения (5)

$$\gamma_{s2} = 0,65(t_s/d_i)^{-0,06} \alpha_{st}, \quad (5)$$

где,  $\alpha_{st}$  – коэффициент, зависящий от марки стали (для стали ВСтЗпс4 –  $\alpha_{st} = 1,00$ ; для стали 09Г2С –  $\alpha_{st} = 1,07$ ; для стали 16Г2АФ –  $\alpha_{st} = 1,12$ ).

Зависимость между коэффициентами  $\gamma_{s2}$  и  $\mu_{pb}$  для различных марок стали приведена на рис. 1.

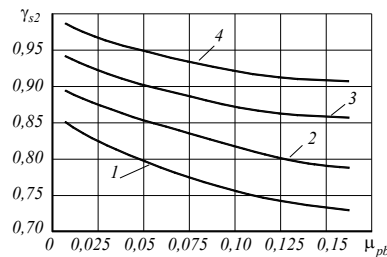


Рис. 1. Зависимость между коэффициентом  $\gamma_{s2}$  и коэффициентом армирования  $\mu_{pb}$  для марок сталей:

1 – ВСтЗкп, 20; 2 – ВСтЗпс4, ВСтсп4; 3 – 09Г2С; 4 – 16Г2АФ

Коэффициент продольного изгиба при осевом сжатии  $\varphi_e$  рекомендуется определять по формуле (6)

$$\varphi_e = 1,16 - 0,005\lambda_{red} - 0,01R_{b,pb} - 0,0025R_s, \quad (6)$$

где приведенная гибкость  $\lambda_{red}$  определяется в зависимости от геометрических и механических характеристик трубобетонного элемента ( $t_s, d_i, l_0, R_{b,pb}, R_s$ ) при условии равенства продольных деформаций бетонного ядра и трубы-оболочки ( $\varepsilon_{su} = \varepsilon_{su}$ ) по формуле (7)

$$\lambda_{red} = \frac{2l_0}{d_i \sqrt{0,5 - \frac{0,25}{1 + \frac{t_s R_s}{R_{b,pb} (0,25d_i + 16,1t_s \beta_{op})}}}}} \quad (7)$$

или по формуле [5]

$$\lambda_{red} = \frac{2l_0}{d_i \sqrt{0,5 - \frac{0,25}{1 + \mu_{pb} \chi}}} \quad (8)$$

где,  $l_0$  – расчетная длина элемента;

$\chi$  – коэффициент, учитывающий отношение механических характеристик бетона и стали при их работе в предельном состоянии. Для трубобетонных элементов с трубой из стали марки ВСтЗпс4  $\chi = 0,06$  при бетоне класса В15;

$\chi = 0,10$  при бетоне класса В20;  $\chi = 0,13$  при бетоне класса В30;  $\chi = 0,17$  при бетоне класса В40.

Использование полученных зависимостей для выбора оптимальных параметров в первом приближении может значительно облегчить расчет сечений трубобетонных элементов (табл. 1; 2; 3 и рис. 1; 2).

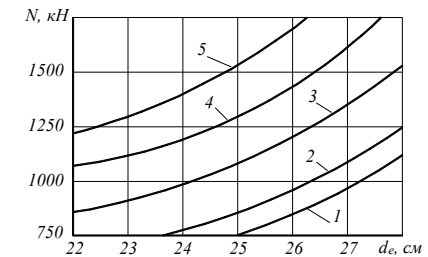


Рис.2. Оптимальный наружный диаметр  $d_e$  гибких трубобетонных элементов (бетонное ядро класса В12,5; труба – сталь марки ВСтЗпс4, коэффициент армирования  $\mu_{pb} = 0,1$ ) в зависимости от продольного усилия  $N$  при расчетной длине:

$$1 - l_0 = 12 \text{ м}; 2 - l_0 = 10 \text{ м}; 3 - l_0 = 8 \text{ м}; 4 - l_0 = 6 \text{ м}; 5 - l_0 = 4 \text{ м}$$

На следующем примере рассмотрено практическое использование предлагаемой методики расчета поперечных сечений сжатых трубобетонных элементов с оптимальными параметрами.

#### Пример.

Необходимо подобрать сечение трубобетонной стойки (без учета гибкости), работающей на центральное сжатие. Продольное усилие, воспринимаемое стойкой  $N = 4800$  кН.

Трубобетонная стойка проектируется сплошного поперечного сечения с вибрированным бетонным ядром. Для трубобетонной стойки принимаем стальную бесшовную горячекатаную трубу из стали марки ВСтЗпс4 с расчетным сопротивлением  $R_s = 235$  МПа и тяжелый бетон класса В25.

Определяем параметры, необходимые для расчета трубобетонной стойки.

Для принятого класса бетона В25 и марки стали ВСтЗпс4 из табл. 1 определяем оптимальный коэффициент армирования  $\mu_{pb,opt} = 0,128$ . Для бетона класса В25 коэффициент  $\beta_{op} = 0,52$ . Для  $\mu_{pb,opt} = 0,128$  и стали марки ВСтЗпс4 устанавливаем  $\gamma_{s2} = 0,86$ . По табл. 3 для принятого  $\mu_{pb,opt} = 0,128$  при  $\delta_{red} = 0,1$  принимаем  $\gamma_{pb2} = 0,822$ .

Расчетное сопротивление бетона

$$R_{b,pb} = 0,65 \gamma_{pb} B(1 + 16,1 \mu_{pb,opt} \beta_{op}) = 0,65 \cdot 1,1 \cdot 25(1 + 16,1 \cdot 0,128 \cdot 0,52) = 33,1 \text{ МПа.}$$

В расчетных формулах используем:

$$R_{b,pb} = 33,1 \text{ МПа} = 3,31 \text{ кН/см}^2; R_s = 235 \text{ МПа} = 23,5 \text{ кН/см}^2.$$

Определяем требуемый внутренний диаметр трубы трубобетонной стойки (1)

$$d_{i,req} = \sqrt{\frac{1,273N}{\gamma_{pb2} \varphi_e (R_{b,pb} + \gamma_{s2} \mu_{pb} R_s)}} = \sqrt{\frac{1,273 \cdot 4800}{0,82 \cdot (3,31 + 0,86 \cdot 0,128 \cdot 23,5)}} = 35,5 \text{ см.}$$

Определяем требуемую толщину стенки трубы (2)

$$t_{s,req} = 0,5 d_{i,req} (\sqrt{1 + \mu_{pb,opt}} - 1) = 0,5 \cdot 35,5 (\sqrt{1 + 0,128} - 1) = 1,1 \text{ см}$$

Требуемый расчетный наружный диаметр трубы

$$d_{e,req} = d_{i,req} + 2t_{s,req} = 35,5 + 2 \cdot 1,1 = 37,7 \text{ см.}$$

По стандарту стальных труб, выпускаемых промышленностью, принимаем трубу с наружным диаметром  $d_e = 377$  мм и толщиной стенки  $t_s = 10$  мм. Для принятых размеров трубобетонной стойки площадь поперечного сечения трубы  $A_s = 115,2$  см<sup>2</sup>; площадь поперечного сечения бетонного ядра  $A_b = 1000$  см<sup>2</sup>; коэффициент армирования  $\mu_{pb} = 0,115$ .

Уточняем расчетное сопротивление бетона

$$R_{b,pb} = 0,65 \cdot B(1 + 16,1 \mu_{pb,opt} \beta_{op}) = 0,65 \cdot 25(1 + 16,1 \cdot 0,115 \cdot 0,5) = 31,3 \text{ МПа.}$$

Определяем несущую способность центрально сжатой трубобетонной стойки (3)

$$N_{per} = R_{b,pb} A_b + \gamma_{sb2} R_s A_s = 3,31 \cdot 1000 + 0,82 \cdot 23,5 \cdot 115,2 = 5350 \text{ кН.}$$

Так как  $N_{per} = 5350$  кН  $>$   $N = 4800$  кН, несущая способность запроектированного трубобетонного элемента обеспечена.

**Выводы** На основе сказанного выше, в процессе проектирования, можно определить оптимальные параметры центрифугированного трубобетонного элемента в зависимости от известных нагрузок и физико-механических характеристик материалов.

#### ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Лукша Л.К. Прочность трубобетона. – Минск: Вышейша школа, 1977. – 95 с.
2. Долженко А.А. Трубчатая арматура в железобетоне // Дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.01. – Воронеж : ВИСИ, 1967. – 413 с.
3. Росновский В.А. Трубобетон в мостостроении. – М.: Трансжелдориздат, 1963. – 110 с.
4. Стороженко Л.И. Объемное напряженно-деформированное состояние железобетона с косвенным армированием. – Автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.23.01. – М.: ВЗИСИ, 1985. – 48 с.
5. Стороженко Л.И., Плахотный П.И., Черный А.Я. Расчет трубобетонных конструкций с использованием ЭВМ. – К.: Будівельник, 1991. – 120 с.

#### УДК 624.012.45

#### ОПЫТ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ СТАЛЬНЫХ ТРУБ, ЗАПОЛНЕННЫХ ЦЕНТРИФУГИРОВАННЫМ БЕТОНОМ

Ефименко В.И., Сухан А.П., Сухан С.П.

Криворожский технический университет, г.Кривой Рог

**Постановка проблемы.** Распространение в практике строительства получает центрифугированный железобетон. Известно, что элементы из центрифугированного трубобетона обладают всеми преимуществами, свойственными как обычному трубобетону, так и центрифугированному