

ПРОБЛЕМЫ СОВРЕМЕННОГО БЕТОНА И ЖЕЛЕЗОБЕТОНА

К расчету ширины раскрытия трещин в железобетонных безнапорных трубах

Method for calculation the width of crack opening in reinforced concrete non-pressure pipes

Шепелевич Н.И., кандидат технических наук, доцент, заведующий научно-исследовательской лабораторией РУП «Институт БелНИИС»

Молчан А.Е., ведущий инженер-конструктор научно-исследовательской лаборатории конструкций инженерных коммуникаций РУП «БелНИИС»

АННОТАЦИЯ

Предложен метод расчета ширины раскрытия трещин в железобетонных безнапорных трубах, основанный на использовании трехмерной конечно-элементной модели. Расчетная модель трубы сформирована в виде массива, состоящего из объемных и стержневых конечных элементов, моделирующих соответственно бетон и арматуру. Расчет выполняют методом итераций с использованием диаграмм деформирования бетона и стали. Образование трещин учитывают путем исключения из работы цепочек бетонных элементов, деформации в которых достигли предельной растяжимости бетона.

ABSTRACT

This article describes the method for calculating the width of cracks opening in reinforced concrete non-pressure pipes, based on the use of three-dimensional finite element model. Computational model of the pipe is formed into an array with-standing bulk and core of the finite element modeling, respectively concrete and rebar. The calculation performed by the method of iterations with the Uses of the diagrams of deformation of concrete and steel. Cracking takes into account by excluding from the chains of concrete elements, the deformation of which reached the maximum stretch of concrete.

ВВЕДЕНИЕ

Железобетонные безнапорные трубы относятся к конструкциям, для которых в условиях эксплуатации допускается ограниченное длительное раскрытие трещин, то есть при проектировании данных конструкций помимо расчета на прочность, необходимо выполнять расчет на образование и раскрытие трещин. Причем, для труб эксплуатирующихся в условиях действия агрессивных сред, например, в условиях среды канализационных коллекторов, данный вид расчета, как правило, является определяющим.

Известные методики (СНиП) расчета ширины раскрытия (нормальных) трещин в железобетонных изгибаемых элементах, разработаны применительно к плоским конструкциям - балкам и плитам и т.п. [1-3]. Данные методики применялись так же и при расчетах железобетонных безнапорных труб. Однако результаты испытаний труб показывают, что фактическая ширина раскрытия трещин в 1,5...2 раза отличается от расчетной.

Цель работы – выявить факторы, влияющие на процесс образования и раскрытия трещин в железобетонных безнапорных трубах и разработать предложения по расчету ширины раскрытия трещин в данных конструкциях.

1. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА И ИСПЫТАНИЙ ТРУБ

Исследованиям процесса образования и раскрытия нормальных трещин в железобетонных изгибаемых элементах посвящено большое количество работ. Согласно [4] применяемые на практике методы расчета ширины раскрытия трещин условно можно разделить на 4 группы.

К первой группе следует отнести методы, основанные на положениях теории В.И.Мурашова [5], согласно которых ширина раскрытия трещин a_{crc} определяется из выражения:

$$a_{crc} = (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{bt,m}) l_{crc}; \quad (1)$$

где l_{crc} – расстояние между трещинами, а $\varepsilon_{bt,m}$ и ε_{sm} – относительные удлинения растянутой зоны бетона и арматуры на участке между трещинами.

Расстояние же между трещинами l_{crc} определяют из условия, что в момент трещинообразования разность усилия растяжения арматуры в сечении с трещиной и в сечении между трещинами уравнивается силами сцепления арматуры с бетоном. При этом ширина раскрытия трещин существенно зависит от напряжения сцепления арматуры с бетоном и коэффициента полноты эпюры напряжений сцепления.

Методы второй группы основаны на использовании эмпирических и полуэмпирических зависимостей, полученных по результатам экспериментальных исследований. К данным методам относится и методика СНиП 2.03.01-84 [1], в которой ширина раскрытия нормальных трещин определяется по формуле

$$a_{crc} = \delta \varphi \eta \frac{\sigma_s}{E_s} 20(3,5-100\mu) \sqrt[3]{d}; \quad (2)$$

где δ , φ и η – коэффициенты, учитывающие вид силового воздействия, длительность действия нагрузки и профиль рабочей арматуры;

σ_s и E_s – соответственно, напряжение и модуль упругости арматуры;

μ и d – коэффициент армирования сечения и диаметр рабочей арматуры.

Результаты расчета ширины раскрытия нормальных трещин в изгибаемых железобетонных элементах с использованием (2), как правило, хорошо согласовывались с экспериментальными данными (для плоских элементов).

К методам третьей группы относится методика в СНиП 2.05.03-85 [2], основанная на предложении О.Я.Берга, в которой ширина раскрытия нормальных трещин определяется через т.н. радиус армирования R_r , учитывающий взаимодействие арматуры с бетоном

$$a_{crc} = \frac{\sigma_s}{E_s} \psi \sqrt{R_r}; \quad (3)$$

Данная методика используется при расчете мостовых конструкций и хорошо согласуется с данными эксперимента для предварительно-напряженных изгибаемых элементов. В то же время основные параметры данной методики никак не связаны с характером взаимодействия арматуры (распределением касательных напряжений) и бетона.

Методы четвертой группы основаны на гипотезе (Томаса), в которой ширину раскрытия трещин определяют как сумму взаимных смещений арматуры и бетона на участке между трещинами. Для их реализации необходимо знать функцию, связывающую относительные смещения и касательные напряжения на участке между трещинами. М.М.Холмянским предложен метод построения такой функции для центрально-растянутых железобетонных элементов [6].

В методике СНБ 5.03.01-02 (основана на предпосылках теории В.И.Мурашова), в котором расчетную ширину раскрытия нормальных трещин w_k определяют по формуле

$$w_k = \beta \cdot s_{rm} \cdot \varepsilon_{sm}; \quad (4)$$

где β – коэффициент, учитывающий геометрические размеры сечения;

ε_{sm} и s_{rm} – соответственно, средние относительные деформации арматуры и среднее расстояние между трещинами, определяемое с использованием полуэмпирических зависимостей [3].

Анализ представленных методик показывает, что они имеют принципиальные различия в исходных предпосылках, что и отражается и на результатах расчета. Что же касается расчета ширины раскрытия трещин в железобетонных безнапорных трубах, то до ввода в действие СНБ 5.03.01 данные расчеты выполнялись по методике СНиП 2.03.01.

В таблице 1 приведены результаты расчета ширины раскрытия трещин в опасных сечениях железобетонных безнапорных труб по ГОСТ 6482-88 [7], с использованием различных методик расчета. Трубы запроектированы из тяжелого бетона класса В25 и армированы цилиндрическим каркасом, в котором в качестве спиральной (рабочей) арматуры использована проволока класса Вр-1 диаметром 5 мм или арматура класса АIII диаметром 6 и 8 мм. Арматурный каркас установлен таким образом, что в шельге и лотке трубы обеспечиваются требуемые значения расчетной высоты сечения d при толщине стенки трубы h .

Таблица 1

Марка трубы	M_{sd} , кН·м/м	M_{crc} кН·м/м	h/d , мм	Диаметр и шаг арматуры, мм	Ширина раскрытия трещин, мм		
					СНиП 2.03.01-84	СНиП 2.05.03-85	СНБ 5.03.01
ТБ50.50-3	2,655	1,677	60/35	5/60	0,118	0,138	0,134
ТБ60.50-3	3,192	1,677	60/35	5/50	0,121	0,141	0,136
ТБ80.50-3	6,236	2,981	80/45	6/45	0,089	0,139	0,128
ТБ100.50-3	9,249	4,657	100/59	8/70	0,096	0,166	0,150

Нормативное значение изгибающего момента M_{sd} , возникающего в шельге трубы от действия приведенной вертикальной нагрузки P (контрольной по трещиностойкости). Момент трещиностойкости сечения стенки трубы M_{crc} , вычислен при $R_{btn} = 1,6 \text{ МПа}$.

Как видно из табл.1 значения, полученные по методикам СНБ 5.03.01 и СНиП 2.05.03, между собой различаются незначительно и существенно (до 60%) превышают значения, полученные при расчете труб по методике СНиП 2.03.01. Фактическая же ширина раскрытия трещин (при испытании) для труб диаметром 500-1000 мм при нормативной нагрузке (контрольной по трещиностойкости), как правило, не превышала 0,05... 0,1 мм. Т.е. имеются существенные расхождения между результатами расчета и данными эксперимента.

Данные расхождения, на наш взгляд, обусловлены (особенно в трубах малого диаметра) начальной кривизной конструкций, которая влияет на характер взаимодействия (сцепление) арматуры с бетоном. Чем больше кривизна конструкции - тем больше силы сцепления арматуры с бетоном, что не учитывается существующими методиками расчета.

В настоящее время в Республике Беларусь налажено производство железобетонных безнапорных труб методами радиального прессования и вибропрессования. Конструктивные решения данных труб разработаны РУП «Институт БелНИИС». Испытания опытных образцов труб нагружением показывают, что при контрольных нагрузках по трещиностойкости трещины в опасных сечениях труб либо вообще не образуются, либо ширина их раскрытия существенно меньше допускаемой. И, если для традиционных труб (второй и третьей групп по несущей способности) определяющим является расчет по прочности, то для труб четвертой и пятой групп - по несущей способности, а также для труб, предназначенных для эксплуатации в агрессивной среде – расчет по трещиностойкости.

Таким образом, на наш взгляд, требуется разработка новых или корректировка существующих методик расчета ширины раскрытия трещин, применительно к железобетонным безнапорным трубам и другим изгибаемым элементам, имеющим начальные кривизны.

2. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ РАСЧЕТА ШИРИНЫ РАСКРЫТИЯ ТРЕЩИН В ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ТРУБАХ

На наш взгляд, данная задача более точно может быть решена с использованием методов численного моделирования. С учетом того, что труба, как в условиях эксплуатации, так и при проведении испытаний нагружением находится в условиях плоской деформации, данная задача легко реализуется, например, с помощью, конечно-элементной расчетной модели. Аналогичный подход был использован при расчете железобетонных полушпал [8].

На рис. 1 представлен фрагмент расчетной конечно-элементной модели железобетонной безнапорной трубы диаметром 1000 мм пятой группы по несущей способности с толщиной стенки 130 мм. Труба армирована двумя цилиндрическими каркасами с рабочей (спиральной) арматурой диаметром 8 мм класса S500, навитой с шагом 80 мм, проектный класс бетона C25/30.

Исходными данными для составления конечно-элементной модели являются геометрические размеры трубы и арматурного каркаса. Для моделирования бетона использованы объемные элементы размером 10x10x10 мм, жестко сопряженные между собой, а для моделирования арматуры – стержневые элементы длиной 10 мм, жестко сопряженные между собой и с объемными элементами (по узлам), см. рис. 2. Деформационные характеристики элементов заданы диаграммами деформирования бетона и арматуры.

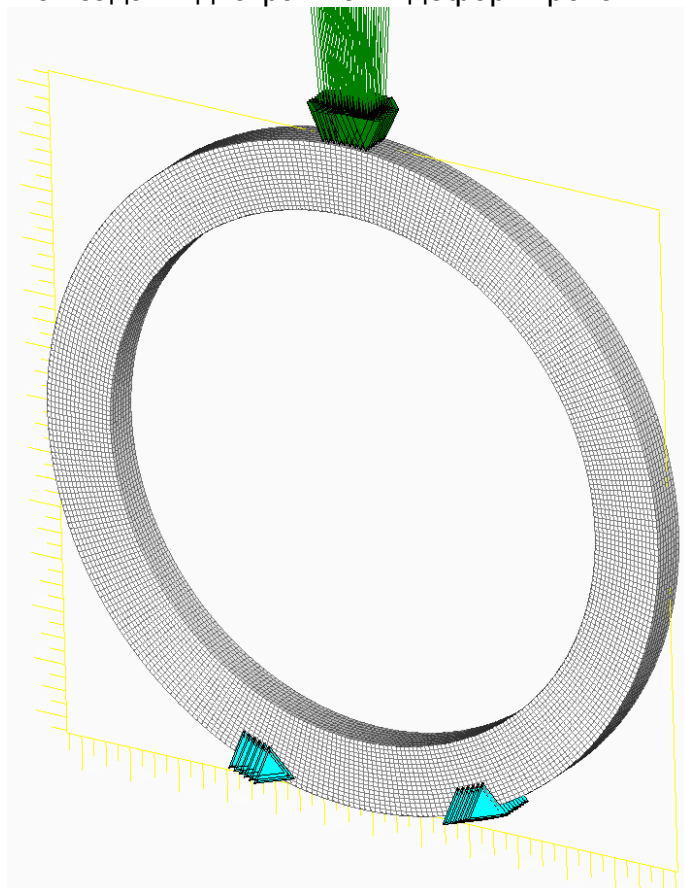


Рисунок 1. Расчетная модель фрагмента трубы

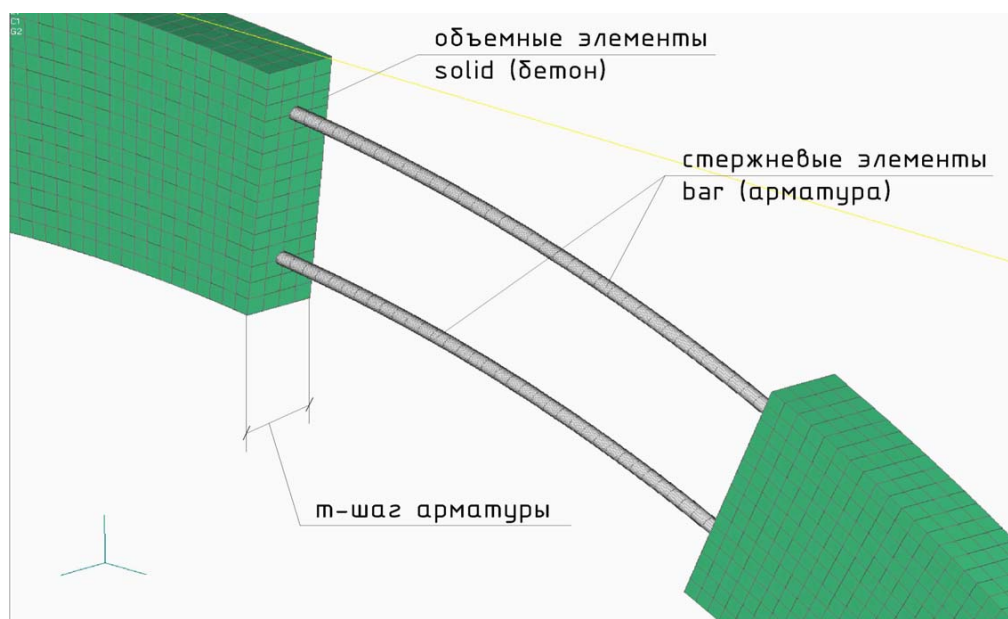


Рисунок 2. Конечно-элементная модель стенки трубы

Внешняя нагрузка задавалась в виде вертикальных сосредоточенных сил, приложенных в узлах модели в пределах шага спирали. Условия закрепления моделировали с использованием шарнирно-подвижных и шарнирных опор, размещенных в соответствии со схемой испытаний трубы при нагружении.

Нагрузку прикладывали ступенями, принятыми при испытании трубы. На каждой ступени нагружения удаляли бетонные элементы, деформации растяжения которых превысили предельные $\approx 0,15\%$ (получены экспериментальным путем) и производили повторный перерасчет.

На рис. 3 представлена мозаика напряжений, возникающих в опасных (продольных) сечениях фрагмента шелыги трубы на различных ступенях нагружения.

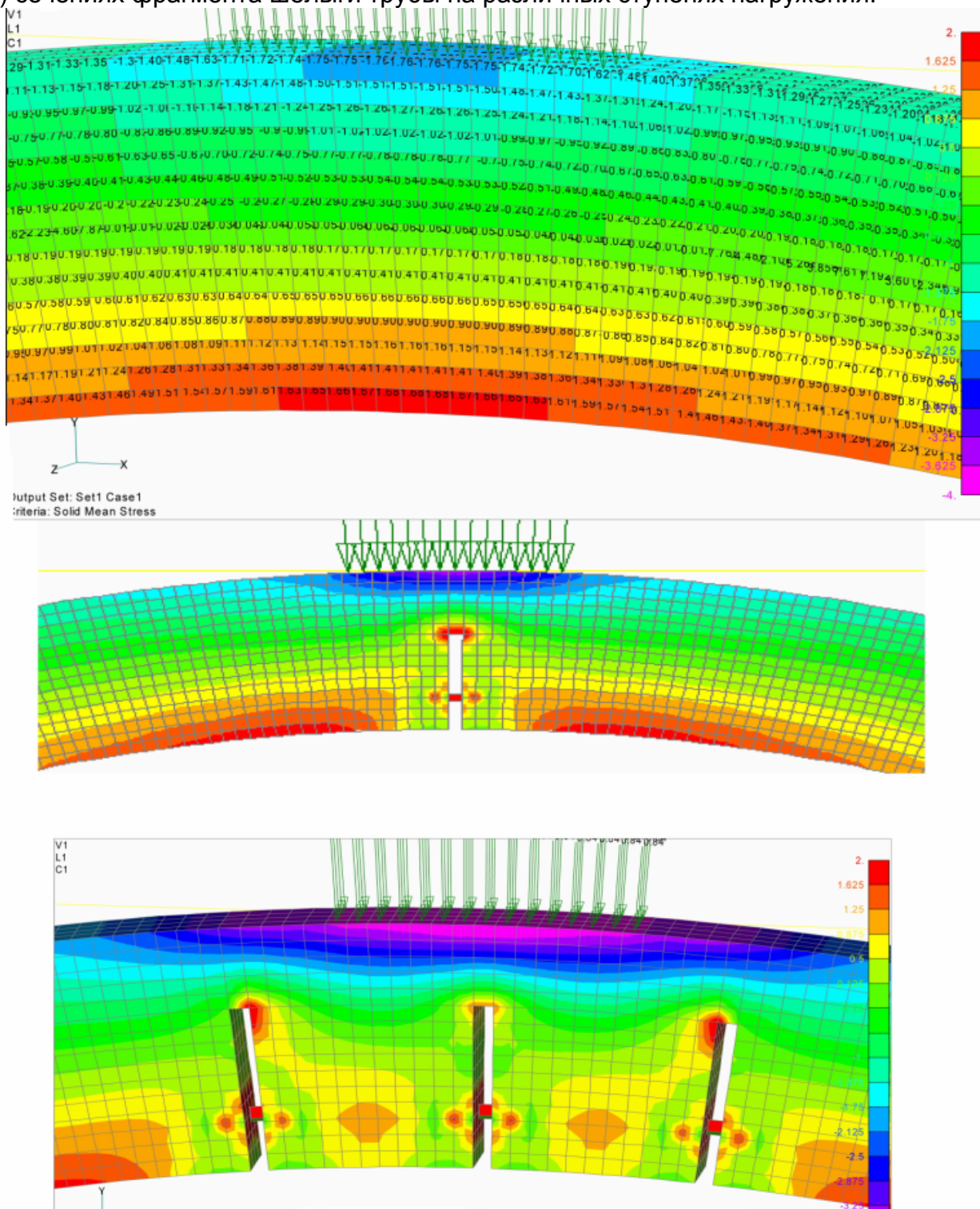


Рисунок 3. Мозаика напряжений в опасных сечениях стенки трубы.

Для сравнительного анализа приведем результаты испытаний опытных образцов

железобетонных труб диаметром 1000 мм и 2000 мм на прочность и трещиностойкость. Трубы армированы двойными спирально-продольными каркасами. В качестве рабочей (спиральной) арматуры использована арматура класса S500. Испытания труб произведены нагружением по трехлинейной схеме (см. фото на рис. 4). Нагрузку прикладывали ступенями. На каждой ступени нагружения производили измерения изменений вертикального и горизонтального диаметров трубы, а также ширины раскрытия трещин в шельге (наиболее загруженное сечение), см. фото на рис. 5.



Рисунок 4. Испытание трубы марки ТБ100.25-5 нагружением



Рисунок 5. Внешний вид трещин в шельге трубы

Испытания показали, что у всех образцов первые трещины образовались в шельге трубы при нагрузках, превышающих контрольную по трещиностойкости, что обусловлено высокой прочностью вибропрессованного бетона на растяжение.

Что касается перемещений (изменений вертикального и горизонтального диаметров трубы), то значения перемещений, полученные из расчетной модели, отличаются от данных эксперимента не более, чем на 10%, что подтверждает адекватность представленной расчетной модели.

В таблице 2 представлены сравнительные результаты расчетов (по различным методикам) и экспериментальные значения ширины раскрытия трещин в опасном сечении (шельге) железобетонных безнапорных труб диаметром 1000 и 2000 мм на различных ступенях нагружения. Технические характеристики труб приведены в табл. 3.

Таблица 2

Нагрузка, кН/м	Ширина раскрытия трещин согласно различным методикам				
	СНиП 2.03.01-84*	СНБ 5.03.01-02	СНиП 2.05.03-84	Опытные данные	Расчетная модель
Труба ТБ 100.25-5					
115	0,19	0,20	0,23	0,1	0,12
135	0,23	0,25	0,26	0,2	0,21
155	0,32	0,36	0,37	0,28	0,30
Труба ТБ 200.25-3					
110	0,12	0,13	0,13	0,08	0,09
125	0,27	0,29	0,29	0,2	0,23
140	0,49	0,55	0,56	0,42	0,44

Таблица 3

Марка трубы	h, мм	d, мм	Диаметр и шаг арматуры, мм	Прочн. бетона, МПа	Контр. нагр. по трещин. Р, кН/м	Расчетн. Знач. $a_{срс}$	Нагрузка Р кН/м при $a_{срс} = 0,2$ мм
ТВ100.25-2	130	95	8 x 80	37,8	105,2	0,19	191,3
ТБ200.25-3	150	120	8 x 40	38,3	94,6	0,22	125,0

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, предложенная методика расчета ширины раскрытия трещин в железобетонных безнапорных трубах, основанная на использовании трехмерной конечно-элементной модели, наиболее близко соответствует данным эксперимента и может быть рекомендована к применению при проектировании труб.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бетонные и железобетонные конструкции: СНиП 2.03.01-84. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1985.
2. Мосты и трубы: СНиП 2.05.03-85. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1985.
3. Бетонные и железобетонные конструкции: СНБ 5.03.01-02. – Минск: Минстройархитектуры, 2003.
4. Бондаренко, В. М. Расчетные модели силового сопротивления железобетона/ М.М.Бондаренко, В.И.Колчунов. — М.: Издательство АСВ, 2004. — С. 40-64.
5. Мурашов, В.И. Трещиностойкость, жесткость и прочность железобетона.- М.: Машстройиздат, 1950. – 268 с.
6. Холмянский, М.М. Бетон и железобетон: деформативность и прочность/М.М.Холмянский – М.: Стройиздат, 1997. – С. 391-397.
7. ГОСТ 6482- 88. Трубы железобетонные безнапорные. Технические условия. – М.: Издательство стандартов, 1989.
8. Шепелевич, Н.И. Расчет коротких изгибаемых элементов на прочность и трещиностойкость с использованием конечно-элементной модели/ Н.И.Шепелевич, А.Н.Бугаев// Архитектура и строительство. – 2006. – № 4. – С. 102-104.