

Численное исследование нелинейно деформированного состояния подземного железобетонного трубопровода

О.В. Радайкин^{1,2}, Р.Р. Хадиуллина²

¹ Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань

² Казанский государственный энергетический университет, г. Казань

Аннотация: Железобетонные конструкции кольцевого сечения широко используются в строительстве. Например, в виде подземных трубопроводов. Они испытывают сложное нелинейное деформированное состояние, описать которое аналитически составляет сложную математическую задачу механики. Поэтому часто для её решения прибегают к численным методам. В данной статье применён метод конечных элементов, реализованный в ПК «Ли́ра-САПР 2022». нелинейное деформированное состояние железобетонных трубопроводов определяется в физически нелинейной постановке с учётом рассмотрения 4 факторов влияния: внутреннего диаметра, класса бетона, свойств грунта засыпки, свойств грунта основания. Составлен план полного многофакторного численного эксперимента, который включает в себя 81 модель. Получены значения внутренних силовых факторов во всех сечениях подземного трубопровода с учётом варьирования каждого фактора по отдельности и с учётом взаимного их влияния. Установлены сочетания факторов, дающие экстремальные значения внутренних усилий в трубопроводе. На основе этого разработаны рекомендации по рациональному конструированию.

Ключевые слова: подземный трубопровод, железобетон, компьютерное моделирование, продольный профиль, поперечное сечение, ПК «Ли́ра-САПР».

Введение

Конструкции из железобетона кольцевого сечения широко используются в разных сферах строительства [1]. Они могут представлять собой дымовые трубы, подземные напорные и безнапорные трубопроводы [2], сваи и опоры большого диаметра в гидротехнике, опоры для линий электропередач, колонны каркасов зданий и сооружений. Железобетонные трубопроводы широко применяются для транспортировки жидкостей и газов на промышленных объектов нашей страны. Их прочность, жёсткость и трещиностойкость имеют большое значение для обеспечения непрерывности технологических процессов на производстве [3]. В связи с этим оценка нелинейного деформированного состояния трубопроводов с учётом различных факторов влияния является актуальной задачей.

Получить эту оценку аналитически является весьма сложной и порой нерешаемой задачей. Поэтому для этих целей прибегают к компьютерному моделированию в программах на основе метода конечных элементов [4,5].

При этом при построении моделей необходимо отталкиваться от уже наработанного опыта расчёта и конструирования рассматриваемых сооружений [6-8].

В данной статье с применением ПК «Ли́ра-САПР 2022» проведён численный эксперимент по определению нелинейное деформированное состояние подземного трубопровода с варьированием наиболее значимых факторов влияния. Выявлены наиболее нагруженные участки трубопровода в зависимости от сочетания факторов и разработаны рекомендации по его рациональному конструированию.

Материалы и методы

Рассматривается продольный профиль трубопровода (рис. 1) на основе предварительных наших результатов, изложенных в [9].

Модель представляет собой грунтовый массив размером 75х9 метров с трубой, расположенной ниже глубины промерзания. Массив разделён на 2 слоя: основание и засыпка, которые моделируются нелинейными пластинчатыми элементами типа 281 с теорией прочности Кулона-Мора. Параметры грунтов приняты согласно СП 22.13330.2016 «Основания зданий и сооружений». Труба представлена упругим стретчевым конечным элементом типа 10 кольцевого сечения.

Учтены нагрузки от собственного веса грунта и трубопровода, а также нагрузки от транспортных средств типа НК, сближенных двумя тягачами, осуществляющими перевозку тяжеловесных грузов.

План численного эксперимента составлен на основе общих принципов теории планирования эксперимента [10]. Рассмотрено влияние 4-х факторов: 1) вида (жёсткости) грунта засыпки, 2) вида (жёсткости) грунта основания, 3)

диаметр трубопровода и 4) класс бетона его изготовления. План эксперимента предусматривал рассмотрение 81-й модели, параметры которых представлены в табл. 1.

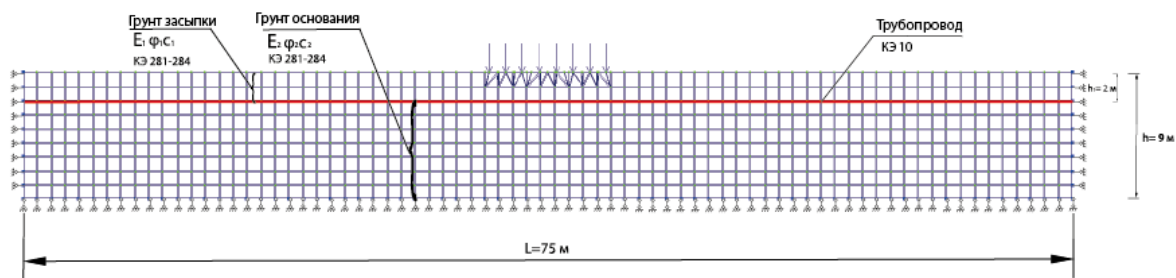


Рис.1. – Модель продольного профиля трубопровода

Таблица №1

План численного эксперимента

№ модели	Грунт засыпки	Грунт основания	Диаметр, мм	Класс бетона, МПа
1	2	3	4	5
1	Пылеватый песок	Супесь	500	B40
2	Пылеватый песок	Суглинок	500	B40
3	Пылеватый песок	Гравелистый песок	500	B40
4	Пылеватый песок	Супесь	1000	B40
5	Пылеватый песок	Суглинок	1000	B40
6	Пылеватый песок	Гравелистый песок	1000	B40
7	Пылеватый песок	Супесь	1600	B40
8	Пылеватый песок	Суглинок	1600	B40
9	Пылеватый песок	Гравелистый песок	1600	B40
10	Мелкий песок	Супесь	500	B40
11	Мелкий песок	Суглинок	500	B40
12	Мелкий песок	Гравелистый песок	500	B40
13	Мелкий песок	Супесь	1000	B40
14	Мелкий песок	Суглинок	1000	B40
15	Мелкий песок	Гравелистый песок	1000	B40
16	Мелкий песок	Супесь	1600	B40
17	Мелкий песок	Суглинок	1600	B40
18	Мелкий песок	Гравелистый песок	1600	B40
19	Гравелистый песок	Супесь	500	B40
20	Гравелистый песок	Суглинок	500	B40
21	Гравелистый песок	Гравелистый песок	500	B40
22	Гравелистый песок	Супесь	1000	B40
23	Гравелистый песок	Суглинок	1000	B40
24	Гравелистый песок	Гравелистый песок	1000	B40
25	Гравелистый песок	Супесь	1600	B40
26	Гравелистый песок	Суглинок	1600	B40



1	2	3	4	5
27	Гравелистый песок	Гравелистый песок	1600	B40
28	Пылеватый песок	Супесь	500	B20
29	Пылеватый песок	Суглинок	500	B20
30	Пылеватый песок	Гравелистый песок	500	B20
31	Пылеватый песок	Супесь	1000	B20
32	Пылеватый песок	Суглинок	1000	B20
33	Пылеватый песок	Гравелистый песок	1000	B20
34	Пылеватый песок	Супесь	1600	B20
35	Пылеватый песок	Суглинок	1600	B20
36	Пылеватый песок	Гравелистый песок	1600	B20
37	Мелкий песок	Супесь	500	B20
38	Мелкий песок	Суглинок	500	B20
39	Мелкий песок	Гравелистый песок	500	B20
40	Мелкий песок	Супесь	1000	B20
41	Мелкий песок	Суглинок	1000	B20
42	Мелкий песок	Гравелистый песок	1000	B20
43	Мелкий песок	Супесь	1600	B20
44	Мелкий песок	Суглинок	1600	B20
45	Мелкий песок	Гравелистый песок	1600	B20
46	Гравелистый песок	Супесь	500	B20
47	Гравелистый песок	Суглинок	500	B20
48	Гравелистый песок	Гравелистый песок	500	B20
49	Гравелистый песок	Супесь	1000	B20
50	Гравелистый песок	Суглинок	1000	B20
51	Гравелистый песок	Гравелистый песок	1000	B20
52	Гравелистый песок	Супесь	1600	B20
53	Гравелистый песок	Суглинок	1600	B20
54	Гравелистый песок	Гравелистый песок	1600	B20
55	Пылеватый песок	Супесь	500	B60
56	Пылеватый песок	Суглинок	500	B60
57	Пылеватый песок	Гравелистый песок	500	B60
58	Пылеватый песок	Супесь	1000	B60
59	Пылеватый песок	Суглинок	1000	B60
60	Пылеватый песок	Гравелистый песок	1000	B60
61	Пылеватый песок	Супесь	1600	B60
62	Пылеватый песок	Суглинок	1600	B60
63	Пылеватый песок	Гравелистый песок	1600	B60
64	Мелкий песок	Супесь	500	B60
65	Мелкий песок	Суглинок	500	B60
66	Мелкий песок	Гравелистый песок	500	B60
67	Мелкий песок	Супесь	1000	B60
68	Мелкий песок	Суглинок	1000	B60
69	Мелкий песок	Гравелистый песок	1000	B60
70	Мелкий песок	Супесь	1600	B60
71	Мелкий песок	Суглинок	1600	B60
72	Мелкий песок	Гравелистый песок	1600	B60
73	Гравелистый песок	Супесь	500	B60
74	Гравелистый песок	Суглинок	500	B60
75	Гравелистый песок	Гравелистый песок	500	B60

1	2	3	4	5
76	Гравелистый песок	Супесь	1000	B60
77	Гравелистый песок	Суглинок	1000	B60
78	Гравелистый песок	Гравелистый песок	1000	B60
79	Гравелистый песок	Супесь	1600	B60
80	Гравелистый песок	Суглинок	1600	B60
81	Гравелистый песок	Гравелистый песок	1600	B60

Результаты исследования

Вначале было изучено прямое влияние рассматриваемых 4-х факторов на нелинейное деформированное состояние трубопровода. В табл. 2 приведены результаты для тех моделей, в которых возникают максимальные и минимальные значения внутренних усилий.

Таблица №2

Максимальные и минимальные значения усилий в трубопроводе

Параметр	Максимальные значения	Минимальные значения
Продольная сила, кН:		
Растягивающая	494,1 (46 модель)	298,0 (7 модель)
Сжимающая	-110,3 (39 модель)	-142,1 (25 модель)
Изгибающий момент, кН·м :		
Положительный	3514,3 (7 модель)	172,8 (39 модель)
Отрицательный	-111,7 (39 модель)	-1030,4 (7 модель)
Поперечная сила, кН:		
Положительная	547,3 (7 модель)	93,6 (39 модель)
Отрицательная	-93,6 (39 модель)	-547,3 (7 модель)

На рис. 2 и 3 показаны эпюры изгибающих моментов в моделях трубопровода №7 и 39 соответственно. Их сравнительный анализ показывает, что увеличение жёсткости грунта основания и снижение жёсткости сечения самого трубопровода приводит к уменьшению в нём изгибающих моментов почти в 3,5 раза, а также к более равномерному их распределению по длине

трубы. Это в конечном счёте способствует снижению материалоемкости труб при их изготовлении.

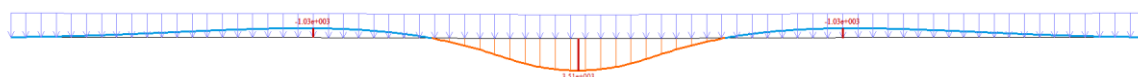


Рис.2. – Эпюра изгибающих моментов в модели трубопровода №7

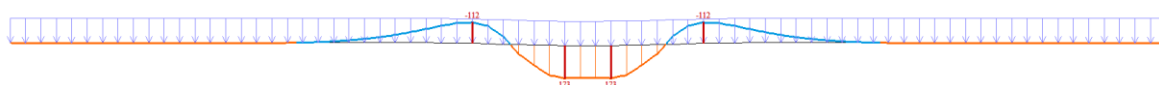


Рис. 3. – Эпюра изгибающих моментов в модели трубопровода №39

Далее для изучения корреляционных взаимосвязей факторов было рассмотрено влияние одного фактора на влияние остальных трёх факторов (см. табл. 3-6).

Таблица №3

Степень влияния в % увеличения внутреннего диаметра трубопровода d на внутренние усилия в его расчётных сечениях при изменении остальных трёх факторов

Грунты засыпки и основания	$N_{сж}$, кН	$N_{раст}$, кН	$M_{уmax}$, кН*м	$M_{уmin}$, кН*м	Q_{zmax} , кН	Q_{zmin} , кН	Класс бетона
1	2	3	4	5	6	7	8
Пылеватый песок, супесь	-30,21	16,05	421,58	261,81	167,12	167,12	B20
	-30,77	18,86	379,91	220,42	146,11	146,11	B40
	-15,34	3,33	128,84	97,30	68,65	68,65	B60
Пылеватый песок, суглинок	-8,33	7,69	664,20	392,65	253,93	253,93	B20
	-9,94	7,45	586,79	348,09	229,41	229,41	B40
	-10,47	7,43	562,98	335,88	221,20	221,20	B60
Пылеватый песок, гравелистый песок	-2,61	8,69	775,81	428,82	282,03	282,03	B20
	-4,41	8,11	690,48	390,39	257,99	257,99	B40
	-5,01	7,97	660,75	380,84	249,73	249,73	B60
Мелкий песок, супесь	-34,38	20,27	441,55	282,07	177,30	177,30	B20
	-35,05	24,55	396,10	235,02	154,43	154,43	B40
	-17,62	4,40	133,79	103,37	72,34	72,34	B60

1	2	3	4	5	6	7	8
Мелкий песок, суглинок	-11,50	7,42	680,30	407,95	261,39	261,39	B20
	-13,10	7,25	600,01	360,70	235,74	235,74	B40
	-13,61	7,26	575,31	347,76	227,17	227,17	B60
Мелкий песок, гравелистый песок	-5,11	8,53	789,20	442,86	288,71	288,71	B20
	-6,93	7,88	700,88	402,43	263,70	263,70	B40
	-7,51	7,73	670,58	392,29	255,15	255,15	B60
Гравелистый песок, супесь	-35,06	21,15	445,41	286,11	179,29	179,29	B20
	-35,77	25,73	399,24	237,92	156,06	156,06	B40
	-17,99	4,61	134,75	104,56	73,06	73,06	B60
Гравелистый песок, суглинок	-12,08	7,40	683,56	410,92	262,86	262,86	B20
	-13,71	7,20	602,79	363,22	236,99	236,99	B40
	-14,23	7,22	577,94	350,15	228,35	228,35	B60
Гравелистый песок, гравелистый песок	-6,62	6,38	607,23	358,72	239,07	239,07	B20
	-7,48	7,81	703,60	404,88	264,81	264,81	B40
	-8,08	7,66	673,15	394,62	256,20	256,20	B60

По данным таблицы 3 сделаны следующие выводы:

1. При увеличении внутреннего диаметра трубопровода с 500 мм до 1600 мм в моделях с наименьшей жёсткостью грунта основания и максимальной и средней жёсткостью грунта засыпки в сочетании с минимальным или средним классом бетона трубопровода значение сжимающей продольной силы $N_{сж}$ уменьшается на 34,38-35,77 %.

2. При указанном в п. 1 сочетании факторов было выявлено увеличение растягивающей продольной силы $N_{раст}$ на 20,27-25,27 %, что тем не менее, меньше, чем снижается $N_{сж}$, поэтому в целом конструктивные мероприятия, приведённые в п. 1 благотворно сказываются на несущей способности трубопровода и приводят к снижению расхода материалов.

3. При увеличении внутреннего диаметра трубопровода с 500 мм до 1600 мм в моделях с максимально жёсткими грунтами основания, малой и средней жёсткости грунта засыпки, и наименьшим классом бетона трубопровода изгибающие моменты $M_{уmax}$ и $M_{уmin}$ показывали наибольший рост – до 9 раз, что неблагоприятно сказывается на несущей способности трубопровода и приводят к повышенному расходу материалов.

4. В целом для рационального проектирования трубопровод рекомендуется принимать для них класс бетона В20-В40, грунт основания максимально жёсткий, а грунт засыпки – с любыми характеристиками, но не ниже минимальных требований норм.

Таблица №4

Степень влияния в % увеличения класса бетона трубопровода на внутренние усилия в его расчётных сечениях при изменении остальных трёх факторов

Грунты засыпки и основания	$N_{сж},$ кН	$N_{раст},$ кН	$M_{уmax},$ кН*м	$M_{уmin},$ кН*м	$Q_{zmax},$ кН	$Q_{zmin},$ кН	Внутренний диаметр
1	2	3	4	5	6	7	8
Пылеватый песок, супесь	-2,80	0,71	27,77	22,73	17,81	17,81	500
	-3,88	1,82	19,54	15,46	11,13	11,13	1000
	17,91	-10,33	-43,94	-33,07	-25,62	-25,62	1600
Пылеватый песок, суглинок	0,61	1,83	35,20	27,77	20,06	20,06	500
	8,52	-6,70	-61,49	-52,17	-42,68	-42,68	1000
	-1,74	1,58	17,30	13,05	8,95	8,95	1600
Пылеватый песок, гравелистый песок	1,45	2,41	36,41	25,31	20,25	20,25	500
	0,67	2,20	26,77	20,61	16,48	16,48	1000
	-1,05	1,74	18,49	13,94	10,08	10,08	1600
Мелкий песок, супесь	-3,24	0,73	28,68	24,35	18,62	18,62	500
	-4,52	2,26	19,99	16,10	11,56	11,56	1000
	21,47	-12,55	-44,45	-33,81	-26,28	-26,28	1600
Мелкий песок, суглинок	0,41	1,94	35,62	28,37	20,46	20,46	500
	-0,66	1,76	24,97	19,55	15,50	15,50	1000
	-1,99	1,79	17,37	13,17	9,05	9,05	1600
Мелкий песок, гравелистый	1,33	2,54	36,80	25,78	20,58	20,58	500
	0,39	2,23	26,99	20,88	16,70	16,70	1000
	-1,24	1,78	18,55	14,06	10,17	10,17	1600
Гравелистый песок, супесь	-3,34	0,77	28,85	24,66	18,77	18,77	500
	-4,63	2,34	20,07	16,22	11,65	11,65	1000
	22,07	-12,99	-44,54	-33,95	-26,41	-26,41	1600
Гравелистый песок, суглинок	0,38	1,96	35,69	28,47	20,53	20,53	500
	-0,72	1,48	25,02	19,65	15,55	15,55	1000
	-2,08	1,79	17,40	13,19	9,07	9,07	1600
Гравелистый песок, гравелистый песок	0,27	0,57	8,47	5,81	4,89	4,89	500
	0,35	2,24	27,04	20,93	16,74	16,74	1000
	-1,30	1,78	18,58	14,09	10,19	10,19	1600

По данным таблицы 4 сделаны следующие выводы:

1. При увеличении класса бетона трубопровода с В20 до В60 в моделях с наименее жёстким грунтом основания в сочетании с наибольшим внутренним диаметром трубопровода значение сжимающей продольной силы $N_{сж}$ увеличивается до 22,07 %, а значение растягивающей продольной силы $N_{раст}$ при этом снижается, но в меньшей степени – до 12,99 %. По этому силовому фактору получается, что класс бетона трубопровода повышать не рекомендуется, принимая его в пределах В20-В40.

2. При увеличении класса бетона трубопровода с В20 до В60 в моделях со слабым грунтом засыпки и средним по жёсткости грунтом в основании и со средним внутренним диаметром трубы (1000 мм) значения изгибающих моментов в трубопроводе уменьшается до 61,49%. Также в данном случае наблюдается значительное уменьшение поперечных сил – на 42,68 %.

3. В целом для рационального проектирования трубопровод рекомендуется принимать для них класс бетона В20-В40 (не выше), грунт основания средней и максимально жёсткий, а грунт засыпки – минимальной жёсткости. При этом оптимальный диаметр трубы составляет 1000 мм.

Таблица №5

Степень влияния в % увеличения жёсткости грунта засыпки на внутренние усилия в расчётных сечениях трубопровода при изменении остальных трёх факторов

Диаметр, класс бетона	$N_{сж}$, кН	$N_{раст}$, кН	$M_{уmax}$, кН*м	$M_{уmin}$, кН*м	Q_{zmax} , кН	Q_{zmin} , кН	Грунт основания
1	2	3	4	5	6	7	8
500, В20	12,44	-2,07	-4,76	-6,93	-4,83	-4,83	Супесь
	6,42	-0,72	-2,73	-4,06	-2,85	-2,85	Суглинок
	5,91	1,28	23,59	14,74	12,26	12,26	Гравелистый песок
500, В40	11,99	-2,04	-4,15	-5,66	-4,25	-4,25	Супесь
	6,24	-0,61	-2,47	-3,65	-2,56	-2,56	Суглинок
	4,72	-0,57	-1,77	-3,22	-2,16	-2,16	Гравелистый песок

1	2	3	4	5	6	7	8
500, B60	11,81	-2,01	-3,95	-5,46	-4,06	-4,06	Супесь
	6,17	-0,59	-2,38	-3,53	-2,46	-2,46	Суглинок
	4,68	-0,53	-1,73	-3,12	-2,08	-2,08	Гравелистый песок
1000, B20	9,15	-1,31	-1,91	-2,62	-2,01	-2,01	Супесь
	13,79	-9,10	-69,49	-60,62	-	-50,95	Суглинок
	3,45	-0,69	-0,96	-1,61	-1,21	-1,21	Гравелистый песок
1000, B40	8,53	-0,93	-1,58	-2,08	-1,66	-1,66	Супесь
	4,23	-0,85	-1,01	-1,56	-1,18	-1,18	Суглинок
	3,21	-0,65	-0,80	-1,42	-1,04	-1,04	Гравелистый песок
1000, B60	8,31	-0,80	-1,47	-1,98	-1,55	-1,55	Супесь
	4,11	-1,13	-0,95	-1,49	-1,12	-1,12	Суглинок
	3,12	-0,65	-0,75	-1,35	-0,98	-0,98	Гравелистый песок
1600, B20	4,62	2,24	-0,41	-0,68	-0,49	-0,49	Супесь
	2,06	-0,99	-0,27	-0,50	-0,40	-0,40	Суглинок
	1,55	-0,87	-0,20	-0,46	-0,37	-0,37	Гравелистый песок
1600, B40	3,91	3,63	-0,29	-0,51	-0,38	-0,38	Супесь
	1,80	-0,84	-0,20	-0,40	-0,31	-0,31	Суглинок
	1,36	-0,84	-0,14	-0,36	-0,29	-0,29	Гравелистый песок
1600, B60	8,31	-0,80	-1,47	-1,98	-1,55	-1,55	Супесь
	1,72	-0,78	-0,17	-0,38	-0,29	-0,29	Суглинок
	1,29	-0,82	-0,13	-0,34	-0,27	-0,27	Гравелистый песок

По данным таблицы 5 сделаны следующие выводы:

1. Увеличение жёсткости грунта засыпки оказывает незначительное влияние на внутренние усилия в сечениях трубопровода в моделях со средним и наибольшим внутренним диаметром.

2. При проектировании трубопровода среднего диаметра и наименьшего класса бетона В20 целесообразнее использовать грунт в основании средней жёсткости, а грунт засыпки – наименьшей жёсткости.

По данным таблицы 6 сделаны следующие выводы:

1. Увеличение жёсткости грунта основания приводит к снижению изгибающих моментов.

2. Рекомендуется использовать грунт основания с наибольшей жёсткостью. При этом увеличение жёсткости грунта засыпки оказывает незначительное влияние.

Таблица №6

Степень влияния в % увеличения жёсткости грунта основания на внутренние усилия в расчётных сечениях трубопровода при изменении остальных трёх факторов

Диаметр, класс бетона	$N_{сж}$, кН	$N_{раст}$, кН	$M_{уmax}$, кН*м	$M_{уmin}$, кН*м	Q_{zmax} , кН	Q_{zmin} , кН	Грунт засыпки
500, В20	-29,04	-3,27	-71,15	-58,37	-51,39	-51,39	Пылеватый песок
	-33,16	-2,14	-70,45	-57,10	-50,35	-50,35	Мелкий песок
	-33,16	0,04	-62,56	-48,67	-42,66	-42,66	Гравелистый песок
500, В40	-26,74	-2,01	-69,80	-57,58	-50,69	-50,69	Пылеватый песок
	-30,80	-0,79	-69,16	-56,66	-49,79	-49,79	Мелкий песок
	-31,50	-0,53	-69,05	-56,48	-49,61	-49,61	Гравелистый песок
500, В60	-25,94	-1,63	-69,19	-57,49	-50,38	-50,38	Пылеватый песок
	-30,00	-0,39	-68,58	-56,60	-49,53	-49,53	Мелкий песок
	-30,66	-0,15	-68,48	-56,43	-49,36	-49,36	Гравелистый песок
1000, В20	-17,36	-3,23	-61,76	-51,61	-44,20	-44,20	Пылеватый песок
	-21,06	-2,73	-61,44	-51,19	-43,82	-43,82	Мелкий песок
	-21,68	-2,62	-61,39	-51,11	-43,75	-43,75	Гравелистый песок
1000, В40	-14,44	-2,92	-60,03	-49,81	-42,22	-42,22	Пылеватый песок
	-18,03	-2,70	-59,75	-49,52	-41,92	-41,92	Мелкий песок
	-18,63	-2,65	-59,72	-49,47	-41,86	-41,86	Гравелистый песок
1000, В60	-13,44	-2,87	-59,45	-49,45	-41,52	-41,52	Пылеватый песок
	-17,00	-2,75	-59,18	-49,18	-41,24	-41,24	Мелкий песок
	-17,59	-2,72	-59,15	-49,13	-41,18	-41,18	Гравелистый песок
1600, В20	-0,98	-9,40	-51,55	-39,15	-30,47	-30,47	Пылеватый песок
	-3,34	-11,69	-51,48	-39,04	-30,40	-30,40	Мелкий песок
	-3,88	-12,15	-51,45	-39,02	-30,38	-30,38	Гравелистый песок
1600, В40	1,15	-10,87	-50,25	-35,07	-28,28	-28,28	Пылеватый песок
	-0,84	-14,07	-50,21	-35,00	-28,23	-28,23	Мелкий песок
	-1,33	-14,70	-50,18	-34,98	-28,22	-28,22	Гравелистый песок
1600, В60	-16,90	2,79	2,41	3,60	2,89	2,89	Пылеватый песок
	-21,41	2,78	3,56	5,05	4,00	4,00	Мелкий песок
	-22,28	2,77	3,81	5,34	4,23	4,23	Гравелистый песок

Обсуждение и заключения

Проведённый многофакторный численный эксперимент с применением ПК «Ли́ра-САПР 2022», план которого включал варьирование 4-х факторов и 81 модель подземного железобетонного трубопровода.

Проведённое исследование показало, что выбор параметров грунта основания и засыпки, диаметра и класс бетона труб существенно влияет на нелинейное деформированное состояние подземных железобетонных трубопроводов. Полученные результаты позволяют оптимизировать конструкцию рассматриваемых сооружений при проектировании.

По результатам исследования предложены следующие практические рекомендации к проектированию железобетонных трубопроводов:

1. Рекомендуется применять трубы небольшого внутреннего диаметра (500 мм), изготавливаемые из бетона классов В20...В40, в основании трубопроводов использовать грунты максимально возможной жёсткости исходя из возможностей на конкретном объекте проектирования (по классификации СП 35.13330.2011 это грунты с коэффициентом жёсткости основания в пределах $9800 < C \leq 19600 \text{ кН/м}^3$). При этом не рекомендуется применять трубы малого внутреннего диаметра из более прочного бетона В60 на грунте в основании с высокой жёсткостью.

2. При слабых грунтах в пределах сжимаемой толщи основания ($1960 < C \leq 3920 \text{ кН/м}^3$) рекомендуется использовать трубы высокой жёсткости – большого диаметра (1600 мм) и из бетона В60.

3. Рекомендуется проектировать трубопровод с внутренним диаметром 500-1000 мм из бетона класса В20 при следующих грунтовых условиях: грунт в основании средней жёсткости ($3920 < C \leq 5880 \text{ кН/м}^3$), грунт засыпки – с минимальными характеристиками, но не ниже указанных в нормах ($1960 \text{ кН/м}^3 < C$).

4. Рекомендуется не увеличивать жёсткость грунта основания при использовании труб с большим внутренним диаметром (1600 мм) из бетона В60.

Литература

1. Чувашов А.Ю. Формы поперечного сечения и внутренней поверхности труб, используемых для трубопроводов на сетях водоотведения // Концепции современного образования: вопросы теории и практики: Сборник научных трудов. – Казань: ООО "СитИвент", 2020. С. 264-267.
 2. Ксенофонтова Т.К. Оценка влияния отпора грунта и физической нелинейности железобетона при расчете подземных сборных железобетонных трубопроводов для воды // Природообустройство. 2021. №1. С. 29-36.
 3. Ракитин Б.А., Ивашенко Ю.А., Сабуров В.Ф. Испытания подземных трубопроводов на воздействие различных видов транспортных нагрузок // Современные проблемы науки и образования. 2013. №3. С. 33.
 4. Ксенофонтова Т.К., Цуй Юй Выбор оптимального угла охвата подземной железобетонной трубы при ее опоре на фундамент // Природообустройство. 2013. №1. с.47-50.
 5. Файзуллина Э.В., Паршикова М.А., Гулин Д.А., Султанмагомедов Т.С., Султанмагомедов С.М., Насибуллин Т.Р. Напряженно-деформированное состояние трубопровода, проложенного на участках распространения пучинистых грунтов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2022. №9. С. 168-177.
 6. Qiang Zheng, Qian Xu, Zekai Shu, Di Yang, Weiwang Chen, Nevzat Akkurt, et al. A review of advances in mechanical behaviors of the underground energy transmission pipeline network under loads // Gas Science and Engineering. 2023. №117. URL: [researchgate.net/publication/372587695_A_review_of_advances_in_mechanical_b](https://www.researchgate.net/publication/372587695_A_review_of_advances_in_mechanical_b)
-

ehaviors_of_the_underground_energy_transmission_pipeline_network_under_load
s

7. Zhenmian Li, Jianxing Yu, Yang Yu, Xin Liu, Zhenglong Yang, Xiaowei Liu, Zhiwei Zhang Deformation analysis of buried subsea pipeline under different pressure-reverse fault displacement loading paths // Thin-Walled Structures. 2023. №185. URL:

researchgate.net/publication/369697379_Deformation_analysis_of_buried_subsea_pipeline_under_different_pressure-reverse_fault_displacement_loading_paths

8. Широков В.С. О грунтовых и транспортных нагрузках на подземные трубопроводы // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2018. №2. Сс. 31-34.

9. Хадиуллина Р.Р Изучение влияния конструктивных параметров и грунтовых условий на распределение внутренних усилий в подземном железобетонном напорном трубопроводе // Молодой исследователь: вызовы и перспективы: Сборник статей по материалам CCCLXVII международной научно-практической конференции. М.: Общество с ограниченной ответственностью "Интернаука", 2024. С. 75-85.

10. Никишеночкин А.П., Никишечкин П.А. Планирование эксперимента: учебное пособие. - Москва; Вологда: Инфра – Инженерия, 2024. С.152.

References

1. Chuvashov A.Yu. Konceptii sovremennogo obrazovaniya: voprosy` teorii i praktiki: Sbornik nauchny`x trudov. Kazan`: ООО SitIvent, 2020. Pp. 264-267.

2. Ksenofontova T.K. Prirodoobustrojstvo. 2021. №1. Pp. 29-36.

3. Rakitin B.A., Ivashenko Yu.A., Saburov V.F. Sovremennyy`e problemy` nauki i obrazovaniya. 2013. №3. P. 33.

4. Ksenofontova T.K., Czuj Yuj. Prirodoobustrojstvo. 2013. №1. pp.47-50.

5. Fajzullina E`V., Parshikova M.A., Gulin D.A., Sultanmagomedov T.S., Sultanmagomedov S.M., Nasibullin T.R. Izvestiya Tomskogo politexnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov. 2022. №9. pp. 168-177.

6. Qiang Zheng, Qian Xu, Zekai Shu, Di Yang, Weiwang Chen, Nevzat Akkurt, et al. Gas Science and Engineering. 2023. №117. URL: researchgate.net/publication/372587695_A_review_of_advances_in_mechanical_behaviors_of_the_underground_energy_transmission_pipeline_network_under_loads

7. Zhenmian Li, Jianxing Yu, Yang Yu, Xin Liu, Zhenglong Yang, Xiaowei Liu, Zhiwei Zhang. Thin-Walled Structures. 2023. №185. URL: researchgate.net/publication/369697379_Deformation_analysis_of_buried_subsea_pipeline_under_different_pressure-reverse_fault_displacement_loading_paths

8. Shirokov V.S. Osnovaniya, fundamenty` i mexanika gruntov. 2018. №2. pp. 31-34.

9. Xadiullina R.R. Izuchenie vliyaniya konstruktivny`x parametrov i gruntovy`x uslovij na raspredelenie vnutrennix usilij v podzemnom zhelezobetonnom napornom truboprovode. Molodoj issledovatel`: vy`zovy` i perspektivy`: Sbornik statej po materialam CCCLXVII mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. M.: Obshhestvo s ogranichennoj otvetstvennost`yu Internauka, 2024. pp. 75-85.

10. Nikishenchkin A.P., Nikishechkin P.A. Planirovanie e`ksperimenta: uchebnoe posobie, [Experiment planning: a tutorial] Moskva; Vologda :Infra Inzheneriya, 2024. P. 152.

Авторы согласны на обработку и хранение персональных данных.

Дата поступления: 20.11.2025

Дата публикации: 26.12.2025