
Методология численного эксперимента прокладки коллекторов под автомагистралями закрытым способом

Е.А. Муравьева, А.В. Манько

ФГБОУ ВО НИ Московский государственный строительный университет

Аннотация: Разработана методология численного эксперимента прокладки закрытым способом методами горизонтально-направленного бурения, бурошнековое бурение, продавливание, микротоннелирование. Приведены некоторые особенности возведения футляров для проходки коллекторами под действующими автомагистралями, включая общие сведения о применяемых материалах футляров. Произведен выбор управляемых факторов и планирования эксперимента, проверки устойчивости системы, анализа достоверности результатов.

Ключевые слова: коллектор, методология численного эксперимента, микротоннелирование, горизонтальное направленное бурение, бурошнековое бурение, прокол, продавливание, автомагистраль, футляр, железобетон, металлические трубы.

Общие сведения о футлярах для коллекторов

В соответствии с СТО НОСТРОЙ 2.16.65-2012 «Коллекторы для инженерных коммуникаций», СП 42.13330.2016 «Планировка и застройка городских и сельских поселений», СП 265.1325800.2016 «Коллекторы коммуникационные» для возведения коллекторов закрытым способом через автодорожные полотна используют футляры. По технологии строительства футляры коллекторов могут прокладываться следующими способами: прокол или бурошнековое бурение (БШБ); горизонтально-направленное бурение (ГНБ); продавливание [1, 2]. Футляры для коллекторов могут быть железобетонные или металлические, но чаще всего применяют металлические футляры. В нормативных документах и научных работах по проектированию и строительству коллекторов нет указаний, при каких условиях какой материал футляра использовать [3, 4].

Металлический футляр коллекторов представляет собой металлическую трубу с толщиной стенки от 8 мм до 25 мм: сварные спиралешовные, сварные прямошовные и бесшовные цельнотянутые трубы. Бесшовные трубы применяются для футляров только диаметром до 273 мм.

Во всех остальных случаях можно применять прямошовные и спиралешовные трубы.

В таблице 1 даны минимально необходимые размеры металлических футляров.

Таблица № 1

Требуемые размеры металлических футляров

| Наружный диаметр, мм | | Толщина стенки металлического футляра, мм | |
|------------------------------------|---------|---|--------------|
| Максимальный рабочего трубопровода | Футляра | Минимальная | Максимальная |
| 159 | 325 | 8 | 9 |
| 219 | 377 | 9 | 10 |
| 273 | 426 | 9 | 11 |
| 325 | 530 | 9 | 12 |
| 426 | 630 | 10 | 12 |
| 530 | 720 | 10 | 12 |
| 630 | 820 | 10 | 12 |
| 720 | 920 | 10 | 12 |
| 820 | 1020 | 10 | 14 |
| 920 | 1220 | 10 | 14 |
| 1020 | 1220 | 10 | 14 |
| 1220 | 1420 | 11 | 14 |
| 1420 | 1620 | 14 | 16 |

При определении длины футляра коллектора учитывается ширина дорожного полотна или железнодорожной насыпи, а также размер стартовых шахт (при необходимости). Максимальная длина футляров, в зависимости от технологии проходки, составляет от 60 до 400 метров [5].

Железобетонный футляр коллектора применяется в основном при траншейном способе строительства, поэтому в данной статье эти конструкции рассматриваться не будут. Также железобетонная обделка применяется при микротоннелировании, которое в рамках данной статьи также не рассматривается.

Железобетонные футляры для закрытого способа проходки применяются по ГОСТ 20054-82 и ГОСТ 6482-2011, максимальной длиной до 40 м.

В таблице 2 и 3 даны размеры основных железобетонных футляров [6].

Таблица № 2

Размеры основных железобетонных футляров по ГОСТ 20054-82

| Тип трубы | Внутренний диаметр, мм | Внешний диаметр, мм | Длина одного звена, мм |
|-----------|------------------------|---------------------|------------------------|
| ТБ 40.15 | 400 | 550 | 1600 |
| | 400 | 530 | 1600 |
| | 400 | 510 | 1600 |
| ТБ 50.20 | 500 | 670 | 2100 |
| | 500 | 650 | 2100 |
| | 500 | 630 | 2100 |
| ТБ 60.20 | 600 | 790 | 2100 |
| | 600 | 770 | 2100 |
| | 600 | 750 | 2100 |
| ТБ 80.20 | 800 | 1040 | 2110 |
| | 800 | 1010 | 2110 |
| | 800 | 990 | 2110 |
| ТБ 100.20 | 1000 | 1290 | 2110 |
| | 1000 | 1250 | 2110 |
| | 1000 | 1230 | 2110 |
| | 1000 | 1210 | 2110 |

Таблица № 3

Размеры основных железобетонных футляров по ГОСТ 6482-2011

| Тип трубы | Внутренний диаметр, мм | Толщина стенки, мм | Длина одного звена, мм |
|---------------|------------------------|--------------------|------------------------|
| Т | 300 | 45 | 2000 |
| ТБ | 400 | 50 | 2500 |
| ТС | 500 | 55 | 2500 |
| ТФ | 600 | 60 | 2500 |
| Т ТБ ТС | 800 | 80 | 2500 |
| | 1000 | 100 | 3000 |
| | 1200 | 110 | 3000 |
| | 1400 | 110 | 3000 |
| | 1600 | 120 | 3000 |

Суть метода продавливания футляров коллекторов состоит в том, что футляр вдавливается в грунт открытым концом с помощью гидравлических

домкратов [7]. Для того, чтобы уменьшить трение футляра в грунте, конец сегмента железобетонной обделки оснащен ножевой частью из металлической трубы. В процессе продавливания грунт переходит в трубу, а затем его вручную разрабатывают.

Принцип метода горизонтально-направленного бурения сводится к созданию двух проколов в земле между двух стартовых котлованов, заполненных буровым раствором, состоящим из бентонитовой суспензии с добавками-пластификаторами. Методика подразумевает выполнение подготовительных работ, формирование пилотной скважины и последующее её расширение в соответствии с диаметром труб. На завершающем этапе работ в полученные траншеи затягиваются футляры из металлических труб только по прямой траектории [8].

Бурошнековое бурение (или прокол) - это современная технология для проведения работ по беспросадочной прокладке трубопроводов. Перед началом работ возводятся стартовый и приемный котлованы. Линейные размеры варьируются в пределах нескольких метров. БШБ может проводиться при непосредственной близости от остальных коммуникаций. Производство работ проводится этапами. На первоначальном этапе устраивают два котлована по прямой линии. Лазерный теодолит с видеокамерой и мишенью используется для контроля проходки. Секции футляра продавливаются по всей длине проектной трассы. Грунт разрабатывается шнековым буром внутри футляра. По мере необходимости шнековый бур наращивают.

Выбор управляемых факторов и планирование эксперимента

В науке все больше возрастает потребность к более эффективному распределению труда исследователя. Существенную роль играют такие разделы теории вероятности, как планирование эксперимента, математическое моделирование запланированных процессов, модели

процессов и способы их создания [9]. Существует великое множество подходов к оптимальному анализу всех происходящих процессов. Для этого необходимо выяснить взаимосвязи между наиболее существенными факторами, определяющими ход данных процессов, и описать их количественно, т.е. придать форму, подлежащую математической обработке и оценке или оценке графическими способами [10-11].

В качестве фактора анализа Y будет принят параметр h – глубина заложения футляра, определяемой в самой верхней точки футляра с внешней стороны до дневной поверхности. Глубина заложения h в свою очередь варьируется в пределах от глубины промерзания и до 20м. Для проходки футляров можно выбрать следующие управляющие факторы:

1) Количественные

- Диаметр трубы футляра (X_1),
- Толщина стенки трубы минимальная/максимальная/средняя (X_2),
- Скорость экскавации грунта из футляра (X_3).

2) Качественные

- Разновидность грунтов (X_4).

В описании факторов X_1 и X_2 нет надобности, но необходимо пояснить факторы X_3 и X_4 .

Фактор X_3 базируется на технологии проходки футляров для коллекторов. В связи с тем, что сам фактор технологии возведения является качественным фактором, имеющим более 2 степеней свободы, контролировать его не представляется возможным. А при наличии двух и более факторов анализа Y существенно снижается точность построенной матрицы планирования. Поэтому было принято решение - качественный фактор технологии превратить в количественный, увязав его со временем проходки футляра или коллектора (в случае микротоннелирования), что в данном случае является совершенно верным решением.

Фактор X_4 был выбран как качественный и под этим фактором понимается дисперсный грунт в соответствии с ГОСТ 25100-2011 «Грунты», в котором ведется проходка футляра коллектора. Грунты имеют различные физико-механические характеристики, гранулометрический и минеральный составы, но для данного исследования все эти качества будут нивелированы в пользу усредненного мелкого песчаного и глинистого грунтов. Именно поэтому фактор X_4 признан как качественный.

Следующим шагом необходимо поставить задачу для оптимизационного эксперимента и решить матрицу планирования эксперимента. Для этого необходимо получить факторы для линейной модели на двух уровнях. Когда число факторов известно, можно сразу найти необходимое число опытов. Простейшая формула для определения числа опытов выглядит следующим образом:

$$N = 2^k \quad (1)$$

где N — число опытов; k — число факторов; 2 — число уровней.

Все эксперименты по возведению футляра коллектора можно разделить на две большие программы:

1. Возведение футляров из металлических труб.
2. Возведение футляров из железобетонных труб.

В соответствии с (1), по каждой программе необходимо будет выполнить по 16 экспериментов. Но в связи с тем, что качественный фактор X_4 состоит из двух грунтов, не похожих по минеральному составу и физико-механических характеристиках, будет использован дробный факторный анализ. В связи с этим для каждой программы будет выполнено по 8 экспериментов для песков и глин и данный фактор будет называться «вектор-столбец второго порядка» или «эффект взаимодействия второго порядка». Поэтому факторы $X_1X_2X_3$ будут являться трехфакторным экспериментом 2^3 .

Матрица планирования эксперимента, уровня $\{-1 +1\}$, вида 2^3 , будет выглядеть следующим образом (Таблица 4).

Проанализировав таблицу 4, можно построить геометрическую интерпретацию факторного эксперимента 2^3 , представленную на рисунке 1. Эта фигура – куб. Куб задает область эксперимента. Центр куба является центром плана полного факторного эксперимента.

Таблица № 4

Матрица планирования экспериментов 2^3

| Номер опыта | X_1 | X_2 | X_3 | Y |
|-------------|-------|-------|-------|-------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 1 | - | - | + | y |
| 2 | + | - | + | y_2 |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 4 | + | + | + | y_4 |
| 5 | - | - | - | y_5 |
| 6 | + | - | - | y_6 |
| 7 | - | + | - | y_7 |
| 8 | + | + | - | y_8 |

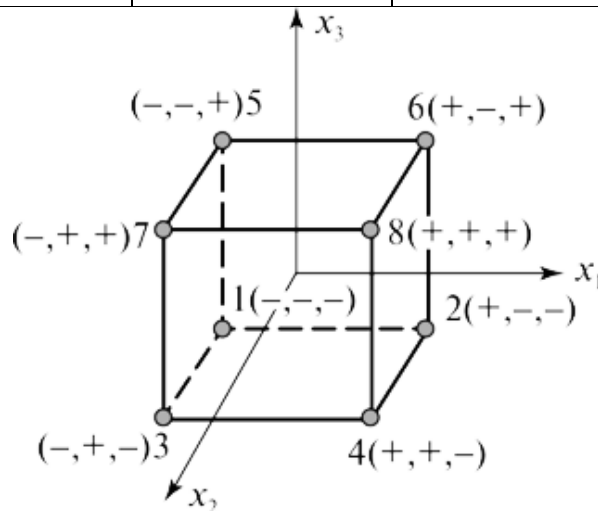


Рис. 1. – Схема полного факторного эксперимента 2^3

Чтобы построить матрицу полного факторного эксперимента, необходимо рассчитать число возможных взаимодействий:

$$C_n^k = \frac{k!}{n!(k-n)!} = \frac{4!}{3!(4-3)!} = 4 \quad (2)$$

Следовательно, матрица 2^3 полного факторного эксперимента эффекта взаимодействия будет иметь вид, показанный в Табл. 5.

Воспользовавшись составленной полной матрицей планирования эксперимента, можно составить план математического моделирования двух экспериментальных программ, описанных выше.

Таблица № 5

Матрица полного факторного эксперимента 2^3

| Номер опыта | Матрица планирования результатов | | | | | | | | Вектор результатов |
|-------------|----------------------------------|-------|-------|-------|-------------------------------|----------|----------|-------------|--------------------|
| | Факторы, X_j | | | | Факторы взаимодействия, X^T | | | | |
| | X_0 | X_1 | X_2 | X_3 | X_1X_2 | X_1X_3 | X_2X_3 | $X_1X_2X_3$ | |
| 1 | + | - | - | - | + | + | + | - | y_1 |
| 2 | + | + | - | - | - | - | + | + | y_2 |
| 3 | + | - | + | - | - | + | - | + | y_3 |
| 4 | + | + | + | - | + | - | - | - | y_4 |
| 5 | + | - | - | + | + | - | - | + | y_5 |
| 6 | + | + | - | + | - | + | - | - | y_6 |
| 7 | + | - | + | + | - | - | + | - | y_7 |
| 8 | + | + | + | + | + | + | + | + | y_8 |

Для металлического футляра принимаются начальные данные для математического моделирования геомеханической работы, указанные в таблице 6.

Таблица № 6

Исходные данные моделирования металлического футляра

| Диаметр трубы футляра, мм | Толщина стенки, мм | Глубина заложения футляра, м |
|---------------------------|--------------------|------------------------------|
| 426 | 9 | 2 |
| 530 | 9 | 4 |
| 820 | 10 | 6 |
| 1620 | 14 | 8 |
| 325 | 8 | 10 |
| 630 | 10 | 12 |
| 1020 | 10 | 14 |

| | | |
|------|----|----|
| 1220 | 10 | 16 |
|------|----|----|

Для моделирования железобетонного футляра примем трубу в соответствии с ГОСТ 6482-2011 (Таблица №3). Исходные характеристики для проведения моделирования представлены в таблице 7.

Таблица № 7

Исходные данные моделирования железобетонного футляра

| Диаметр трубы футляра, мм | Толщина стенки, мм | Глубина заложения футляра, м |
|---------------------------|--------------------|------------------------------|
| <i>l</i> | 2 | 3 |
| 500 | 55 | 2 |
| 600 | 60 | 4 |
| <i>l</i> | 2 | 3 |
| 1000 | 100 | 6 |
| 1600 | 120 | 8 |
| 400 | 50 | 10 |
| 800 | 80 | 12 |
| 1200 | 110 | 14 |
| 1400 | 110 | 16 |

Литература

1. Алексеев М. И., Дмитриев В. Д., Быховский Е. М. [и др.]. Городские инженерные сети и коллекторы: учеб. для вузов – Л.: Стройиздат, 1990. 385 с.
2. Теличенко В. И. Современные технологии комплексного освоения подземного пространства мегаполисов: монография. – М.: АСВ, 2010. 360 с.
3. Агиян В. А. Строительство и реконструкция городских подземных инженерных сооружений: монография. – СПб.: МАНЭБ, 2008. 221 с.
4. Абрамчук В. П., Власов С. Н., Мостков В. М. Подземные сооружения. – М.: ТА Инжиниринг, 2005. 462 с.
5. Кашкинбаев И. З. Бестраншейные технологии прокладки и реновации трубопроводов: монография. – Алматы: Нур-Принт, 2016. 198 с.

6. Бабина Л. А., Шутова О. А. Исследование применимости закрытого способа прокладки инженерных коммуникаций // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. 2008. С. 395-401.
7. Bilfinger W. Tunneling Through the Rock-Soil Interface // Soil-Rock Interface: Pan American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Cancun, 2019. pp. 194-214.
8. Allouche E. N., Ariaratnam S.T., Lueke J.S. Horizontal directional drilling: a profile of an emerging underground construction industry // Journal of Construction Engineering and Management, 126(1). United States, 2000. pp. 68-76.
9. Сидняев Н. И. Теория планирования эксперимента и анализ статистических данных: учебник. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Юрайт, 2019. 495 с.
10. Максимов В. П. Методология численного эксперимента динамической модели подпокрывного агрегата // Инженерный вестник Дона. 2012. №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2012/780
11. Чижик М. А., Волков В. Я. Графические оптимизационные модели многопараметрических технологических процессов легкой промышленности // Инженерный вестник Дона. 2012. №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2012/901

References

1. Alekseev M. I., Dmitriev V. D., Byhovskij E. M. [et all]. Gorodskie inzhenernye seti i kollektory [Urban Utilities and Collectors]: ucheb. dlja vuzov. L.: Strojizdat, 1990. p.385.
2. Telichenko V. I. Sovremennye tehnologii kompleksnogo osvoenija podzemnogo prostranstva megapolisov [Modern technologies of complex development of underground space of megacities]: monografija. M.: ACB, 2010. p.360.

3. Agijan V. A. Stroitel'stvo i rekonstrukcija gorodskih podzemnyh inzhenernyh sooruzhenij [Construction and reconstruction of urban underground engineering facilities]: monografija. SPb.: MANJEB, 2008. p.221.
4. Abramchuk V. P., Vlasov S. N., Mostkov V. M. Podzemnye sooruzhenija. M.: TA Inzhiniring, 2005. p.462.
5. Kashkinbaev I. Z. Bestranshejnye tehnologii prokladki i renovacii truboprovodov [Trenchless pipeline laying and renovation technologies]: monografija. Almaty: Nur-Print, 2016. p.198.
6. Babina L. A., Shutova O. A. Sovremennye tehnologii v stroitel'stve. Teorija i praktika. 2008. pp.395-401.
7. Bilfinger W. Pan American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Cancun, 2019. pp. 194-214.
8. Allouche E. N., Ariaratnam S.T., Lueke J.S. Journal of Construction Engineering and Management, 126(1). United States, 2000. Pp.68-76.
9. Sidnjaev N. I. Teorija planirovanija jeksperimenta i analiz statisticheskikh dannyh [Theory of experiment planning and statistical data analysis]: uchebnyk. 2-e izd., pererab. i dop. M.: Jurajt, 2019. p.495.
10. Maksimov V. P. Inzhenernyj vestnik Dona. 2012. №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2012/780
11. Chizhik M. A., Volkov V. Ja. Inzhenernyj vestnik Dona. 2012. №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2012/901