

Методология численного эксперимента прокладки теплосети в условиях городской застройки

О.С. Матюхова

Московский государственный строительный университет

Аннотация: Отсутствие четких рекомендаций в нормативной и научной литературе по прокладке теплосети в непроходном канале не только увеличивает сроки строительства, но и приводит к серьезным ошибкам при проектировании, влекущим за собой уменьшение срока службы инженерной сети и возникновение аварийных ситуаций на объекте. В данной статье разработана методология численного эксперимента прокладки теплосети в непроходном канале, произведено планирование эксперимента с выбором управляемых факторов. Произведена обработка данных и анализ достоверности результатов с целью упрощения строительства в условиях городской застройки.

Ключевые слова: каналы теплотрасс, реновация, напряженно-деформированное состояние, методология, численный эксперимент, закрытый канал, теория планирования эксперимента, метод конечных элементов, математическое моделирование, «черный ящик».

Введение

В Москве 1 августа 2017 года была утверждена программа реновации ветхого жилья на территории города Москвы и вновь образованных административных территорий города [1]. Ежегодный прирост площадей остальных крупных городов России составляет около 1%, что является следствием того, что в городах происходит новое строительство, а не реновация уже существующей застройки [2]. Но постепенно реновация начинает разворачиваться и там.

Суть реновации жилых микрорайонов заключается в создании большего количества жилых квартир, чем в существующем сейчас на этом месте доме [3]. Каждый год темпы реновации только наращивают, но при этом существенно отстают темпы реновации инженерных сетей. В Москве только в августе 2020 года власти Москвы утвердили программу реновации комплексных систем инженерного обеспечения территорий, где были возведены новые дома на вводимых повторно в оборот территориях.

Одной из основных реновируемых инженерных систем в условиях сложившейся городской застройки являются теплотрассы отопления жилых домов.

Для их возведения или реконструкции необходимо детальное изучение геомеханических особенностей окружающего массива, слагающего площадку строительства и взаимное влияние на напряженно-деформированное состояние. Но для того, чтобы выбрать оптимальное число расчетов, методами математического моделирования необходимо построить матрицу планирования эксперимента.

Описание сетей теплотрасс

В рамках реновации возводится новый комплекс в г. Москве. Для обеспечения возможности проживания необходимо подключение комплекса ко всем коммуникациям и далее будет рассмотрено строительство участка теплотрассы для одного из 25-ти этажного жилого дома. Способ прокладки тепловой сети – траншейный в подземном непроходном канале.

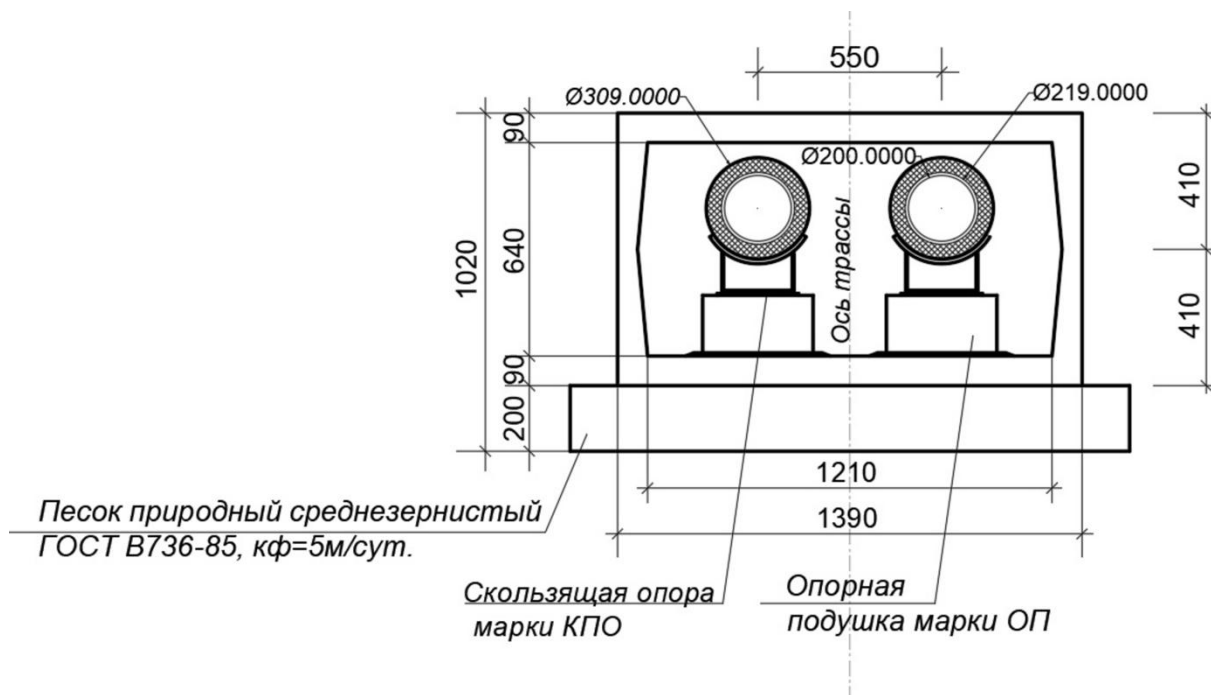


Рис. 1. – Схема прокладки тепловой сети в непроходном канале КН-3

Непроходной канал представляет собой железобетонное изделие П-образной формы и осуществляет защиту теплосетей от внешнего негативного воздействия. Для строительства тепловой сети была принята двухтрубная прокладка теплопровода – используются две параллельные стальные трубы по ГОСТ 56227-2014. Трубы укладываются на скользящие хомутовые опоры, а каналы – на подготовленное и уплотненное песчаное основание [4, 5].

Канал будет подобран и изготовлен в соответствии с [6], а также СП–124.13330.2012 «Тепловые сети». В таб. 1 и 2 приведены основные характеристики непроходных каналов и стальных труб для этих каналов.

Таблица № 1

Размеры каналов по серии 3.903

№ п/п	Условное обозначение канала	Длина l, мм	Ширина b, мм	Высота h, мм	Класс бетона
1	КН-0	2390	490	300	В15
2	КН-1	1990	890	280	В15
3	КН-2	1990	1140	340	В15
4	КН-3	1990	1390	410	В15
5	КН-4	1990	1640	490	В15
6	КН-5	1990	1740	540	В20
7	КН-6	1990	2260	660	В20
8	КН-7	1490	3080	780	В20

Таблица № 2

Размеры основных стальных труб

Диаметр условного прохода трубы D_v , мм	Внешний диаметр трубы D_1 , мм	Расстояние между осями труб L, мм
70	160	350
150	250	500
200	315	550
300	450	650
400	560	800
500	710	1000
600	800	1300

Построение матрицы планирования эксперимента

В настоящее время для оптимизации процессов строительства требуется разработка эффективных и качественных решений. Их создание базируется на применении различных разделов высшей математики теории вероятности – метод планирования эксперимента [7, 8].

Метод планирования эксперимента – это процедура выбора числа и условий проведения опытов, необходимых и достаточных для решения с требуемой точностью и достоверностью поставленной задачи. Целью планирования эксперимента, как правило, является получение математической модели (ММ) исследуемого объекта или процесса [9]. В научной литературе объект исследования представляется в виде структурной схемы, т.е. в виде кибернетической системы «черный ящик» [10]. Для планирования эксперимента исследуемый процесс, в нашем случае – строительство тепловой сети, будет представлен по аналогии следующей схемой, изображенной на рис.2.



Рис. 2. – Структурная схема планирования эксперимента по принципу «Черного ящика»

Начало решения данной задачи сводится к выбору и формулировке «воздействий на черный ящик», т.е. к выбору управляющих факторов X_i . Все факторы разделим на две группы: качественные и количественные. По результатам структурирования управляющих операций были выбраны следующие факторы.

1. Количественный:

1.1. X_1 – расстояние от поверхности земли до верхней грани канала.

1.2. X_2 – ширина закрытого канала.

1.3. X_3 – нагрузка от окружающей застройки в зоне влияния строительства.

2. Качественный:

2.1. X_4 – разновидность грунтов по генезису и гранулометрическому составу.

Глубина заложения канала и ширина самого канала – основополагающие факторы, не требующие подробного описания. Следует пояснить выбор факторов X_3 и X_4 .

В зависимости от количественного фактора X_3 (нагрузки от окружающей застройки), будет происходить перераспределение напряжений и деформаций геотехнической системы «подземное сооружение – окружающий массив». В таком случае возможна потеря устойчивости стенок естественного откоса траншеи из-за превышения угла откоса и изменение формы призмы обрушения грунта. Целесообразно заменить изначально принятую форму непроходного канала, а также предусмотреть устройство укрепления стенок траншеи инвентарными деревянными или неинвентарными шпунтовыми ограждениями в зависимости от глубины заложения непроходного канала.

Выбор качественного фактора X_4 основан на различных физико-механических характеристиках грунтов, вариациях их гранулометрического и минерального составов согласно ГОСТ 25100-2020 «Грунты». Для данного исследования будут приняты нормативные характеристики глинистого и песчаного грунтов. Таким образом будет упрощено построение матрицы планирования эксперимента.

Далее будет произведен анализ по подбору параметров оптимизации – численных характеристик целей исследования Y_i . Зададимся одним выходом «черного ящика», а именно - глубиной заложения непроходного канала h , принимаемой исходя из минимального объема земляных работ и надежного укрытия от раздавливания транспортом [11]. Заглубление от поверхности земли до верха перекрытия канала варьируется в пределах 1,5м – 4 м.

Следующим этапом, для точной постановки задачи и решения матрицы планирования эксперимента, будет являться рассмотрение всех наборов состояния «черного ящика», т.е. получение числа возможных опытов. Так как число факторов уже известно, нахождение необходимого числа опытов осуществляется по простейшей формуле:

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

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

Важно отметить, что с целью минимизации расчетов в математическую модель исследуемого процесса включены только факторы взаимодействия первого порядка - X_1 , X_2 , X_3 . Качественный параметр X_4 , состоящий из двух грунтов с различными физико-механическими характеристиками, в первоначальном расчете не учитывается. Следовательно, формула (1) примет вид $N=2^3$ и эксперимент будет являться трехфакторным.

План полного факторного эксперимента (ПФЭ) изображают в виде таблицы - матрицы планирования (МП) эксперимента, столбцы которой отражают уровни факторов, а строки – номера опытов. Полученная МП уровня $\{-1 ; +1\}$ и вида 2^3 представлена в Таб. 3. Номер опыта соответствует номеру по порядку из таб.1.

Таблица №3

Матрица планирования экспериментов 2^3

Номер опыта	X_1	X_2	X_3	Y
1	-	-	-	y_1
2	+	-	-	y_2

Номер опыта	X ₁	X ₂	X ₃	Y
3	-	+	-	y ₃
4	+	+	-	y ₄
5	-	-	+	y ₅
6	+	-	+	y ₆
7	-	+	+	y ₇
8	+	+	+	y ₈

Геометрической интерпретацией ПФЭ 2^3 является куб (рис. 3), границы которого задают область эксперимента. Так как априори неизвестна зависимость между факторами, то необходимо построить развернутую матрицу планирования, учитывающую факторы совместно с их взаимодействиями, предварительно рассчитав число возможных взаимодействий:

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

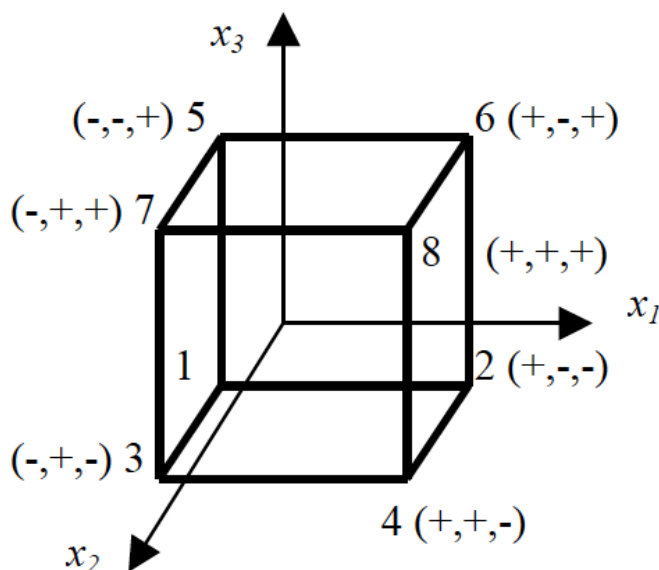


Рис. 3. - Схема полного факторного эксперимента 2^3

Следовательно, развернутая МП для ПФЭ типа 2^3 для исследуемого процесса будет иметь следующий вид (таб.4):

Таблица №4

Матрица полного факторного эксперимента 2^3

Номер опыта	Матрица планирования результатов								Вектор результатов
	Факторы , x_i				Факторы взаимодействия, $x_i x_j$				
	x_4	x_1	x_2	x_3	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$	$x_1 x_2 x_3$	y
1	+	-	-	-	+	+	+	-	y_1
2	+	+	-	-	-	-	+	+	y_2
3	+	-	+	-	-	+	-	+	y_3
4	+	+	+	-	+	-	-	-	y_4
5	+	-	-	+	+	-	-	+	y_5
6	+	+	-	+	-	+	-	-	y_6
7	+	-	+	+	-	-	+	-	y_7
8	+	+	+	+	+	+	+	+	y_8

При построении матрицы полного факторного эксперимента качественный фактор x_4 условно принят «фиктивным» для удобства машинного счета (для идентичности формул).

Для реализации плана эксперимента (таб.5), а именно - для расчета ПФЭ типа 2^3 выполняется рандомизация. Данная операция производится для того, чтобы исключить влияние на факторы изменение во времени неконтролируемых факторов, т.е. для установки ортогональности плана. Были выписаны числа, лежащие в интервале от 1-8, и получена следующая последовательность реализации экспериментов:

1. Номер опыта в матрице 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8
2. Количество серий – 3;
3. Порядок реализации эксперимента:
 - a. 5, 6, 2, 8, 4, 7, 3, 1
 - b. 8, 4, 5, 2, 6, 3, 1, 7
 - c. 2, 5, 1, 8, 3, 4, 7, 6

Таблица №5 (начало) Расчет ПФЭ типа типа 2³

№ точки факторного пространства	Номер опыта			x ₀ = x ₄	x ₁	x ₂	x ₃	x ₁ x ₂	x ₂ x ₃
	сери я1	сери я 2	сери я 3						
1	5	8	2	+	-	-	-	+	+
2	6	4	5	+	+	-	-	-	+
3	2	5	1	+	-	+	-	-	-
4	8	2	8	+	+	+	-	+	-
5	4	6	3	+	-	-	+	+	-
6	7	3	4	+	+	-	+	-	-
7	3	1	7	+	-	+	+	-	+
8	1	7	6	+	+	+	+	+	+
$\sum_{i=1}^N x_i \cdot \bar{y}_i$				20,38	1,67	0,05	-1,15	1,73	0,3
Критерий Стьюдента. $f = 16 t_{кр} = 0,685$			b_i	2,55	0,2	0,006	-0,14	0,22	0,4
			t_i	7,5	0,59	0,018	0,4	0,64	1,14
			Вывод	зн	зн	нз	нз	нз	зн
Примечание. В выводах: зн – значимый фактов, нз – не значимый фактор									

Таблица №5 (окончание)

№ точки факторного пространства	y _{i1}	y _{i2}	y _{i3}	\bar{y}_i	S_{yi}^2
1	2,52	4	1,51	2,676	1,57
2	3,03	2,04	2,5	2,52	0,25
3	1,5	2,51	1,56	1,856	0,32
4	4,08	1,53	4,02	3,21	2,12
5	2,1	3,02	2,15	2,42	0,27
6	3,55	2,02	2,09	2,55	0,75
7	2,11	1,51	3,56	2,4	1,11
8	1,59	3,55	3,1	2,746	1,05
Критерий Кохрена : $G_p = 0,28$ $G_{кр} = 0,52$ ($f_1 = 2$, $f_2 = 8$, $q = 0,05$) Вывод: дисперсии однородны Критерий Фишера $q = 0,05$, $f_2 = 16$ Линейная ММ: $y = 2,55 + 0,2x_1 + 0,006x_2 - 0,14x_3$					

Вывод

В результате произведенного расчета матрицы полного факторного эксперимента, можно сделать вывод о том, что более предпочтительно опыты №2 и №8 признать значимыми. Для математического моделирования прокладки теплосети в условиях застройки необходимо принять следующие начальные данные для непроходного канала, указанные в таб. 6.

Таблица № 6

Исходные данные для моделирования непроходного канала

Условное обозначение канала	Длина l , мм	Ширина b , мм	Высота h , мм	Глубина заложения канала, м	Диаметр условного прохода трубы D_v , мм	Внешний диаметр трубы D_1 , мм	Расстояние между осями труб L , мм
КН-1	1990	890	280	1,5	70	160	350
КН-7	1490	3080	780	4	600	800	1300

Литература

1. Зильберова И.Ю., Маилян В.Д., Петров К.С., Беланова М.А. Реновация как разновидность модернизации городских территорий // Инженерный вестник Дона. 2019. № 9. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N9y2019/6185
2. Елисеева Т.П., Кирсанов А.Л. Формирование и развитие рынка жилищно-коммунальных услуг на территории Ставропольского края // Инженерный вестник Дона. 2012. №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2012/682
3. Маметьев В.А. Реализация проектов реновации в Москве в целях повышения эффективности использования территорий жилой застройки // Молодой ученый. 2017. №38. С. 28-32.
4. Храменков С.В., Примин О.Г., Орлов В.А. Реконструкция трубопроводных систем. М.: Издательство АСВ, 2008. 215 с.



5. Howell A.P. Sewerage: The Designing, Construction and Maintaining of Sewage Systems and Sewage Treatment Plants. South Carolina: CreateSpace Independent Publishing Platform. 2018. 498 p.

6. Типовые решения прокладки трубопроводов тепловых сетей в изоляции из пенобетона «Совби» диаметром Ду 50-600мм. М: ОАО «Объединение ВНИПИэнергопром». 2008. 124с.

7. Хрисанов Н.Н. Планирование эксперимента. Самара: СГТУ. 2016. 40с.

8. Goupy J.L. Methods for Experimental Design. Amsterdam: Elsevier Science. 1993. 448p.

9. Ленхорова И.А. Повышение адекватности и достоверности модели обработки метрологических массивов данных в исследованиях систем методом планирования эксперимента // Новые исследования в разработке техники и технологий. № 2. 2013. С. 18-21.

10. Воронов А.А. Кибернетический подход к анализу современной экономической системы: возможность применения метода "черного ящика" // Экономика и менеджмент систем управления. № 2-2. 2015. С. 243-250.

11. Справочник строителя тепловых сетей /под ред. Захаренко С.Е. М.: Энергоатомиздат. 1984. 184с.

References

1. Zil'berova I.Ju, Mailjan V.D., Petrov K.S., Belanova M.A. Inzhenernyj vestnik Dona. 2019. № 9. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N9y2019/6185

2. Eliseeva T.P., Kirsanov A.L. Inzhenernyj vestnik Dona. 2012. №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2012/682

3. Mamet'ev V.A. Molodoj uchenyj. 2017. №38. pp. 28-32.

4. Hramenkov S.V., Primin O.G., Orlov V.A. Rekonstrukcija truboprovodnyh sistem. М.: Izdatel'stvo ASV, 2008. 215p.



5. Howell A.P. Sewerage: The Designing, Construction and Maintaining of Sewage Systems and Sewage Treatment Plants. South Carolina: CreateSpace Independent Publishing Platform. 2018. 498 p.
6. Tipovye reshenija prokladki truboprovodov teplovyh setej v izoljácii iz penobetona «Sovbi» diametrom Du 50-600mm. [Typical Solutions for Laying Heating Network Pipelines in Sovbi Foam Concrete Insulation with Diameter DN 50-600 mm] M: OAO «Ob'edinenie VNIPIjenergoprom». 2008. 124s.
7. Hrisanov N.N. Planirovanie jeksperimenta. [Design of experiments] Samara: SGTU. 2016. 40p.
8. Goupy J.L. Methods for Experimental Design. Amsterdamm: Elsevier Science. 1993. 448p.
9. Lenhorova I.A. Novye issledovanija v razrabotke tehniki i tehnologij. № 2. 2013. pp. 18-21.
10. Voronov A.A. Jekonomika i menedzhment sistem upravlenija. № 2-2. 2015. pp. 243-250.
11. Spravochnik stroitelja teplovyh setej /pod red. Zaharenko S.E. M.: Jenergoatomizdat. 1984. 184p.