

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ГОРИЗОНТАЛЬНОГО СМЕЩЕНИЯ ШПУНТОВОГО ОГРАЖДЕНИЯ ПРИ ОТКОПКЕ КОТЛОВАНОВ НА ОСНОВЕ ВАРИАНТНЫХ РАСЧЕТОВ

STATISTICAL EVALUATION OF THE HORIZONTAL DISPLACEMENT OF SHEET PILING ENCLOSING STRUCTURE AT EXCAVATING PITS BASED ON VARIANT CALCULATIONS

В геотехнической практике все чаще встречаются проекты зданий и сооружений, для которых предусмотрено развитое подземное пространство, что в свою очередь приводит к необходимости разработки глубоких котлованов. Рассмотрена методика расчета консольных шпунтовых ограждений, позволяющая выполнить предварительную оценку проектных решений исходя из минимального набора исходных данных. Показано, что использование эмпирико-теоретической зависимости позволяет определить горизонтальное перемещение консольного ограждения с достаточной для инженерной практики точностью. Приведено сравнение результатов численного моделирования с расчетом по предложенной регрессионной модели.

Ключевые слова: фундаменты, котлован, горизонтальное смещение, шпунтовое ограждение.

In geotechnical practice, it is increasingly common to encounter designs of buildings and structures for which a developed underground space is envisaged, which in turn leads to the need to develop deep excavations. The method of calculation of cantilever sheet pile enclosing structures is considered, which allows performing a preliminary assessment of design solutions based on a minimum set of input data. It is shown that the use of empirical-theoretical dependence allows assessing the horizontal displacement of the cantilevered sheet pile enclosing structure with sufficient accuracy for engineering practice. Comparison of the results of numerical simulation with the calculation by the proposed regression model is given.

Keywords: foundations, foundation pit, horizontal displacement, sheet piling.

Введение

Как рассмотрено в работе [1], существует множество методик расчета усилий в ограждающих конструкциях, но, как правило, не рассматривается определение перемещений ограждений и их влияние на дополнительную осадку соседних зданий и сооружений. При этом существующие методики расчета [2–17], несмотря на их хорошую сходимость с результатами наблюдений, являются весьма сложными для использования в инженерной практике.

Материалы и методы

Целью предлагаемого метода является получение значений перемещения горизонтального отклонения шпунтового ограждения с использованием основного минимального набора параметров. В [1] отмечено, что для решения данной задачи предложено использовать эмпирико-теоретическую зависимость, основанную на регрессионной модели, в которой в качестве модели грунта выступает Hardening soil, имеющая ряд преимуществ относительно Mohr – Coulomb [18].

Указанная зависимость строится на оценке влияния различных параметров. Все параметры, кроме одного, фиксируются, и выполняются многочисленные расчеты, которые зависят от количества шагов изменений. В качестве расчетного аппарата использован комплекс, основанный на применении метода конечных элементов Plaxis 3D. Трехмерная постановка задачи выбрана из соображений, что ключевым фактором является длина ограждения котлована (рис. 1). Расчетная схема для оценки эмпирико-теоретической зависимости представлена на рис. 2.

Первоначально авторами рассматривалась зависимость горизонтального перемещения шпунтового ограждения U_x от десяти независимых переменных:

$$U_x = f(d, P, h, a, E_1 I, c, \varphi, E, h_w, \gamma), \quad (1)$$

где d — глубина котлована, м; P — давление по подошве фундамента здания окружающей застройки, кПа; h — глубина заложения фундамента здания окружающей застройки, м; a — расстояние от края фундамента соседней застройки до ограждающей конструкции котлована, м; E_1 — модуль упругости ограждающей конструкции, МПа; I — момент инерции ограждающей конструкции, мм⁴; c — сцепление грунта, кПа; φ — угол внутреннего трения грунта, град.; E — модуль деформации грунта, МПа; h_w — уровень грунтовых вод, м; γ — удельный вес грунта, кН/м³.

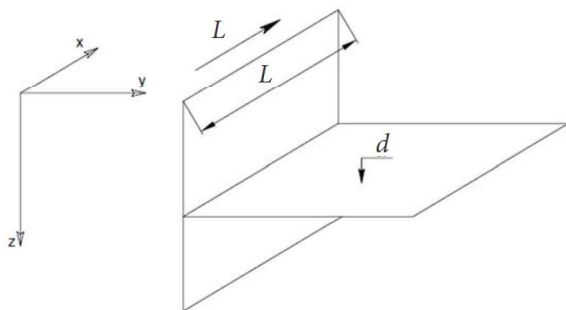


Рис. 1. Схема котлована с ограждением с указанием параметров, оказывающих наибольшее влияние на максимальное перемещение в ограждении

В ходе решения задачи был выполнен анализ ряда независимых переменных, которые оказывают значительное влияние на изменение НДС, а также принято допущение, в результате которого было исключено рассмотрение окружающей застройки и изменение глубины закрепления шпунтового ограждения. Таким образом, представленная в статье модель позволяет определить перемещения консольного ограждения без учета дополнительного фактора в виде окружающей застройки (см. рис. 2). Указанное допущение объясняется следующими особенностями:

1. Учет трех дополнительных факторов в виде P, h, a приводит к серьезному увеличению количества расчетных схем ($7^5 = 16\,807$), что требует больших вычислительных мощностей для выполнения расчета и статистического анализа такого количества данных.

2. Данный метод является предварительным расчетом, который позволяет, имея всего пять известных параметров (d, c, φ, h_w, L), получить приближенные значения горизонтального отклонения шпунтового ограждения для оценки корректности имеющейся конструкции котлована и внести необходимые изменения.

Результаты

В результате предварительных расчетов была определена постоянная минимальная величина длины шпунтового ограждения, равная $1,5d$, где d — глубина котлована, м (см. рис. 2).

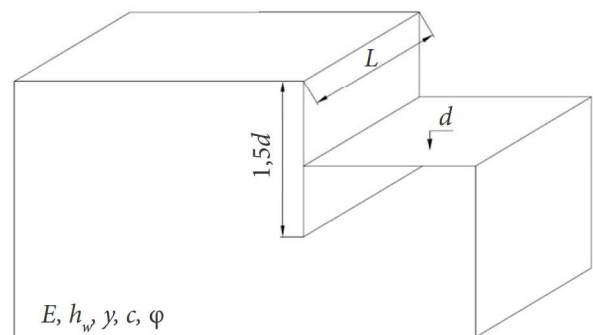


Рис. 2. Расчетная схема для оценки горизонтального перемещения шпунтового ограждения

На основе вышесказанного зависимость (1) приобретает следующий вид:

$$U_x = f(d, c, \varphi, h_w, L). \quad (2)$$

Шаг независимых переменных (d, c, φ, h_w, L) был принят из опыта проектирования таким образом, чтобы имелась возможность охватить условия строительства в разных регионах.

Значения рассмотренных независимых переменных представлены в табл. 1.

Как отмечено ранее, вклад каждой переменной в горизонтальное отклонение шпунтового ограждения оценивается при фиксации остальных параметров. Таким образом, суммарное количество опытных наблюдений составляет $4^5 = 1024$. В табл. 2 представлен принцип изменения параметров для первых 25 расчетных схем.

В результате решения 1024 расчетных схем были получены значения максимальных горизонтальных отклонений шпунтового ограждения. График зависимости номера испытания и максимального смещения (U_x-E) представлен на рис. 3.

Таблица 1

Значения рассмотренных независимых переменных X1–X5

d (X1)	c (X2)	φ (X3)	h_w (X4)	L (X5)
3	0	15	0	12,5
5	7	20	1,5	25
7	15	25	3	37,5
10	30	30	4,5	50

Таблица 2

Пример изменения переменных для каждой расчетной схемы

№	d (X1)	c (X2)	φ (X3)	h_w (X4)	L (X5)	U_x (Y)
1	3	0	15	0	12,5	Y
2	5	0	15	0	12,5	Y
3	7	0	15	0	12,5	Y
4	10	0	15	0	12,5	Y
5	3	7	15	0	12,5	Y
6	5	7	15	0	12,5	Y
7	7	7	15	0	12,5	Y
8	10	7	15	0	12,5	Y
9	3	15	15	0	12,5	Y
10	5	15	15	0	12,5	Y
11	7	15	15	0	12,5	Y
12	10	15	15	0	12,5	Y
13	3	30	15	0	12,5	Y
14	5	30	15	0	12,5	Y
15	7	30	15	0	12,5	Y
16	10	30	15	0	12,5	Y
17	3	0	20	0	12,5	Y
18	5	0	20	0	12,5	Y
19	7	0	20	0	12,5	Y
20	10	0	20	0	12,5	Y
21	3	7	20	0	12,5	Y
22	5	7	20	0	12,5	Y
23	7	7	20	0	12,5	Y
24	10	7	20	0	12,5	Y
25	3	15	20	0	12,5	Y

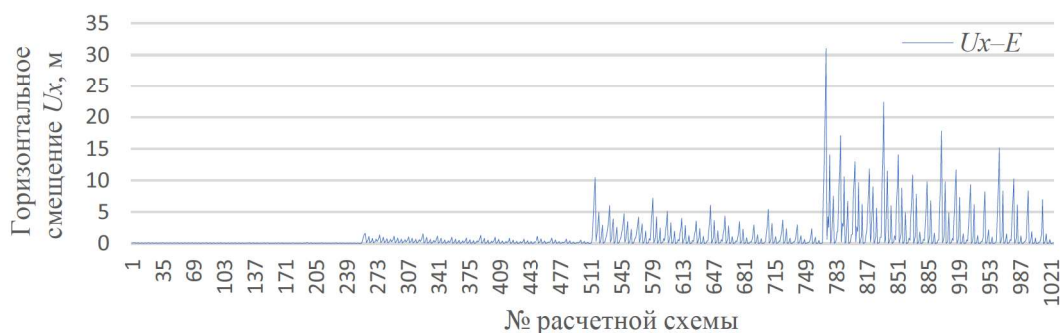


Рис. 3. График результатов горизонтальных перемещений шпунтового ограждения от номера испытания, где U_x-E — данные, полученные в результате численного моделирования

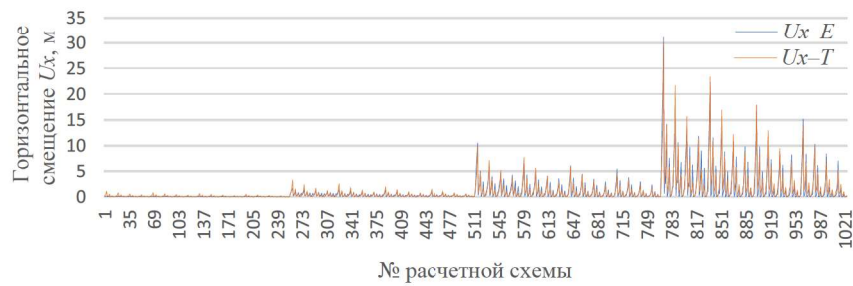


Рис. 4. Графики зависимости горизонтального перемещения шпунтового ограждения, экспериментальный и теоретический (полученный по регрессионной модели), где U_{x-E} — данные, полученные в результате численного моделирования; U_{x-T} — теоретические данные (полученные по регрессионной модели)

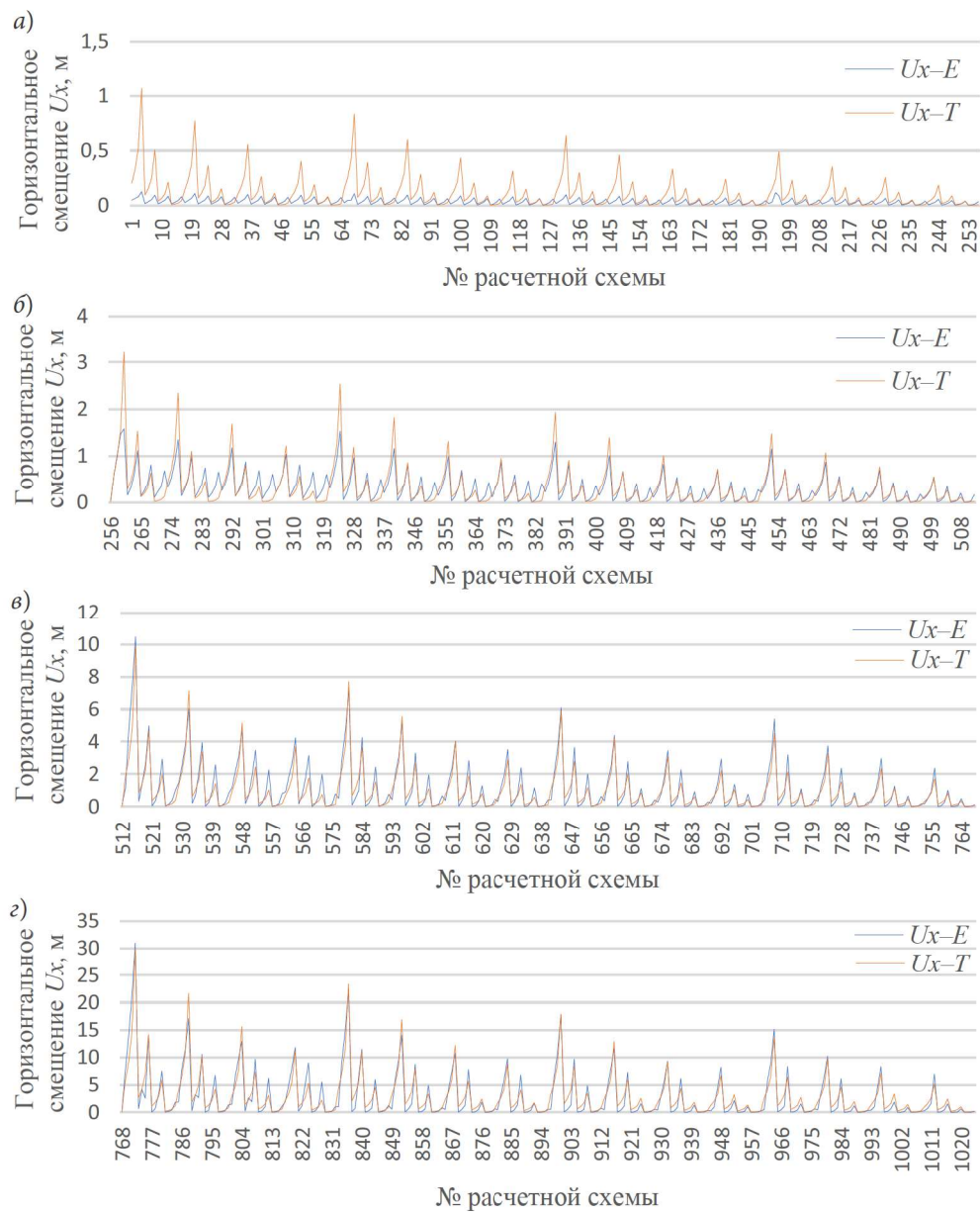


Рис. 5. Графики зависимости горизонтального перемещения шпунтового ограждения U_{x-E} и U_{x-T} для расчетных схем: а — № 1–256; б — № 256–512; в — № 512–768; г — № 768–1024

Таблица 3

Сравнение регрессионной модели на случайном наборе параметров

№	d	c	f_i	h_w	L	U_x-E	U_x-T	Процент отклонения, %
1	4	10	16	0	13	0,0244	0,087	71,82
2	6	8	20	0	21	0,198	0,273	27,36
3	10	0	23	0	31	2,634	3,387	22,22
4	5	4	15	0	42	3,232	2,970	-8,81
5	7	12	30	2	40	0,7	0,444	-57,77
6	8	1	17	3	50	10,3	8,840	-16,51
7	9	3	15	0	24	1,1	1,738	36,71
8	10	11	16	0	30	1,74	1,478	-17,73
9	6	5	19	0	36	1,82	1,530	-18,97
10	5	20	30	2	47	0,064	0,215	70,21
11	5	0	15	0	12	0,055	0,318	82,73
12	4	3	14	0	16	0,077	0,276	72,07
13	7	5	19	0	20	0,27	0,468	42,34
14	10	9	17	0	27	1,276	1,318	3,20
15	9	6	14	0	30	2,044	2,283	10,45
16	9	8	17	0	32	2,008	1,805	-11,25
17	7	17	18	0	12	0,04	0,067	39,92
18	6	19	19	1	15	0,075	0,043	-73,63
19	12	0	22	0	20	0,72	2,192	67,15
20	8	0	16	0	20	0,75	1,245	39,76

ностью описывает экспериментальный график (рис. 4). Формула регрессионной модели имеет вид:

$$U_x = 0,088 \times ((1,27^d \cdot 0,897^c \cdot 0,937^f \cdot 0,837^{h_w} \cdot 1,093^L). (3)$$

Среднее значение относительной погрешности по всем наблюдениям составляет 10,01 %, средняя разница между теоретическими значениями и численным моделированием — 82,3 %. Для большей наглядности сходимости графиков ниже представлены графики с шагом по 256 испытаний (рис. 5).

Как следует из графиков, регрессионная формула (3) с хорошей точностью позволяет получить значения рассчитанных горизонтальных отклонений шпунтового ограждения.

В качестве проверки ниже приведены 20 расчетов на случайных наборах параметров (табл. 3, рис. 6), а также выполнено сравнение с реальным объектом по результатам геотехнического мониторинга (табл. 4, рис. 7).

Выводы

Предложенная расчетно-теоретическая зависимость позволяет оценить возможные значения горизонтальных отклонений шпунтового ограждения с достаточной для приближенного расчета точностью. Среднее значение относительной погрешности по всем наблюдениям составляет 10,01 %, средняя разница между теоретическими значениями и экспериментальными не превышает 82,3 %.

Сравнение регрессионной модели с результатами геотехнического мониторинга также продемонстрировало хорошую сходи-

мость для приближенного расчета ($U_x-Real = 0,04$ м; $U_x-T = 0,025$ м по короткой стороне и $U_x-Real = 0,137$ м; $U_x-T = 0,329$ м по длинной стороне).

Данный метод может быть использован в качестве предварительного расчета ограждений котлованов с целью оценки корректности имеющейся конструкции котлована.

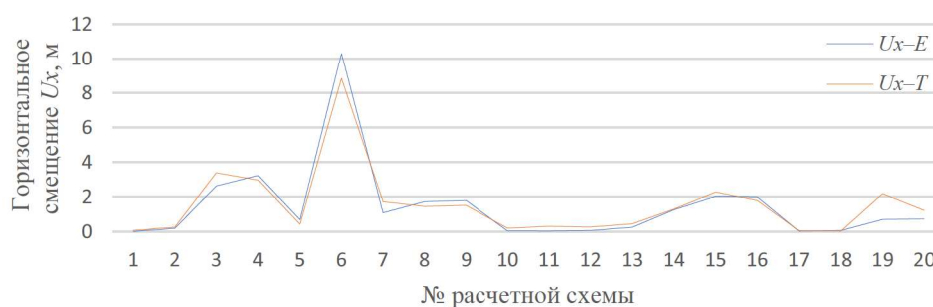


Рис. 6. Графики зависимости горизонтального перемещения шпунтового ограждения экспериментальный и теоретический (полученный для случайного набора параметров)

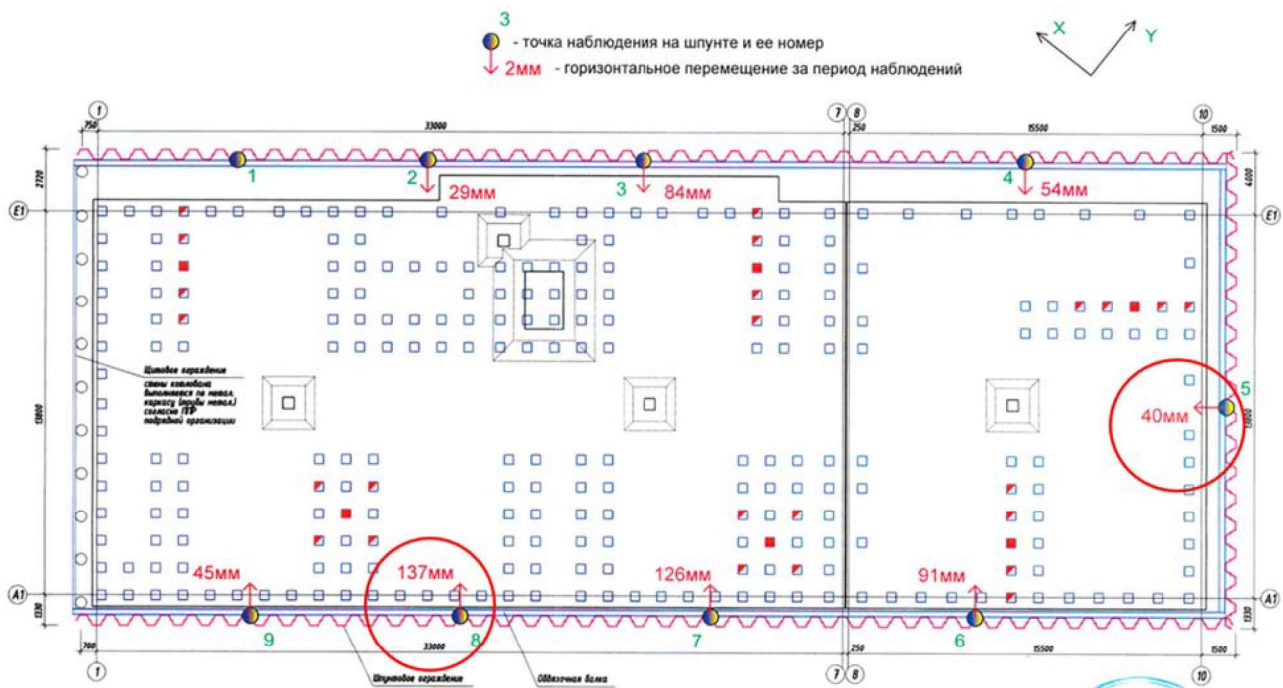


Рис. 7. Схема горизонтального перемещения шпунтового ограждения по результатам геотехнического мониторинга

Таблица 4
Сравнение регрессионной модели
с результатами геотехнического мониторинга

№	d	c	f_i	h_w	L	$U_x - \text{Real}$	$U_x - T$
1	3	20	18	2,8	19,13	0,04	0,025
2	3	20	18	2,8	50,95	0,137	0,329

Библиографический список

- Скворцов К. Д., Мангушев Р. А. Учет влияния деформаций шпунтовых ограждений котлованов на дополнительные осадки зданий окружающей застройки // Вестник гражданских инженеров. 2022. № 5 (94). С. 61–68.
- Ренгач В. Н. Шпунтовые стенки (расчет и проектирование). Л.: Стройиздат, 1970. 112 с.
- Снитко Н. К. Статическое и динамическое давление грунтов и расчет подпорных стенок. М.; Л.: Стройиздат, 1963. 295 с.
- Соколовский В. В. Статика сыпучей среды. Изд. 3-е, перераб. и доп. М.: Физматгиз, 1960. 121 с.
- Новоторцев В. И. Опыт применения теории пластичности к задачам об определении несущей способности оснований сооружений // Изв. НИИ гидротехники. 1938. Т. XXII. С. 115–127.
- Шихиев Ф. М. Исследование деформаций и напряженного состояния грунтов // Научные труды. Гидротехника. Отдел учебных заведений ММФ СССР. М.: Морской транспорт, 1962. Вып. II. С. 100–110.
- Шихиев Ф. М. О распределении давления сыпучих тел по высоте подпорных стен // Науч. тр. Одесского ин-та инженеров морского флота. М.: Морской транспорт, 1955. С. 221–235.
- Terzaghi K. Stability and stiffness of cellular cofferdams // Trans ASCE. 1945. Vol. 110. Paper 2253. Pp. 1083–1119.
- Дуброва Г. А. Взаимодействие грунта и сооружений: расчеты нагрузок от несвязных грунтов на гидротехнические сооружения с учетом деформаций. М.: Речной транспорт, 1963. 219 с.
- Якоби Э. К. Расчет шпунтовых стен. Рига: Ионк и Полиевский, 1912. 54 с.
- Бреннеке Л., Ломейер Э. Основания и фундаменты. В 3 т. / пер. с нем. К. Л. Клейн; под ред. П. П. Смиреникина. М.; Л.: Госстройиздат, 1933–1936. Т. 1. Строительные грунты, строительные материалы. 1933. 287 с.
- Клейн Г. К. Расчет подпорных стен. М.: Высшая школа, 1964. 196 с.
- Жемочкин Б. Н. Расчет упругой заделки стержня. Изгиб стержня в упругом полупространстве. М.: Стройиздат, 1948. 68 с.

14. Горбунов-Посадов М. И., Маликова Т. А., Соломин В. И. Расчет конструкций на упругом основании. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1984. 679 с.

15. Горбунов-Посадов М. И., Шехтер О. Я., Кофман В. А. Давление грунта на жесткий заглубленный фундамент и свободные деформации котлована // Труды НИИ оснований и фундаментов. 1954. Сб. № 24.

16. Снитко А. Н. О решении контактной задачи для жесткой стенки в упругой среде // Сб. докладов по гидротехнике. Вып. 11. ВНИИГ, 1970.

17. Симвулиди И. А. Расчет инженерных конструкций на упругом основании. Изд. 3-е, испр. и доп. М.: Высшая школа, 1973. 431 с.

18. Schanz T., Vermeer P. A., Bonnier P. G. The hardening soil model: Formulation and verification // *Beyond 2000 in Computational Geotechnics*. Ed. by R. B. J. Brinkgreve. Balkema, Rotterdam, 1999. 328 p.

References

1. Skvortsov K. D., Mangushev R. A. *Uchet vliyaniya deformatsiy shpuntovykh ograzhdeniy kotlovanov na dopolnitelnye osadki zdaniy okruzhayushchey zastroyki* [Accounting for the influence of sheet pile excavation enclosing structures' deformations on additional settlement of buildings of the surrounding area]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2022, no. 5 (94), pp. 61–68.

2. Rengach V. N. *Shpuntovye stenki (raschet i projektirovanie)* [Sheet pile walls (calculation and design)]. Leningrad, Stroyizdat Publ., 1970, 112 p.

3. Snitko N. K. *Staticheskoe i dinamicheskoe davlenie gruntov i raschet podpornykh stenok* [Static and dynamic pressure of soils and calculation of retaining walls]. Moscow, Leningrad, Stroyizdat Publ., 1963, 295 p.

4. Sokolovskiy V. V. *Statika sypuchey sredy* [Statics of loose medium]. 3-rd ed., revised. Moscow, Fizmatgiz Publ., 1960, 121 p.

5. Novotortsev V. I. *Opyt primeneniya teorii plastichnosti k zadacham ob opredelenii nesushchey sposobnosti osnovaniy sooruzheniy* [Experience of application of plasticity theory to problems of determination of the bearing capacity of foundations of structures]. *Izv. NII gidrotekhniki – Proceedings of the Research Institute of Hydraulic Engineering*, 1938, vol. XXII, pp. 115–127.

6. Shikhiev F. M. *Issledovanie deformatsiy i napryazhennogo sostoyaniya gruntov* [Research of deformations and stressed state of soils]. *Nauchnye trudy. Gidrotekhnika. Otdel uchebnykh zavedeniy MMF SSSR* [Scientific works. Hydro-engineering. Department of Educational Institutions of the USSR MMF]. Moscow, Morskoy transport Publ., 1962, iss. II, pp. 100–110.

7. Shikhiev F. M. *O raspredelenii davleniya sypuchikh tel po vysote podpornykh sten* [About distribution of pressure

of loose bodies on height of retaining walls]. *Nauchnye trudy Odesskogo in-ta inzhenerov morskogo flota. Yubileyniy vypusk* [Proceedings of the Odessa Institute of Marine Engineers. Jubilee issue]. Moscow, Morskoy transport Publ., 1955, pp. 221–235.

8. Terzaghi K. Stability and stiffness of cellular cofferdams. *Trans ASCE*, 1945, vol. 110, paper 2253, pp. 1083–1119.

9. Dubrova G. A. *Vzaimodeystvie grunta i sooruzheniy: raschety nagruzok ot nesvyaznykh gruntov na gidrotekhnicheskie sooruzheniya s uchetom deformatsiy* [Interaction of soil and structures: calculation of loads from unbound soils on hydraulic structures with account of deformations]. Moscow, Rechnoy transport Publ., 1963, 219 p.

10. Yakobi E. K. *Raschet shpuntovykh sten* [Calculation of sheet pile walls]. Riga, Ionk i Polievskiy Publ., 1912, 54 p.

11. Brenneke L., Lomeyer E. *Osnovaniya i fundamenty* [Bases and foundations]. In 3 vols. Transl. from German by Kleyn K. L., ed. by Smirenkin P. P. Moscow; Leningrad, Gosstroyizdat Publ., 1933–1936. Vol. 1: Stroitel'nye grunty, stroitel'nye materialy [Building soils, building materials]. 1933, 287 p.

12. Kleyn G. K. *Raschet podpornykh sten* [Calculation of retaining walls]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1964, 196 p.

13. Zhemochkin B. N. *Raschet uprugoy zadelki sterzhnya. Izgib sterzhnya v uprugom poluprostranstve* [Calculation of elastic termination of a rod. Bending of a rod in an elastic half-space]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1948, 68 p.

14. Gorbunov-Posadov M. I., Malikova T. A., Solomin V. I. *Raschet konstruktсий na uprugom osnovanii* [Calculation of structures on an elastic base]. 3-rd ed., revised. Moscow, Stroyizdat Publ., 1984, 679 p.

15. Gorbunov-Posadov M. I., Shekhter O. Ya., Kofman V. A. *Davlenie grunta na zhestkiy zaglublenniy fundament i svobodnye deformatsii kotlovana* [Soil pressure on rigidly buried foundations and free deformations of the excavation]. *Trudy NII osnovaniy i fundamentov* [Proceedings of the Research Institute of Bases and Foundations]. 1954, iss. 24.

16. Snitko A. N. *O reshenii kontaktnoy zadachi dlya zhyostkoy stenki v uprugoy srede* [On the solution of the contact problem for a rigid wall in an elastic medium]. *Sb. dokladov po gidrotekhnike* [Collection of reports on hydraulic engineering]. VNIIG Publ., 1970, iss. 11.

17. Simvulidi I. A. *Raschet inzhenernykh konstruktсий na uprugom osnovanii* [Calculation of engineering structures on an elastic base]. 3-rd ed., revised. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1973, 431 p.

18. Schanz T., Vermeer P. A., Bonnier P. G. The hardening soil model: formulation and verification. *Beyond 2000 in Computational Geotechnics*, ed. by R. B. J. Brinkgreve, Balkema, Rotterdam, 1999, 328 p.