УДК 624.1

© И. В. Хритин, ст. научн. сотрудник
(АО «НИЦ «Строительство»
НИИОСП им. Н. М. Герсевича)
E-mail: ilyas-niiosp@yandex.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2018-15-2-112-121

© I. V. Khritin, senior research worker
(OJSC SRC «Stroitelstvo»
NIIOSP named after N. M. Gershevich)
E-mail: ilyas-niiosp@yandex.ru

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРНО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ РАСПОРНОЙ СИСТЕМЫ НА ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ УСИЛИЯ В КОНСТРУКЦИЯХ ОГРАЖДЕНИЯ КОТЛОВАНОВ

THE INFLUENCE OF TEMPERATURE DEFORMED STATE OF THE STRUT SYSTEM ON ADDITIONAL FORCES IN THE SHORING STRUCTURES OF EXCAVATION PITS

Приведены результаты комплексных расчетно-теоретических и экспериментальных (лабораторных и натурных) исследований воздействия сезонных изменений температур на напряженно-деформируемое состояние (НДС) системы «массив грунта — ограждающая конструкция — распорная крепь». Выполнен анализ влияния различных факторов: геологических, гидрогеологических условий и параметров котлована (глубина котлована, длина распорок, жесткости ограждающей стенки котлована и распорных конструкций) на изменение НДС в ограждающих и распорных конструкциях котлованов. Показано, что усилия в распорной системе с учетом податливости ограждающих стенок существенно меньше усилий, определенных по схеме с неподвижными опорами. Полученные результаты сопоставлены с данными ранее выполненных исследований, в том числе зарубежных авторов.

Ключевые слова: температурные усилия в распорной системе, сезонные изменения температуры, приращения усилий, геотехнический прогноз, податливость грунта за ограждением котлована, изгибающие моменты в ограждающей стенке.

The article presents the results of complex calculation-theoretic and experimental studies (both laboratory and field ones) of the effect of seasonal temperature changes on the stress-strain state (SSS) of the system «soil mass — enclosing structure — expansion-type support». The author has carried out an analysis on the influence of various factors – geological effects, hydro-geological conditions and parameters of the pit (the pit depth, the length of the struts, the rigidity of the enclosing wall of the pit strut structure) on changing of the SSS values in the enclosing and strut structures of the pit. It is shown that the forces in the strut system, taking into account the yielding property of the enclosing walls are significantly less than the forces determined by the scheme with fixed supports. The obtained results are compared with the data of the earlier carried out studies, including those performed by foreign authors.

Keywords: thermal forces in the strut system, seasonal variations of temperature, the increment of forces, geotechnical forecast, yielding of soil behind the pit enclosing, bending moments in the enclosing wall.

Одним из самых распространенных способов для сооружения подземных частей зданий, а также других заглубленных сооружений в городских условиях являются котлованы. Устройство котлованов может производиться под защитой естественного откоса грунта, но по большей части используются различные ограждающие конструкции.

Современное строительство имеет тенденцию к увеличению габаритов подземных сооружений. Значительная часть котлованов имеет

глубину 15 м и больше. В совокупности с увеличением размера котлована в плане это ведет к усложнению конструкций ограждения котлованов. Температурные воздействия в данных условиях становятся существенным фактором, влияющим на их проектирование.

Для конструкций, не защищенных от суточных и сезонных изменений температуры, СП20.13330.2011 предусмотрено учитывать изменение во времени средней температуры и перепад температуры по сечению эле-

мента. Требование учитывать температурно-климатические воздействия при проектировании основания подземных частей сооружений и при геотехническом прогнозе также приведено в СП22.13330.2011.

Следует учитывать, что длительность работ в котлованах может составлять до года и более, при этом сезонный перепад температуры конструкций ограждения котлованов в условиях средней полосы России может достигать 60 °С. В результате смонтированные в холодные периоды года распорки в теплые периоды удлиняются и, как следствие, в них увеличиваются внутренние усилия, возникающие из-за сопротивления окружающего котлован массива грунта. В системах, смонтированных в летний период, в осенне-зимний период распорки наоборот укорачиваются, что приводит к дополнительным горизонтальным перемещениям ограждения котлована и осадкам прилегающей к котловану территории.

Вопросам устройства котлованов и их влияния на окружающую застройку посвящены работы [1, 3, 4, 8] и др. Отдельные аварийные ситуации, связанные с температурными воздействиями на конструкции ограждения котлованов, описаны в работах [2, 10, 16]. Также в исследованиях [5–7, 11] приводятся данные о влиянии изменения температуры в осенне-зимний период на горизонтальные перемещения ограждающих стенок котлована и дополнительные осадки окружающей застройки при устройстве котлована.

Данные натурных экспериментов [12 и 15] также подтверждают увеличение усилий в распорной системе при повышении температуры распорок. В котловане глубиной 16 м с четырьмя ярусами распорок, выполненном для строительства подземной части здания Main Tower (г. Франкфурт, Германия), при повышении температуры на 20 °С зафиксировано увеличение усилий в распорках до 60 %. Другие данные получены при строительстве станции Esplanade Station (г. Перт, Западная Австралия), в котловане глубиной 13 м с тремя ярусами распорок из труб $\varnothing 406 \times 9,5$ мм и $\varnothing 1016 \times 16$ мм средней длиной 23,5 м. Результаты эксперимента показали, что при повышении температуры на 25 °С дополнительные усилия в распорке верхнего яруса увеличиваются на 30 %.

В работе [12] предложено условие зависимости дополнительных усилий в распорках от податливости грунта за ограждением котлована:

$$\Delta N = f_t \alpha_t \Delta T \cdot EA, \quad (1)$$

где f_t — понижающий коэффициент, учитывающий податливость ограждающих стенок котлована; α_t — коэффициент линейного температурного расширения материала распорки; ΔT — перепад температуры; EA — осевая жесткость распорок.

Понижающий коэффициент f_t для определения усилий в распорной системе с учетом податливости грунта для конкретных условий получен эмпирически. Для ограждения глубокого котлована в виде «стены в грунте» из буросекущих свай в полутвердых глинах коэффициент f_t определен в диапазоне от 0,2 до 0,3. Ранее в работах [17, 18] были предложены следующие значения коэффициента f_t : 0,15 — для ограждения котлована из отдельных элементов; 0,25–0,35 — для сплошного ограждения котлована в виде «стены в грунте» траншейного типа или из буросекущих свай. В работах [13, 14] рассматривались аналогичные эмпирические подходы.

Следует отметить, что предложенный метод определения усилий в распорной системе, основанный на понижении значения усилий, определенных для распорок с неподвижными опорами, не учитывает длину и глубину установки распорок. Понижающий коэффициент приведен для конкретных грунтовых условий.

При этом в современной практике проектирования котлованов расчеты элементов крепления на температурные воздействия, как правило, проводят по схеме с неподвижными опорами. При подобном подходе определенные расчетом температурные напряжения в распорных конструкциях превышают напряжения, определенные с учетом податливости стенок котлована. В результате проектирование ведется с перерасходом материала.

Проведенные автором натурные исследования влияния изменения температуры на усилия в распорных конструкциях котлована показали, что дополнительные усилия в распорках при изменении температуры на 18 °С составили порядка 400 кН. Расчетные дополнительные усилия в распорках, определенные по схеме с неподвижными опорами, достигли бы 700 кН (рис. 1).

Рис. 1. График изменения средней температуры и усилий в распорках: 1 — расчетное усилие в распорках при неподвижных опорах; 2 — средняя температура распорок; 3 — фактическое усилие в распорках

В среднем зафиксированные значения усилий в распорках составили 0,46 от расчетных усилий, определенных по схеме с неподвижными опорами. Исследования проведены при устройстве котлована глубиной 9,4–11,0 м для строительства подземной части многоквартирного жилого дома в Москве. Ограждение котлована выполнено в виде «стены в грунте» из буронабивных свай диаметром 820 мм, длиной 15,9–17,1 м. Крепление ограждающей стенки реализовано двумя ярусами распорок из труб диаметром 630×8 мм, длиной до 23,5 м, установленных с шагом 4–6,4 м.

Для определения факторов, влияющих на формирование напряженно-деформируемого состояния (НДС) системы «массив грунта — ограждающая конструкция — распорная крепь» в условиях изменения температуры последней, и прогнозирования величин усилий в конструкциях ограждения котлована и величин осадок поверхности окружающего массива грунта в экспериментально-технологическом отделении НИИОСП им. Н. М. Герсеева АО «НИЦ «Строительство» проведены расчетно-теоретические исследования.

Исследования выполнены с помощью геотехнического конечно-элементного программного комплекса PLAXIS AE, в котором смоделировано удлинение/укорочение распорок, возникающее

под воздействием повышения/понижения температуры при смене времен года.

Рассмотрены температурные деформации распорок длиной 18 м за счет повышения температуры Δt до 60 °C.

Изменение длины моделирующей распорку стержня при изменении температуры на величину Δt реализовано в расчетах при помощи имеющейся в программе PLAXIS процедуры prescribed displacement (заданные смещения). В расчетах использована нелинейная упруго-идеально-пластическая грунтовая модель Кулона — Мора.

Расчеты изменения НДС конструкции ограждения котлована при повышении температуры распорок выполнены с учетом поэтапной экскавации грунта и после реализации перемещений ограждающих стен от статических нагрузок.

Для проведения исследований была принята модель котлована в однородном массиве грунта под защитой сплошной ограждающей стенки с креплением распорной системой. В качестве базовой расчетной схемы принят котлован глубиной 6 м с одним ярусом распорной системы.

При выполнении исследований варьированию подвергалось шесть основных параметров: грунтовые условия, гидрогеологические условия, глубина котлована, жесткость ограждающей стенки котлована, жесткость распорных конструкций, возможное разуплотнение грунта на контакте с

Рис. 2. Обобщенный вид расчетной схемы котлована

ограждающей стенкой. Обобщенный вид расчетной схемы котлована приведен на рис. 2.

Анализ полученных результатов показал, что дополнительные усилия в конструкциях ограждения котлована пропорциональны жесткости массива грунта, окружающего котлован. Максимальные значения получены для песков плотно-

го сложения, минимальные — для мелких и пылеватых, рыхлых песков любой крупности, глин тугопластичных и мягкопластичных, суглинков мягкопластичных. Практически прямо пропорциональны дополнительные усилия и длине распорок, что объяснимо прямой зависимостью потенциальных температурных деформаций

Таблица 1

Влияние грунтовых условий, гидрогеологических условий и параметров конструкций ограждения котлована на дополнительные усилия ΔN_t , ΔM_t в конструкциях ограждения котлованов

Исследуемый параметр	Влияние исследуемых параметров на значения δ^* , % усилия в конструкциях ограждения котлованов при повышении температуры распорок		
	низкое	среднее	высокое
Грунтовые условия			$\delta_{\Delta N} = 87$ $\delta_{\Delta M} = 80$
Длина распорных конструкций		$\delta_{\Delta N} = 48$ $\delta_{\Delta M} = 52$	
Глубина котлована	$\delta_{\Delta N} = 4$	$\delta_{\Delta M} = 58$	
Гидрогеологические условия	$\delta_{\Delta N} = 2$ $\delta_{\Delta M} = 10$		
Жесткость ограждающей стенки котлована	$\delta_{\Delta N} = 10$	$\delta_{\Delta M} = 72$	
Жесткость распорных конструкций		$\delta_{\Delta N} = 29$ $\delta_{\Delta M} = 33$	
Разуплотнение грунта на контакте с ограждением	$\delta_{\Delta N} = 19$ $\delta_{\Delta M} = 14$		

* Значения δ определены из условия: $-\delta_{\Delta N} = \frac{\Delta N_{\max} - \Delta N_{\min}}{\Delta N_{\max}} 100 \%$; $-\delta_{\Delta M} = \frac{\Delta M_{\max} - \Delta M_{\min}}{\Delta M_{\max}} 100 \%$.

распорок от длины. Глубина котлована, жесткость распорных и ограждающих конструкций ограждения котлованов также оказывают значительное влияние на дополнительные усилия в ограждающей стенке. При этом влияние указанных факторов на усилия в распорной системе незначительное (табл. 1).

Установленные по расчету зависимости дополнительных продольных усилий ΔN_t в распорной системе и изгибающих моментов ΔM_t в ограждении от изменения температуры распорок — линейные (рис. 3, 4).

Отношение расчетных усилий ΔN_t в распорках к усилиям, определенным по схеме с непод-

Рис. 3. Зависимость дополнительных продольных усилий в распорной системе ΔN_t от изменения температуры распорок. Угловой коэффициент $k = \frac{\Delta N_t}{\Delta t}$:
а — в песчаных грунтах; б — в пылеватоглинистых грунтах

Рис. 4. Зависимость дополнительных изгибающих моментов в ограждении от изменения температуры распорок. Угловой коэффициент $k = \frac{\Delta M_p}{\Delta t}$:
а — в песчаных грунтах; б — в пылевато-глинистых грунтах

вижными опорами ΔN_t^{fix} , определено в диапазоне $f_t = 0,09-0,46$, что соотносится с данными [12, 17, 18].

Полученные коэффициенты k и f_t для рассмотренных грунтовых условий возможно выделить в группы со схожим диапазоном коэффициентов (табл. 2).

Данные экспериментальных исследований [9], проведенных в большом грунтовом лотке экспериментального корпуса НИИОСП им. Н. М. Герсеева на крупномасштабной физической модели конструкции ограждения котлована, подтвердили результаты расчетно-теоретических исследований.

Таблица 2

Коэффициенты k и f_t в различных грунтовых условиях

№ п/п	Тип грунта	k		f_t
		$k_{\Delta N_t}$	$k_{\Delta M_t}$	
1	Пески мелкие ($0,45 \leq e \leq 0,65$), средние и крупные ($0,45 \leq e \leq 0,6$)	1,8–1,16	0,67–0,58	0,46–0,37
2	Пески пылеватые ($0,45 \leq e \leq 0,7$), средние и крупные ($0,6 \leq e \leq 0,75$)	1,52–0,7	0,60–0,37	0,4–0,23
3	Пески мелкие ($0,65 \leq e \leq 0,8$), крупные и средние ($e > 0,75$); супеси твердые ($0 \leq I_L \leq 0,25$) и пластичные ($0,25 < I_L \leq 0,75$); суглинки и глины полутвердые ($0 \leq I_L \leq 0,25$); суглинки и глины тугопластичные ($0,25 < I_L \leq 0,5$)	1,16–0,52	0,53–0,26	0,32–0,16
4	Пески пылеватые ($0,75 \leq e \leq 0,85$), мелкие ($e > 0,8$); суглинки и глины мягкопластичные ($0,5 < I_L \leq 0,75$)	0,7–0,25	0,34–0,14	0,21–0,09
5	Пески пылеватые ($e > 0,85$)	0,25–0,05	0,14–0,01	0,09–0,05

Следует отметить, что эксперимент проводился для двух типов ограждающих стенок: из отдельных элементов и сплошной (стенка из труб выполнена с забиркой в виде сплошного металлического листа со стороны грунта). Результаты измерения усилий в распорках для двух типов ограждающих стенок были сопоставлены с данными численного расчета в пространственной постановке в программе PLAXIS (рис. 5).

В результате экспериментальные и расчетные данные показали, что ограждение из одиночных элементов в сравнении со сплошным ограждением при прочих равных условиях обладает большей податливостью, и температурные усилия в распорках с подобным типом ограждения будут ниже на 15–25 % (рис. 6).

Заключение

На основании экспериментальных и расчетно-теоретических исследований сделан вывод

о том, что дополнительные усилия в конструкциях ограждения котлованов при изменении температурно-деформированного состояния распорной системы практически пропорциональны жесткости окружающего котлован массива грунта. Более жесткий грунт при прочих равных условиях обуславливает появление в конструкциях ограждения котлована наибольших дополнительных усилий.

При определении дополнительных усилий в конструкциях ограждения котлованов следует учитывать длину распорок, глубину котлована, жесткость распорных конструкций и ограждающих стенок.

Расчетно-теоретическими и экспериментальными исследованиями подтверждено, что дополнительные «температурные» усилия в распорках, определенные с учетом податливости ограждающих стенок, существенно меньше усилий, опре-

Рис. 5. Деформированная схема конечных элементов при численном расчете модели котлована в PLAXIS (перемещения увеличены в 200 раз): а — сплошное ограждение; б — ограждение из отдельных элементов

Рис. 6. Графики экспериментальных и расчетных значений усилий в распорках при изменении температуры

деленных по схеме с неподвижными опорами. Для рассмотренных условий соотношение усилий определено в диапазоне от 0,09 до 0,46, что согласуется с данными натурных наблюдений.

Применение на практике учета податливости грунта при определении температурных воздействий на распорную систему ограждений позволит сократить материалоемкость и объемы строительно-монтажных работ при устройстве котлованов и избежать возможных аварийных ситуаций.

Библиографический список

1. Ильичев В. А., Мангушев Р. А., Никифорова Н. С. Опыт освоения подземного пространства российских мегаполисов // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2012. № 2. С. 15–17.
2. Колыбин И. В. Уроки аварийных ситуаций при строительстве котлованов в городских условиях // Развитие городов и геотехническое строительство. 2008. № 12. С. 90–124.
3. Мангушев Р. А., Карлов В. Д., Сахаров И. И., Осокин А. И. Основания и фундаменты. М.: АСВ, 2013. 388 с.
4. Мангушев Р. А., Никифорова Н. С. Технологические осадки зданий и сооружений в зоне влияния подземного строительства. М.: АСВ, 2017. 160 с.

5. Петрухин В. П., Поспехов В. С., Шулятьев О. А. Опыт проектирования и мониторинга глубокого котлована. НИИОСП им. Н. М. Герсевича: сб. науч. тр. Вып. 99. М.: Издательский дом «Экономика, строительство, транспорт», 2008. С. 139–148.
6. Петрухин В. П., Шулятьев О. А., Мозгачева О. А. Опыт проектирования и мониторинга подземной части Турецкого торгового центра // Основания и фундаменты. 2004. № 5. С. 2–8.
7. Петрухин В. П., Шулятьев О. А., Мозгачева О. А. Особенности строительства Турецкого торгового центра // Основания и фундаменты. 2003. № 2. С. 6–8.
8. Основания, фундаменты и подземные сооружения: справочник геотехника / под общ. ред. В. А. Ильичева, Р. А. Мангушева. М.: АСВ, 2014. 728 с.
9. Хритин И. В. Экспериментальные исследования влияния сезонных изменений температуры на усилия в конструкциях ограждения котлованов // Вестник гражданских инженеров. 2017. № 2 (61). С. 154–162.
10. Шулятьев О. А., Поспехов В. С. Анализ работы распорной системы ограждения глубокого котлована в условиях изменения температуры // Промышленное и гражданское строительство. 2017. № 4. С. 50–54.
11. Шулятьев О. А., Поспехов В. С., Шулятьев С. О. Из практики проектирования ограждающей конструкции и фундаментной плиты административного комплекса с четырехуровневой подземной автостоянкой // Жилищное строительство. 2012. № 9. С. 50–53.
12. Moormann Ch. In-situ monitoring and analysis of braced excavations with irregular shape // Geotechnical

Aspects of Underground Construction in Soft Ground: Proceedings of the 3rd international symposium / Edited by Kastner R., Emeriault F., Dias D., Guilloux A. Lyon, 2002. Pp. 523–528.

13. Chapman K. R., Cording E. J., Schnabel H., Jr. Performance of a braced excavation in granular and cohesive soils // Proc. Of the Speciality Conference on Performance of Earth and Earth-Supported Structures, ASCE, Vol. 3, 1973. Pp. 271–293.

14. Endo M., Kawasaki T. Study of thermal stresses acting on struts // Transact. Architect. Inst. Japan — AIJ 63. 1963. Pp. 689–692.

15. Zaremba N. L. Experiences in strut load monitoring in excavations for the new metrorail city project // School of Civil and Resource Engineering, The University of Western Australia, 2007. 12 p.

16. Teparaksa W., Thasnanipan N., Maung A. W., Tangseng P. Lessons from the collapse during construction of an inlet pumping station: Geotechnical instrumentation aspects // Field measurements in geomechanics. Proc. of the 5th Int. Symposium. Singapore, 1999. Pp. 247–252.

17. Weißenbach A. Einfluss der Temperatur auf die Kräfte in der Aussteifung tiefer Baugruben // Beiträge zum 7. Chr. Veder Kolloquium, Mitteil. Institut für Bodenmechanik, Felsmechanik und Grundbau, Techn. Univ. Graz, 1992.

18. Weißenbach A. Einfluss der Temperatur auf die Bemessung der Aussteifung tiefer Baugruben // Mitteilungen des Instituts für Grundbau, Bodenmechanik und Energiewasserbau, Universität Hannover, Heft 36, 1993. Pp. 275–285.

References

1. Il'ichev V. A., Mangushev R. A., Nikiforova N. S. *Opyt osvoeniya podzemnogo prostranstva rossiyskikh megapolisov* [Experience of underground space development in Russian megalopolises]. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov. – Bases, foundations and soil mechanics*, 2012, no. 2, pp. 15–17.

2. Kolybin I. V. *Uroki avariynykh situatsiy pri stroitel'stve kotlovanov v gorodskikh usloviyakh* [Emergency situations experience during construction of foundation pits in urban environments]. *Razvitie gorodov i geotekhnicheskoe stroitel'stvo – Development of cities and geotechnical engineering*, 2008, no. 12, pp. 90–124.

3. Mangushev R. A., Karlov V. D., Sakharov I. I., Osokin A. I. *Osnovaniya i fundamenty* [Bases and foundations]. Moscow, ASV Publ., 2013, 388 p.

4. Mangushev R. A., Nikiforova N. S. *Tekhnologicheskie osadki zdaniy i sooruzheniy v zone vliyaniya podzemnogo stroitel'stva* [Technology caused settlement of buildings and structures in the zone of underground construction influence]. Moscow, ASV Publ., 2017, 160 p.

5. Petrukhin V. P., Pospekhov V. S., Shulyat'ev O. A. *Opyt proektirovaniya i monitoringa glubokogo kotlovana* [The experience of designing and monitoring a deep foundation pit]. NIIOSP named after N. M. Gersevanov. Coll. of sci. works, iss. 99. Moscow, Ehkonomika, Stroitel'stvo, Transport Publ., 2008, pp. 139–148.

6. Petrukhin V. P., Shulyat'ev O. A., Mozgacheva O. A. *Opyt proektirovaniya i monitoringa podzemnoy chasti Turetskogo trgovogo tsentra* [Experience in the design and monitoring of the underground part of the Turkish trade center]. *Osnovaniya i fundamenty – Bases and foundations*, 2004, no. 5, pp. 2–8.

7. Petrukhin V. P., Shulyat'ev O. A., Mozgacheva O. A. *Osobennosti stroitel'stva Turetskogo trgovogo tsentra* [Features of construction of the Turkish trade center]. *Osnovaniya i fundamenty – Bases and foundations*, 2003, no. 2, pp. 6–8.

8. *Osnovaniya, fundamenty i podzemnye sooruzheniya: spravochnik geotekhnika*. [Bases, foundations and underground structures: handbook of geotechnical engineering]. Ed. by Il'ichev V. A., Mangushev R. A. Moscow, ASV Publ., 2014, 728 p.

9. Khritin I. V. *Ehksperimental'nye issledovaniya vliyaniya sezonnykh izmeneniy temperatury na usiliya v konstruktivnykh ograzhdeniyakh kotlovanov* [Experimental study of the effect of seasonal temperature changes on the forces in excavation shoring constructions]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2017, no. 2 (61), pp. 154–162.

10. Shulyat'ev O. A., Pospekhov V. S. *Analiz raboty raspornoj sistemy ograzhdeniya glubokogo kotlovana v usloviyakh izmeneniya temperatury* [Analysis of the strut system performance in the deep foundation pit enclosing structure in conditions of temperature change]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo – Industrial and Civil Construction*, 2017, no. 4, pp. 50–54.

11. Shulyat'ev O. A., Pospekhov V. S., Shulyat'ev S. O. *Iz praktiki proektirovaniya ograzhdayushchey konstruktсии i fundamentnoy plity administrativnogo kompleksa s chetyrehurovnevoy podzemnoy avtostoyankoy* [From the practice of designing the building the enclosing structure and the foundation slab of the administrative complex with a four-level underground parking]. *Zhilishchnoe stroitel'stvo – House construction*, 2012, no. 9, pp. 50–53.

12. Moormann Ch. *In-situ monitoring and analysis of braced excavations with irregular shape*. Proc. of the 3rd international symposium “Geotechnical aspects of underground construction in soft ground”. Ed. by Kastner R., Emeriault F., Dias D., Guilloux A. Lyon. 2002, pp. 523–528.

13. Chapman K. R., Cording E. J., Schnabel H., Jr. Performance of a braced excavation in granular and cohesive soils. Proc. of the Speciality Conference on Performance of

Earth and Earth-Supported Structures. ASCE, vol. 3, 1973, pp. 271–293.

14. Endo M., Kawasaki T. Study of thermal stresses acting on struts. *Transact. Architect. Inst. Japan — AIJ* 63, 1963, pp. 689–692.

15. Zaremba N. L. *Experiences in strut load monitoring in excavations for the new metro rail city project*. School of Civil and Resource Engineering. University of Western Australia, 2007, 12 p.

16. Teparaksa W., Thasnanipan N., Maung A. W., Tangseng P. *Lessons from the collapse during construction of an inlet pumping station. Geotechnical instrumentation*

aspects. Field measurements in geo-mechanics. Proc. of the 5th Int. Symposium. Singapore, 1999, pp. 247–252.

17. Weißenbach A. *Einfluss der Temperatur auf die Kräfte in der Aussteifung tiefer Baugruben*. Beiträge zum 7. Chr. Veder Kolloquium, Mitteil. Institut für Bodenmechanik, Felsmechanik und Grundbau, Techn. Univ. Graz, 1992.

18. Weißenbach A. *Einfluss der Temperatur auf die Bemessung der Aussteifung tiefer Baugruben*. Mitteilungen des Instituts für Grundbau, Bodenmechanik und Energiewasserbau, Universität Hannover, Heft 36, 1993, pp. 275–285.