

УДК 624.159.2

А.Б. Пономарев, А.В. Захаров

Пермский национальный исследовательский
политехнический университет

О НЕКОТОРОМ ПОДХОДЕ К ПРОГНОЗУ ОСАДОК ОСНОВАНИЙ НА ТЕХНОГЕННЫХ ГРУНТАХ

Представлены результаты исследований инженерно-геологических условий на участке старого пруда. Авторами осуществлен ряд прогнозных геотехнических расчетов для моделирования осадок грунтового основания в период строительства жилого комплекса. Сложность расчетов заключалась в использовании техногенных грунтов в качестве основания инженерных коммуникаций без их удаления. Также приводятся результаты геотермального мониторинга грунтов, на основании которых был выполнен расчет основания с учетом сезонного оттаивания грунта.

Ключевые слова: техногенные грунты, насыпные грунты, мониторинг температурных полей, осадки оснований, численное моделирование.

Переход от типового строительства на свободной территории к реконструкции и новому строительству в сложных условиях плотной городской застройки является актуальной задачей всех участников современного строительного комплекса. В настоящее время интенсивное жилищное строительство в г. Перми ведется на территориях, характеризующихся сложными инженерно-геологическими условиями (14 опасных геологических процессов по СНиП 2.01.15–90) и высокой плотностью застройки [1].

Рассматриваемая в данной статье площадка строительства относится к району, где в конце XVIII – начале XIX в. проводились разработки медистых песчаников из подземных выработок. Со временем рудоносные пласты песчаников были выработаны, добыча их прекратилась. Участок расположен на делювиальном склоне IV левобережной надпойменной террасы долины р. Камы. Склон долины реки осложнен логом. Глубина лога, по архивным материалам, ранее достигала до 7–10 м. В тальвеге лога был пруд, который пользовался популярностью у местных жителей и получил название «Гагаринский пруд» по причине близости Дворца культуры им. Ю. Гагарина. В связи с массовой застройкой окружающей территории лог к 1981 г. был почти полностью спланирован, незасыпанная часть лога осталась заполненной водой. В августе 1992 г. производилось частичное осушение водоема и его чистка. Строительное освоение территории привело к ухудшению питания водоема, что вызвало его деградацию. Зимой 2011 г. была осу-

ществлена окончательная засыпка водоема для строительства жилого комплекса на данном участке. Засыпка пруда осуществлялась неорганизованным способом, в основном из привозного грунта, с примесью различного строительного мусора, с включением льда водоема и снегового покрова с окружающей территории. В процессе работ не осуществлялся контроль качества отсыпки техногенного грунта, не определялись его степень уплотнения, гранулометрический состав, физические и механические свойства [2].

Ввиду сложности инженерно-геологических условий площадки строительства в процессе выполнения исследовательских работ были поставлены следующие задачи:

- провести анализ и уточнение геологической ситуации массива насыпного грунта на территории бывшего пруда;

- выполнить прогнозные геотехнические расчеты и моделирование для определения возможных деформаций массива насыпного грунта при устройстве наружных инженерных сетей и благоустройстве территории;

- разработать рекомендации по осуществлению технических решений, с учетом возможных деформаций массива грунта, при выполнении СМР по наружным сетям и благоустройству.

Для решения поставленных задач были выполнены следующие основные работы:

- проведены дополнительные инженерно-геологические изыскания на площадке строительства;

- осуществлен мониторинг температурных полей массива грунта;

- выполнены численные и аналитические расчеты по прогнозу осадок грунтового массива;

- осуществлено численное моделирование процесса оттаивания грунтов;

- разработаны рекомендации по принятию технических решений с целью инженерного освоения данной территории.

Для уточнения состояния и свойств насыпных грунтов, условий их залегания, выявления мерзлых прослоек проведены дополнительные изыскания. Схема расположения выработок приведена на рис. 1.

По результатам анализа архивных данных и проведенных дополнительных изысканий установлено фактическое инженерно-геологическое строение площадки. Установлено, что с поверхности залегают насыпные грунты, представленные суглинками коричневого цвета, от текуче-

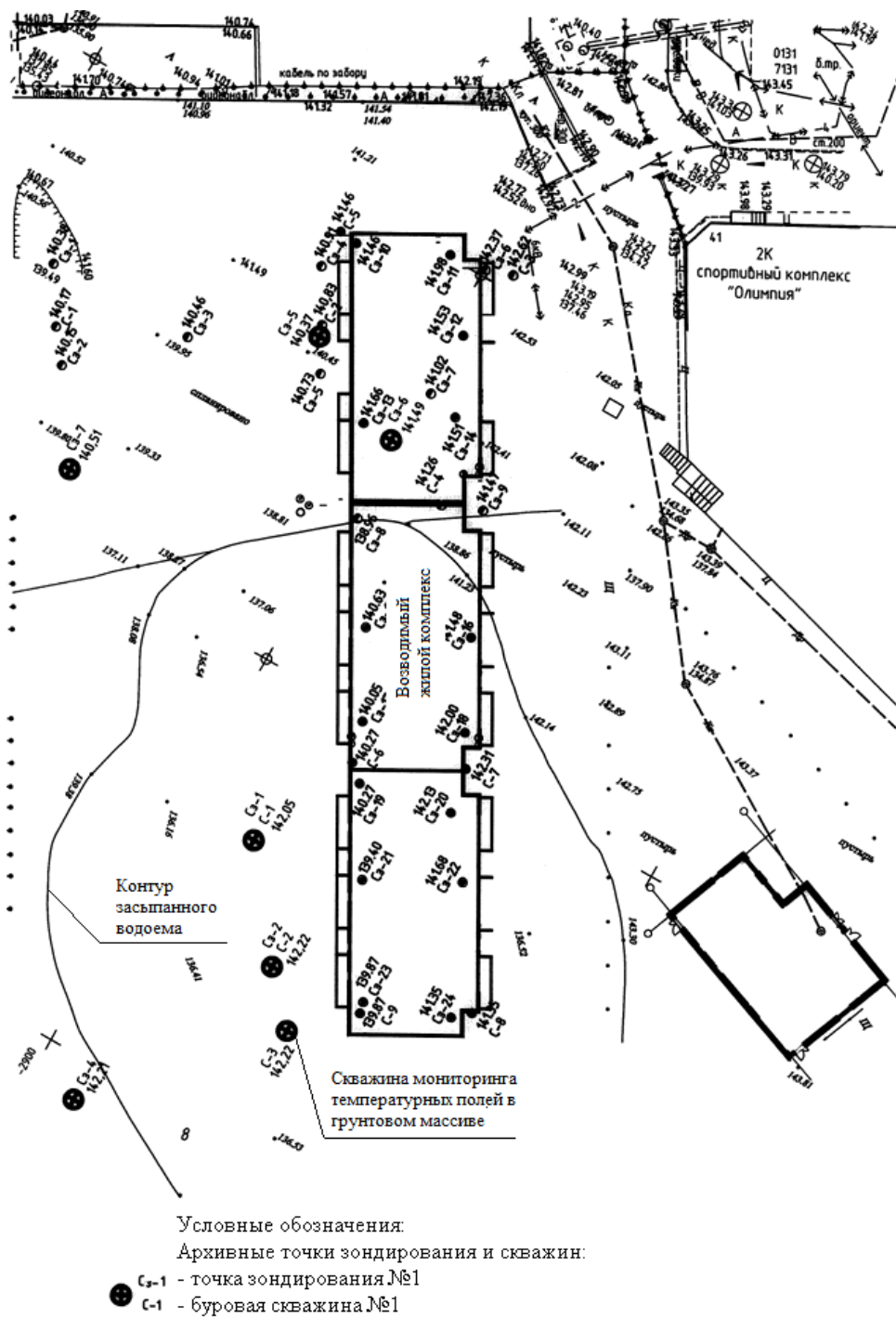


Рис. 1. План строительной площадки

пластичной до тугопластичной консистенции, с примесью органического вещества, прослоями и линзами льда до 10 см, включениями строительного мусора и щебня. Техногенные отложения подстилаются четвертичными аллювиальными грунтами. Вся толща четвертичных отложений представлена глинистыми грунтами. Коренные породы – аргиллиты, по данным архивных изысканий, залегают на глубинах 9,6–13,0 м. Породы сильнотрещиноватые, сильно и неравномерно выветрелые. Показатели свойств ИГЭ приведены в таблице. Установившейся уровень грунтовых вод, по данным изысканий августа 2012 г., зафиксирован на глубине 1,7 м [2].

Показатели физических свойств грунтов

№ ИГЭ	Наименование грунта	w, д.е.	ρ , г/см ³	ρ_s , г/см ³	n, д.е.	e, д.е.	S_r , д.е.	c, МПа	φ , град.	k_{com}
1	Суглинок тугопластичный насыпной	0,18	1,83	1,55	0,43	0,74	0,66	0,019	21,87	0,87
2	Суглинок текучепластичный	0,25	1,97	1,58	0,42	0,72	0,94	0,046	8,58	–
3	Суглинок текучий с прослоями льда	0,24	1,96	1,58	0,41	0,69	0,90	0,008 0,022	8,21 8,9	–
4	Глина заторфованная, текучепластичная	0,30	1,96	1,51	0,45	0,82	1,00	0,007	12,69	–
5	Глина текучая	0,26	1,94	1,54	0,44	0,78	0,91	0,006	8,7	–

На основе анализа имеющихся архивных данных и выполненных дополнительных инженерно-геологических изысканий установлено, что основными особенностями данного геологического массива являются:

- развитие осадки за счет самоуплотнения насыпного грунта от собственного веса, а также внешней нагрузки, в том числе динамической;
- развитие дополнительной осадки за счет уплотнения подстилающих грунтов от веса насыпи;
- развитие осадок слоя частично замороженного грунта в результате его оттаивания.

Для оценки степени промороженности грунтов и прогнозирования времени их оттаивания были выполнены следующие работы:

- установка температурных датчиков в грунтовом массиве;
- мониторинг распределения температурных полей в грунтовом массиве;

- численное моделирование процесса оттаивания грунтов во времени;
- прогноз времени оттаивания грунтов.

Мониторинг распределения температурных полей проведен путем установки датчиков температуры в грунтовом массиве до глубины 10 м с шагом 1,5 м. Установка датчиков произведена августе 2012 г. Результаты мониторинга на конец августа представлены на графиках на рис. 2 и 3.

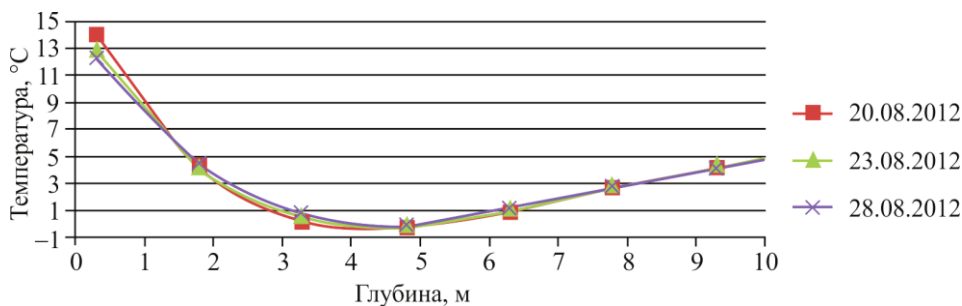


Рис. 2. График распределения температурных полей в грунтовом массиве

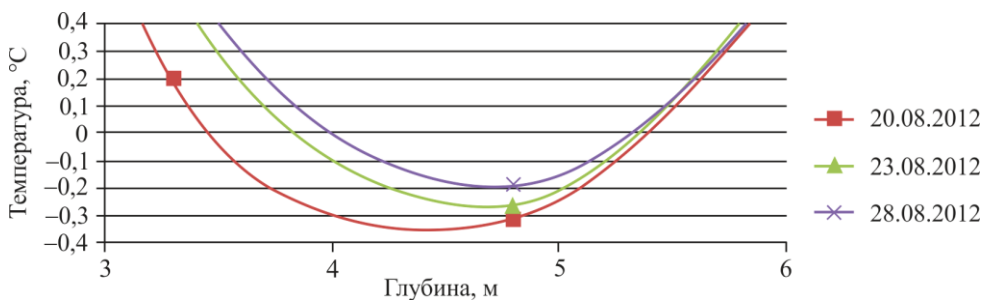


Рис. 3. График распределения температурных полей в грунтовом массиве на глубинах 3–6 м

Анализ графиков позволяет сделать вывод о том, что происходит постепенное оттаивание грунтов. Скорость изменения температуры на глубине 4,8 м составляет $\approx 0,015$ °C/сут. Принимая допущение, что скорость на протяжении всего периода оттаивания грунтов будет постоянной, отметим, что общая продолжительность оттаивания составит ≈ 20 дней.

Численное моделирование процесса оттаивания грунтов во времени было проведено в программном комплексе GeoStudio. Рассматривалось решение плоской нестационарной задачи. Для создания мо-

дели были использованы физические характеристики грунтов по результатам выполненных изысканий в августе 2012 г. Граничные условия модели приняты по аналогии с [3]. Результаты численного моделирования представлены в виде графика изменения температуры во времени на глубине 4,8 м (рис. 4). Анализ графика показал, что переход грунтов в талое состояние происходит на 13-й день численного моделирования.

На основании дополнительных исследований выявлена неравномерность и переслоение промороженного грунта, поэтому было высказано предположение, что продолжительность оттаивания составит не менее 2 мес.

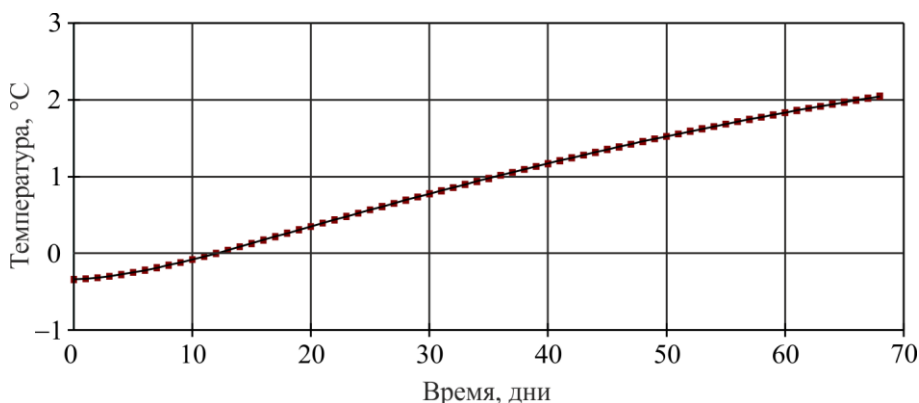


Рис. 4. График изменения температуры на глубине 4,8 м

Для определения возможных деформаций массива насыпного грунта при устройстве наружных инженерных сетей и благоустройства территории были выполнены численное моделирование и аналитические расчеты [4, 5]. Численное моделирование осуществлено с использованием программного комплекса PLAXIS 2D. Вариантное моделирование выполнялось в зависимости от грунтовых условий (для максимальной – 10 м и минимальной – 5 м толщи насыпного грунта), а также глубины заложения инженерных коммуникаций (1,4 и 5,8 м). Согласно полученным результатам, максимальная осадка поверхности от собственного веса и транспортной нагрузки составила 20,4 см. При этом основная доля осадки массива – 12,8 см – приходится на насыпной техногенный грунт мощностью до 10 м. Также по результатам расчетов сделан вывод, что наличие и глубина заложения инженерных коммуникаций не оказали существенного влияния на величину осадок

во всех вариантах расчета, ввиду их незначительных размеров относительно сжимаемой толщи грунтов.

Следующим этапом анализа геотехнической ситуации был подбор варианта улучшения грунтовых условий на основе численного моделирования. Рассмотрены следующие варианты технологических решений:

1. Устройство легкосжимаемых компенсаторов в толще насыпного грунта.

2. Устройство под коммуникации вытрамбованной щебеночной подушки, усиленной геосеткой, и слоя армогрунта из геотекстиля в толще насыпного грунта.

Анализ результатов выполненных расчетов показал, что наиболее эффективным является второй вариант предлагаемых решений. В этом случае максимальная осадка составит $S = 9,7$ см. При этом осадка насыпного грунта $S = 7,6$ см, а осадка подстилающего слоя глины $S = 2,1$ см. Геометрические размеры траншеи подбираются в зависимости от типа коммуникаций и вида грунта.

На завершающем этапе работ были выполнены расчеты осадок насыпного грунта. Учитывалось самоуплотнение толщи насыпных грунтов, а также дополнительные осадки за счет уплотнения подстилающих грунтов от веса насыпи, которые определяются толщиной слоя насыпных грунтов, а также сжимаемостью и условиями консолидации подстилающих насыпь грунтов. Максимальная толщина насыпного грунта была принята 10 м, а толщина подстилающих грунтов (глины текучие и текучепластичные) – 3,7 м. Для учета самоуплотнения неслежавшихся насыпных грунтов к значениям дополнительного вертикального напряжения от внешней нагрузки в пределах насыпного слоя было добавлено вертикальное напряжение от собственного веса грунта. При расчете осадок основания была учтена осадка подстилающих грунтов от веса насыпи путем добавления к значениям напряжения от внешней нагрузки, ниже кровли подстилающих грунтов вертикального напряжения от веса вышележащих слоев.

Расчет осадки основания выполнялся с учетом полезной транспортной нагрузки, с использованием расчетной схемы в виде линейно деформируемого полупространства, методом послойного суммирования. В результате была получена суммарная величина осадки (S) слоя насыпного грунта и дополнительной осадки подстилающего слоя из глины, равная 8,8 см.

Для проверки полученных расчетных значений осадки толщи насыпных грунтов была использована методика проф. В.И. Крутова [6]. Величина дополнительной осадки за счет уплотнения подстилающих грунтов от собственного веса насыпного грунта составила $S_f = 1,47$ см. Суммарная величина осадки слоя насыпного грунта и дополнительной осадки подстилающего слоя составила $S = 8,47$ см.

Полученные результаты расчетов осадки двумя изложенными выше аналитическими методами хорошо коррелируются между собой, разница полученных значений не превышает 4 %. Разница с численными расчетами не превысила 14 %.

Для оценки развития осадок во времени выполнялся расчет по методу эквивалентного слоя с использованием теории фильтрационной консолидации насыпного грунта (первичной консолидации). За величину конечной стабилизированной осадки принималось максимальное полученное значение при численном моделировании $S_\infty = 9,7$ см.

Получены следующие значения: $S_{1\text{год}} = 4,04$ см (41 % стабилизированной конечной осадки); $S_{3\text{год}} = 5,83$ см (60 %); $S_{10\text{год}} = 8,14$ см (83 %).

В дальнейшем была использована модель компрессии мерзлых грунтов при оттаивании [4]. Тогда осадка с учетом процесса оттаивания грунта составит: $S_{1\text{год}} = 1,8$ см (19 % стабилизированной конечной осадки); $S_{2\text{год}} = 4,58$ см (47 %); $S_{3\text{год}} = 5,78$ см (60 %); $S_{5\text{год}} = 6,88$ см (71 %); $S_{10\text{год}} = 8,14$ см (83 %).

Сравнение выполненных расчетов представлено на рис. 5.

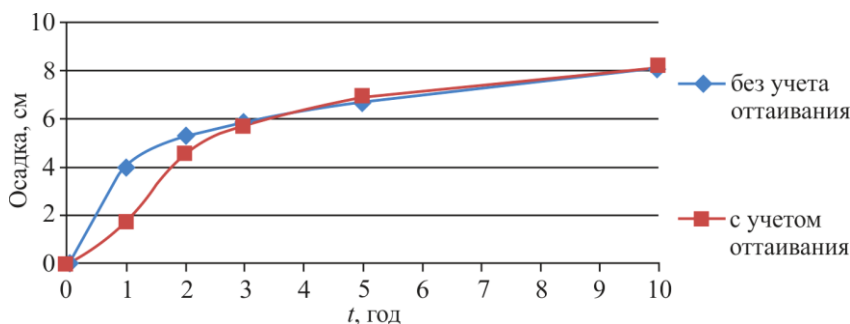


Рис. 5. График изменения осадки насыпного грунта во времени

Основные выводы:

1. Исследуемая площадка строительства представлена недоуплотненными насыпными грунтами, мощностью 5–10 м, в пределах глубины от 3 до 8 м находящимися в частично замороженном-оттаивающем состоянии.

2. Полное оттаивание массива насыпного грунта произойдет не менее чем через 60 сут.

3. Конечная суммарная стабилизированная осадка слоя насыпного грунта, с учетом его самоуплотнения и дополнительной осадки подстилающего слоя согласно выполненным расчетам составит $S_{\infty} = 9,7$ см и завершится через 21 год.

4. На основании выполненного комплекса работ с учетом сроков строительства сделан вывод, что на момент выполнения работ по благоустройству территории (3-й год самоуплотнения грунта) остаточная стабилизация осадок, которая будет развиваться в течение остальных 18 лет, составит 3,92 см.

5. Рекомендуется выполнить устройство под коммуникации вытрамбованной щебеночной подушки, усиленной геосеткой.

6. С целью недопущения неравномерных деформаций поверхности и провалов благоустройство территории выполнять с применением геотекстиля, с укладкой на глубину не менее 1 м от поверхности.

Для оценки геотермальной ситуации массива оттаивающего насыпного грунта в период строительства рекомендуется осуществлять геотермальный мониторинг.

Учитывая, что первоначальным решением, предлагаемым проектной организацией, была полная экскавация насыпных грунтов с последующей отсыпкой с контролируемым уплотнением, заключим, что предложенные решения позволили снизить стоимость выполнения земляных работ на 70 %.

Библиографический список

1. Мащенко А.В., Пономарев А.Б. К вопросу использования армированных сезоннопромерзающих пучинистых грунтов в качестве оснований фундаментов // Вестник Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. Строительство и архитектура. – Пермь, 2012. – С. 56–80.

2. Пономарев А.Б., Захаров А.В. Анализ строительства на техногенных грунтах в г. Перми // Вестник ВолгГАСУ. Сер.: Строительство и архитектура. – 2013. – Вып. 31–2 (50). – С. 272–278.

3. Определение полей напряжений в однородных грунтовых массивах сложного поперечного сечения / А.Н. Богомолов, О.А. Вихарева, А.В. Редин, Д.П. Торшин // Изв. вузов. Строительство. – 2001. – № 4. – С. 135–137.

4. Пономарев А.Б., Захаров А.В. Использование геотермальной энергии для отопления и кондиционирования зданий // Вестник ВолГАСУ. Сер.: Строительство и архитектура. – 2010. – Вып. 17 (36). – С. 119–122.

5. Бобров И.А., Калошина С.В., Захаров А.В. Применение тепловой энергии грунтового основания для отопления и кондиционирования зданий // Вестник Перм. гос. техн. ун-та. Строительство и архитектура. – 2011. – № 1. – С. 10–14.

6. Крутов В.И. Основания и фундаменты на насыпных грунтах. – М.: Стройиздат, 1988. – 223 с.

References

1. Mashchenko A.V., Ponomarev A.B. K voprosu ispol'zovaniia armirovannykh sezonopromerzaiushchikh puchinistykh gruntov v kachestve osnovanii fundamentov [The question of the use of reinforced seasonal freezing heaving soils as bases foundations]. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2012, pp. 56–80.

2. Ponomarev A.B., Zakharov A.V. Analiz stroitel'stva na tekhnogennykh gruntakh v g. Permi [Analysis of construction on industrial soil in Perm]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2013, no. 31-2 (50), pp. 272–278.

3. Bogomolov A.N., Vikhareva O.A., Redin A.V., Torshin D.P. Opredelenie polei napriazhenii v odnorodnykh gruntovykh massivakh slozhnogo poperechnogo secheniia [Definition of fields of pressure in homogeneous soil mass of a compound cross-section]. *Izvestiia vuzov. Stroitel'stvo*, 2001, no. 4, pp. 135–137.

4. Ponomarev A.B., Zakharov A.V. Ispol'zovanie geotermal'noi energii dlia otopleniia i konditsionirovaniia zdanii [Use of geothermal energy of soils for heating and air-conditioning of buildings]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2010, no. 17 (36), pp. 119–122.

5. Bobrov I.A., Kaloshina S.V., Zakharov A.V. Primenenie teplovoi energii gruntovogo osnovaniia dlia otopleniia i konditsionirovaniia zdanii [Application of geothermal energy of soils for heating and air-conditioning of buildings]. *Vestnik Permskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2011, no. 1, pp. 10–14.

6. Krutov V.I. Osnovaniia i fundamenti na nasypnykh gruntakh [The bases and the foundations on filled soils]. Moscow: Stroizdat, 1988, 223 p.

A.B. Ponomarev, A.V. Zakharov

**ON SOME APPROACHES TO BASE SETTLEMENTS
FORECAST FOR TECHNOGENIC SOIL**

The article presents the research results of engineering-geological conditions at the site of the old pond. The authors carried out a number of forecast of geotechnical calculations for the modelling of settlement soil base during the construction of the residential complex. The complexity of the calculations was the use of technogenic soils as a base of the engineering communications without deleting them. Also the article contains the results of the geothermal monitoring of soils on the basis of which was performed calculation base with account of seasonal thawing soil.

Keywords: technogenic soil, backfill soil, monitoring of temperature fields, base settlements, numerical modeling.

Об авторах

Пономарев Андрей Будимирович (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Строительное производство и геотехника» ФГБОУ ВПО ПНИПУ (e-mail: spstf@pstu.ru).

Захаров Александр Викторович (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительное производство и геотехника» ФГБОУ ВПО ПНИПУ (e-mail: miks@pstu.ru).

About the authors

Ponomarev Andrey Budimirovich (Perm, Russia) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department of Building construction and geotechnics, Perm National Research Polytechnic University (e-mail: spstf@pstu.ru).

Zakharov Alexandr Viktorovich (Perm, Russia) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Building construction and geotechnics, Perm National Research Polytechnic University (e-mail: miks@pstu.ru).

Получено 27.12.2013