DOI: 10.15593/2224-9826/2015.1.06

УДК 624.142

А.Л. Невзоров, С.В. Чуркин

Северный (Арктический) федеральный университет
имени М.В. Ломоносова, Архангельск, Россия

ДЕФОРМАЦИИ ЗДАНИЯ НА СВАЙНОМ ФУНДАМЕНТЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СИЛ МОРОЗНОГО ПУЧЕНИЯ

Город Архангельск имеет сложные инженерно-геологические условия, с практически повсеместным распространением многометровых толщ торфа и ила. На территории города наблюдается сезонное промерзание грунтов на глубину 1,8–2,2 м. Обычно промерзание пучинистых грунтов является причиной повреждения дорог, коммуникаций и малоэтажных зданий, однако авторы в своей практике столкнулись с деформациями здания на свайном фундаменте, причиной которых послужило морозное пучение ила.

В статье рассматривается здание склада-холодильника, эксплуатировавшегося в течение 27 лет. В основании здания образовалась многометровая линза мерзлого грунта, а морозное пучение смерзшегося с боковой поверхностью свай ила привело к подъему центральных колонн здания и деформациям пола. Для прогноза продолжительности оттаивания линзы выполнено численное моделирование основания.

Полученный опыт может быть полезен при строительстве ледовых арен, холодильников и обычных неотапливаемых складских зданий в районах со среднегодовой температурой воздуха, близкой к 0 °С.

Ключевые слова: холодный климат, морозное пучение, свайный фундамент, мерзлый грунт, численное моделирование.

A.L. Nevzorov, S.V. Churkin

Northern (Arctic) Federal University named
after M.V. Lomonosov, Arkhangelsk, Russian Federation

DEFORMATION OF BUILDING ON PILE FOUNDATION DUE TO FROST HEAVE

The city of Arkhangelsk has the complicated geological conditions, particularly wide spread occurrence of soft ground such as peat and mud. On the territory of the city that enables the seasonal frost penetration only up to 1,8–2,2 m. Usually the frost penetration causes damages to low-rise buildings, road paving, and pipelines, however, the authors in their practice are faced with the strain building on pile foundations, caused by frost heave sludge.

The article discusses the building of the warehouse, operated for 27 years. At the base of the building formed a multi-meter lens frozen soil, and frost heave frozen together with the side surface of the piles of sludge led to the rise of the Central pillars and deformation of the floor. To predict the duration of the defrost lens numerical simulation of the base.

The lessons learned can be useful in the construction of ice arenas, fridge and conventional unheated storage buildings in areas with an average annual air temperature is close to 0 °C.

Keywords: cold climate, frost heave, pile foundation, frozen soil, numerical simulation.

Особенностями природно-климатических условий г. Архангельска, расположенного в приарктической зоне России, являются холодный климат и практически повсеместное распространение многометровых толщ слабых грунтов – торфа или ила [1]. Среднегодовая температура атмосферного воздуха равна +0,8 °C, продолжительность периода с отрицательными температурами составляет около 6 месяцев, поэтому имеет место сезонное промерзание грунтов на глубину 1,8–2,2 м [2]. Многолетняя мерзлота отсутствует. Промерзание грунтов служит причиной повреждения дорог, коммуникаций, малоэтажных зданий, а наличие слабых грунтов существенно повышает стоимость устройства фундаментов [3, 4].

В настоящей статье рассматривается несколько нетипичный случай деформаций здания склада-холодильника для хранения рыбы, возведенного на сваях длиной 18 м. Причиной послужило морозное пучение ила, промерзшего на глубину около 8 м.

Здание одноэтажное, с железобетонным каркасом, имеет два пролета по 12 м, длину 42 м, высоту 8,4 м. Балки покрытия железобетонные, плиты – ребристые. Наружные стены выполнены из керамзитобетонных панелей с дополнительной внутренней теплоизоляцией из пенополистирола. Полы бетонные. Для защиты основания от промерзания под плитой пола отсыпан слой шунгизитового гравия толщиной 0,9 м, а под ним в бетонной подготовке устроена система электрического обогрева. Фундаменты здания свайные. Из-за присутствия на площадке слоя ила толщиной 10,7–13,3 м использованы забивные составные сваи длиной 18 м, нижняя секция – 12 м, верхняя – 6 м.

Установленное в здании холодильное оборудование поддерживало температуру –20...–24 °C в течение всего периода эксплуатации. Здание эксплуатировалось в нормальном режиме с 1985 г., но начиная с конца 90-х гг. в полах и на внутренних кирпичных стенах и перегородках было замечено появление трещин (рис. 1). В 2012 г. холодильник был выведен из эксплуатации, когда подъем средних колонн достиг 130 мм, а подъем полов превысил 180 мм. На рис. 2 приведена схема деформаций пола. Крайние колонны и стены, а также примыкающие к ним участки пола деформаций не претерпели.

Рис. 1. Трещины на внутренней перегородке

Условные обозначения:

- — точки нивелировки пола
- 0,15 — изолинии подъема пола, м

Рис. 2. Схема деформаций пола

Как позже удалось выяснить, причиной деформаций стало промерзание пучинистых грунтов основания из-за повреждения системы обогрева. Отсутствие термометрических скважин не позволило заметить и устранить дефект. Здание продолжали эксплуатировать в обычном режиме.

Основание представлено следующим напластованием грунтов:

– ИГЭ № 1 – *техногенные отложения* – песок мелкий, влажный; мощность слоя составляет 2,1–3,2 м;

– ИГЭ № 2 – *аллювиально-морские отложения* – песок мелкий, водонасыщенный; 1,3–2,8 м.

– ИГЭ № 3 – *аллювиально-морские отложения* – ил текучепластичный; 1,5–3,6 м.

– ИГЭ № 4 – *аллювиально-морские отложения* – ил текучий, с незначительными прослойками песка; 9,2–9,7 м.

– ИГЭ № 5 – *ледниковые отложения* – суглинок тугопластичный; мощность слоя около 1,0 м.

– ИГЭ № 6 – *морские отложения* – песок пылеватый, средней плотности; вскрытая мощность слоя 3,1 м.

Для уточнения инженерно-геологических условий площадки и определения мощности мерзлого слоя осенью 2014 г. выполнено бурение двух скважин внутри здания – у крайней и средней колонн. Одна из них, глубиной 21,0 м, прошла всю толщу ила, другая достигла подошвы мерзлого слоя. Было установлено, что под наружными стенами мерзлые грунты отсутствуют, температура грунта колеблется от 0,5 до 3,2 °С. В средней части здания в интервале от 3,8 до 8,1 м залегают мерзлые грунты: мелкий песок – 1,0 м и ил – 3,3 м. Температура мерзлых грунтов колеблется от –0,3 до –0,5 °С, что соответствует пластично-мерзлому состоянию ила. Разрез здания с инженерно-геологическими условиями приведен на рис. 3.

Результаты испытаний трех образцов мерзлого ила методом компрессионного сжатия представлены на рис. 4. На первом этапе испытаний до достижения давления 100 кПа образцы находились при отрицательной температуре, затем холодильная камера была отключена (в соответствии с ГОСТ 12248–2010 «Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости» и СП 25.13330.2012 «Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах»). Коэффициент сжимаемости ила в пластично-мерзлом состоянии составил 0,47–0,63 МПа^{–1}, коэф-

Рис. 3. Разрез здания холодильника

Рис. 4. Компрессионное сжатие образцов мерзлого грунта

коэффициент оттаивания 0,029–0,063 и коэффициент сжимаемости при оттаивании 0,092–0,268 МПа⁻¹. С учетом полученных данных расчетная величина осадки основания при оттаивании мерзлой толщи составила 0,12–0,15 м, что примерно соответствует выявленной величине подъема колонн и полов.

Также проводились испытания по определению степени пучинистости образцов ила. Использовалась специальная лабораторная установка [5, 6], подробное описание которой дано в ранее опубликованной работе [7]. Конструкция установки соответствует требованиям ГОСТ 28622–2012 «Грунты. Метод лабораторного определения степени пучинистости» и решению технического комитета ISSMFE по мерзлым грунтам [8]. Установка состоит из гильзы с образцом грунта, поддона, штампа со штоком, холодильной и морозильной камеры, перемещаемой вдоль гильзы с образцом грунта, а также емкости с водой для подпитки образца. Передача вертикальной нагрузки на образец грунта, а также измерение деформаций образца в результате морозного пучения осуществляются с помощью нагрузочной рамы LoadTrac-II (Geocomp Corporation, США). Конструкция установки позволяет контролировать скорость перемещения фронта промерзания в образце.

Промораживание образцов выполнялось со скоростью 10 мм/сут, нагрузка на образец составляла 50 кПа. Сформировавшаяся в образцах слоистая криогенная текстура представлена на рис. 5 [9]. Как видно из рис. 6, относительная деформация пучения ила достигла 0,05–0,068, что соответствует среднепучинистым грунтам.

Рис. 5. Образец ила, промороженный в лабораторной установке

Рис. 6. Зависимость деформаций пучения от времени

Следующим шагом исследований стал прогноз продолжительности оттаивания грунтов основания. С этой целью было выполнено численное моделирование здания и основания с использованием модуля Temp/W программного комплекса GeoStudio 2012 [10]. Рассматривалось пять временных этапов:

- начало работы холодильной установки и системы обогрева пола (1985 г.);
- выход из строя системы обогрева пола (90-е гг.);
- отключение холодильных агрегатов (2012 г.);
- момент обследования здания после двухлетнего перерыва в эксплуатации, без охлаждения и обогрева здания (2014 г.);
- полное оттаивание мерзлых грунтов в основании (дата определяется расчетом).

В качестве исходных данных задавались: геометрические размеры здания, напластование грунтов, годовой ход температуры атмосферного воздуха, коэффициенты теплопроводности и значения удельной теплоемкости материалов конструкций и грунтов основания, а также влажность грунтов и материалов. Причем для грунтов, в отличие от материалов конструкций, коэффициент теплопроводности задавался с учетом зависимости его от температуры. Учитывались также изменения содержания незамерзшей воды от температуры и теплота фазовых переходов. Температурные условия задавались двух типов:

постоянные и переменные во времени. Постоянная температура задавалась на нижней границе массива грунта, в здании холодильника во время его эксплуатации, а также при обогреве пола холодильника. Переменная температура задавалась для моделирования погодных условий вне здания и внутри него, когда холодильник был выведен из эксплуатации.

На рис. 7 приведены графические результаты расчетов температурного режима основания. Изолинии, обозначенные пунктирными линиями, являются нулевыми изотермами.

Верификация модели осуществлялась сопоставлением контуров мерзлого слоя в основании на 2014 г. по результатам моделирования и данным, полученным при проходке скважин. Как оказалось, если принять, что выход из строя системы обогрева произошел в 1995 г., наблюдается весьма удовлетворительное совпадение положения кровли и подошвы мерзлого слоя в середине здания – 3,8/8,1 м и 3,1/8,0 м по данным бурения и расчета соответственно.

Далее были смоделированы несколько вариантов оттаивания околосвайного грунта. Каждый из них предусматривает разборку пола с удалением слоя шунгизитового гравия. При использовании электрических нагревательных элементов, погруженных вокруг центральных кустов свай, а также поддержании температуры внутри здания 5 °С оттаивание околосвайного грунта наблюдается через 40 сут (рис. 8, а).

При поддержании температуры внутри цеха 5 °С и устройстве обогрева пола для оттаивания околосвайного грунта потребуется около трех лет (рис. 8, б).

Остается открытым вопрос состояния стыка свай. Отрывка шурфов показала, что стыки голов свай и ростверка находятся в хорошем состоянии. Трудно предположить, что произошел подъем свай, нижний конец которых заглублен в пылеватый песок на 2,0 м. Скорее всего, морозное пучение привело к разрыву стыка секций составных свай.

При оттаивании околосвайного грунта верхние секции составных свай должны вернуться в исходное состояние по высоте, но нельзя исключать, что площадь перекрытия секций в стыке окажется незначительной, может произойти скол бетона свай и в таком случае их несущая способность станет недостаточной. В этом случае потребуется усиление фундаментов.

Рис. 7. Температурный режим основания здания в период эксплуатации:
a – этап инициализации, 1985 г.; *б* – эксплуатация холодильного цеха с подогревом пола, зима 1995 г.; *в* – эксплуатация холодильного цеха без обогрева пола, зима 1997 г.; *г* – эксплуатация холодильного цеха без подогрева пола, зима 2011 г.; *д* – эксплуатация холодильного цеха без подогрева пола, лето 2012 г.; *е* – оттаивание линзы мерзлого грунта в течение 2 лет, обследование здания в октябре 2014 г.

Рис. 8. Моделирование оттаивания мерзлого грунта: *а* – отогрев линзы мерзлого грунта с помощью глубинных электрических нагревателей, 40 дней после начала обогрева; *б* – оттаивание линзы мерзлого грунта за счет обогрева пола, три года с начала обогрева

Полученный опыт может быть полезен не только при строительстве ледовых арен, холодильников, но и обычных неотапливаемых складских зданий. Что касается последних, то в районах со среднегодовой температурой, близкой к 0°C , как в г. Архангельске, из-за отсутствия солнечной радиации под зданиями может формироваться слой мерзлых грунтов. При их проектировании следует выполнять численное моделирование температурного режима.

Библиографический список

1. Nevzorov A. The long-term peat settlement under the sand embankment // The 5th international geotechnical symposium. – Incheon, Korea, 2013. – P. 403–406.
2. Климат Архангельска / под ред. Ц.А. Швер и А.С. Егоровой. – Л.: Гидрометеиздат, 1982. – 208 с.
3. Andersland O., Ladanyi B. Frozen ground engineering. – 2nd ed. – Chichester, UK, 2004. – 384 p.
4. Машенко А.В., Пономарев А.Б. К вопросу использования армированных сезоннопромерзающих пучинистых грунтов в качестве оснований фундаментов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2012. – С. 64–80.
5. Саенко Ю.В., Невзоров А.Л. Исследование деформационных свойств ледниковых суглинков // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство

и архитектура. – 2014. – № 3. – С. 119–128. DOI: <http://dx.doi.org/10.15593/2224-9826/2014.3.09>

6. Невзоров А.Л., Коршунов А.А. Прибор для измерения деформаций морозного пучения грунта: патент на изобретение № 2474650 // Бюллетень изобретений. – 2013. – № 4.

7. Korshunov A., Churkin S., Nevzorov A. Numerical simulation of laboratory freezing test of frost-susceptible soil // Proceedings of the 8th european conference on numerical methods in geotechnical engineering. – Delft, Netherlands, 2014. – P. 977–982.

8. Frost in geotechnical engineering // Int. Symp. – Vol. 1, 2. – Espoo: VTT, 1989.

9. Ершов Э.Д. Общая геокриология. – М.: Недра, 1990. – 559 с.

10. Geo-slope International Ltd. Thermal modeling with Temp / W 2007. – 4th ed. – Calgary, Alberta, Canada, 2010. – 246 p.

References

1. Nevzorov A. The long-term peat settlement under the sand embankment. *The 5-th international geotechnical symposium*. Incheon, Korea, 2013, pp. 403-406.

2. Klimat Arkhangel'ska [Climate Arkhangelsk]. Ed. Ts.A. Shver, A.S. Egorova. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1982. 208 p.

3. Andersland O., Ladanyi B. Frozen ground engineering (second edition). Chichester, UK, 2004. 384 p.

4. Mashhenko A.V., Ponomarev A.B. K voprosu ispol'zovaniia armirovannykh sezonopromerzaushchikh puchinistyykh gruntov v kachestve osnovanii fundamentov [The question of the use of reinforced seasonal freezing heaving soils as bases foundations]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2012, no. 1, pp. 64-80.

5. Saenko Iu.V., Nevzorov A.L. Issledovanie deformatsionnykh svoystv lednikovyykh suglinkov [Investigation of deformation properties glacial clayey deposits] *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2014, no. 3, pp. 119-128. DOI: <http://dx.doi.org/10.15593/2224-9826/2014.3.09>

6. Korshunov A.A. Pribor dlia izmereniia deformatsii moroznogo pucheniia grunta: Patent na izobretenie № 2474650 [A device for measuring

deformation on frost heaving of the soil: the patent for invention no. 2474650]. *Biulleten' izobretenii*, 2013, no. 4.

7. Korshunov A., Churkin S., Nevzorov A. Numerical simulation of laboratory freezing test of frost-susceptible soil. *Proceedings of the 8th european conference on numerical methods in geotechnical engineering*. Delft, Netherlands, 2014, pp. 977-982.

8. Frost in geotechnical engineering. *Int. Symp.* Espoo, VTT, 1989, vol. 1, 2.

9. Ershov E.D. Obshchaia geokriologiya [General geocryology]. Moscow: Nedra, 1990. 559 p.

10. Geo-slope International Ltd. Thermal modeling with Temp. W 2007. Calgary, Alberta, Canada, 2010. 246 p.

Получено 22.01.2015

Сведения об авторах

Невзоров Александр Леонидович (Архангельск, Россия) – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедры «Инженерная геология, основания и фундаменты» Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова (163002, г. Архангельск, наб. Северной Двины, 17, e-mail: a.nevzorov@narfu.ru).

Чуркин Сергей Владимирович (Архангельск, Россия) – аспирант кафедры «Инженерная геология, основания и фундаменты» Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова (163002, г. Архангельск, наб. Северной Двины, 17, e-mail: s.churkin@narfu.ru).

About the authors

Alexander L. Nevzorov (Arkhangelsk, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Geotechnical Department, Northern (Arctic) Federal University (17, The Northern Dvina Embankment, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation, e-mail: a.nevzorov@narfu.ru).

Sergei V. Churkin (Moscow, Russian Federation) – Postgraduate student, Geotechnical department, Northern (Arctic) Federal University (17, The Northern Dvina Embankment, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation, e-mail: s.churkin@narfu.ru).