

УДК 624.139

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-3\(34\)-103-113](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-3(34)-103-113)

EDN VNNDZX

ПРИМЕНЕНИЕ ГИДРАТАЦИОННОГО ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЯ БЕТОНА БУРОНАБИВНЫХ СВАЙ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ГРУНТОВ ОСНОВАНИЯ ПО ПРИНЦИПУ II

В.Д. КАУРКИН[✉], канд. геол.-минерал. наук
А.И. ХАРИЧКИН, канд. техн. наук
А.В. ИОСПА

Научно-исследовательский, проектно-изыскательский и конструкторско-технологический институт оснований и подземных сооружений (НИИОСП) им. Н.М. Герсеевича АО «НИЦ «Строительство», Рязанский проспект, д. 59, г. Москва, 109428, Российская Федерация

Аннотация

Введение. Устройство фундаментов из буронабивных свай – распространенная строительная технология. Она достаточно давно и успешно применяется также и в районах развития многолетнемерзлых грунтов. Однако тепловыделение при гидратации рассматривается как побочный эффект твердения цементной смеси и не применяется в практических целях, в частности при подготовке основания для использования мерзлых грунтов по Принципу II.

Цель работы – экспериментальное исследование процесса гидратации цемента при твердении и оценка изменения его температуры, а в дальнейшем, с учетом полученных данных, выполнение теплотехнических и деформационных расчетов для практического применения при проектировании.

Материалы и методы. Для решения поставленной цели был проведен анализ нормативной и научно-технической литературы. Выполнены экспериментальные лабораторные исследования для нескольких образцов цементной смеси. Обработаны и проанализированы полученные результаты, а также определены направления для дальнейших исследований и разработки рекомендаций при проектировании.

Результаты. По итогам экспериментального исследования было установлено, что максимальное повышение температуры цементной смеси фиксируется примерно через сутки после укладки и в зависимости от ее состава и начальной температуры может составлять 8,2–29,9 °С. Теплотехнические и геотехнические расчеты для конкретного проектируемого объекта с применением полученных экспериментальных данных показали возможность использования принятого подхода при устройстве фундаментов. Это позволило заложить требования по минимальной температуре приготавливаемой цементной смеси и ориентировочным срокам формирования оттаивающего массива в основании здания в проектную документацию.

Выводы. Проведенные исследования и численное моделирование показали, что при определенном подборе характеристик цементной смеси для буронабивных свай фундамента выделяемой тепловой энергии в процессе гидратации может быть достаточно для оттаивания высокотемпературных многолетнемерзлых грунтов и подготовки основания для использования по Принципу II. Такой подход позволит оптимизировать сроки и финансовые затраты в процессе строительства.

Ключевые слова: буронабивные сваи, гидратация цемента, мерзлые грунты, принципы использования грунтов, теплотехническое моделирование

Для цитирования: Кауркин В.Д., Харичкин А.И., Иоспа А.В. Применение гидратационного тепловыделения бетона буронабивных свай при использовании грунтов основания по Принципу II. *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2022;34(3):103–113. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-3\(34\)-103-113](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-3(34)-103-113)

Вклад авторов

Кауркин В.Д. – постановка цели и задач исследования, проведение исследования, выполнение численного моделирования, анализ и обработка полученных данных.

Харичкин А.И. – постановка цели и задач исследования, общее руководство, редактура.

Иоспа А.В. – участие в экспериментальном исследовании, анализе и обработке полученных данных.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 26.07.2022

Поступила после рецензирования 30.08.2022

Принята к публикации 12.09.2022

APPLICATION OF THE HYDRATION HEAT OF CONCRETE BORED PILES WHEN USING FOUNDATION SOILS ACCORDING TO PRINCIPLE II (ACTIVE METHOD)

V.D. KAURKIN✉, Cand. Sci. (Geology and Mineralogy)

A.I. KHARICHKIN, Cand. Sci. (Engineering)

A.V. IOSPA

*Research Institute of Bases and Underground Structures (NIIOSP) named after N.M. Gersevanov,
JSC Research Center of Construction, Ryazanskiy ave., 59, Moscow, 109428, Russian Federation*

Abstract

Introduction. The use of bored piles in foundation works is a common construction technology, which has been successfully employed for construction in permafrost zones. However, up to the present time, the heat of hydration released during the hardening of cement mixes has been considered as an adverse event thus not being practically applied, particularly when preparing foundation soils according to Principle II, or the Active method.

Aim: to study the process of cement hydration when hardening and to assess variations in its temperature in order to use the data obtained for thermal and deformation calculations in construction design.

Materials and methods. An analysis of regulatory framework, as well as scientific and technical literature, was carried out. Experimental laboratory studies of different cement mixes were performed. The obtained results were analyzed, the directions for further studies were outlined along with design recommendations.

Results. The experimental study showed the maximum increase in the temperature of cement mixes one day after laying to range between 8.2 and 29.9 °C depending on the composition and initial temperatures of the mixes. Thermal and geotechnical calculations for a particular designed project based on the obtained data proved the efficiency of the considered approach for foundation works. Hence, this allowed the requirements for a minimum temperature of a cement mix and an estimated period of soil thawing under the building foundation to be included in the design documentation.

Conclusions. The conducted experiments and numerical calculations showed that, under a certain set of characteristics of cement mixes for bored pile foundations, the released heat of hydration can be sufficient for thawing permafrost soils and preparing the foundation soils for use in terms of Principle II. This approach ensures time and cost optimization during the construction period.

Keywords: bored piles, concrete hydration, permafrost, active and passive methods, thermal modeling

For citation: Kaurkin V.D., Kharichkin A.I., Iospa A.V. Application of the hydration heat of concrete bored piles when using foundation soils according to Principle II (Active method). *Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2022;34(3):103–113. (In Russ.) [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-3\(34\)-103-113](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-3(34)-103-113)

Author contribution statements

Kaurkin V.D. – determining the aim and tasks of the study, conducting the study, numerical modeling, processing and analysis of the data obtained.

Kharichkin A.I. – determining the aim and tasks of the study, general supervision, article editing.

Iospa A.V. – taking part in experimental study, processing and analysis of the data obtained.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 26.07.2022

Revised 30.08.2022

Accepted 12.09.2022

Введение

Гидратация – это физико-химический процесс, протекающий при взаимодействии компонентов цементной смеси с водой, в результате которого происходит схватывание цемента и последующее его твердение. Процесс гидратации характеризуется интенсивным выделением тепловой энергии, изменяющейся в зависимости от вида, марки и начальной температуры цемента в пределах от 188 до 419 кДж/кг [2, 3]. Большая часть тепловой энергии при гидратации выделяется в период с 1-х по 9-е сутки (85–90 %), оставшаяся часть (10–15 %) – вплоть до 28-го дня. Такое тепловыделение приводит к повышению температуры раствора на 20–50 °С [4, 5].

При строительстве зданий и сооружений в районах распространения многолетнемерзлых грунтов с применением буронабивных свай такое продолжительное по времени тепловое воздействие ведет к формированию вокруг фундаментов ореолов оттаивания, а в некоторых случаях, при прерывистом в плане и по глубине распространении мерзлоты, формированию единого талого грунтового массива.

Если в случае использования грунтов по Принципу I тепловыделение в процессе гидратации оказывает больше отрицательное влияние, увеличивая время смерзания свай со вмещающими грунтами, то при использовании грунтов по Принципу II, наоборот, может существенно сократить сроки подготовки основания для передачи проектных нагрузок.

Несмотря на то что сам процесс гидратации и сопутствующего тепловыделения достаточно подробно описан в научной и технической литературе [2–5], ощущается недостаток структурированных и взаимосвязанных характеристик и параметров в линейке состав

бетонного раствора – выделяемая теплота и повышение температуры в процессе гидратации – влияние на прочностные и деформационные характеристики мерзлых (оттаивающих) грунтов. Без понимания параметров в данной последовательности проблематично выполнять корректные прогнозные теплотехнические и деформационные расчеты при проектировании и оценивать надежность системы фундамент – грунт основания.

Для целей практического применения при проектировании было проведено экспериментальное исследование процесса гидратации цемента при твердении и оценено изменение его температуры, а в дальнейшем, с учетом полученных данных, выполнены теплотехнические и деформационные расчеты.

Экспериментальная часть исследования

В процессе экспериментального исследования в лабораторных условиях были подготовлены три образца цементной смеси на основе портландцемента марки М500 с различным соотношением цемент/песок (щебень в образцах не использовался ввиду их малых размеров):

- образец № 1: соотношение цемент/песок 1/7,7;
- образец № 2: соотношение цемент/песок 1/3,2;
- образец № 3: соотношение цемент/песок 1/2,3.

Подготовленный раствор заливался в деревянные формы размерами $15 \times 15 \times 15$ см (рис. 1). Для создания эффекта «термоса» и приближения условий твердения к реальным эти формы помещались в специальные теплоизоляционные ящики из пенополистирола. Измерения температуры цементной смеси выполнялись при помощи термометрической косы и логгера, записывающего полученные данные с периодичностью один раз в час (рис. 2).

Результаты измерения температуры в процессе экспериментального исследования приведены на рис. 3.



Рис. 1. Вид деревянной формы для заливки цементной смеси
Fig. 1. View of a wooden mold for pouring the cement mix



Рис. 2. Вид образцов цементной смеси, упакованных в теплоизоляционные ящики и подключенных к термокосе для измерения температуры

Fig. 2. View of cement mix samples packed in thermal insulation boxes and connected to the thermistor chain to measure the temperature

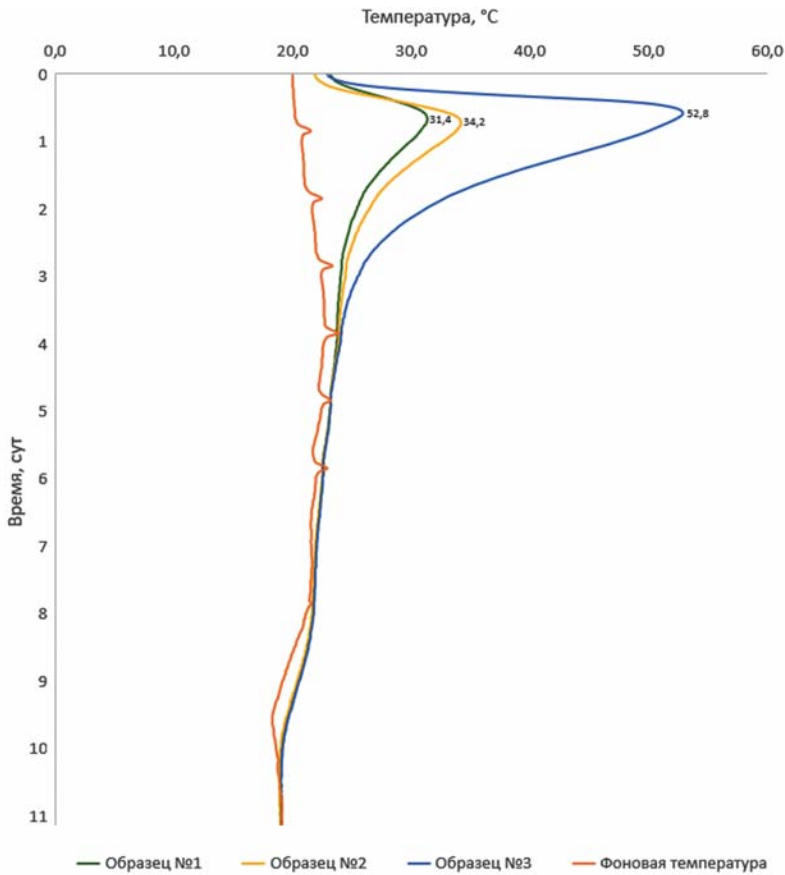


Рис. 3. График изменения температуры цементной смеси (бетона) во времени
Fig. 3. Temperature curve of the cement mix (concrete)

При рассмотрении результатов измерения температуры цементной смеси (бетона) во времени видно, что максимальное повышение температуры фиксируется примерно через сутки после начала эксперимента. При начальной температуре смеси 22,0–23,2 °С повышение температуры составляет:

- для образца № 1 – плюс 8,2 °С;
- для образца № 2 – плюс 12,3 °С;
- для образца № 3 – плюс 29,9 °С.

В дальнейшем наблюдалось плавное понижение температуры образцов (остывание) до фоновых значений, продолжавшееся вплоть до 11-го дня эксперимента.

По истечении 28 дней образцы бетона были извлечены из деревянных форм (рис. 4) и испытаны на прочность.



Рис. 4. Образцы бетона, полученного в процессе эксперимента
Fig. 4. Experimental concrete samples

По результатам испытаний получены следующие характеристики:

- образец № 1 – прочность 34,7 МПа, марка М350;
- образец № 2 – прочность 41,6 МПа, марка М400;
- образец № 3 – прочность 47,2 МПа, марка М450.

Результаты экспериментального исследования применены при проектировании фундаментов пассажирского терминала аэровокзального комплекса в г. Магадане.

Применение результатов исследования при проектировании

Проектируемый пассажирский терминал аэровокзального комплекса располагается в п. Сокол в 50 км от г. Магадана. Для района характерна отрицательная среднегодовая температура воздуха минус 4,5 °С и островное распространение многолетнемерзлых грунтов.

Непосредственно в контуре застройки, на всю глубину выполненных изысканий, присутствуют как талые, так и высокотемпературные (минус 0,3 – минус 0,1 °С) мерзлые грунты, представленные в основном дресвяными суглинками с прослоями песка.

В качестве фундамента пассажирского терминала в процессе предпроектной проработки было предложено использование монолитной железобетонной «перевернутой» ребристой плиты со свайным основанием. Плита толщиной 600 мм с утолщением до 1200 мм в местах устройства свайных кустов. Сваи фундамента буронабивные, диаметром 400 мм, глубиной заложения 14 м от дна котлована. Размеры плиты и свайного поля в плане составляют $102 \times 61,5$ м (рис. 5).

Так как под одной частью проектируемого здания на всю рассматриваемую глубину распространены талые грунты, а мерзлые грунты, присутствующие в другой части здания, слабоблидистые и имеют высокие отрицательные температуры, близкие к температуре начала замерзания, по результатам рассмотрения различных вариантов, было принято решение использовать грунтовое основание по Принципу II.

Оттаивание мерзлых грунтов предполагалось в процессе устройства буронабивных свай и заливки фундаментной плиты за счет тепловыделения в процессе гидратации цемента при твердении. Для подтверждения возможности применения такого решения были выполнены теплотехнические расчеты с использованием данных, приведенных в [2, 3], и данных, полученных в ходе экспериментального исследования.

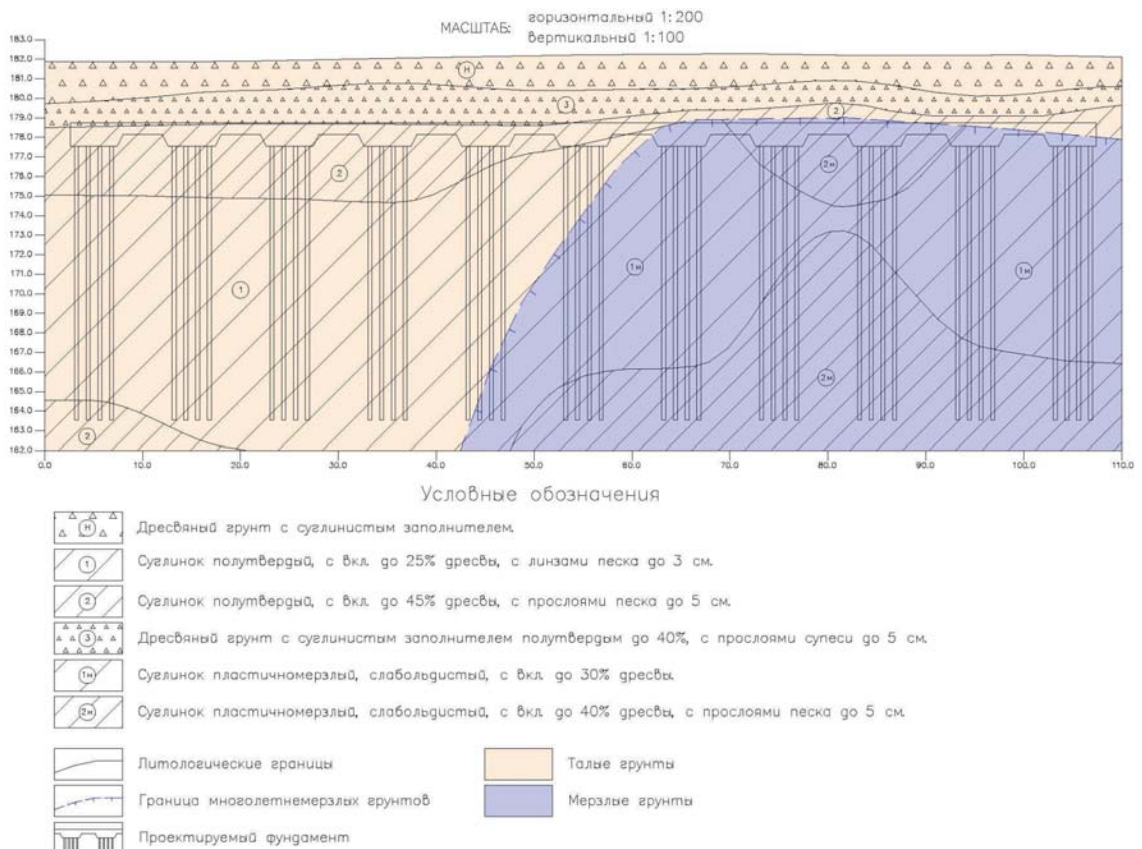


Рис. 5. Расположение фундамента проектируемого пассажирского терминала аэровокзального комплекса

Fig. 5. Layout of the foundation of a designed passenger terminal in an airport complex

Теплотехнические расчеты выполнялись в программе «WEBGEO», позволяющей прогнозировать изменения температурного режима грунтов основания зданий и сооружений в трехмерном пространстве с учетом влияния как природных, так и техногенных факторов. Размеры расчетной области выбирались с таким условием, чтобы в нее помещалось все проектируемое здание (свайное поле) с участками прилегающей территории. Подобный выбор обеспечивает корректную теплофизическую постановку задачи (рис. 6). В дальнейшем область исследования разбивалась на прямоугольные элементы (блоки) размером не более 0,2 м для более детального учета мерзлотно-грунтовых условий. Для каждого выделенного внутреннего блока модели задавались свои физико-механические и теплофизические характеристики, соответствующие свойствам грунтов, определенным в результате инженерно-геологических изысканий.

Климатические параметры задавались по данным ближайшей метеостанции.

Начальная температура бетонной смеси принималась в расчетах, равной 20 °С. Для обеспечения равномерного твердения бетонной смеси и предотвращения ее преждевременного охлаждения на участках поверхности, где закачивалось устройство свай, в расчетах на протяжении 28 дней принималось, что температура не опускается ниже 0 °С.

Теплотехнические расчеты выполнялись в 2 этапа:

Этап 1. Предварительное моделирование по подбору граничных условий и условий теплообмена атмосферы с грунтовой поверхностью для сопоставления и верификации расчетной модели с данными инженерных изысканий (начальное распределение температуры по глубине грунтового разреза, положение границы распространения мерзлоты).

Этап 2. Откопка котлована и последовательное устройство буронабивных свай с последующим возведением фундаментной плиты. Детальный теплотехнический расчет при устройстве

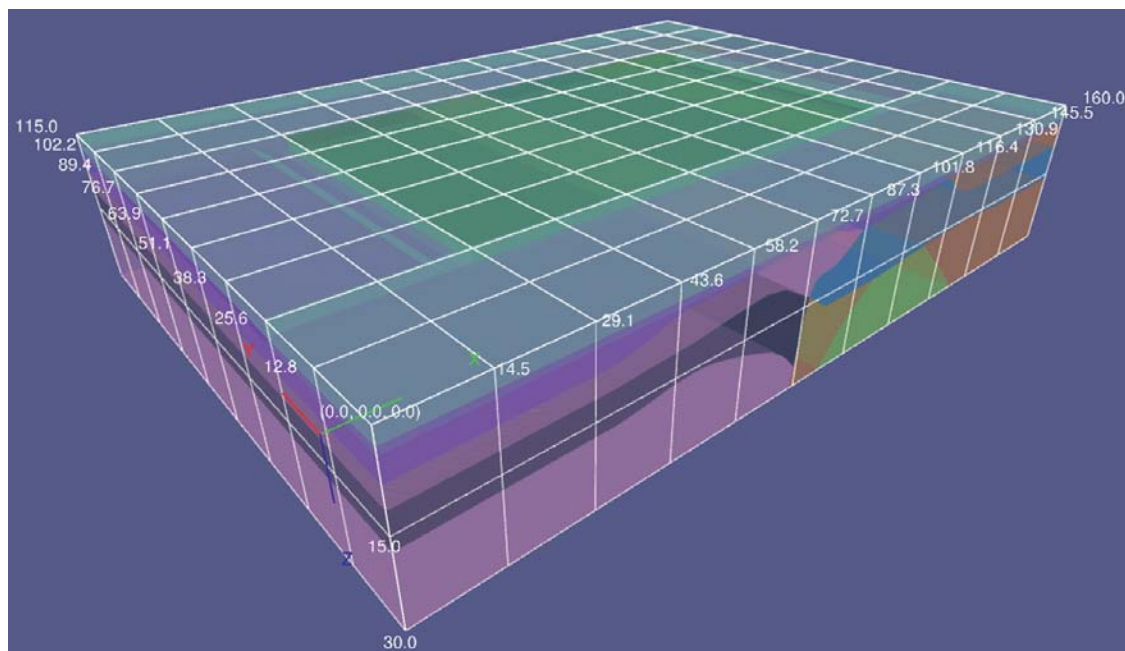


Рис. 6. Вид расчетной области в программе «WEBGEO»

Fig. 6. View of a computational region in WEBGEO software

буронабивных свай выполнялся для участка развития мерзлых грунтов. Принималось, что один куст свай (16 шт.) устраивается в среднем за 4 дня. Работы параллельно выполняются с двух сторон. Бетонирование фундаментной плиты начинается «захватками» по 4 группы кустов свай (8 кустов, 128 свай) спустя примерно 14 дней после окончания устройства последнего куста свай в группе.

Результаты теплотехнических расчетов показали, что в процессе устройства буронабивных свай и плиты фундамента за счет тепловыделения при твердении бетона происходит интенсивное оттаивание мерзлых грунтов основания.

После устройства части свайного поля на участке развития мерзлых грунтов, для которого выполнялся детальный теплотехнический расчет, глубина зоны растепления достигает 2,4 м, считая от нижнего конца свай. После устройства всего свайного поля в контуре проектируемого здания образуется сплошной массив талого грунта, а глубина зоны растепления достигает 5,3 м, считая от нижнего конца свай (рис. 7).

Последующие расчеты несущей способности свай, устойчивости на действие вертикальных, горизонтальных и сейсмических воздействий подтвердили достаточную надежность

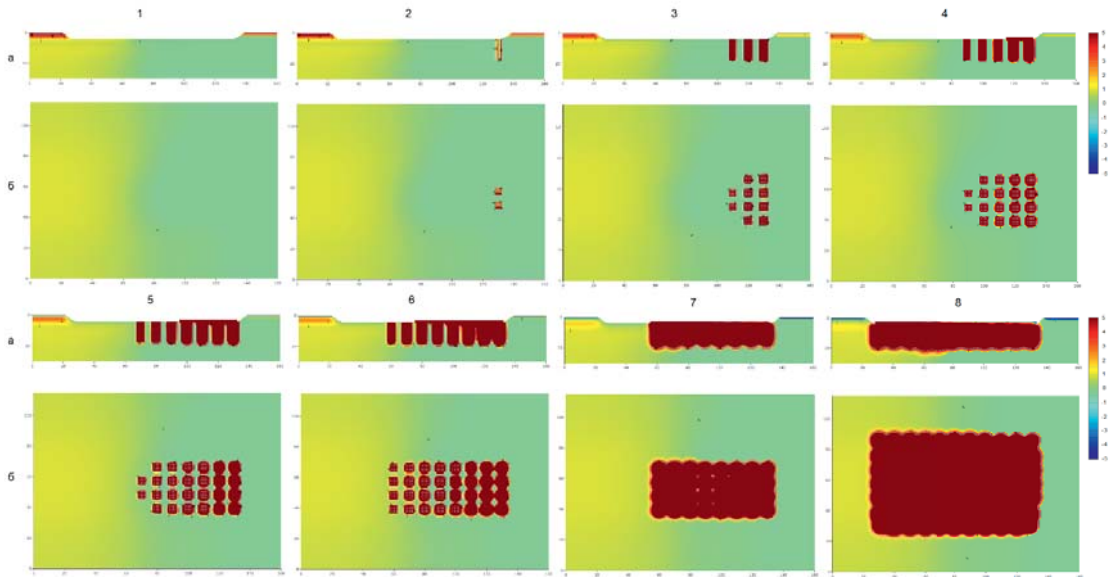


Рис. 7. Результаты теплотехнических расчетов:

а – распределение температуры по глубине грунтового разреза; *б* – распределение температуры на глубине заложения свай

1 – на момент начала моделирования (октябрь); 2 – после устройства первой группы свай; 3 – после устройства пятой группы свай; 4 – после устройства девятой группы свай; 5 – после устройства тринадцатой группы свай; 6 – после устройства всех свай на участке детального теплотехнического расчета; 7 – после устройства всех свай, фундаментной плиты и окончания условного периода гидратации на участке детального теплотехнического расчета; 8 – после устройства всего свайного поля и фундаментной плиты проектируемого здания

Fig. 7. Results of thermal calculations:

a – temperature distribution in depth of soil section; *б* – temperature distribution in depth of pile laying
1 – at the beginning of modeling (October); 2 – after laying the 1st group of piles; 3 – after laying the 5th group of piles; 4 – after laying the 9th group of piles; 5 – after laying the 13th group of piles; 6 – after laying all the piles in the sector of a detailed thermal calculation; 7 – after laying all the piles, a foundation slab, and completion of a conventional hydration period in the sector of a detailed thermal calculation; 8 – after laying the pile field and a foundation slab of the designed building

системы основание – сооружение и правильность принятого технического решения по устройству фундамента.

На основании всех выполненных расчетов в проектную документацию были заложены требования по минимальной температуре приготавливаемой бетонной смеси и ориентировочным срокам формирования оттаивающего массива в основании здания.

Для контроля за реализацией проектных решений на стадии строительства и эксплуатации объекта разработаны программа и проект геотехнического мониторинга, включающие наблюдения за:

- температурой грунтов в контуре здания в период устройства буронабивных свай и фундаментной плиты для контроля оттаивания грунтов основания и фиксации времени смыкания ореолов оттаивания от кустов свай;
- температурой грунтов вокруг здания в период строительства надземных конструкций и при последующей эксплуатации для оценки динамики изменения их термического состояния;
- вертикальными и горизонтальными перемещениями свай фундамента и фундаментной плиты в период их строительства с учетом возможных осадок оттаивающих мерзлых грунтов;
- вертикальными и горизонтальными перемещениями надземных конструкций на различных этапах их строительства (передачи проектных нагрузок) и при последующей эксплуатации.

Выводы

1. Тепловыделение при гидратации является значимым физико-химическим процессом, однако рассматривается как побочный эффект твердения бетона и не используется в практических целях, в частности при подготовке основания зданий и сооружений при использовании мерзлых грунтов по Принципу II.

2. Выделяемая тепловая энергия зависит от состава, объема, свойств и начальной температуры цементной смеси. Дальнейшие экспериментальные исследования в комплексе с теплотехническими и деформационными расчетами позволят более точно рекомендовать необходимые характеристики при устройстве свай фундамента.

3. Для совершенствования предлагаемого подхода необходимым условием является накопление фактических мониторинговых данных об изменении температуры как самой укладываемой цементной смеси при устройстве фундаментов, так и температуры вмещающих грунтов. Такие данные для продолжения исследований планируется получать при строительстве пассажирского терминала аэровокзального комплекса в г. Магадане. Обработка материала позволит верифицировать расчетные модели и повысить точность прогнозирования.

Список литературы

1. СП 25.13330.2020 Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах [Интернет]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/573659326>
2. НИИЖБ Госстроя СССР. Руководство по бетонированию фундаментов и коммуникаций в вечномерзлых грунтах с учетом твердения бетона при отрицательных температурах. Москва: Стройиздат; 1982.

3. ЦНИИОМТП Госстроя СССР. Руководство по производству бетонных работ в зимних условиях, районах Дальнего Востока, Сибири и Крайнего Севера. Москва: Стройиздат; 1982.
4. Будников П.П., Косырева З.С. Исследование расширяющегося цемента. В: Тр. МХТИ им. Д.И. Менделеева. Вып. 15. Москва; 1949, с. 36–50.
5. Запорожец И.Д., Окорочков С.Д., Парийский А.А. Тепловыделение бетона. Ленинград – Москва: Стройиздат; 1966.

References

1. SP 25.13330.2020 Foundations and foundations on permafrost soils [Internet]. Available from: <https://docs.cntd.ru/document/573659326> (in Russian).
2. NIIZHB Gosstroy of the USSR. Guidelines for concreting foundations and communications in permafrost soils, taking into account the hardening of concrete at negative temperatures. Moscow: Stroyizdat Publ.; 1982 (in Russian).
3. TSNIOMTP Gosstroy of the USSR. Guidelines for the production of concrete works in winter conditions, areas of the Far East, Siberia and the Far North. Moscow: Stroyizdat Publ.; 1982 (in Russian).
4. Budnikov P.P., Kosyreva Z.S. Investigation of expanding cement. In: Proceedings of the Moscow Chemical-Technological Institute. D.I. Mendelev. Is. 15. Moscow; 1949, p. 36–50 (in Russian).
5. Zaporozhets I.D., Okorokov S.D., Pariyskiy A.A. Heat release of concrete. Leningrad – Moscow: Stroyizdat Publ.; 1966 (in Russian).

Информация об авторах / Information about the authors

Василий Дмитриевич Кауркин , канд. геол.-минерал. наук, старший научный сотрудник лаборатории № 18 НИИОСП им. Н.М. Герсеевича АО «НИЦ «Строительство», Москва
e-mail: vdkaurkin@gmail.com

Vasiliy D. Kaurkin , Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Senior Researcher of Laboratory No. 18 of NIIOSP named after N.M. Gersevanov, JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: vdkaurkin@gmail.com

Андрей Игоревич Харичкин, канд. техн. наук, заведующий лабораторией № 18 НИИОСП им. Н.М. Герсеевича АО «НИЦ «Строительство», Москва
e-mail: andrei.kharichkin@gmail.com
тел.: +7 (926) 853-29-07

Andrey I. Kharichkin, Cand. Sci. (Engineering), Head of Laboratory No. 18 of NIIOSP named after N.M. Gersevanov, JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: andrei.kharichkin@gmail.com
tel.: +7 (926) 853-29-07

Андрей Викторович Иоспа, главный геолог лаборатории № 18 НИИОСП им. Н.М. Герсеевича АО «НИЦ «Строительство», Москва
e-mail: aviospa@gmail.com
тел.: +7 (910) 445-24-31

Andrey V. Iospa, Senior Geologist of Laboratory No. 18 of NIIOSP named after N.M. Gersevanov, JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: aviospa@gmail.com
tel.: +7 (910) 445-24-31

 Автор, ответственный за переписку / Corresponding author