

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ГРУНТОВ ОСНОВАНИЯ С УЧЕТОМ ТЕПЛОТЫДЕЛЕНИЯ ПРИ ГИДРАТАЦИИ ЦЕМЕНТА

Н.П. Скибина, И.Н. Дембовский  
ООО «НТЦ «Симмэйкерс»

e-mail: skibina.nadezhda@simmakers.ru, igor.dembovskii@simmakers.ru

Рассмотрена проблема математического моделирования теплового влияния свайного буронабивного фундамента на грунты основания при твердении бетона. Предложена инженерная методика, основанная на нормативных документах, позволяющая с минимальным набором входных данных производить учет тепловыделения цемента в бетоне в прогнозных теплотехнических расчетах. При апробации методики в программном комплексе Frost 3D достигнуто количественное и качественное соответствие натурным наблюдениями по температуре в теле сваи.

При устройстве буронабивных свайных фундаментов в зоне вечной мерзлоты важную роль играет время, за которое восстанавливается температурный режим в основании всего свайного поля, после чего возможна полная загрузка фундаментов [1]. Нарушение температурного режима грунтов в процессе возведения фундамента связано с 3 факторами:

1. тепловыделение при гидратации цемента;
2. избыточная начальная температура бетонной смеси;
3. прогрев бетона во время твердения.

Мы будем рассматривать только беспрогревное бетонирование – с противоморозными добавками и/или с утеплением головы сваи по методу «термоса».

Гидратация цемента – комплекс физико-химических процессов взаимодействия дисперсного порошка цемента с дисперсной жидкой средой. При гидратации цемента происходит твердение бетона и набор им прочности, что сопровождается выделением значительного количества теплоты — в основном (~75% и более) теплота химических реакций присоединения воды с образованием гидратов (химическая теплота гидратации) [2].

Гидратация начинается при затворении (смешивании цемента с водой) и может продолжаться несколько лет (см. табл. XI-2 в [2]); в теории — бесконечно долго [2, с. 50]. Сравнительно четкий момент завершения (прерывания) гидратации наблюдается только при резком исчезновении активной воды, например, при ее полном превращении в лед, которое происходит при температуре около  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  (для пресной воды) или ниже, в зависимости от концентрации солей [3]. Для бездобавочных общестроительных цементов, при постоянной температуре  $\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , большая часть теплоты гидратации выделяется уже в первые 3–7 суток, после чего процессы гидратации медленно затухают [2, 3].

Рассмотрим кривую тепловыделения бетона — зависимость объемного тепловыделения бетона от времени  $Q(\tau)$ , кДж/кг. Максимальное тепловыделение бетона  $Q_{max} = Q(\infty)$  зависит (в идеальных условиях: отсутствие в бетоне фазовых превращений воды и водообмена с окружающей средой) от следующих характеристик бетона [2]:

1. расход цемента;
2. начальный запас активной воды;
3. минералогический состав цементного клинкера.

Вид кривой относительного тепловыделения  $Q(\tau)/Q_{max}$  определяется следующими факторами [2, 3]:

1. тонкость помола цемента;
2. содержание гипса;
3. вид и расход добавок в бетоне;
4. подвижность бетонной смеси;
5. температурный режим твердения бетона.

Известен ряд математических моделей кривой тепловыделения  $Q(\tau)$ . Можно отметить некоторые недостатки, характерные для большинства моделей:

1. использование  $Q_{max}$  в качестве параметра: в нормативных и справочных документах можно найти значение тепловыделения цемента в возрасте до 90 суток, но  $Q(90)$  значительно меньше  $Q_{max}$  (см. табл. XI-2 в [2]);

2. наличие нескольких свободных параметров, что требует компьютерной адаптации модели путем решения нелинейной оптимизационной задачи [4];

3. плохое соответствие экспериментальным данным (формула А. А. Гвоздева [2, с. 71; 5]; уравнение И. Д. Запорожца в первые 3 суток [6]).

Тем не менее, на практике при расчете теплового влияния буронабивного свайного фундамента на грунт основания достаточно оценить 2 параметра:

1. время  $t_a$  (сут) активного тепловыделения бетона;
2. общее количество теплоты  $Q_a \leq Q_{max}$ , внесенное в грунт, за время  $t_a$ .

Можно считать, что по истечении  $t_a$  суток темп тепловыделения бетона снижается настолько, что рассеяние теплоты гидратации более не способно породить заметные аномалии температурного поля грунтов (например, в [4] авторы исходят из того, что бетон активно выделяет тепло в течение 28 суток).

Был проведен вычислительный эксперимент с использованием программного комплекса Frost 3D на основе данных из работы [1]. Прогнозный период был равен 31 сут. Тепловыделение сваи моделировалось при помощи линейного источника тепла. Погонная мощность источника, умноженная на площадь поперечного сечения сваи, была равна производной скорости тепловыделения. Были использованы действующие нормы расхода цемента [7]. Кривая тепловыделения была построена по данным таблицы Б.2 из рекомендуемого Приложения Б в [8]. Использовались оригинальные табличные значения тепловыделения (без пересчета на нестандартную и переменную во времени температуру твердения): мы, следуя [9, с. 18; 10, с. 26], использовали изотермическое приближение режима твердения, а средняя ожидаемая температура твердения (за рассматриваемый прогнозный период) считалась такой же, как в испытаниях, лежащих в основе таблицы Б.2 [8] — как показала вычислительная практика, такое упрощение оказалось оправданным. Для интерполяции и экстраполяции табличных данных использовалась линейная (в первые 3 суток) и гиперболическая аппроксимация. Результаты расчетов представлены на рис. 1-3.

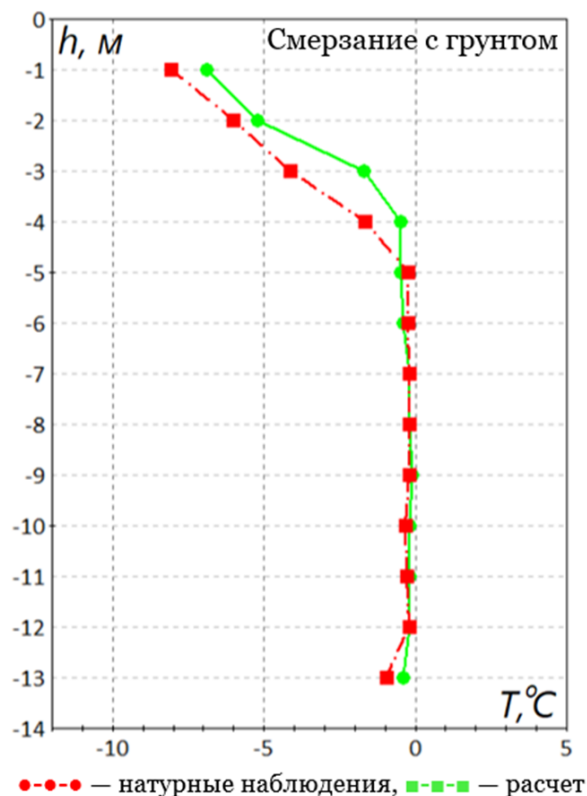
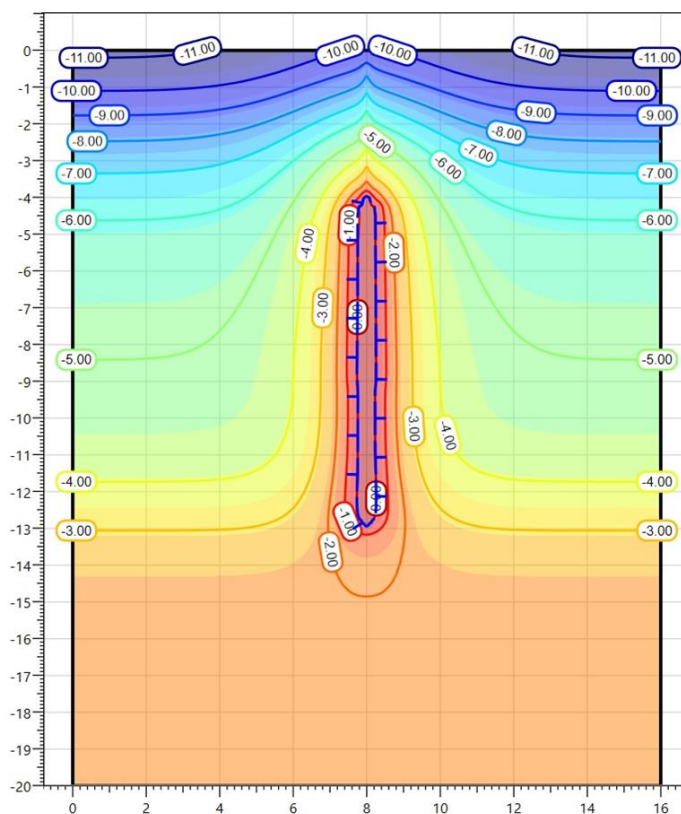
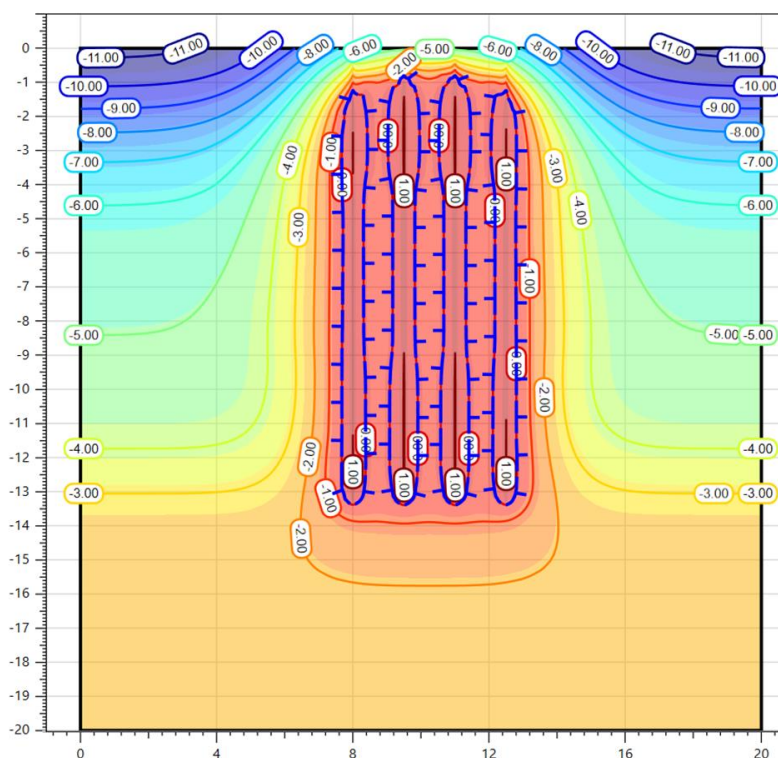


Рис. 1. Сравнение результатов расчета с данными натурных наблюдений на 31-е сутки после заливки бетонной смеси



**Рис. 2.** Распределение температуры в продольном сечении буронабивной сваи на 31-е сутки после заливки бетонной смеси



**Рис. 3.** Распределение температуры в сечении по внутреннему ряду куста буронабивных свай 4x4 на 31-е сутки после заливки бетонной смеси

Таким образом, предложенная инженерная методика, основанная на нормативных документах, позволяет с минимальным объемом входных данных производить учет тепловыделения бетона в прогнозных теплотехнических расчетах многолетнемерзлых оснований буронабивных свайных фундаментов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ефимов В.М., Рожин И.И., Попенко Ф.Е., Попенко Ф.Е., Степанов А.В., Степанов А.А., Васильчук Ю.К. Устройство буронабивных свай в условиях криолитозоны центральной Якутии // Арктика и Антарктика. – 2018. – № 1. – С. 133–141.
2. Запорожец И.Д., Огороков С.Д., Парийский А.А. Тепловыделение бетона. – М.: Стройиздат, 1966. – 316 с.
3. Руководство по бетонированию фундаментов и коммуникаций в вечномерзлых грунтах с учетом твердения бетона при отрицательных температурах / НИИ бетона и Железобетона Госстроя СССР. – М.: Стройиздат, 1982. – 160 с.
4. Курушин А.Д., Костяев П.С., Воронов П.В. Гидратационная модель изотермического тепловыделения твердеющего бетона // Проектирование и строительство зданий на транспорте: межвуз. сб. науч. тр. – Гомель, 1994. – С.41–46.
5. Фрид С.А. Расчет изменения температуры бетонных массивов под влиянием экзотермии цемента // Известия ВНИИГ. – 1949. – Т. 41. – с. 67–76.
6. Стародубцев А.А. Анализ тепловыделения бетонных конструкций в стадии набора прочности // Тенденции развития науки и техники. – 2022. – № 84-2. – С. 164–167.
7. СНиП 82-02-95 Федеральные ( типовые) элементные нормы расхода цемента при изготовлении бетонных и железобетонных конструкций.
8. СП 41.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции гидротехнических сооружений.
9. Кудряшов Б.Б., Яковлев А.М. Бурение скважин в мерзлых породах. – М.: Недра, 1983. – 286 с.
10. Зиневич Л.В. Применение численного моделирования при проектировании технологии обогрева и выдерживания бетона монолитных конструкций // Magazine of Civil Engineering. – 2011. – №2. – С. 24–28.