

УДК 624.15:536.2

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ БУРОНАБИВНЫХ СВАЙ С ТЕРМОХИМИЧЕСКИМ УШИРЕНИЕМ В ОСНОВАНИИ

¹Глушков А.В., ¹Хинканин Л.А., ²Соколов Н.С., ³Глушков И.В., ¹Сергеев С.А.

¹Поволжский государственный технологический университет, Йошкар-Ола, e-mail: 256289@list.ru;

²Чувашский государственный университет им. И.И. Ульянова, Чебоксары, e-mail: ns_sokolov@mail.ru;

³Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, e-mail: givperm@mail.ru

В статье представлены результаты экспериментальных исследований влияния уширения в забое буронабивной сваи на ее несущую способность. Для выявления влияния термохимического уширения (ТХУ) на несущую способность буронабивных свай проведены исследования моделей свай на экспериментальной площадке. В качестве моделей свай использованы модели бетонных буронабивных свай длиной 700 мм, диаметром 130 мм. Проведено комплексное сравнение результатов модельных экспериментальных исследований и расчетов методом конечных элементов напряженно-деформированного состояния свай с термохимическим уширением в забое. В сравнении рассмотрено влияние появления уширения на отдельные компоненты деформированного и напряженного состояния. Для анализа зоны деформирования основания представлено развитие зон пластических деформаций по основным стадиям приложения нагрузок. Проведено моделирование термодинамических процессов, проходящих в забое скважины при устройстве термохимического уширения буронабивной сваи. Градиент температур определяется в ходе численного эксперимента методом конечных элементов в программном комплексе ANSYS. В результате расчетов установлено: сваи с ТХ-уширением – отмечается увеличение зоны деформирования основания вокруг сваи за счет созданной эллиптической формы уширения. Экспериментальные исследования указывают на значительное увеличение несущей способности буронабивных свай при использовании с термохимического уширения. Проработанная комбинация аналитической и численной методики расчета оптимальной формы и массы заряда позволяет подобрать необходимое количество инициирующей смеси. Статья предназначена для специалистов в области промышленного и гражданского строительства и инженеров-геотехников.

Ключевые слова: буронабивные сваи, уширение, термохимическое уширение, метод конечных элементов, механика грунтов, геотехника, напряженно-деформированное состояние

INVESTIGATION OF THE WORK IN BASIS OF BORED PILES WITH THERMOCHEMICAL BROADENING

¹Glushkov A.V., ¹Khinkanin L.A., ²Sokolov N.S., ³Glushkov I.V., ¹Sergeev S.A.

¹Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola, e-mail: 256289@list.ru;

²Chuvash State University, Cheboksary, e-mail: ns_sokolov@mail.ru;

³Perm National Research Polytechnic University, Perm, e-mail: givperm@mail.ru

The article presents the experimental investigations results of the broadening effect in the bored pile bottom on its bearing capacity. To determine the effect of thermochemical broadening (TCB) on the bearing capacity of bored piles, investigations were carried out on models of piles on the experimental site. As models of piles, models of concrete bored piles with a length of 700 mm and a diameter of 130 mm were used. A complex comparison of the model experimental studies results and calculations by the finite element method of the stress-strain state of piles with thermochemical broadening in the face is carried out. In comparison, the influence of the appearance of broadening on individual components of the deformed and stressed state is considered. For the deformation zone analysis of the basis, the development of plastic points distribution along the main stages of loads application is presented. Modeling of the thermodynamic processes passing at the bottom of the well during thermochemical broadening of the bored pile are strongly considered. The temperature gradient is determined in the course of a numerical experiment by the finite element method in the ANSYS software complex. As a result of calculations, it has been established that piles with TC-broadening show an increase in the zone of deformation of the basis around the pile due to the created elliptical form of broadening. Experimental studies indicate a significant increase in the bearing capacity of bored piles with use of thermochemical broadening. A well-developed combination of analytical and numerical methods for calculating the optimal shape and mass of the charge allows you to select the required amount of the initiating mixture. The article is intended for specialists in the field of industrial and civil engineering and geotechnics.

Keywords: bored piles, broadening, thermochemical broadening, finite element method, soil mechanics, geotechnics, stress-strain state

Буронабивные сваи являются одной из наиболее часто применяемых конструкций для передачи нагрузки на основание. Использование буронабивных свай начинается со сравнительно малых диаметров и длин при коттеджном, малоэтажном строительстве, возведении малых архитектурных

форм и достигает значительных размеров (десятков метров в длину, до нескольких метров в диаметре) при строительстве зданий повышенного класса ответственности, мостов и уникальных сооружений [1, 2]. Практика строительства показывает, что буронабивные сваи могут эффективно при-

меняться при реконструкции зданий и сооружений в сфере усиления конструкций фундаментов, подземных частей здания и конструкций, взаимодействующих с основанием [3, 4].

Таким образом особенное значение приобретают научные исследования, направленные на развитие теории взаимодействия буронабивных свай с основанием и технологии увеличения их несущей способности [5].

Широкое применение технологии изготовления буронабивных свай вскрыло класс проблем, с которыми сталкиваются при их выполнении: образование шлама в забое скважины; малая несущая способность (сравнительно с другими технологиями); высокая деформативность неуплотненной зоны основания (затруднен процесс их включения в работу при усилении фундаментов) [5–7].

Экспериментальные исследования

Целью настоящего исследования является изучение работы буронабивной сваи с термохимическим уширением в основании.

Для выявления влияния термохимического уширения (ТХУ) на несущую способность буронабивных свай проведены исследования моделей свай на экспериментальной площадке. В качестве моделей свай использовались монолитные бетонные буронабивные сваи длиной $L = 700$ мм, диаметром $d = 130$ мм. В качестве термохимической смеси используется термитная смесь, обеспечивающая на выходе высо-

кую температуру горения в бескислородной среде. Дистанционная инициация термохимической смеси производилась по принципу «электрических спичек» [8]. Технология создания моделей буронабивных свай и устройства в них при помощи термохимической смеси уширения показана на рис. 1.

В инженерно-геологическом отношении экспериментальная площадка равномерно с поверхности до глубины до 2,8 м сложена суглинком мягкопластичным, который является качественным однородным основанием в пределах исследуемой зоны деформирования буронабивной сваи и термохимического уширения [9].

После полного набора прочности бетона проведены испытания моделей буронабивных свай статической вдавливающей нагрузкой по ГОСТ 5686-2012 Грунты. Методы полевых испытаний сваями. Вертикальная статическая нагрузка сообщалась ступенями по 0,1–0,2 кН (100–200 кг) посредством гидравлического домкрата ДГ-5, регистрация перемещений свай производилась по двум прибомерам Максимова ПМ-3.

При обработке результатов экспериментальных исследований использовалось классическое решение аппроксимации степенными функциями методом наименьших квадратов (рис. 2).

Таким образом, в результате проведенной серии испытаний можно отметить, что при осадках более $S = 30$ мм несущая способность свай с ТХУ превышает несущую способность свай без уширения в $N_2/N_1 = 1,2$ раза.

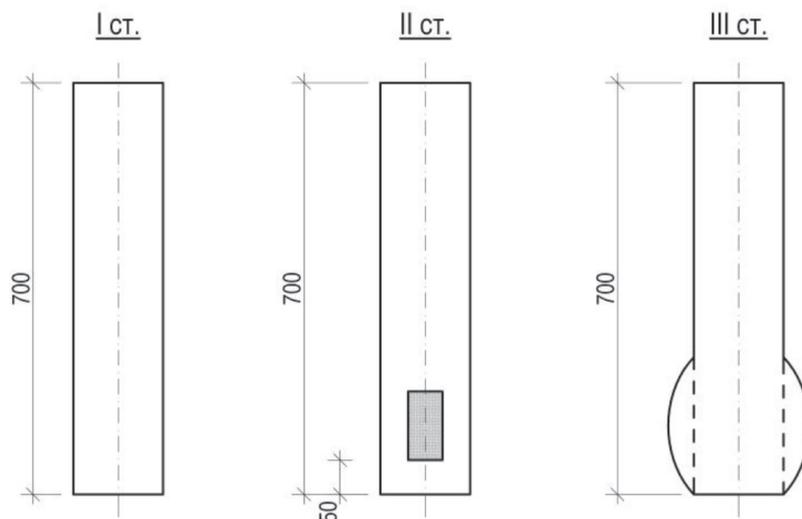


Рис. 1. Технология создания буронабивной сваи термохимического уширения в буронабивной свае по стадиям: 1 ст. – устройство скважины в основании; 2 ст. – фиксирование термохимической смеси в забое скважины с последующей укладкой бетонной смеси; 3 ст. – дистанционная инициация термохимической смеси и получение уширения в свае с созданием уплотненной зоны в основании

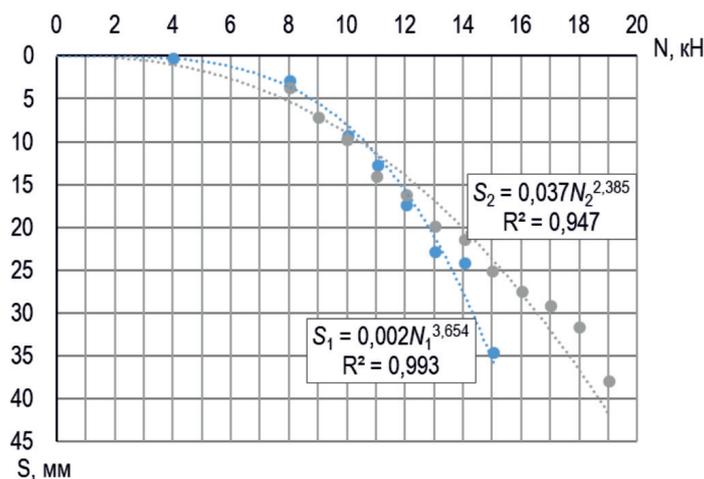


Рис. 2. График зависимости осадки от нагрузки буронабивной сваи при экспериментальных исследованиях в связном основании:
 $S_1 = f(N_1)$ – свая без термохимического уширения; $S_2 = f(N_2)$ – свая с ТХУ

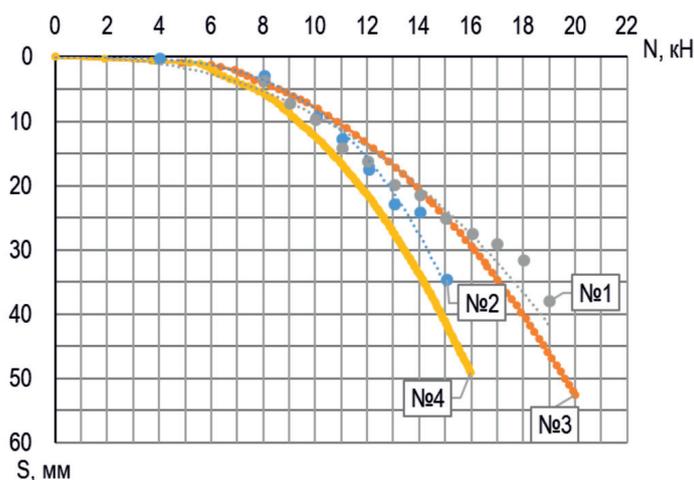


Рис. 3. График зависимости осадки от нагрузки $S = f(N)$ буронабивной сваи в связном основании:
 1, 2 – испытания модели сваи в связном грунте соответственно без ТХУ и с ТХУ;
 3, 4 – моделирование методом КЭ буронабивной сваи соответственно без ТХУ и с ТХУ

Численное моделирование напряженно-деформированного состояния

На начальном этапе проверки гипотезы о влиянии инициации термохимической смеси в забое буронабивной сваи было проведено численное физическое моделирование с использованием геотехнического комплекса Plaxis 2D. Дальнейшие экспериментальные исследования подтвердили принятые геометрические параметры и физические модели, принятые в расчетах [10].

В качестве расчетной модели использовалась осесимметричная модель буронабивной сваи, расчетная область принята размерами $5d \times 2,5L$, где d – диаметр буро-

набивной сваи поверху, L – длина сваи. Разбивка расчетной области на конечные представлена на рис. 4.

Рассмотрим основные результаты расчетов напряженно-деформированного состояния буронабивных свай с термохимическим уширением (ТХУ) в связном грунте. Исследованиями установлено, что несущая способность свай с ТХУ более чем в 1,2 раза выше практически во всем диапазоне осадок (рис. 3). Расчетные графики зависимости осадки от нагрузки $S = f(N)$ для свай с уширениями имеют высокую корреляцию с аппроксимациями экспериментальных данных, что подтверждает корректность и обусловленность выбранной геометрической и физической расчетной модели [11, 12].

Наличие уширения, полученного с использованием термохимической смеси, положительно влияет на работу буронабивной сваи в основании [13].

На рис. 5 приведены изолинии вертикальных напряжений σ_y в связном основании для буронабивной сваи с использованием термохимического уширения и тестовой сваи без ТХУ. Наибольшее увеличение диаметра сваи в забое производилось на 10–15%, что обеспечивает снижение максимальных вертикальных напряжений σ_y до 15%, обеспечивая включение в работу большего объема грунта в основании в сторону от центра сваи и выше плоскости острия.

На рис. 6, а, представлены вертикальные перемещения U_y в основании сваи без ТХУ (слева) и с термохимическим уширением (справа). Для сваи с ТХ-уширением (справа) отмечается увеличение зоны деформирования основания вокруг сваи в 1,10–1,15 раза за счет созданной эллиптической формы уширения, перераспределяющей нагрузку на сваю. В текущем примере при равных осадках $S_2 = S_1$ нагрузки на сваю отличаются в $N_2/N_1 = 1,25$ раза.

На рис. 6, а, представлены вертикальные перемещения U_y в основании сваи без ТХУ (слева) и с термохимическим уширением (справа). Для сваи с ТХ-уширением (справа) отмечается увеличение зоны деформирования основания вокруг сваи в 1,10–1,15 раза за счет созданной эллипти-

ческой формы уширения, перераспределяющей нагрузку на сваю. В текущем примере при равных осадках $S_2 = S_1$ нагрузки на сваю отличаются в $N_2/N_1 = 1,25$ раза.

Для приведенных приложенных нагрузок на рис. 6, б, приведены горизонтальные перемещения U_x для буронабивной сваи и ее аналога с применением термохимической смеси. Горизонтальная компонента перемещений грунта в основании в результате приложения нагрузок становится более выраженной за счет изменения направления передачи усилий от преимущественно вертикального. Поэтому максимальные горизонтальные перемещения $U_{x\max}$, локализованные преимущественно в области забоя скважины, для сваи с уширением на 30–40% больше, чем для сваи без уширения.

Для анализа зоны деформирования основания на рис. 7 представлено развитие зон пластических деформаций по основным стадиям приложения нагрузок. Для обеих конструкций свай отмечается относительно равный объем грунта, перешедший на соответствующих стадиях в пластическую стадию. Различия заключаются в появлении зон пластических деформаций в области вокруг и в сторону от уширения, что означает, что окружающая его часть основания активно начинает включаться в работу и имеет положительное влияние на конечную несущую способность сваи.

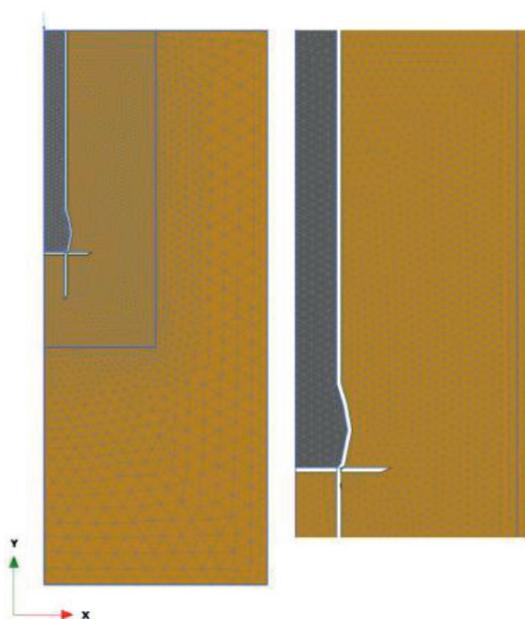


Рис. 4. Разбивка расчетной области на треугольные конечные элементы

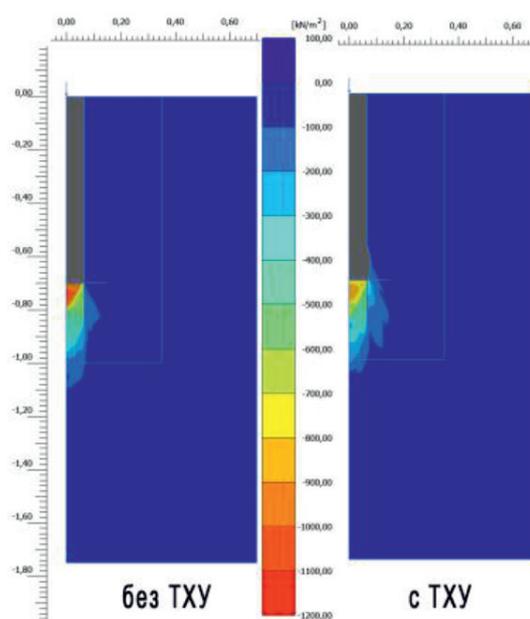


Рис. 5. Вертикальные напряжения σ_y в основании буронабивной сваи

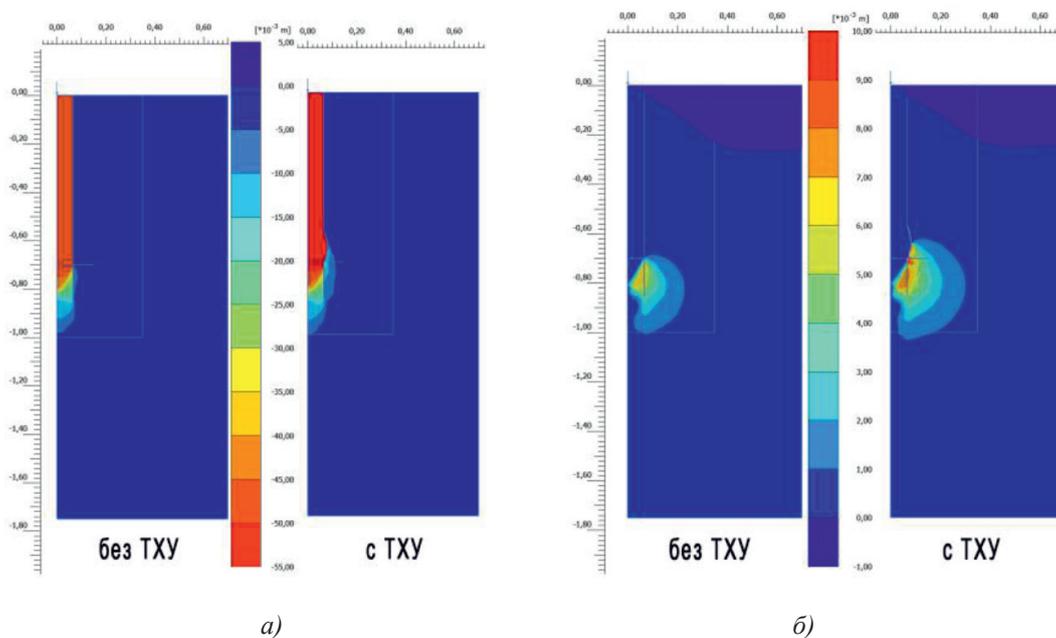


Рис. 6. Вертикальные U_y (а) и горизонтальные U_z (б) перемещения в основании буронабивной сваи

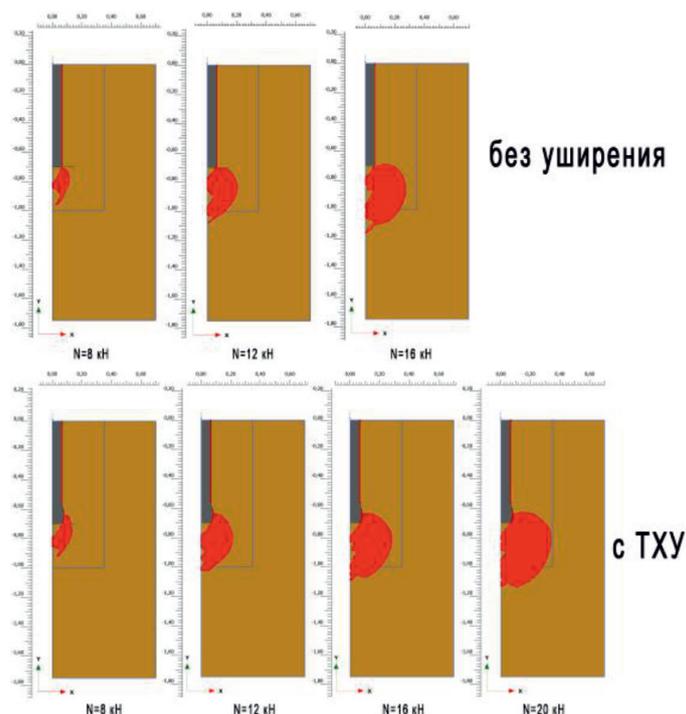


Рис. 7. Развитие зон пластических деформаций в основании с ростом нагрузки N для буронабивной сваи без уширения и с уширением (ТХУ)

Численное моделирование термодинамических процессов

Термохимическое уширение обусловлено фазовым переходом свободной влаги (несвязанной физико-химической реакци-

ей затворения смеси) из жидкого состояния в парообразное. Для описания этого фазового перехода необходимо рассмотреть свободную энтальпию пароводяной смеси в малом масштабе времени [14].

Рассмотрим тепловой баланс системы «свая с ТХУ – грунт». Примем, в первом приближении, тепловой поток на границах системы (на удалении 2,0 м от оси симметрии сваи) равным 0 Вт. Таким образом, вся тепловая энергия заряда поглощается бетонной смесью, энтальпией перехода воды в пар и окружающим грунтом

$$Q_{\text{заряд}} = E_{\text{вода}} + E_{\text{пар}} + Q_{\text{бетон}} + Q_{\text{грунт}} \quad (1)$$

Описанные выше грунтовые условия позволяют с достаточной точностью составить систему уравнений теплового баланса системы.

$$Q_{\text{грунт}} = c_{\text{грунт}}(t, \varphi) \cdot m_{\text{грунт}} \cdot \Delta t_{\text{бетон-грунт}} \quad (2)$$

$$Q_{\text{бетон}} = c_{\text{бетон}} \cdot m_{\text{бетон}} \cdot \Delta t_{\text{заряд-грунт}} \quad (3)$$

$$E_{\text{вода}} = f(p_{\text{вода}}, \Delta t_{\text{заряд-грунт}}) \quad (4)$$

$$E_{\text{пар}} = f(p_{\text{пар}}, \Delta t_{\text{заряд-вода}}) \quad (5)$$

Градиент температур определяется в ходе численного эксперимента методом конечных элементов в программном комплексе ANSYS. Применяемая модель нестационарного теплопереноса, позволяет оценить как длительность процесса нагрева бетонной смеси, так и процесс перехода несвязной воды из жидкого в газообразное состояние. Не учтенные, в первом приближе-

нии, процессы конвективного теплообмена в неньютоновской жидкости (бетонной смеси) оцениваются как несущественные. Прорывы газообразных продуктов сгорания по телу сваи от заряда к устью скважины мало сказываются на процессе теплопереноса ввиду низкой теплоемкости газа.

Как видно из рис. 8, процесс прогрева тела бетона до точки кипения воды проходит между первой и второй минутой. Зона прогрева меж стенкой «грунт/свая» и зарядом прогревается выше 100 °С (минимальная температура в зоне прогрева) за 126 секунд. Вместе с тем стоит отметить, что при сопоставимой энергоемкости процесса горения эффективнее использовать смеси с меньшей температурой горения, но большим временем химической реакции, что обеспечит длительный равномерный прогрев, повышая удельную энтальпию бетонной смеси.

Требуются дополнительные изыскания для определения теплофизических свойств бетонной смеси в пограничном состоянии (при переходе из жидкого в отвержденное состояние) [15].

Применение зарядов с соотношением «диаметр/высота» более 1:10 не может признаться эффективным, из-за увеличения влияния конвективных процессов теплообмена в теле сваи.

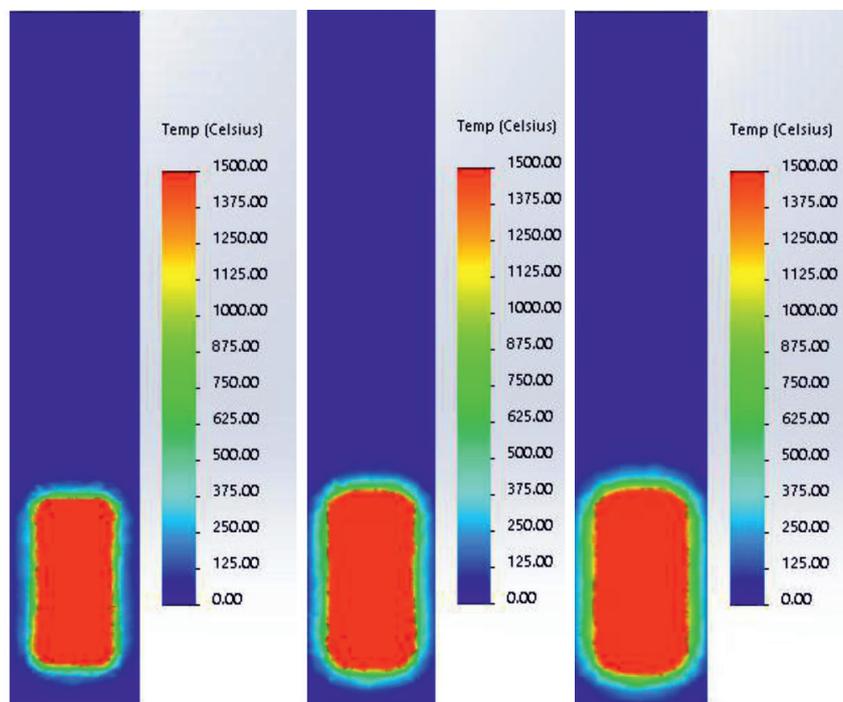


Рис. 8. Процесс прогрева тела сваи с ТХУ в сечении плоскости симметрии. Слева направо: термограмма на 10 секундах, термограмма на 50 секундах, термограмма на 100 секундах прогрева

Выводы

1. По результатам экспериментальных исследований в связном грунте установлено, что при осадках более $S = 30$ мм несущая способность моделей буронабивных свай с ТХУ превышает несущую способность свай без уширения в $N_2/N_1 = 1,2$ раза.

2. Численное моделирование работы буронабивных свай с уширением, полученным в результате инициации термохимической смеси, возможно проводить с использованием геотехнических комплексов КЭ-анализа и получать адекватную картину распределения компонент напряженно-деформированного состояния (рис. 4–7). В результате расчетов установлено: сваи с ТХ-уширением – отмечается увеличение зоны деформирования основания вокруг сваи в 1,10–1,15 раза за счет созданной эллиптической формы уширения, перераспределяющей нагрузку от сваи на основание.

3. Процесс прогрева тела бетона в свае с ТХУ до точки кипения воды проходит между первой и второй минутой. Зона прогрева меж стенкой «грунт/свая» и зарядом прогревается выше 100°C (минимальная температура в зоне прогрева) за 126 секунд. Таким образом, выгоднее применять смеси низкотемпературного горения, но с большей длительностью химической реакции.

4. Численное моделирование показало, что удлинение заряда в пропорциях больше 1:10 (диаметр заряда к его высоте) не несет значимого положительного эффекта. Наоборот, в таком случае неизбежно увеличение доли конвективного теплообмена в системе, что снижает эффективность свай с ТХУ.

Полученные выводы подтверждают высокий потенциал использования конструкций свай с ТХУ в промышленном и гражданском строительстве, а также при реконструкции зданий и сооружений при должной проработке технологии производства работ.

Список литературы

1. Справочник геотехника. Основания, фундаменты и подземные сооружения / под общ. ред. В.А. Ильичева и Р.А. Мангушева. – М.: Изд-во АСВ, 2014. – 728 с.

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

3. Пронозин Я.А. Результаты лабораторных и полевых исследований изготовления буринъекционной сваи с контролируемым уширением / Я.А. Пронозин, М.А. Самохвалов, Д.В. Рачков // Промышленное и гражданское строительство. – 2014. – № 3. – С. 56–60.

4. Федоров В.С. Конструктивные решения свайных фундаментов с концевыми и поверхностными уширениями для структурно-неустойчивых оснований / В.С. Федоров, Н.В. Купчикова // Вестник гражданских инженеров. – 2011. – № 1. – С. 88–90.

5. Полищук А.И. Определение усилия вдавливания иньектора иньекционной сваи в глинистых грунтах / А.И. Полищук, А.А. Петухов, А.А. Тарасов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2013. – № 2(39). – С. 346–353.

6. Глухов В.С. Исследование влияния уширения свай в пробитых скважинах на осадку / В.С. Глухов, О.В. Хрянина, М.В. Глухова // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2011. – № 5–2(38). – С. 351–354.

7. Мельников Р.В. Исследование влияния уширения свай в пробитых скважинах на осадку / Р.В. Мельников, О.С. Порошин, М.А. Самохвалов // Научное обозрение. – 2015. – № 17. – С. 73–77.

8. Суворов А.В. Карамельная ракета / А.В. Суворов // Популярная механика. – 2016. – № 9. – С. 86–89.

9. Ponomaryov A.B., Sazonova S.A. The use of express method for determining the modulus of deformation of fill soil. Challenges and Innovations in Geotechnics – Proceedings of the 8th Asian Young Geotechnical Engineers Conference, 8AYGEC 2016 8th, 2016, pp. 283–286.

10. Шашкин А.Г. Критический анализ наиболее распространенных нелинейных моделей работы грунта / А.Г. Шашкин // Инженерная геология. – 2010. – № 3. – С. 29–37.

11. Дидух Б.И. Упругопластическое деформирование грунтов: монография. – М.: Изд-во УДН, 1987. – 166 с.

12. Зарецкий Ю.К. Вязкопластичность грунтов и расчеты сооружений. – М.: Стройиздат, 1988. – 352 с.

13. Wei H.W. Design parameter optimization of beam foundation on soft soil layer with nonlinear finite element / H.W. Wei, Y.Z. Wu, Z.H. Yu // Journal of Central South University. 2012. Vol. 19. № 6. pp. 1753–1763.

14. Пат. 110489 Российская Федерация. МПК G 01 N 25 18,G 01 N 33 24. Устройство для определения тепловых физических качеств грунта, прилегающего к зданиям и сооружениям, по теплопроводности в натуральных условиях / Муреев П.Н., Куприянов В.Н., Котлов В.Г. и др.; заявитель и патентообладатель Марийский ГТУ. – № 2011107056/28. 2011 г.

15. Хинканин Л.А. Влияние теплопроводных включений на температурные поля в пористых телах / Л.А. Хинканин, А.П. Хинканин // Научному прогрессу – творчество молодых: мат. межд. науч. конф. – Йошкар-Ола: Изд-во ПГТУ, 2013. – С. 177–179.