

ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ, ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

УДК 624.159.5

*ЕЩЕНКО ОЛЕГ ЮРЬЕВИЧ, канд. техн. наук, доцент,
master@geoproekt.net
ЧЕРНЯВСКИЙ ДЕНИС АЛЕКСЕЕВИЧ, аспирант,
asp_projekt93@mail.ru
Кубанский государственный аграрный университет,
350044, г. Краснодар, ул. Калинина, 13*

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА БУРОИНЪЕКЦИОННЫХ СВАЙ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ГЛИНИСТЫХ ГРУНТАХ

В статье рассмотрены особенности конечно-элементной модели одиночной буроинъекционной сваи в глинистых грунтах, в том числе вопросы влияния характеристик области соприкосновения сваи с грунтом, а также применяемого типа сетки конечных элементов. Приведены результаты расчётов одиночных буроинъекционных свай в глинистых грунтах при действии статических сжимающих нагрузок. Даны рекомендации по назначению параметров области взаимодействия грунта и сваи, а также применяемого типа сетки конечных элементов при расчёте осадки и несущей способности одиночных буроинъекционных свай. Дана сравнительная оценка результатов численных расчётов и натурных испытаний.

Ключевые слова: буроинъекционная свая; осадка; МКЭ; контактное взаимодействие.

*OLEG YU. ESHCHENKO, PhD, A/Professor,
master@geoproekt.net
DENIS A. CHERNYAVSKII, Research Assistant,
asp_projekt93@mail.ru
Kuban State Agrarian University,
13, Kalinin Str., 350044, Krasnodar, Russia*

CONTINUOUS FLIGHT AUGER ANALYSIS USING FINITE ELEMENT METHOD

The paper presents the finite element model of a single continuous flight auger (CFA) piles used in clay soils, including the properties of the soil contact area. Also, the mesh type used finite element mesh is described. The design calculations are presented for single CFA piles under the static compressive loads. Recommendations are given on the parameter assignment for

soil/pile interaction and the type of the finite element mesh used in the analysis of the setting and bearing capacity of single CFA piles. A comparative estimation is given for the numerical calculation results and field tests.

Keywords: continuous flight auger; setting; finite element model; contact interaction.

На сегодняшний день в отечественной практике строительства все большее применение находят технологии, позволяющие выполнять фундаменты зданий или сооружений на буринъекционных сваях [1, 2]. Как известно, отличительной особенностью таких свай является формирование развитой боковой поверхности [3, 4] при ее устройстве, что, очевидно, и приводит к увеличению несущей способности сваи по грунту по сравнению с буровыми или забивными типами свай. Существующая нормативная база* учитывает данную особенность через полуэмпирические коэффициенты, однако отдельные ученые [5–8] отмечают, что результаты расчётов по общепринятой методике могут сильно отличаться от данных натурных испытаний буринъекционных свай. С точки зрения расчётов численными методами существующие на сегодняшний день указания [10, 11] по моделированию области взаимодействия боковой поверхности сваи с грунтом схожи с данными для буровых свай, тем самым происходит недоучёт по несущей способности.

Таким образом, особый научный и практический интерес вызывают вопросы, связанные с изучением влияния особенностей численного моделирования области взаимодействия боковой поверхности буринъекционных свай с грунтом.

Все проводимые исследования выполнялись с использованием конечно-элементного расчётного программного комплекса Midas GTS. В данном расчётном комплексе моделирование области соприкосновения сваи с грунтом выполняется путём ввода специального контактного элемента. Поведение такого элемента базируется на законе Кулона, когда сила трения пропорциональна коэффициенту трения и величине нормальной силы, действующей на контактный элемент. При этом с точки зрения математического аппарата функция разрушения (f) и функция потенциала (g) для контактного элемента описываются уравнениями:

$$f = \sqrt{t_t^2 + t_n \tan \varphi(k) - c(k)}; \quad (1)$$

$$g = \sqrt{t_t^2 + t_n \tan \psi}, \quad (2)$$

где c – коэффициент сцепления как функция скорости нагружения, k ; φ – угол внутреннего трения как функция скорости нагружения, k ; ψ – угол дилатансии.

Коэффициенты жёсткости, нормальный (k_n) и касательный (k_t) к поверхности контактного элемента, вычисляются по формуле

$$k_n = k_t = \frac{1000 E_{\max}}{d},$$

где E – самый большой модуль деформации, присутствующий в модели, МПа; d – размер самого маленького элемента в области контакта, м.

* СНиП 2.02.03–85. Свайные фундаменты. М. : ФГУП ЦПП, 2006. 46 с.

СП 24.13330.2011. Свайные фундаменты. Актуализированная редакция СНиП 2.02.03. М. : ФГУП ЦПП, 2011. 85 с.

Взаимосвязь между трением (t) и относительными перемещениями (Δu) описывается уравнением

$$t = D \Delta u. \quad (3)$$

Для 3D расчётов каждая компонента описывается следующими выражениями:

$$t = \begin{Bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{Bmatrix}, \quad D = \begin{bmatrix} k_x & 0 & 0 \\ 0 & k_y & 0 \\ 0 & 0 & k_z \end{bmatrix}, \quad \Delta u = \begin{Bmatrix} \Delta u_x \\ \Delta u_y \\ \Delta u_z \end{Bmatrix}, \quad (4)$$

где t_x – силы трения, действующие по нормали к контактному элементу, Н; t_y , t_z – силы трения, действующие касательно к контактному элементу, Н; Δu_x – относительные перемещения по нормали к контактному элементу, м; Δu_y , Δu_z – относительные перемещения по касательной к контактному элементу, м²; k_x – постоянный показатель жёсткости, по направлению совпадающий с нормалью к контактному элементу; k_y , k_z – постоянные показатели жёсткости, по направлению касательные к контактному элементу.

При упругом поведении контактного элемента матрица жёсткости принимает следующий вид:

$$D^e = t_v \times \begin{bmatrix} E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{E}{2(1+\nu)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{E}{2(1+\nu)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{Et_v}{12} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где E – модуль деформации грунта, МПа; ν – коэффициент Пуассона; t_v – виртуальная толщина контактного элемента.

Каждый узел контактного элемента имеет три поступательные и одну вращательную степени свободы. Вращение допускается только вдоль длинной стороны контактного элемента.

Взаимосвязь между действующими на контактный элемент моментными нагрузками (m) и деформациями кручения ($\Delta \varphi$) носит нелинейный характер и описывается выражением

$$m_s = \frac{Eb^2}{12} \Delta \varphi_s, \quad \Delta \varphi_s \leq \frac{2t_n}{EI}, \\ m_s = \frac{\Delta \varphi_s |t_n| b}{2|\Delta \varphi_s|} \left[1 - \sqrt{\frac{8|t_n|}{9|\Delta \varphi_s| Eb}} \right], \quad \Delta \varphi_s > \frac{2t_n}{EI}. \quad (6)$$

Взаимосвязь между относительными деформациями и силами трения при нелинейной работе контактного элемента описывается выражением

$$m_s = D_m \Delta \varphi_s, \quad (7)$$

$$\text{где} \quad D_m = \left[\sqrt[4]{\frac{|t_n|^3}{18E|\Delta \varphi_s|^3}} \right]. \quad (8)$$

Для удобства использования в ПК Midas GTS большинство из вышеупомянутых параметров объединены в группы, которые задаются при помощи двух коэффициентов: виртуальная толщина контакта (t_v) и коэффициент пропорциональности (R_t) для соответствующих характеристик грунта.

Таким образом, для моделирования контактных элементов, учитывающих особенности взаимодействия буринъекционной сваи и грунта, было отдельно рассмотрено влияние величины значения коэффициента пропорциональности (R_t) и виртуальной толщины (t_v) на осадку одиночной буринъекционной сваи. Для этого выполнено две серии расчётов отдельно для каждого параметра. При этом менялся только исследуемый параметр, а второй оставался постоянным и принимал значения, выставленные в программе по умолчанию.

Для проведения исследований в качестве тестовой задачи была разработана 3D модель одиночной железобетонной буринъекционной сваи длиной 7 м и диаметром 100 мм. Физико-механические характеристики грунта принимались по таблицам СП 22.13330.2011 как для глинистых грунтов со следующими характеристиками: $E = 12$ МПа; $c = 22$ кПа; $\varphi = 17^\circ$; $\mu = 0,35$.

В первой серии расчётов исследовалось влияние параметра виртуальной толщины (t_v) на осадку одиночной буринъекционной сваи. Теоретический диапазон значений параметра (t_v) составляет $0 < t_v < 1$. Разработчики программного комплекса рекомендуют для любых грунтовых условий принимать $t_v = 0,5$. В работе данный параметр был рассмотрен в интервале значений от 0,3 до 0,7 с шагом 0,1. По результатам расчётов построен график (рис. 1).

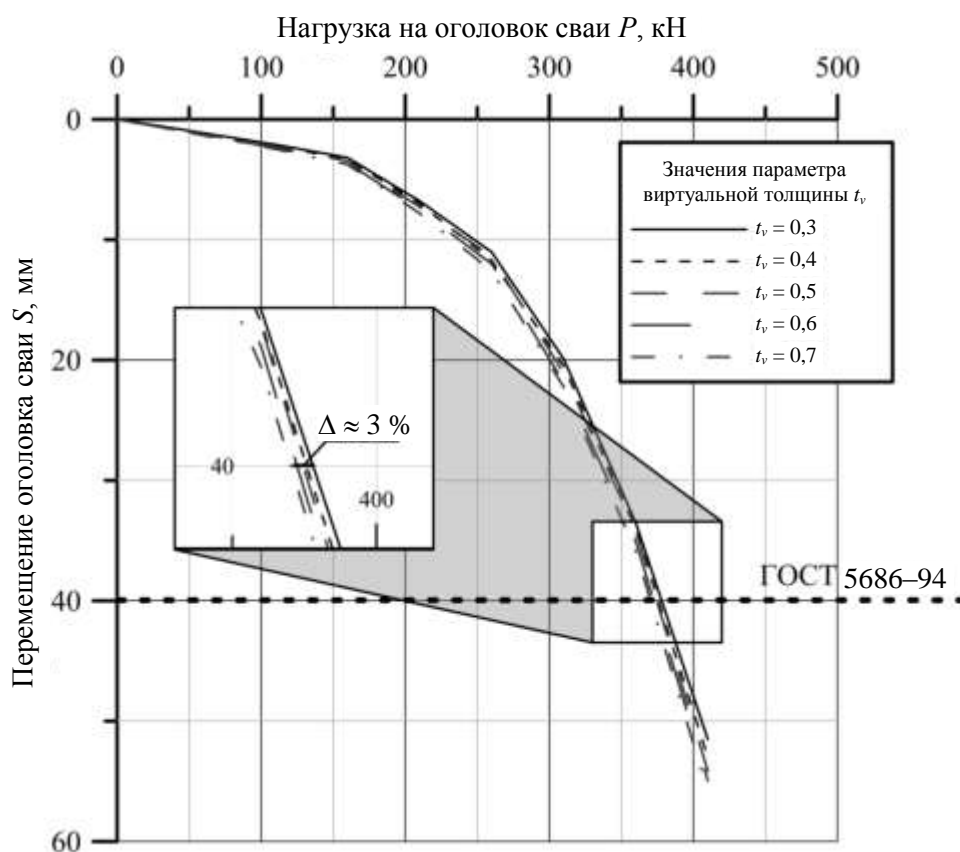


Рис. 1. Влияние параметра виртуальной толщины на осадку одиночной буринъекционной сваи

Из графика (рис. 1) видно, что при осадке сваи, равной 40 мм (несущая способность согласно ГОСТ 5686–94), относительная погрешность по нагрузке не превышает 3 %. Поэтому можно сделать вывод о том, что рассматриваемый параметр не оказывает существенного влияния на результаты расчётов при определении осадки одиночных буроинъекционных свай.

Однако следует отметить, что в момент, когда значения виртуальной толщины (t_v) принимают величины, равные 0,3 и 0,7, при проведении расчётов наблюдается плохая сходимость итерационного решателя и значительное увеличение времени проведения расчёта.

Во второй серии расчётов исследовалось влияние коэффициента пропорциональности (R_f) на осадку одиночной буроинъекционной сваи. Согласно документации разработчика используемого расчётного программного комплекса [10], для подобного типа свай рекомендуется использовать значение коэффициента пропорциональности (R_f), равное 1. Для целей исследования данный параметр был рассмотрен в интервале значений от 0,8 до 1,2 с шагом 0,1. По результатам расчётов построен график (рис. 2).

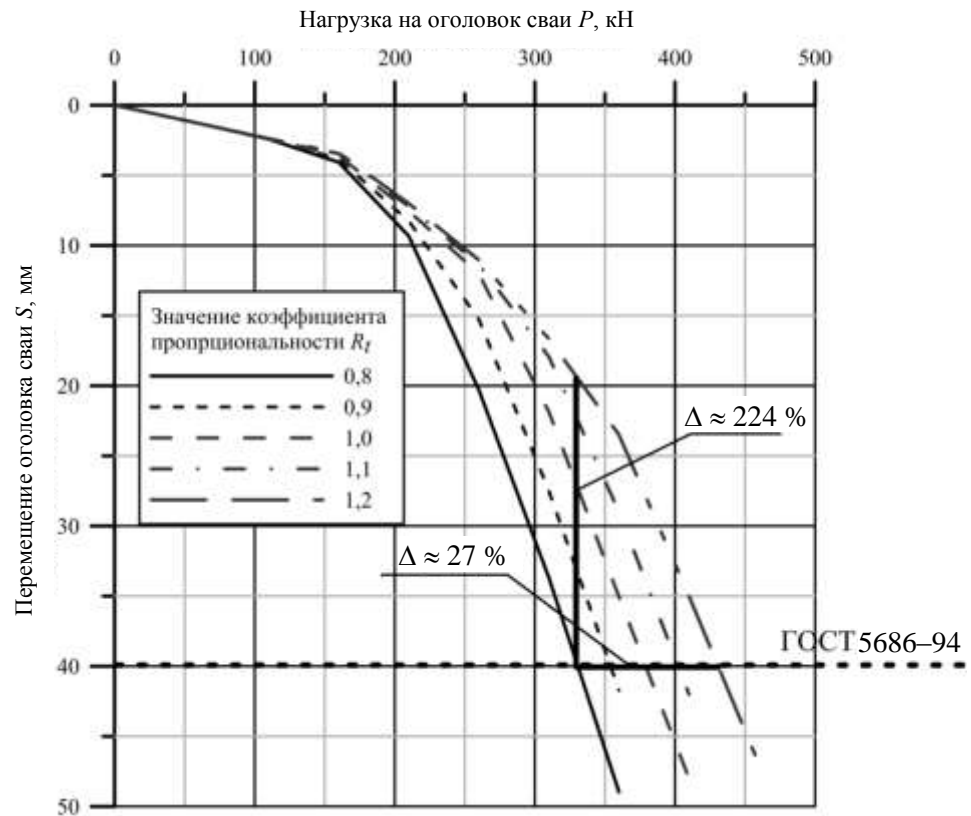


Рис. 2. Влияние коэффициента пропорциональности (R_f) на осадку одиночной буроинъекционной сваи

Из графика (рис. 2) видно, что при фиксированной осадке изменение коэффициента пропорциональности (R_f) в 1,5 раза (от 0,8 до 1,2) приводит

к увеличению расчётной нагрузки на 27 %. Если же зафиксировать внешнюю нагрузку P ($P = 334$ кН), то изменение (R_t) от 0,8 до 1,2 приводит к снижению осадки более чем в 2 раза (224 %).

Таким образом, можно сделать вывод о том, что величина коэффициента пропорциональности (R_t) существенно влияет на несущую способность и осадку одиночной буринъекционной сваи. Качественный подбор данного параметра можно выполнить только на основе сопоставления результатов расчёта компьютерного моделирования с результатами испытаний натуральных буринъекционных свай.

В качестве натуральных испытаний были рассмотрены испытания двух буринъекционных цилиндрических свай Titan, выполненных ЗАО «ПКТИ» в 2005 г. Испытания проводились статической вдавливающей нагрузкой с целью определения несущей способности свай по грунту. Испытуемые сваи (далее свая № 44 и № 47) были выполнены по технологии фирмы ISCHEBECK в скважинах диаметром 210 мм и глубиной 12 м. Инженерно-геологические условия участка испытания свай принимались согласно геологическому разрезу плана свайного поля, выполненного ОАО «ЛенГипроТранс» в 2005 г.

Для удобства и наглядности результаты сопоставления представлены в виде графика (рис. 3), который объединяет в себе данные натуральных испытаний двух свай (свая № 44 и № 47 согласно отчёту ЗАО «ПКТИ» [9]), расчётных численных моделей с контактными элементами и модели, в которой контактные элементы отсутствуют.

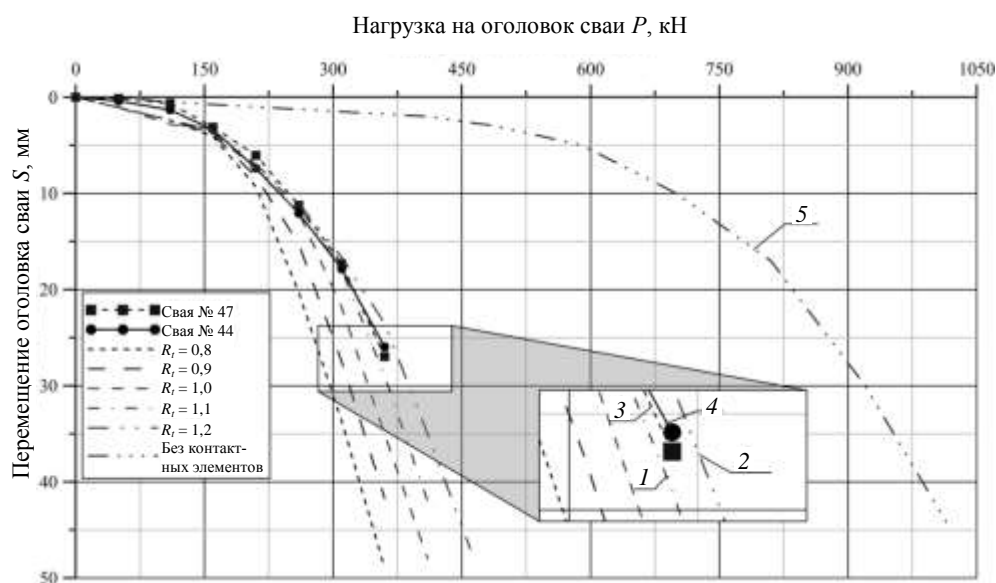


Рис. 3. Сравнение данных компьютерного моделирования с результатами испытаний натуральных буринъекционных свай

Из графика (рис. 3) видно, что кривые 1 ($R_t = 1,1$) и 2 ($R_t = 1,2$) наиболее точно повторяют кривые осадки натуральных свай № 44 и № 47 (кривые 3, 4). Однако следует отметить, что при постоянной нагрузке (P , кН) осадка свай,

согласно кривой 2, будет меньше данных натуральных испытаний (кривые 3, 4). Кривая осадки сваи для расчётной модели, не учитывающей контактные элементы, имеет значительное отклонение от кривых натуральных испытаний. При этом в момент, когда осадка натуральных свай равна порядка 25 мм (момент окончания натуральных испытаний), расчётная нагрузка для кривой 5 почти в 3 раза больше, чем для кривых 3, 4.

Исходя из сказанного выше, можно сделать вывод о том, что проведение численных расчётов осадки буроинъекционной сваи на моделях, выполненных без учёта контактных элементов, может привести к существенным ошибкам при определении осадок и несущей способности. Применение коэффициента пропорциональности (R_f) более чем 1,1 приводит к завышению значений осадки свай, что недопустимо при выполнении расчётов реальных задач и проведении исследований.

Второй вопрос, который был рассмотрен, это оценка влияния типа применяемого конечного элемента на результаты расчёта осадки одиночных буроинъекционных свай. Учитывая вышеописанные данные, а также используя те же геологические условия и геометрические параметры буроинъекционной сваи, что и при определении параметров контактных элементов, были отдельно созданы 4 расчётные модели, в которых для дискретизации расчётных областей применялись различные типы конечных элементов (тетраэдры и гексаэдры низшего и высшего порядка). Для наглядности применяемые в исследованиях типы КЭ представлены на рис. 4.

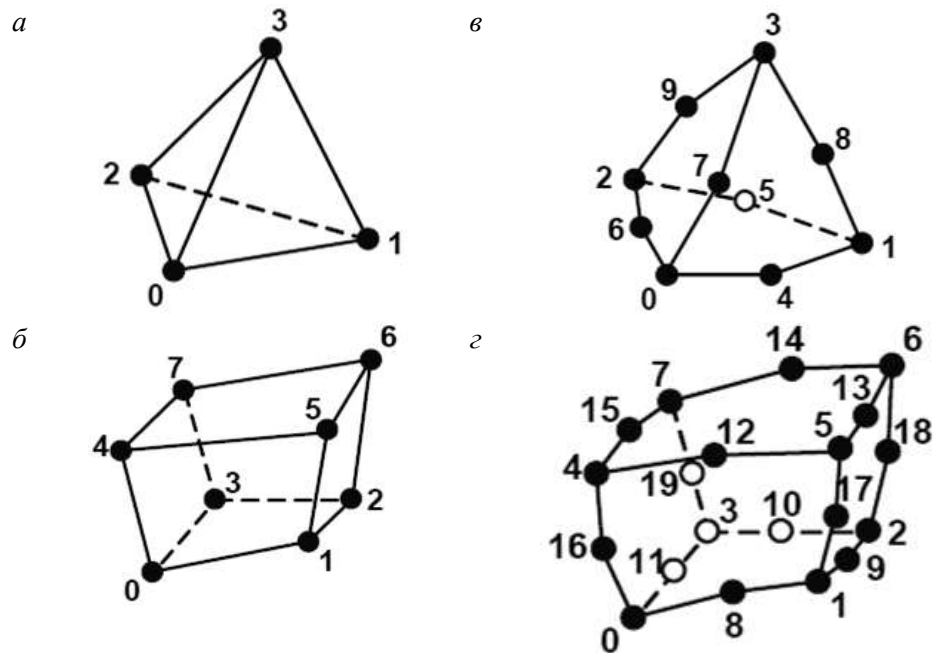


Рис. 4. Применяемые типы конечных элементов:

a – тетраэдр низшего порядка; *б* – тетраэдр высшего порядка; *в* – гексаэдр низшего порядка; *г* – гексаэдр высшего порядка

Далее над вышеописанными моделями были проведены серии расчётов, по результатам которых построен график (рис. 5).

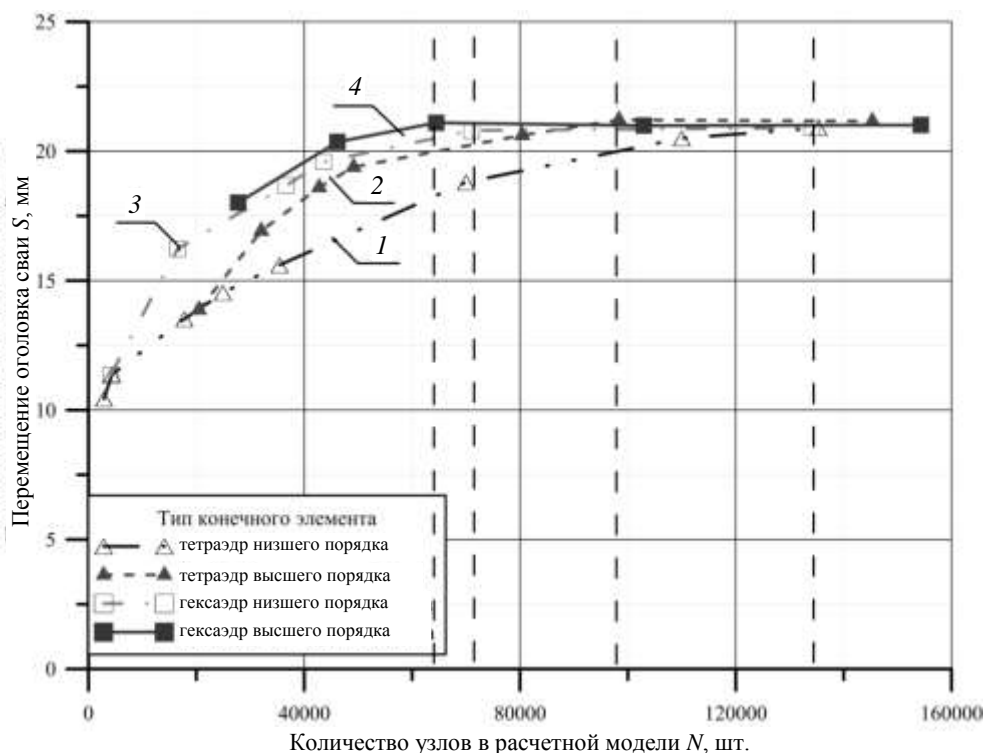


Рис. 5. График зависимости величины осадки буринъекционной сваи от применяемого типа конечных элементов

Из графика (рис. 5) видно, что в интервале значений количества узлов сетки КЭ (N) от 500 до $13 \cdot 10^4$ шт. колебания значений осадки сваи составляют от 10,2 до 21,8 мм, при этом относительная погрешность вычислений (δ_x) составляет порядка 53 %. Также для каждой кривой существует область, в которой она параллельна оси абсцисс, что может свидетельствовать об отсутствии влияния применяемого типа конечных элементов на результаты расчётов. Для каждой кривой характерно минимальное количество узлов сетки КЭ, при последующем увеличении количества узлов влияние применяемого типа КЭ минимально.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что от применяемого типа КЭ в значительной степени зависят результаты расчёта осадки сваи. Наименьшее количество узлов сетки КЭ, а следовательно и времени проведения расчёта, требуется для расчётной модели, в которой дискретизация расчётной области выполнена гексаэдрами высшего порядка.

Выводы

Проанализировав результаты решения задач, можно сделать следующие основные выводы:

1. Выполнение расчётов осадки одиночных буроинъекционных свай без применения контактных элементов приводит к завышению получаемых значений осадки почти в 3 раза.

2. При назначении параметров контактных элементов большее влияние на результаты расчёта оказывает коэффициент пропорциональности (R_t), чем виртуальная толщина (t_v).

3. Наибольшая сходимость результатов расчётов осадок одиночных буроинъекционных свай методом конечных элементов и фактически полученной осадки при испытании натуральных свай достигается при применении коэффициента пропорциональности (R_t) в диапазоне от 1,1 до 1,2.

4. Наибольшая скорость проведения расчётов достигается при применении значения виртуальной толщины (t_v), равного 0,5.

5. Сетка из гексаэдров лучше, чем из тетраэдров. Элементы высшего порядка обеспечивают более высокую точность расчета и скорость сходимости решения (при том же количестве узлов), чем элементы низшего порядка.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рытов, С.А. Эффективные современные технологии устройства буроинъекционных свай и грунтовых инъекционных анкеров / С.А. Рытов // Информационный вестник. – 2007. – № 1 (16). – 12 с.
2. Мангушев, Р.А. Современные свайные технологии / Р.А. Мангушев, А.В. Ершов, А.И. Осокин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во АСВ, 2010. – 240 с.
3. Bruce, D.A. Drilled and grouted micropiles: state of practice review / D.A. Bruce, I. Juran. – Springfield, VA, USA, 1997. – Report № FHWA-RD-97-144. – V. 1-4. – NTIS. – 115 p.
4. Bruce, D.A. High capacity micropiles – basic principles and case histories / D.A. Bruce, M.E.C. Bruce, R.P. Traylor // GeoEngineering for Underground Facilities. Proc. Of the 3rd National Conference of the Geo-Institute of the American Society of Civil Engineers. Geotechnical Special Publication. – 1999. – № 90. – Urbana-Champaign. – IL. – June 13–17. – P. 188–199.
5. Джантимиров, Х.А. Разработка конструкции и методов расчёта буроинъекционных свай : дис. ... канд. техн. наук. – М., 1986. – 240 с.
6. Маршалка, А. Ю. Совершенствование метода проектирования свайно-плитных фундаментов из буроинъекционных свай на песчаных и глинистых грунтах : дис. ... канд. техн. наук. – Волгоград, 2013. – 156 с.
7. Мангушев, Р.А. Об определении несущей способности буронабивных и буроинъекционных свай / Р.А. Мангушев, А.В. Кошман // Материалы 54-й научной конференции. – СПб.: СПбГАСУ, 1997. – С. 23–24.
8. Конюшков, В.В. Несущая способность буроинъекционных свай на вертикальную и горизонтальную нагрузки с учетом технологии их изготовления : дис. ... канд. техн. наук. – СПб., 2007. – 163 с.
9. Отчёт ПКТИ о результатах полевых испытаний буроинъекционных свай на статическую вдавливающую нагрузку. – СПб.: ПКТИ, 1991–2007. – 84 с.
10. GTS 2012 Analysis Manual. Part 1 Analysis Case. – 2011. – P. 243.
11. De Vos, M. Innovative design methods ingeotechnical engineering / M. De Vos, V. Whendam // GeoTechNet – European Geotechnical Thematic Network. Part 2. – 2010. – 13 p.

REFERENCES

1. Rytov S.A. Effektivnye sovremennye tekhnologii ustroystva buroin"eksionnykh svay i gruntovykh in"eksionnykh ankerov [Efficient modern technologies of installation of inclined piles]. *Informatsionnyy vestnik*. 2007. No. 1 (16). 12 p. (rus)

2. *Mangushev R.A., Ershov A.V., Osokin A.I.* Sovremennye svaynye tekhnologii [Advanced pile technologies]. Moscow : ASV Publ., 2010. 240 p. (rus)
3. *Bruce D.A., Juran I.* Drilled and grouted micropiles: state of practice review. USA, Springfield, VA, 1997. Report N FHWA-RD-97-144. V. 1–4. 115 p.
4. *Bruce D.A., Bruce M.E.C., Traylor R.P.* High capacity micropiles – basic principles and case histories geoengineering for underground facilities. *Proc. 3rd Nat. Conf. of Geo-Institute of the American Society of Civil Engineers*. Geotechnical Special Publication, Urbana-Champaign, IL, 1999. No. 90. Pp. 188–199.
5. *Dzhantimirov Kh.A.* Razrabotka konstruksii i metodov rascheta buroin"eksionnykh svay dis. ... kand. tekhn. nauk [Structural analysis and design methods of inclined piles. PhD Thesis]. Moscow, 1986. P. 240. (rus)
6. *Marshalka A.Yu.* Sovershenstvovanie metoda proektirovaniya svayno-plitnykh fundamentov iz buroin"eksionnykh svay na peschanykh i glinistykh gruntakh: dis. kand. tekhn. nauk [Improvement of design method of pile foundations of inclined piles on sandy and clay soils. PhD Thesis]. Volgograd, 2013. 156 p. (rus)
7. *Mangushev R.A., Koshman A.V.* Ob opredelenii nesushchey sposobnosti buronabivnykh i buroin"eksionnykh svay [Bearing capacity of inclined piles]. *Proc. 54th Int. Sci. Conf. St-Petersburg* : SPSUACE Publ., 1997. Pp. 23–24. (rus)
8. *Konyushkov V.V.* Nesushchaya sposobnost' buroin"eksionnykh svay na vertikal'nyu i gorizontal'nyu nagruzki s uchedom tekhnologii ikh izgotovleniya: dis. ... kand. tekhn. nauk [Bearing capacity of inclined piles under vertical and horizontal loads. PhD Thesis]. St-Petersburg, 2007. 163 p. (rus)
9. Otchet PKTI o rezul'tatakh polevykh ispytaniy buroin"eksionnykh svay na staticheskuyu vдавlivayushchuyu nagruzku [Report on field tests of inclined piles under static pressed loads]. St-Petersburg, 1991–2007. 84 p. (rus)
10. *GTS 2012*. Analysis Manual. Part 1. Analysis Case. 2011.
11. *Monika De Vos, Valerie Whenham.* Innovative design methods in geotechnical engineering. GeoTechNet – European Geotechnical Thematic Network. Pt. 2. 2010. 13 p.