

УДК 624.15

UDC 624.15

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КРАЕВЫХ УСЛОВИЙ МОДЕЛИ НА ПЕРЕМЕЩЕНИЯ БУРОИНЪЕКЦИОННОЙ СВАИ ПРИ ДЕЙСТВИИ СТАТИЧЕСКИХ НАГРУЗОК

RESEARCH INFLUENCE OF BOUNDARY CONDITIONS ON THE MOVE OF CFA PILE UNDER STATIC LOADS

Ещенко Олег Юрьевич
к.т.н., доцент

Eschenko Oleg Yurievich
Cand.Tech.Sci., associate professor

Чернявский Денис Алексеевич
соискатель
Кубанский государственный аграрный университет, Краснодар, Россия

Chernyavskiy Denis Alekseevich
applicant
Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russia

В статье обсуждаются вопросы влияния краевых условий на результаты численного расчета перемещений буроинъекционных свай при действии статических нагрузок. Приведена сравнительная оценка результатов расчета перемещений одиночных буроинъекционных свай при изменении величины расчетной области, количества узлов сетки МКЭ, критерия сходимости расчета. Даны рекомендации по назначению размеров расчетной области в вертикальном и горизонтальном направлении, количества узлов сетки МКЭ, выбору и числовому значению применяемого критерия сходимости. На примере расчета перемещений одиночной буроинъекционной сваи подобраны параметры численной модели, исключаящие влияние краевых условий на результаты расчета

The article discusses the influence of boundary conditions on the numerical results of displacement CFA piles under static loads. Comparative evaluation of the results of calculation of single movements of CFA piles to the extent of the computational domain, the number of grid points, FEM convergence criterion calculation has been presented. The recommendations on the appointment of the size of the computational domain in the vertical and horizontal direction, the number of grid points, FEM numerical value and choice to apply the criteria of convergence have been listed. On the example of calculating the movements of a single CFA piles we have chosen the parameters of the numerical model, eliminating the influence of boundary conditions on the results of the calculation

Ключевые слова: БУРОИНЪЕКЦИОННАЯ СВАЯ, ОСАДКА, МКЭ, РАСЧЕТНАЯ ОБЛАСТЬ, КРИТЕРИЙ СХОДИМОСТИ, КРАЕВЫЕ УСЛОВИЯ

Keywords: CFA PILE, SETTLEMENT, FEM, COMPUTATION DOMAIN, CONVERGENCE CRITERION, BOUNDARY CONDITIONS

В последнее время в инженерной практике и научных исследованиях все большее распространение получают численные методы расчета. Теме численного моделирования и расчета буроинъекционных свай посвящен целый ряд работ как отечественных [1, 2], так и зарубежных ученых [3, 8]. Отечественная нормативная литература допускает применение компьютерного моделирования при расчете свай, однако, содержит лишь общие указания по назначению краевых условий [4]. Группой Европейских специалистов подготовлены более детальные рекомендации по численным расчетам [7], но они содержат обобщающие указания для широкого спектра геотехнических задач. Таким образом,

научный и практический интерес представляют вопросы, связанные с влиянием краевых условий на перемещения одиночных буроинъекционных свай.

Целью данной работы является исследование влияния параметров расчетной модели на вертикальные и горизонтальные перемещения одиночной буроинъекционной сваи при действии статических нагрузок.

Для выполнения исследований был использован расчетный программный комплекс Midas GTS 2012 V1.2. Принятая расчетная схема одиночной буроинъекционной сваи представлена на Рисунок 1. В силу симметрии в расчетах использовалась половина полноразмерной модели, а ось симметрии совмещалась с началом координат. В исследованиях рассматривались буроинъекционные сваи диаметрами , равными 200; 300; 400мм. и длиной , равной 5; 7,5 и 10м, соответственно.

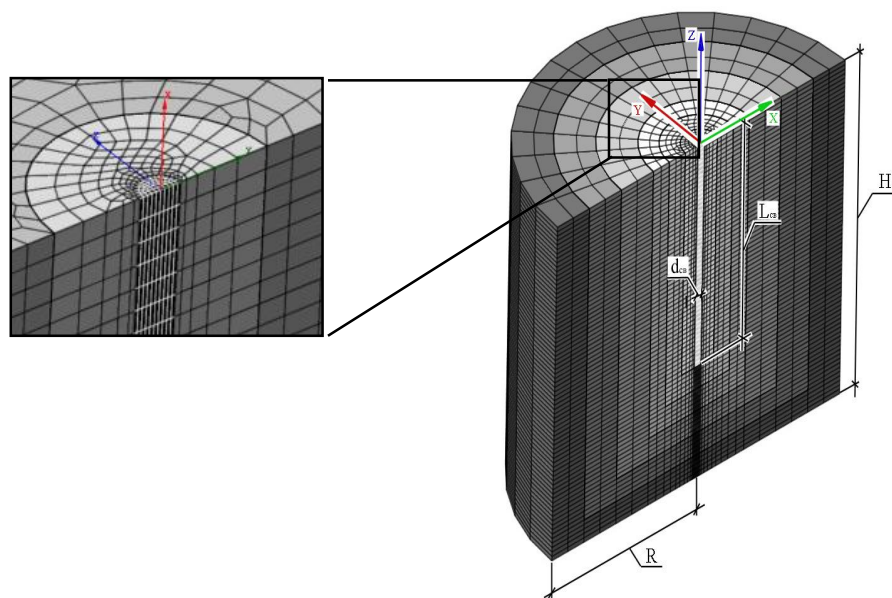


Рисунок 1. Расчетная модель и сетка МКЭ одиночной буроинъекционной сваи

Выбор модели грунта осуществлен в предположении, что в околосвайном пространстве массива грунта возможно развитие зон пластических деформаций (Рисунок 2).

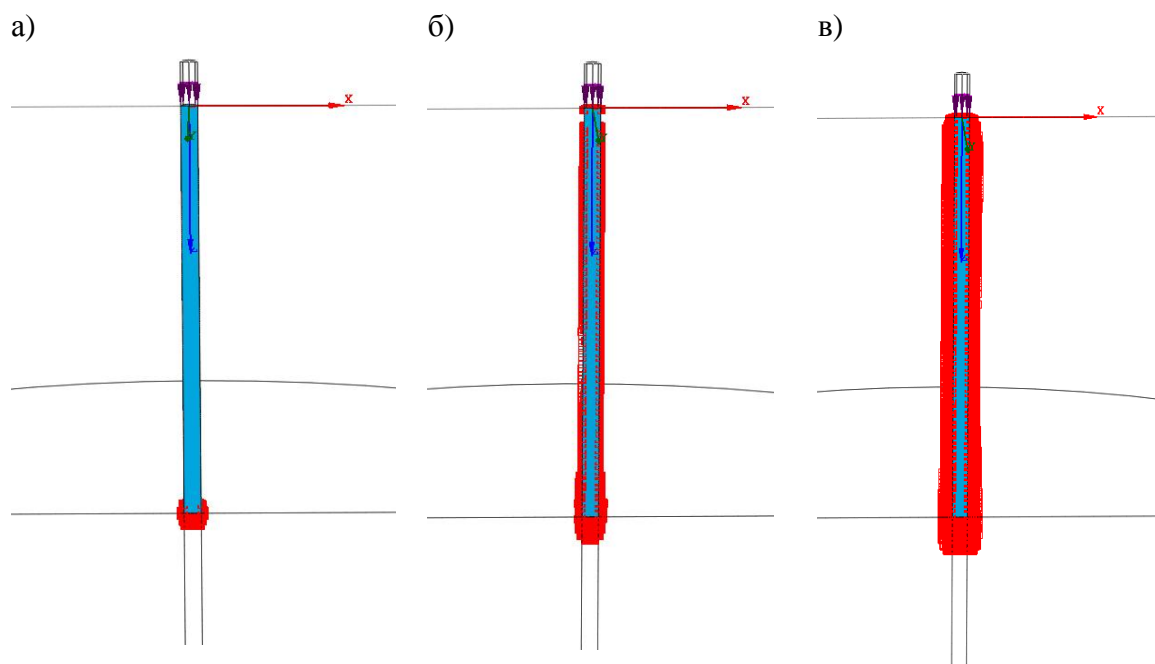


Рисунок 2. Развитие областей пластических деформаций в околосвайном массиве грунта: а) при $N = 0,2F_d$, б) при, в) при $N = 0,75F_d$

В расчетах для грунтового массива использована пятипараметрическая модель грунта, использующая критерий текучести Друкера-Прагера [5]. В данной модели закон течения может быть как ассоциированным, так и неассоциированным. Поверхность текучести не меняется с ростом деформаций, следовательно, отсутствует закон упрочнения, а материал является идеально упруго-пластичным. Эквивалентные напряжения для модели Друкера-Прагера определяются выражением:

(1)

где β - константа материала;

$\sigma_m = \frac{1}{3} (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)$ - среднее или гидростатическое напряжение;

$\{S\}$ - девиаторная часть напряжений;

$[M]$ – матрица жесткости.

Это выражение представляет собой модифицированный критерий Мизеса и учитывает влияние среднего, или гидростатического, напряжения. Чем выше гидростатическое напряжение (всестороннее давление), тем выше предел текучести.

Параметр β - константа материала, определяемая выражением:

$$\beta = \frac{2 \sin \varphi}{\sqrt{3(3 - \sin 2\varphi)}} \quad (2)$$

где φ - угол внутреннего трения;

Предел текучести материала определяется выражением:

$$\sigma_y = \frac{6c \cos \varphi}{\sqrt{3(3 - \sin 2\varphi)}} \quad (3)$$

где c - величина удельного сцепления, кПа.

Таким образом, критерий текучести, принимает вид:

(4)

В пространстве главных напряжений эта поверхность текучести представляет собой круговой конус с параметрами материала, выбранными таким образом, что поверхность является описанной по отношению к шестиграннику Мора-Кулона. Это позволяет несколько повысить точность нелинейных расчетов для 3D моделей.

Для контрольных расчетов принимались средние грунтовые условия. Физико-механические характеристики грунта выбирались по таблицам СНиП [6] как для глинистых грунтов со следующими характеристиками: $E = 10 \text{ МПа}$; $\sigma_c = 25 \text{ кПа}$; $\varphi = 19^\circ$; $\mu = 0,3$. Так как разрушение по бетону в данной модели маловероятно, то при моделировании материала сваи использовалась простейшая линейно-упругая модель следующими характеристиками: $E = 27,5 \times 10^9 \text{ Па}$; $\mu = 0,18$.

В соответствии с рекомендациями [5] для дискретизации расчетной модели были выбраны объемные четырехугольные 8 точечные конечные элементы. Для повышения качества расчета в околосвайном пространстве было выполнено сгущение сетки КЭ (Рисунок 1). Граничные условия заданы следующим образом: на нижней грани запрещены перемещения и повороты во всех направлениях ($U_x = U_y = U_z = 0$, $R_x = R_y = R_z = 0$), на боковых гранях разрешены перемещения вдоль вертикальной оси Z ($U_x = U_y = 0$, $R_x = R_y = R_z = 0$), в плоскости XZ запрещены перемещения в направлении оси Y ($U_y = 0$) из условия симметрии.

Расчет выполнялся в несколько этапов. На первом этапе моделируется напряженно деформированное состояние грунта в естественном состоянии (обжатие грунта собственным весом). При этом, всем объектам модели

присвоены свойства грунта. Из нагрузок присутствует только собственный вес. Все перемещения после проведения расчета обнуляются, остаются только напряжения. На втором этапе в теле массива грунта задается область с геометрией сваи и свойствами бетона. Активируется нагрузка, действующая на оголовок сваи (осевая или горизонтальная).

В исследованиях, за критерий отсутствия влияния краевых условий принималась ситуация при которой относительное приращение перемещения, буроинъекционной сваи составляло не более 1%. Такая высокая точность необходима для исключения влияния именно численных факторов, так как вариации геотехнических параметров имеют существенно больший диапазон.

Влияние размеров расчетной области

Для определения влияния размеров расчетной области на перемещения одиночной буроинъекционной сваи были проведены две серии расчетов отдельно для вертикальной и горизонтальной нагрузок. При этом, в исследованиях вертикальной расчетной области радиус модели был принят равным ста диаметрам сваи для беспрепятственного развития областей перемещений грунта в горизонтальном направлении, а значения высоты модели H (Рисунок 1) менялись соответственно с шагом 0.1 от до (- длина сваи, м). При исследовании влияния размеров расчетной области в горизонтальном направлении было принято , а шаг приращения в горизонтальном направлении составил (- диаметр сваи, м), при этом радиус расчетной области грунта R менялся от до .

Результаты решения задач представлены на графиках (Рисунок 3, 4). Из них видно, что для буроинъекционных свай рассматриваемых диаметров (кривые 1, 2 и 3) есть область с монотонным возрастанием. Так же существуют точки 4, 5, 6 после прохождения, которых кривые выполаживаются. Это свидетельствует о том, что дальнейшее увеличение расчетных областей не оказывает существенного (более 1%) влияния на

результаты расчета. Через данные точки можно провести прямые, описываемые уравнениями (5) и (6).

$$H_{min} = L_{св} (1,5D_{св} + 1) \tag{5}$$

$$\tag{6}$$

где $L_{св}$ - длина сваи, м;

$D_{св}$ - диаметр сваи, м.

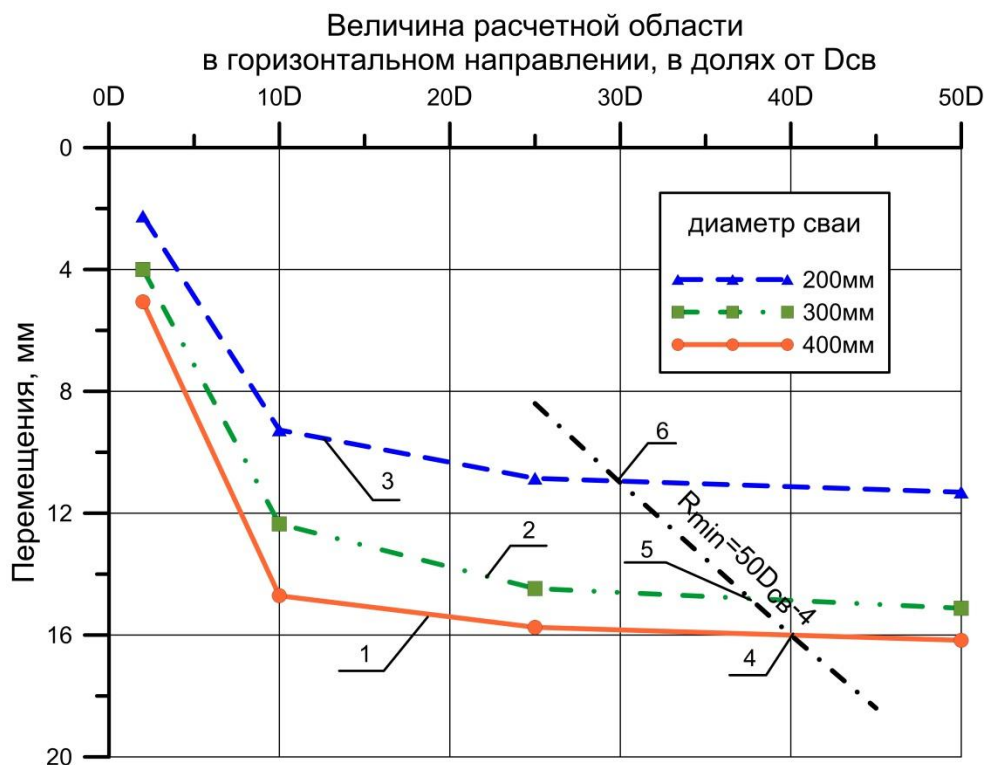


Рисунок 3. График зависимости перемещений буроинъекционных свай от величины расчетной области в вертикальном направлении при действии осевой нагрузки

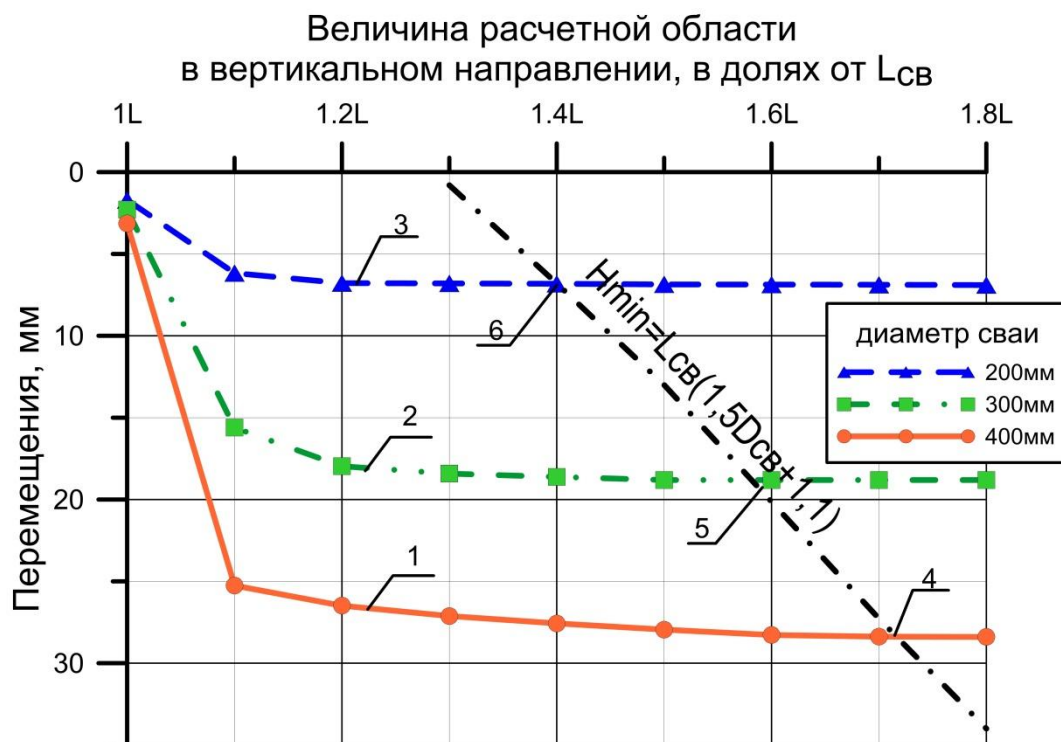


Рисунок 4. График зависимости перемещений буроинъекционных свай от величины расчетной области в горизонтальном направлении при действии горизонтальной нагрузки

Таким образом, H_{min} и R_{min} обуславливают минимальные геометрические размеры расчетной области в вертикальном и горизонтальном направлении, соответственно, при которых относительное приращение перемещений не превышает 1%.

Влияние количества узлов модели на перемещения буроинъекционных свай

Для определения влияния количества узлов сетки МКЭ расчетная область разбивалась с разной плотностью сетки. При этом, отслеживались перемещения головы сваи от действия вертикальной и горизонтальной силы в отдельности. Исследования проводились для количества узлов от 1000 до 60000 штук.

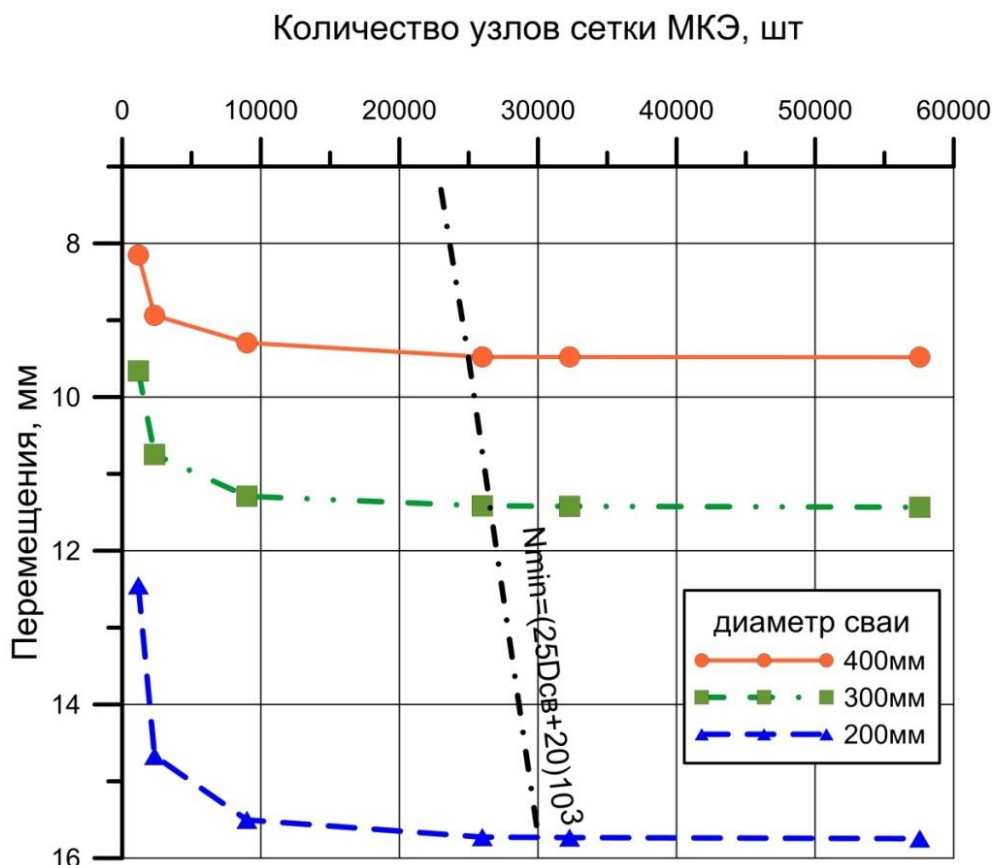


Рисунок 5. График зависимости перемещений свай от количества узлов сетки МКЭ при действии вертикальной силы

Из графика (Рисунок 5) видно, что при решении данной задачи количество узлов сетки МКЭ должно быть не менее N_{min} , при этом значение N_{min} , описывается уравнением:

$$(7)$$

График по результатам исследований при действии горизонтальной силы аналогичен и в статье не представлен.

Применение более густых сеток не влияет на перемещения одиночной сваи, но значительно увеличивает время проведения расчета.

Влияние критериев сходимости расчета на перемещения одиночной буринъекционной сваи

Программа Midas GTS 2012 позволяет использовать для управления итерационным процессом один из трех критериев сходимости расчета, основанный на контроле усилий, перемещений или энергии деформации.

$$\text{Сила} = \frac{\sqrt{\delta \mathbf{g}_i^T \delta \mathbf{g}_i}}{\sqrt{\Delta \mathbf{g}_i^T \Delta \mathbf{g}_i}} \quad (8)$$

(9)

Перемещение =

$$\text{Энергия} = \left| \frac{(\delta \mathbf{u}_i \ \delta \mathbf{g}_i)(\delta \mathbf{u}_i \ \delta \mathbf{g}_i)^T}{(\Delta \mathbf{u}_i \ \Delta \mathbf{g}_i)(\Delta \mathbf{u}_i \ \Delta \delta \mathbf{g}_i)^T} \right|, \quad (10)$$

где \mathbf{u}_i -узловые перемещения;

$\Delta \mathbf{u}_i$ -полное приращение перемещений от текущего шага на i -ой итерации;

$\delta \mathbf{u}_i$ - инкремент перемещений на i -ой итерации;

$\Delta \mathbf{u}_i^T$ - ограничение перемещений i -ой итерации

\mathbf{g}_i - результирующая сила на i -ой итерации;

$\delta \mathbf{g}_i$ - инкремент сил на i -ой итерации;

$\Delta \mathbf{g}_i^T$ -ограничение по силе на i -ой итерации.

Для оценки влияния критериев сходимости на перемещения буринъекционной сваи в параметрах расчета устанавливался один из критериев. Численное значение критерия назначалось как $\lg N$, где N

менялось соответственно -1,-2,...-7. Таким образом, были проведены серии расчетов с каждым критерием.

По данным выполненных расчетов построены графики. В статье представлен график (Рисунок 6) для сваи диаметром 400мм как наиболее характерный и наглядный. Из него видно, что в диапазоне значений относительной погрешности решения системных линейных уравнений от 0,1 до 0,0001 величины перемещений буринъекционной сваи при использовании того или иного критерия сходимости расчета отличаются друг от друга, в среднем, от 2 до 12%. Однако, следует отметить четко выраженную точку перегиба графиков (точка 1) после прохождения которой относительное приращение перемещений не превышает 0,01%. Использование предустановленной в программе величины критерия сходимости (0,01) дает разброс значений перемещений сваи в диапазоне от 18,4 до 19,8мм, т.е. в зависимости от выбранного типа критерия разброс в оценке перемещений может достичь 9%.

Таким образом, вид и величина критерия сходимости не вносят существенной погрешности в результаты расчета при относительной погрешности решения системы линейных уравнений 10^{-4} и менее.

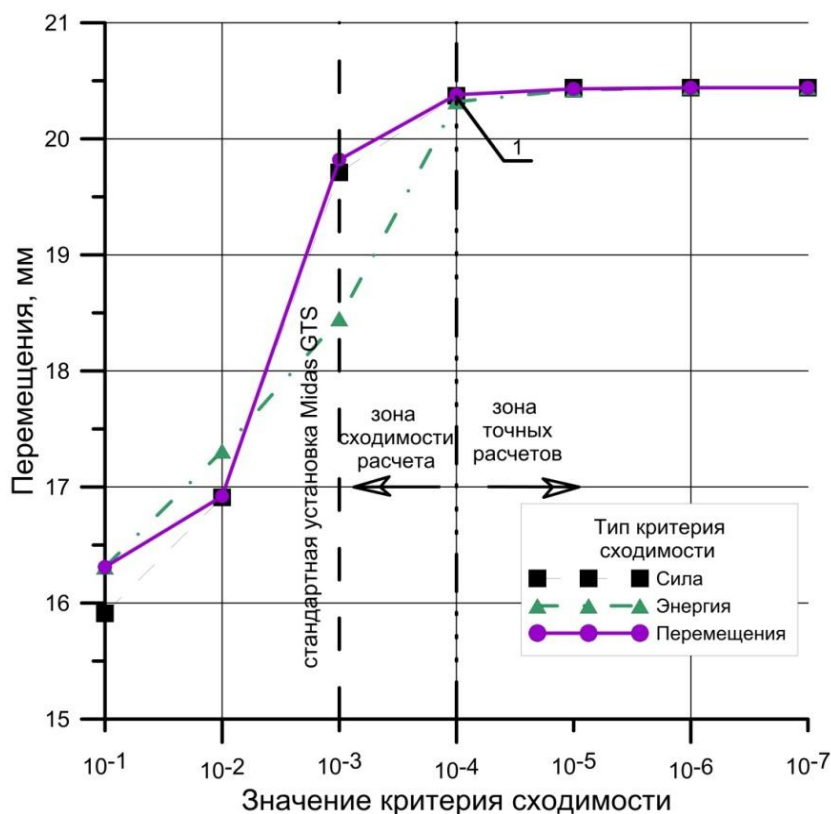


Рисунок 6. График зависимости перемещений от значения критерия сходимости для сваи диаметром 400мм

Влияние применяемого критерия сходимости на количество итераций требуемых для проведения расчета

При проведении исследования влияния критерия сходимости отдельно фиксировались данные о количестве итераций расчета, а следовательно, и времени его проведения, на каждом этапе исследований. По полученным данным построены графики. Однако, в статье представлен только график по свае диаметром 400мм, так как очевидно, что чем больше геометрические размеры модели, тем большее количество времени требуется для расчета. Для меньших диаметров графики выглядят аналогично.

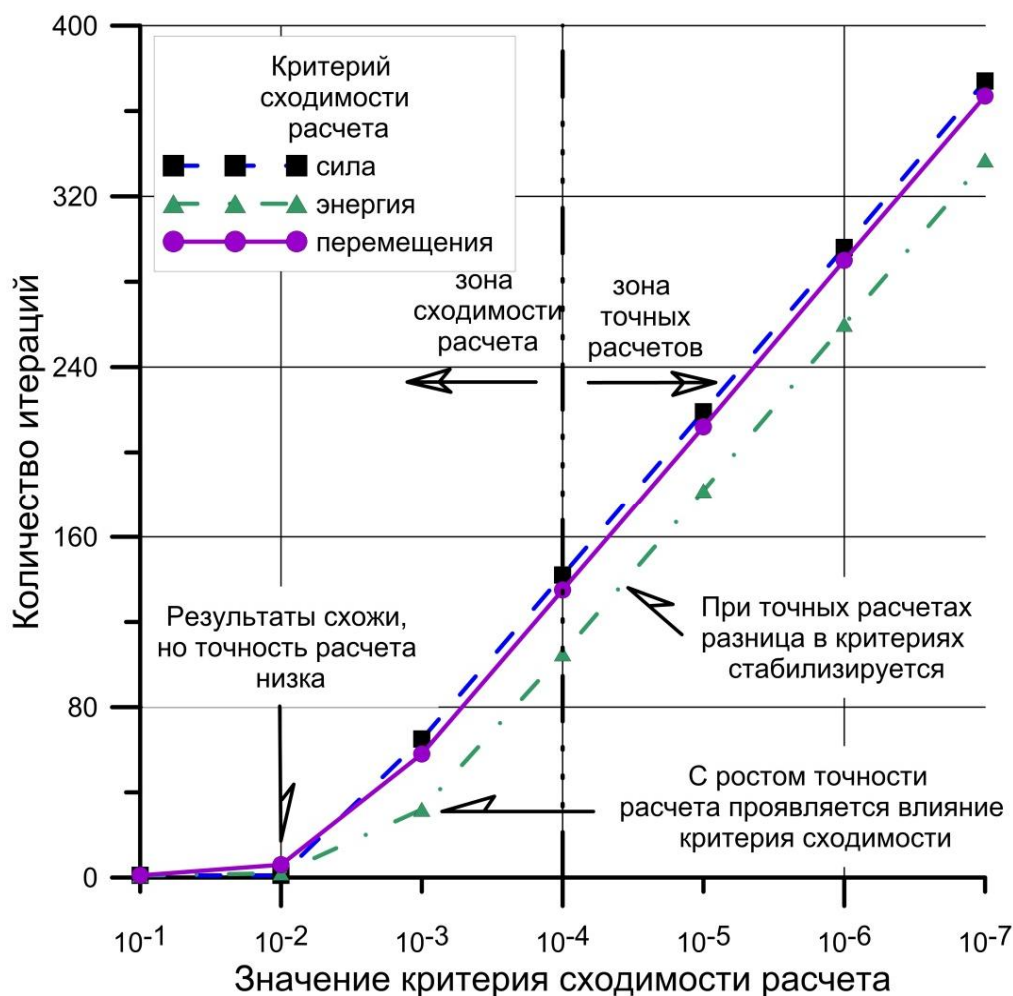


Рисунок 7. График зависимости перемещений от значения критерия сходимости для сваи диаметром 400мм

Из графика (Рисунок 7) видно, что при значении критерия сходимости в диапазоне от 10^{-1} до 10^{-2} для проведения расчета требуется минимальное количество итераций вне зависимости от применяемого критерия сходимости. Однако, как было сказано ранее, в данном диапазоне высокая погрешность расчета. В диапазоне значений критерия сходимости от 10^{-2} до 10^{-4} с ростом точности расчета проявляется влияние критерия сходимости. При точных расчетах разница в количестве итераций для всех критериев стабилизируется и не меняется с увеличением точности расчета. Как видно из графика меньшее количество итераций требуется при использовании критерия сходимости основанного на контроле энергии деформации.

Сопоставление результатов расчетов с натурными испытаниями

Для проверки результатов исследований было проведено 3 расчета. В первом расчете все значения расчетных областей и количество узлов модели были приняты согласно данным исследований описанных ранее. Во втором все параметры краевых условий были уменьшены на 10% по отношению к первому расчету. В третьем увеличены на 10%. По данным расчетов осадки сваи построен график (Рисунок 8).

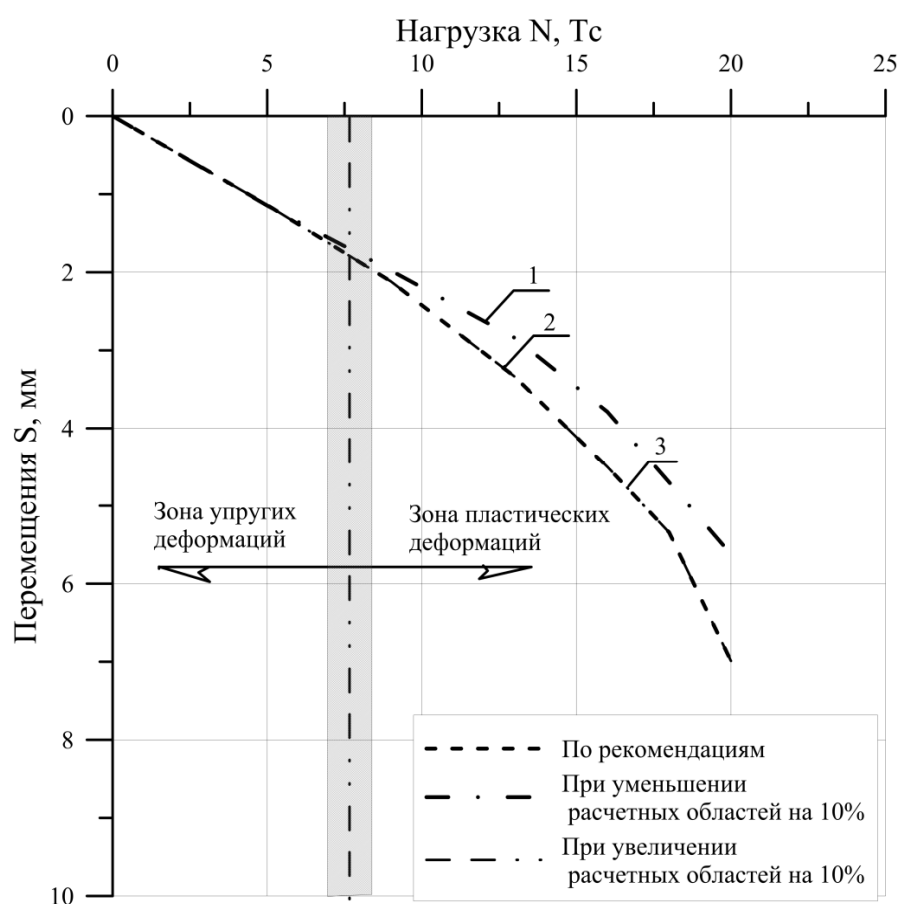


Рисунок 8. График сопоставления результатов компьютерного моделирования осадки буринъекционной сваи и натурального эксперимента

Из графика (Рисунок 8) видно, что в зоне упругих деформаций влияние краевых условий практически отсутствует. Это означает, что при упругих взаимодействиях расчетная модель не чувствительна к малым отклонениям значений краевых условий (на 10%). Однако с началом развития пластических деформаций кривая 1 начинает отклоняться от

кривых 2 и 3 (которые практически совпадают), что свидетельствует о проявлении влияния краевых условий. На графике видно, что увеличение параметров характеризующих краевые условия по отношению к данным, полученным при исследованиях, не дает изменения величины расчетной осадки сваи. Уменьшение значений краевых условий на 10% дает погрешность до 17%.

Выводы

Проанализировав результаты решения задач можно сделать следующие основные выводы:

1. Для упруго-пластичных задач размеры расчетной области существенно влияют на получаемые результаты. Однако существуют такие минимальные размеры, когда влиянием размеров расчетной области можно пренебречь.
2. При расчете одиночной сваи минимальные размеры расчетной области в вертикальном направлении рекомендуется определять по формуле (5), а в горизонтальном по формуле (6);
3. Для обеспечения 1% точности расчета количество узлов в расчетной области должно быть не менее N_{min} определяемого по формуле (7);
4. Для обеспечения 1% точности расчета значения любого из критериев сходимости расчета необходимо задавать не ниже 10^{-4} ;
5. Наибольшая скорость расчета достигается при использовании критерия сходимости по энергии. Для предельных расчетов сокращение времени решения задачи может снижаться до 29%.
6. Даже не значительное отклонение от критических параметров модели в каждую сторону вносит существенные вычислительные погрешности в расчет.

Список литературы

1. Федоровский В. Г. К выбору метода расчета свай при действии продольной и поперечной нагрузок. Труды ин-та НИИ оснований и подземных сооружений, вып.82, 1984, с. 3-13.
2. Алексеев, П. С. Использование среды разработчика конечных элементов при создании моделей в рамках программы FEM models/ П. С, Алексеев, К. Г. Шашкин // Реконструкция городов и геотехническое строительство. - СПб., 2000, №2. - С. 125-127.
3. Yang, J.X., McManus, K.J, and Berrill, J.B. "Kinematic soil-micropile interaction." 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand, 2000 pp. 1-8.
4. СП 24.13330.2011. Свайные фундамент-М., 2011.
5. GTS 2012 Analysis Manual. Part 1 Analysis Case. 2011. 147 p.
6. СНиП 2.02.01-83*. Основания зданий и сооружений-М., 1995.
7. Monika De Vos, Valerie Whenham. Innovative design methods ingeotechnical engineering. GeoTechNet – European Geotechnical Thematic Network. Part 2, 2010, 13 p.
8. Jeon, S., and Kulhawy, F.H. (2002). "Evaluation of axial compression behavior of micropiles." Proceeding of a Specialty Conference – Foundation and ground improvement, Blacksburg VI, ASCE, 460-471.

References

1. Fedorovskij V. G. K vyboru metoda rascheta svaj pri dejstvii prodol'noj i poperechnoj nagruzok. Trudy in-ta NII osnovanij i podzemnyh sooruzhenij, vyp.82, 1984, s. 3-13.
2. Alekseev, P. S. Ispol'zovanie sredy razrabotchika konechnyh jelementov pri sozdanii modelej v ramkah programmy FEM models/ P. S, Alekseev, K. G. Shashkin // Rekonstrukcija gorodov i geotehnicheskoe stroitel'stvo. - SPb., 2000, №2. - S. 125-127.
3. Yang, J.X., McManus, K.J, and Berrill, J.B. "Kinematic soil-micropile interaction." 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand, 2000 pp. 1-8.
4. SP 24.13330.2011. Svajnye fundament-М., 2011.
5. GTS 2012 Analysis Manual. Part 1 Analysis Case. 2011. 147 r.
6. SNiP 2.02.01-83*. Osnovanija zdanij i sooruzhenij-М., 1995.
7. Monika De Vos, Valerie Whenham. Innovative design methods ingeotechnical engineering. GeoTechNet – European Geotechnical Thematic Network. Part 2, 2010, 13 r.
8. Jeon, S., and Kulhawy, F.H. (2002). "Evaluation of axial compression behavior of micropiles." Proceeding of a Specialty Conference – Foundation and ground improvement, Blacksburg VI, ASCE, 460-471.