



## CONSTRUCTION AND GEOTECHNICS

Т. 12, № 3, 2021

<http://vestnik.pstu.ru/arhit/about/inf/>



DOI: 10.15593/2224-9826/2021.3.10

УДК 624.154.1, 624.131.34

### ВЕРТИКАЛЬНОСТЬ СКВАЖИН

**Р.В. Мельников, Я.А. Пронозин**

Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

#### О СТАТЬЕ

Получена: 23 августа 2021

Принята: 10 сентября 2021

Опубликована: 30 сентября 2021

#### Ключевые слова:

скважина, отклонение, микросвая, бурение грунтов, вертикальная свая, несущая способность сваи, ось сваи.

#### АННОТАЦИЯ

Исследуется вопрос о форме скважины при бурении. Традиционным и самым распространенным способом бурения является использование буровой коронки и трубчатых или винтовых штанг. В процессе бурения требование «вертикальности» скважин необходимо для соответствия проектным решениям и расчетным схемам. При этом фактическое обеспечение данного важного качества зачастую оказывается очень сложным. Для его обеспечения проводится анализ нормативной документации при проведении инженерно-геологических изысканий, а также при устройстве свайных фундаментов, изготавливаемых в грунте: буровых и буроинъекционных свай. Для буроинъекционных свай приводятся сведения об исследователях в области оценки искривления оси свай. Также анализируются результаты полевых исследований вертикальности ствола скважины на двух площадках. На первой площадке была выполнена одна скважина глубиной 9,0 м, на второй – 10 скважин глубиной 25,0 м. Пространственное положение стволов скважин определялось при помощи инклинометра. Приводятся результаты измеренных отклонений скважин от вертикальности, дополнительно представленные для наглядности на пространственном графике. Делается вывод о влиянии формы скважины на их вертикальную проекцию при проведении инженерно-геологических изысканий. Для оценки влияния отклонения ствола скважины от вертикали при устройстве буроинъекционных свай на их несущую способность была выполнена серия сравнительных численных расчетов в программе Midas GTS NX. Моделировалась работа одиночной сваи в грунте на вдавливающую и выдергивающую нагрузку. Сделан вывод о влиянии формы ствола сваи (форма скважины) на характер ее работы в грунте.

© ПНИПУ

© Мельников Роман Викторович – кандидат технических наук, доцент, e-mail: melnikovrv@tyuiu.ru

Пронозин Яков Александрович – доктор технических наук, профессор, e-mail: pronozinja@tyuiu.ru

Roman V. Melnikov – Ph. D. in Technical Science, Associate Professor, e-mail: melnikovrv@tyuiu.ru

Yakov A. Pronozin – Doctor of Technical Science, Professor, e-mail: pronozinja@tyuiu.ru

## VERTICALITY OF BOREHOLES

R.V. Melnikov, Y.A. Pronozin

Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation

---

### ARTICLE INFO

Received: 23 August 2021  
Accepted: 10 September 2021  
Published: 30 September 2021

#### Keywords:

deviation, micropile, soil drilling, vertical pile, pile bearing capacity, pile axis.

### ABSTRACT

The study contains the problem of the borehole shape of during drilling. Usage of a drilling bit and tubular or screw rods is traditional and most common drilling methods. The requirement of "verticality" for boreholes in the drilling process is necessary to comply with design solutions and design schemes. At the same time, the actual implementation of this important quality is often very difficult. An analysis of the regulatory documentation is carried out to ensure the requirement during conducting geotechnical investigations, and during installing pile foundations made in the ground: bored piles and continuous flight auger piles (CFA). Data about the researchers in the field of assessing of bending of the pile axis are presented for CFA piles. The article presents the results of field studies of the borehole verticality at two investigation sites. At the first site, a borehole was drilled with a depth of 9.0 m, at the second site, ten boreholes were drilled with a depth of 25.0 m. The spatial position of the boreholes was determined by an inclinometer. The results of the measured verticality deviations of the boreholes are presented on the spatial graph for clear visibility. A conclusion is made about the influence of the borehole shape on its vertical projection during conducting of geotechnical investigations. A series of comparative numerical calculations was performed using the Midas GTS NX program to assess the effect of the verticality deviations of the boreholes during installing bored piles on their bearing capacity. A single pile action in the ground was simulated for the pressing and pulling loads. It is concluded that the shape of the borehole influences on the single pile action in the ground.

© PNRPU

---

## Введение

Предъявляемое к конструкциям зданий и сооружений при их устройстве качество «вертикальность» является абсолютно понятным и логичным. Это необходимо для соответствия проектным решениям и расчетным схемам или моделям. При этом фактическое обеспечение данного важного качества, близкого к идеальному значению, нередко оказывается достаточно сложным, поэтому оно находит отражение в требованиях различных нормативных документов и регламентах. При этом особняком от надземных и, как правило, видимых конструкций стоят виды работ и элементы геотехнических сооружений, особенно те, которые изготавливаются в грунте и фактические размеры которых и положение в пространстве достаточно сложно контролируются.

К такого рода объектам следует отнести работы по изучению геолого-гидрогеологического строения грунтовой среды (проведение, например, инженерно-геологических изысканий) и работы по устройству свайных фундаментов (устройство буронабивных или буроинъекционных свай). Общим способом производства таких работ является бурение скважин. К сожалению, бурение практически не имеет поддержки контрольно-измерительной аппаратуры для отслеживания вертикальности процесса. Традиционным и самым распространенным способом бурения является использование буровой коронки и трубчатых или винтовых штанг. Поэтому действительная форма ствола скважины при бурении и возможности применения к ней качества «вертикальность» является актуальным вопросом [1], важность которого возрастает с увеличением глубины бурения [2].

## Состояние вопроса исследования

Проведя анализ нормативной документации для инженерно-геологических изысканий, было установлено, что условие вертикальности бурения скважин как качественно, так и количественно слабо регламентировано. Требования к проведению буровых работ фокусируются на количестве и месте расположения горных выработок, их глубине, конструкции, способах проходки, опробования и ликвидации. Косвенным обеспечением вертикальности может являться требование о том, что бурение должно осуществляться с горизонтально ровного и расчищенного участка, а на крутых косогорах следует создавать выемки в виде уступа или траншеи (РСН 74-88). То, что требование об обеспечении вертикальности инженерно-геологических скважин не отражено в нормативных документах, может быть связано с отсутствием приемлемых для инженерной практики способов контроля качества формирующейся скважины в процессе бурения.

Необходимость обеспечения вертикальности буровых скважин можно представить наглядно – на рис. 1 изображена идеализированная и во многом более реальная форма ствола скважины. Можно заметить, что принципиально геометрия скважины при ее большой кривизне может оказать влияние на определение глубины бурения, отбор образцов и монолитов и, как следствие, выделение инженерно-геологических элементов.

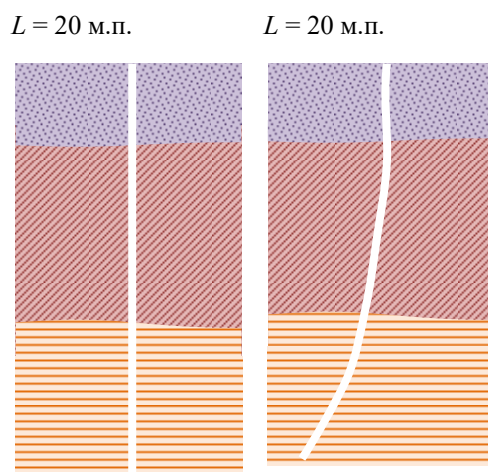


Рис. 1. Идеализированная и реальная формы скважины  
Fig. 1. Idealized and real boreholes shape

При этом утверждать, что в целом оценка вертикальности изучения грунтовой среды при проведении инженерно-геологических изысканий никак не проводится, будет неверным. Так, при осуществлении статического зондирования грунтов на глубину более 20,0 м (а для зданий класса КС-3 на глубину более 10,0 м) есть требование учета отклонения зонда от вертикальности для определения фактической глубины зондирования (ГОСТ 19912-2012). Только для этого требуется использовать специальные зонды с наконечниками, оснащенными инклинометром, применение которых в практике инженерных изысканий все еще является достаточно редким явлением. Фактическая глубина зондирования при использовании зонда, оснащенного инклинометром, определяется по формуле

$$z = \sum_{i=1}^n (C_i^{inc} \cdot \Delta z), \quad (1)$$

где  $n$  – общее число интервалов измерений;  $C_i^{inc}$  – поправочный коэффициент, учитывающий отклонение наконечника зонда от вертикали на  $i$ -м интервале,  $C_i^{inc} = \cos \alpha$ ;  $\alpha_i$  – измеренный угол между вертикальной осью и осью наконечника, град;  $\Delta z$  – длина интервала между измерениями, м.

Влияние отсутствия вертикальности стволов скважин при решении различных геологических задач реализовано в ГИС «Панорама» [3], где доступен режим «Расчеты скважины», предназначенный для обработки и анализа пространственного положения оси ствола скважины по непосредственному указанию координат или использованию данных инклинометра. Учет фактически измеренного пространственного положения ствола скважины позволит скорректировать модель геологической среды. Инклинометрическое исследование ствола инженерно-геологической скважины после завершения процесса бурения и отбора монолитов и образцов грунта является скорее исключением из правил проведения работ, чем их распространенным дополнением.

При анализе нормативной документации, касающейся свайных фундаментов, требования вертикальности бурения скважин (для свай, изготавливаемых в грунте) и вертикальности погруженных свай (для свай заводского изготовления) затрагивают только отдельные технологии их устройства, погружения или материала изготовления.

Так, для забивных свай существует требование по предельному отклонению их оси от вертикали. При этом контроль осуществляется только для 20 % всех свай, выбранных случайным образом. Для свай, изготовленных из стальных труб, составляющих ограждение котлована, требуется обеспечение их вертикальности. Для буроопускных свай, устраиваемых в многолетнемерзлых грунтах, присутствуют требования о проверке их вертикальности после погружения. Данные требования для предварительно изготовленных свай направлены на процесс их погружения, при этом сама свая, имеющая заводское изготовление, является прямой. В этом случае требование вертикальности регламентирует общий наклон свай, а не ее кривизну.

Более подробно рассмотрим обеспечение вертикальности для свай, изготавливаемых в грунте, так как их геометрическая форма в пространстве напрямую зависит от разработки (выбуривания) грунта [4, 5]. Например, при выполнении свай по технологии НПШ (непрерывный полый шнек) требуется обеспечение буровых агрегатов и машин контрольно-измерительной аппаратурой, выводящей информацию (в том числе об отклонении бурения от вертикали) на бортовой компьютер (СТО НОСТРОЙ 2.5.126-2013). Устройство буронабивных свай также требует обеспечения вертикальности оси скважины, что является одним из контролируемым показателей. Для данных видов свай это требование разумно и выполнимо [6], так как бурение скважины осуществляется шнеками большого диаметра (0,45 м и более), обладающих значительной жесткостью в составе колонны, чем шнеки при устройстве буроинъекционных свай. Во многом именно поэтому для буроинъекционных свай отсутствуют требования по обеспечению их общей вертикальности. Взамен этого требуется проводить контроль вертикальности для секций сваи выше поверхности земли, погружаемых в процессе работ, и осуществлять выбуривание грунта на проектную длину, то есть фактически пробурить требуемое количество погонных метров.

Существенной особенностью буроинъекционных свай, влияющих на их работу в грунте, является их большая гибкость (результат малого диаметра поперечного сечения ствола сваи и ее большой длины  $d/l > 120$ ). Исследования в области оценки искривления оси буро-

инъекционной сваи проводили Б.И. Далматов, В.К. Дмоховский, К.С. Завриев, А.А. Мустафаев, Ю.В. Россихин, Н.К. Снитко, Г.С. Шпиро, В.М. Улицкий [7], З.Г. Тер-Мартirosян [8], К.Г. Шашкин, В.В. Конюшков [9], А.И. Полищук [10], М.А. Прыгунов, К. Терцаги, Г. Глик, Л. Стивенс, А. Френсис, П. Ходл, М. Рэндольф [11] и другие [12, 13]. Общим для всех предметом исследования являлась выполненная в грунтовой среде буроинъекционная свая, подвергающаяся действию внешней нагрузки. При этом используемая в методиках расчета форма ствола сваи могла отличаться (вертикальная или с начальной кривизной, принимаемой условно, или кривизной в результате внешнего силового воздействия) [14, 15].

Однако вопрос формирующегося пространственного положения ствола скважины в процессе бурения не рассматривался. При анализе нормативной документации было установлено, что фактическое бурение скважин происходит без оперативных сведений о ее вертикальности. Поэтому вопрос о глубине скважины, являющейся проекцией ее длины на вертикальную ось, и отождествлении его с погонными метрами бурения, как и вопрос влияния на несущую способность сваи, требует рассмотрения.

### Проведение исследования

Для исследования вертикальности ствола скважины, сформированного в процессе бурения, проводились опытные работы на двух площадках. Первая площадка (экспериментальная) была расположена в г. Тюмени по улице Нагорная, 6 на склоне речки Тюменки. Шнековым бурением была выполнена одна скважина глубиной 9,0 м при помощи буровой гусеничной машины FIGARO (рис. 2, а). Вторая площадка для исследования была совмещена с проведением контроля за инженерно-геологическими изысканиями на Троицком мысе в г. Тобольске. Колонковым и шнековым бурением были выполнены 10 скважин глубиной 25,0 м при помощи буровой установки УРБ 2А 2Д на базе автомобиля «Урал» (рис. 2, б).



а



б

Рис. 2. Процесс бурения на площадке: а – в г. Тюмени; б – в г. Тобольске  
Fig. 2. Drilling process at the site: a – in the city of Tyumen; b – in the city of Tobolsk

Пространственное положение стволов скважин определялось установкой в них вертикальных колонн пластиковых труб, соединенных друг с другом специальными направляющими пазами, то есть созданием инклинометрических скважин. Затем в них погружался цифровой вертикальный скважинный инклинометр УСМ-ИСП-В-30/50 для фиксации горизонтальных смещений по глубине (рис. 3).

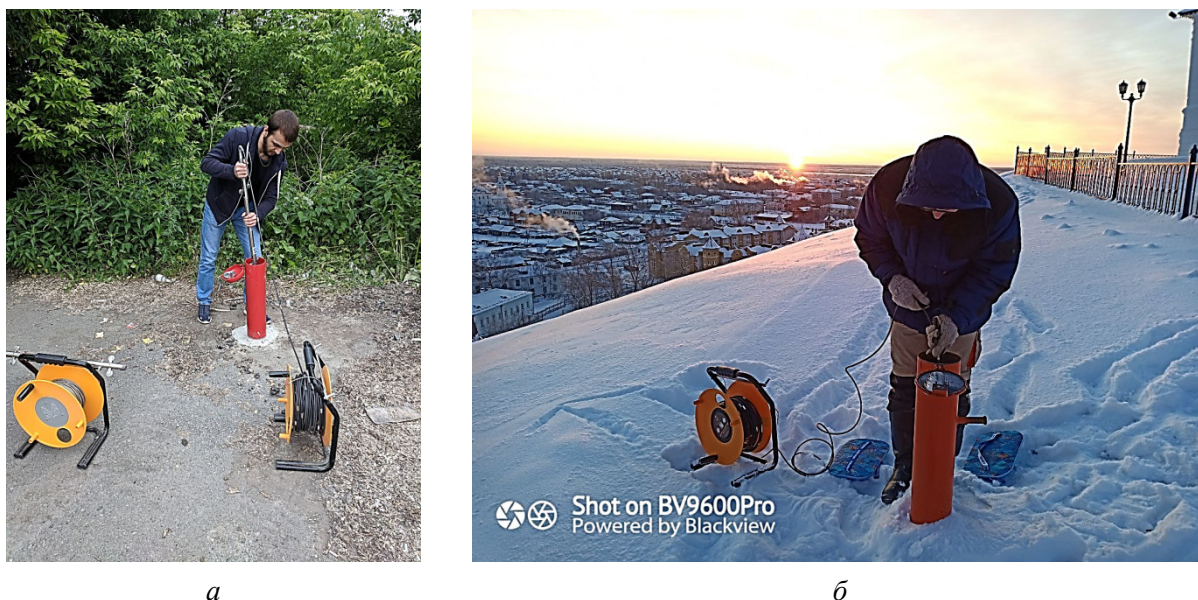


Рис. 3. Процесс инклинометрического исследования: *a* – первая площадка; *б* – вторая площадка  
 Fig. 3. Research process with an inclinometer: *a* – first site; *b* – second site

Снятие показаний инклинометром позволило оценить вертикальность выполненных скважин. Так, на первой площадке (рис. 4, *a*) максимальное отклонение скважины от вертикали приурочено к ее забою и составило 1087 мм (12,7 %), что соответствует общему углу наклона 7,3°.

На второй площадке исследования строгая вертикальность выполненных скважин практически также отсутствует. Так, только одну скважину № 8 можно выделить как условно отвечающую критерию вертикальности, наибольшие горизонтальные отклонения составили 28,9 мм (менее 0,11 %). Наибольшие отклонения для всех остальных скважин приурочены к забою скважины. Для скважины № 6 (рис. 4, *б*) максимальное отклонение вдоль одной из осей составляет 1319 мм, общее отклонение – 1360 мм (5,1 %), что соответствует общему углу наклона 2,9°. Для скважины № 9 (рис. 4, *в*) максимальное отклонение вдоль одной из осей составляет 1911 мм, общее отклонение – 1992 мм (7,5 %), что соответствует общему углу наклона 4,3°.

Для определения вертикальной проекции скважины (истинной глубины) используется формула

$$z = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta u}{\operatorname{tg} \left( \sin^{-1} \frac{\Delta u}{\Delta l} \right)}, \quad (2)$$

где  $n$  – общее число интервалов измерений;  $\Delta u$  – полное горизонтальное отклонение от вертикали на  $i$ -м интервале,  $\Delta l$  – длина интервала между измерениями, м.

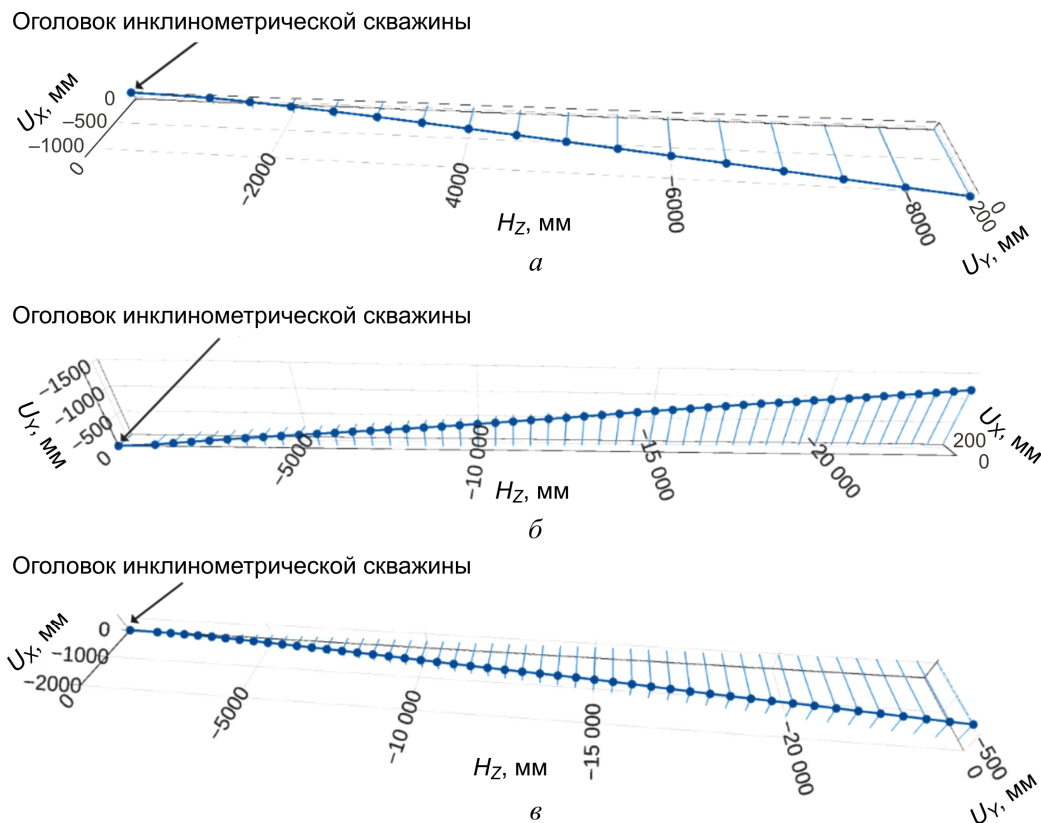


Рис. 4. График пространственного положения оси буровой скважины (ось  $z$  – горизонтальная) на площадке:  $a$  – в г. Тюмени,  $b$  – в г. Тобольске, скважина № 6,  $c$  – в г. Тобольске, скважина № 9  
Fig. 4. Graph of the spatial position of the borehole axis ( $z$ -axis – horizontal) at the site:  
 $a$  – in Tyumen,  $b$  – in Tobolsk, borehole № 6,  $c$  – in Tobolsk, borehole № 9

Установлено, что для скважины № 1 длина ее вертикальной проекции составляет 99,1 % от погонных метров бурения, для скважины № 6 – 99,9 %, для скважины № 9 – 99,7 %. Практически полное соответствие погонных метров погружения инклинометра вертикальной проекции скважины является свидетельством малого отклонения от вертикали при ее бурении.

Таким образом, даже выявленное фактическое отклонение ствола скважины от вертикали несущественно влияет на ее вертикальную проекцию, что в рамках проведения инженерно-геологических работ можно считать технологическим дефектом, не влияющим на качество самих работ.

Для оценки влияния отклонения от вертикали ствола скважины при устройстве буроналивных свай на их несущую способность было проведено тестовое численное моделирование работы одиночной сваи в грунте с использованием метода конечных элементов в программе Midas GTS NX версии 2019.1.1. Выполнена серия независимых расчетов как для реально установленной формы ствола сваи, так и для ее идеализированного (строго вертикального) положения (рис. 5). Для всех расчетов строго выполнялось равенство граничных условий, принятой модели грунта и ее параметров, способа и крупности представления конечными элементами, сценария расчета, настроек решателя, а также сопоставимый опыт при проведении аналогичных расчетов [16–18] и требования СП24.13330 для подготовки численных моделей.

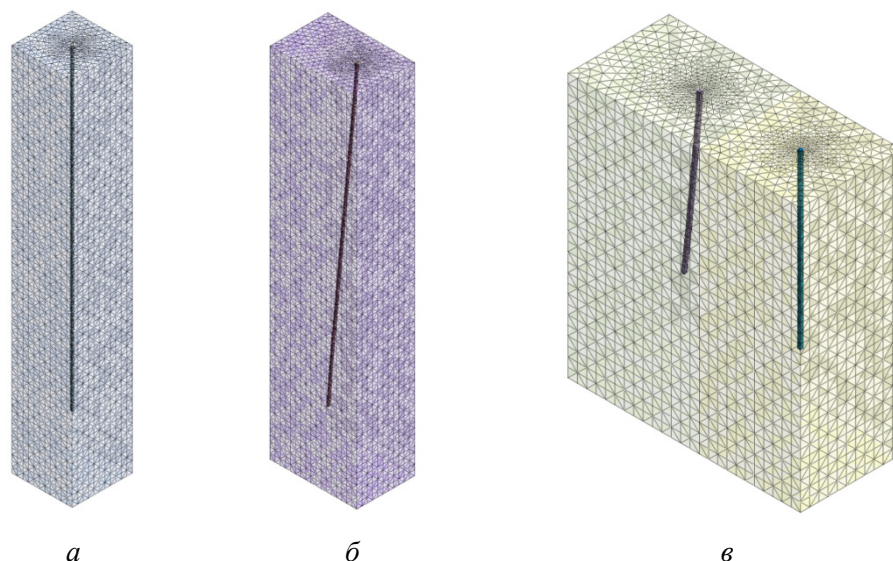


Рис. 5. Расчетные модели численного моделирования: *a* – проектная формой ствола скважины № 6; *б* – фактическая форма ствола скважины № 6; *в* – фактическая и проектная форма ствола скважины № 1

Fig. 5. Computational models of numerical modeling: *a* – the design shape of the borehole № 6; *b* – the actual shape of the borehole № 6; *c* – the actual and design shape of the borehole № 1

Установлено, что форма ствола сваи (форма скважины) не оказывает влияния на характер работы сваи в грунте. Так, работа строго вертикальной сваи и фактически определенной инклинометрическим исследованием оказалась идентичной как на вдавливающую, так и на выдергивающую нагрузку (рис. 6).

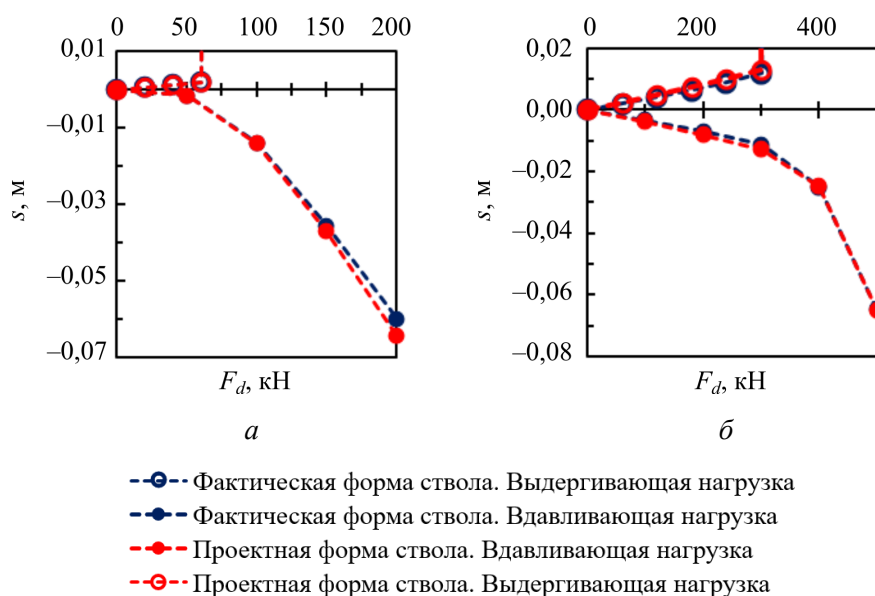


Рис. 6. Графики «нагрузка – осадка» по результатам численного моделирования работы буроинъекционных свай с фактической формой ствола скважины и проектной: *a* – для ствола скважины № 1; *б* – для ствола скважины № 6

Fig. 6. Graphs of load-settlement based on the results of numerical modeling of the operation of bored piles with the actual shape of the wellbore and the design one: *a* – for borehole № 1; *b* – for borehole № 6



## **Выводы**

Проведенное исследование вертикальности буровых скважин позволяет сделать общие выводы для работ, связанных как с инженерно-геологическими изысканиями, так и с устройством буроинъекционных свайных фундаментов:

Проведение контроля вертикальности бурения для погружаемых секций буровых штанг выше поверхности земли способно обеспечить строгую вертикальность ствола скважины только в отдельных случаях. Наиболее часто происходит отклонение ствола скважины от вертикали, увеличивающееся по направлению к забою.

Выявленные максимальные значения горизонтального отклонения стволов скважин от вертикали в условиях залегания грунтов тугопластичной и полутвердой консистенций при глубине скважины до 23 м, диаметром 120 мм не превышают 13 %, что соответствует общему углу наклона не более  $7,5^\circ$ . При этом установлено практически полное соответствие (более 99 %) погонных метров бурения вертикальной проекции скважины.

В рамках инженерно-геологических изысканий отклонение скважин от вертикали можно считать технологическим (сопутствующим) дефектом, не влияющим на качество проведения самих работ.

Отсутствие вертикальности ствола выполненной буроинъекционной сваи в соответствии с численными исследованиями не оказывает влияния на ее работу (несущую способность) в грунтовом основании, по сравнению с вертикальной буроинъекционной свайей.

## **Заключение**

Вопрос о действительной форме ствола скважины при бурении является интересным и практически значимым. При этом даже при вертикальном бурении, более простом, чем наклонное, добиться строгой вертикальности для скважины затруднительно. Выполнение регламентных требований вертикальности для погружаемых секций буровых штанг способно обеспечить «условную» вертикальность, то есть такое отклонение от вертикали, которое будет являться несущественным, и им можно пренебречь. Такое отклонение от вертикали не влияет ни на несущую способность будущих свай, ни на инженерное изучение геологической среды. При этом отклонение будет несущественным даже при бурении в местах ожидаемо неоднородного природного напряженного состояния. При этом следует отметить, что для окончательного ответа на обозначенный в данной статье вопрос необходимо осуществление тщательно выполненных экспериментальных исследований, являющихся критерием истины.

## **Библиографический список**

1. Gorelkin A.A. Analysis of causes of the accidents occurring in process of drilling of big diameter vertical wells // *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. – 2012. – № 5. – С. 18–22.
2. Davie J.R., Liao T., Bell K.R., Gerken D.E. Measured Drill Hole Verticality // *GeoCongress*. – 2012. – Vol. 2012. – P. 2669–2677. DOI: 10.1061/9780784412121.273.
3. Цветков В.Я., Дышленко С.Г. Применение ГИС «Панорама» при изысканиях // *Инженерные изыскания*. – 2009. – № 12. – С. 46–48.
4. Abdrahem M.A., El Naggar M.H. Evaluation of Axial Performance of Hollow Bar Micropiles Constructed with Different Drill Bit to Hollow Bar Diameter Ratio // *Geotechnical and Geological Engineering*. – 2021. – № 5 (39). – P. 3669–3688. DOI: 10.1007/s10706-021-01718-x.

5. Mahmoud M. Achieving tight limits in instrumentation borehole verticality // *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Geotechnical Engineering*. – 1997. – № 1 (125). – P. 33–41. DOI: 10.1680/igeng.1997.28995.
6. Popov D. V, Savinova E.V. Method for calculating the stability of the walls of a drilling well when installing bored piles // *Construction and Geotechnics*. – 2020. – № 1 (11). – P. 62–67. DOI: 10.15593/2224-9826/2020.1.06.
7. Ulitskii V.M., Shashkin A.G., Paramonov V.N. Determination of the bearing capacity of bored piles // *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. – 2001. – № 2 (38). – P. 51–55. DOI: 10.1023/A: 1010474013751.
8. Осадка и несущая способность длинной сваи / А.З. Тер-Мартirosян, З.Г. Тер-Мартirosян, Т.В. Чинь, И.Н. Лузин // *Вестник МГСУ*. – 2015. – № 5. – С. 52–61.
9. Конюшков В.В., Улицкий В.М. Оценка несущей способности буронаблюдательных свай // *Вестник гражданских инженеров*. – 2007. – № 11 (2). – С. 52–57.
10. Полищук А.И., Чернявский Д.А. Расчёт несущей способности буронаблюдательных конических свай в глинистых грунтах // *Основания, фундаменты и механика грунтов*. – 2020. – № 4 (0). – С. 2–7.
11. Randolph M.F., Wroth C.P. Analysis of deformation of vertically loaded piles // *ASCE J. Geotech Eng Div.* – 1978. – № 12 (104). – P. 1465–1488. DOI: 10.1061/ajgeb6.0000729.
12. Study on the effect of side resistance of micropiles / S. Qiu, M. Bai, N. Yu, H. Shi, P. Li // *Journal of Testing and Evaluation*. – 2019. – № 3 (47). DOI: 10.1520/JTE20180221.
13. Zhu X.R., Fang P.F., Huang H.M. Research on super-long pile in soft clay. *Yantu Gongcheng Xuebao* // *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*. – 2003. – № 1 (25). – P. 76.
14. Rajeswari J.S., Sarkar R. Performance of piles with different batter angles in laterally spreading soil: a probabilistic investigation // *Bulletin of Earthquake Engineering*. – 2020. – № 14 (18). – P. 6203–6244. DOI: 10.1007/s10518-020-00936-7.
15. Ulitskii V.M., Shashkin K.G. Deformed scheme for design of piles injected into predrilled holes // *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. – 1998. – № 4–5 (35). – P. 110–114. DOI: 10.1007/BF02465921.
16. Experimental and Numerical Studies on Load-Carrying Capacities of Encased Micropiles with Perforated Configuration under Axial and Lateral Loadings / S. Hong, G. Kim, I. Kim, Q. Abbas, J. Lee // *International Journal of Geomechanics*. – 2021. – № 6 (21). – P. 04021083. DOI: 10.1061/(asce)gm.1943-5622.0002019.
17. Stability analysis of single pile base on efficient finite-element method / J.H. Wan, X.Z. Zheng, W.H. Ouyang, S.W. Liu, X.Y. Li // *Yantu Lixue/Rock and Soil Mechanics*. – 2020. – № 8 (41). – P. 2805–2813. DOI: 10.16285/j.rsm.2019.1611.
18. Tassilov B., Zhambakina Z. Numerical modeling of the operation of bored injection piles to assess their bearing capacity // *Universum: технические науки*. – 2021. – № 86 (2–4). – P. 32–35.

## References

1. Gorelkin A.A. Analysis of causes of the accidents occurring in process of drilling of big diameter vertical wells. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2012, no. 5, pp. 18–22.
2. Davie J.R., Liao T., Bell K.R., Gerken D.E. Measured drill hole verticality. *GeoCongress*, 2012, pp. 2669–2677. DOI: 10.1061/9780784412121.273.

3. Tsvetkov V.Ya., Dyshchko S.G. Primeneniye GIS «Panorama» pri izyskaniyakh [Application of GIS "Panorama" in surveys]. *Inzhenernyye izyskaniya*, 2009, no. 12, pp. 46–48.
4. Abdrahem M.A., El Naggar M.H. Evaluation of axial performance of hollow bar micropiles constructed with different drill bit to hollow bar diameter ratio. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2021, no. 5 (39), pp. 3669–3688. DOI: 10.1007/s10706-021-01718-x.
5. Mahmoud M. Achieving tight limits in instrumentation borehole verticality. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Geotechnical Engineering*, 1997, no. 1 (125), pp. 33–41. DOI: 10.1680/igeng.1997.28995.
6. Popov D.V, Savinova E.V. Method for calculating the stability of the walls of a drilling well when installing bored piles. *Construction and Geotechnics*, 2020, no. 1 (11), pp. 62–67. DOI: 10.15593/2224-9826/2020.1.06.
7. Ulitskii V.M., Shashkin A.G., Paramonov V.N. Determination of the bearing capacity of bored piles. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2001, no. 2 (38), pp. 51–55. DOI: 10.1023/A: 1010474013751.
8. Ter-Martirosyan A.Z., Ter-Martirosyan Z.G., Chin' T.V., Luzin I.N. Osadka i nesushchaya sposobnost' dlinnoy svai [Draft and bearing capacity of a long pile]. *Vestnik MGSU*, 2015, no. 5, pp. 52–61.
9. Konyushkov V.V., Ulitskiy V.M. Otsenka nesushchey sposobnosti buroin"yektsionnykh svay [Assessment of the bearing capacity of bored piles]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*, 2007, no. 11 (2), pp. 52–57.
10. Polishchuk A.I., Chernyavskiy D.A. Raschot nesushchey sposobnosti buroin"yektsionnykh konicheskikh svay v glinistykh gruntakh [Calculation of the bearing capacity of bored conical piles in clayey soils]. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov*, 2020, no. 4 (0), pp. 2–7.
11. Randolph M.F., Wroth C.P. Analysis of deformation of vertically loaded piles. *ASCE J Geotech Eng Div.*, 1978, no. 12 (104), pp. 1465–1488. DOI: 10.1061/ajgeb6.0000729.
12. Qiu S., Bai M., Yu N., Shi H., Li P. Study on the effect of side resistance of micropiles. *Journal of Testing and Evaluation*, 2019, no. 3 (47). DOI: 10.1520/JTE20180221.
13. Zhu X.R., Fang P.F., Huang H.M. Research on super-long pile in soft clay. *Yantu Gongcheng Xuebao/Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2003, no. 1 (25), pp. 76.
14. Rajeswari J.S., Sarkar R. Performance of piles with different batter angles in laterally spreading soil: a probabilistic investigation. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2020, no. 14 (18), pp. 6203–6244. DOI: 10.1007/s10518-020-00936-7.
15. Ulitskii V.M., Shashkin K.G. Deformed scheme for design of piles injected into predrilled holes. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1998, no. 4–5 (35), pp. 110–114. DOI: 10.1007/BF02465921.
16. Hong S., Kim G., Kim I., Abbas Q., Lee J. Experimental and numerical studies on load-carrying capacities of encased micropiles with perforated configuration under axial and lateral loadings. *International Journal of Geomechanics*, 2021, no. 6 (21), pp. 04021083. DOI: 10.1061/(asce)gm.1943-5622.0002019.
17. Wan J.H., Zheng X.Z., Ouyang W.H., Liu S.W., Li X.Y. Stability analysis of single pile base on efficient finite-element method. *Yantu Lixue/Rock and Soil Mechanics*, 2020, no. 8 (41), pp. 2805–2813. DOI: 10.16285/j.rsm.2019.1611.
18. Tassilov B., Zhambakina Z. Numerical modeling of the operation of bored injection piles to assess their bearing capacity. *Universum: technical sciences*, 2021, no. 86 (2–4), pp. 32–35.