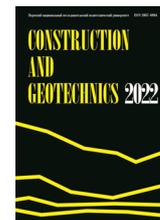




CONSTRUCTION AND GEOTECHNICS

Т. 14, № 1, 2023

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



DOI: 10.15593/2224-9826/2023.1.02

УДК 624.131.541.3

## НЕЛИНЕЙНЫЕ ДЕФОРМАЦИИ УПЛОТНЕННОГО ГРУНТОВОГО ОСНОВАНИЯ ПОД УШИРЕНИЕМ СВАЙ В ПРОБИТЫХ СКВАЖИНАХ

**В.С. Глухов, М.В. Панкина**

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, Пенза, Россия

### О СТАТЬЕ

Получена: 19 ноября 2022  
Одобрена: 20 декабря 2022  
Принята к публикации:  
6 февраля 2023

#### Ключевые слова:

свая в пробитой скважине,  
фундамент в вытрамбованных  
котлованах, свая с уширением,  
коэффициент нелинейности,  
осадка.

### АННОТАЦИЯ

Особенностью свай в пробитых скважинах с уширением, выполняемых по технологии фундаментов в вытрамбованных котлованах, считается высокая несущая способность по сравнению с традиционными забивными сваями. При этом из многолетней практики применения свай в пробитых скважинах с уширением отмечается фактическое превышение расчетных осадок. Это связано со значительным превышением давления порядка 1 000+3 000 кПа под уширением сваи над расчетным сопротивлением уплотненного слоя грунта. Указанное обуславливает необходимость расчета такого фундамента по второй группе предельных состояний с учетом нелинейности в пределах расчетно-допускаемого давления. В статье сравниваются три метода расчета осадки с учетом нелинейности: по таблицам СП 24.13330, методы Н.В. Орнатского и М.В. Малышева. Отмечается, что методы не всегда соответствуют реальной работе фундамента в грунте, что может снижать надежность расчетов. Авторами предложено модернизировать существующие методы расчета осадки из-за особенностей работы свай в пробитых скважинах с уширением. В расчетной схеме свай в пробитых скважинах с уширением для определения осадки необходимо учитывать слой грунта с повышенным модулем деформации, создаваемый в процессе пробивки скважины и формирования уширения. Зоны предельного равновесия развиваются с запасом в границах уплотненного слоя под уширением. Предлагается принимать во внимание нелинейную зависимость деформаций грунта от напряжений в указанных границах, остальные деформации сжимаемой толщи учитывать в линейной постановке. Учет нелинейности при определении осадок ведет к повышению надежности применения рассматриваемых свай, особенно в слабых глинистых водонасыщенных грунтах, а в относительно прочных грунтах позволяет подтверждать надежное использование свай в пробитых скважинах с уширением.

© ПНИПУ

© Глухов Вячеслав Сергеевич – кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Геотехника и дорожное строительство», e-mail: [gds@pguas.ru](mailto:gds@pguas.ru)

Панкина Мария Вячеславовна – старший преподаватель кафедры «Геотехника и дорожное строительство», e-mail: [pankina.marya@mail.ru](mailto:pankina.marya@mail.ru)

Viacheslav S. Glukhov – Candidate of Technical Science, Professor, Head of the Department of Geotechnics and Road Construction, e-mail: [gds@pguas.ru](mailto:gds@pguas.ru)

Mariia V. Pankina – Senior Teacher of Department of Geotechnics and Road Construction, e-mail: [pankina.marya@mail.ru](mailto:pankina.marya@mail.ru)

## NONLINEAR DEFORMATIONS OF THE COMPACTED SOIL BASE UNDER THE BROADENING OF PILES IN PUNCHED HOLES

V.S. Glukhov, M.V. Pankina

Penza State University of Architecture and Construction, Penza, Russian Federation

---

### ARTICLE INFO

Received: 19 November 2022  
Approved: 20 December 2022  
Accepted for publication:  
06 February 2023

#### Keywords:

piles in the punched holes, pile with broadening, ramming piles, foundation in the rammed pits, nonlinearity coefficient, base settlement.

### ABSTRACT

The peculiarity of piles in punched holes with broadening (PPH), performed according to the technology of foundations in rammed pits, is considered to be a high load-bearing capacity compared to traditional driven piles. At the same time, from the long-term practice of using the PPH, the actual excess of the calculated settlement is noted. This is due to a significant excess of pressure of the order of 1,000–3,000 kPa under the widening of the pile over the calculated resistance of the compacted soil layer. This makes it necessary to calculate such a foundation for the second group of limit states, taking into account the nonlinearity within the limits of the calculated allowable pressure. The article compares three methods of calculating settlement taking into account non-linearity: according to the tables of the standard, the methods of N.V. Ornatsky and M.V. Malyshev. It is noted that the methods do not always correspond to the actual work of the foundation in the ground, which can reduce the reliability of calculations. The authors proposed to modernize the existing methods of calculating settlement due to the peculiarities of the work of the PPH. In the calculation scheme of the PPH, to determine the settlement, it is necessary to take into account the soil layer with an increased modulus of deformation created during the punching of the well and the formation of broadening. Zones of marginal equilibrium develop with a margin within the boundaries of the compacted layer under broadening. It is proposed to take into account the nonlinear dependence of soil deformations on stresses within the specified boundaries, and to take into account the remaining deformations of the compressible thickness in a linear formulation. Taking into account the non-linearity in the determination of settlement leads to an increase in the reliability of the application of the piles in question, especially in weak clay water-saturated soils, and in relatively strong soils allows us to confirm the reliable use of PPH.

© PNRPU

---

## Введение

Существующие в настоящее время методы расчета нелинейных осадок позволяют достаточно детально проанализировать процесс деформаций грунтового основания на различных стадиях работы фундамента при загрузении и в целом получать более объективную картину поведения грунтового основания. Весьма актуальным в этом плане представляется расчет деформаций уплотненного грунтового основания под уширением свай в пробитых скважинах. Особенностью последних являются значительные допускаемые давления под уширением [1]. Последние в  $2,0 \div 3,0$  раза превышают давления под уширением буровых свай и находятся в интервале давлений от  $R$  до  $P_u$ . Здесь  $R$  – расчетное сопротивление уплотненного грунтового основания;  $P_u$  – предельное сопротивление указанного основания.

Возможность определять деформации уплотненного грунтового основания за пределами линейной зависимости  $S = f(P)$ , т.е. в диапазоне  $R < P \leq P_u$ , является весьма актуальной задачей с научной и практической точек зрения [2–5]. Решение данной задачи позволит повысить достоверность расчетов и экономичность проектных решений, не пренебрегая надежностью. С позиции надежности определяющим считается вопрос, насколько допустимо превышать величину расчетного сопротивления  $R$  в пределах  $P \leq P_u$ .

## Основная часть

Исследователи в области нелинейной механики грунтов применяют различные методы на основе законов деформационной теории, некоторых условий прочности или используя компьютерные программы [6–8]. Из известных способов определения осадок в нелинейной стадии работы грунта следует выделить, по мнению авторов, три наиболее достоверных способа.

К их числу следует отнести способ, используемый при проектировании гидротехнических объектов, согласно своду правил СП 23.13330 «Основания гидротехнических сооружений». В этом случае осадку  $S_p$  фундамента при давлении под подошвой  $P$ , превышающем  $R$ , определяют по формуле

$$S_p = K_p S_R, \quad (1)$$

где  $S_R$  – осадка при давлении  $P = R$ , см;  $K_p$  – коэффициент нелинейности, определяемый в зависимости от соотношения  $P/R$  и угла внутреннего трения грунта.

При этом для слабых грунтов с углом внутреннего трения порядка  $\varphi = 5^\circ$  соотношение  $P/R$  рассматривается в пределах  $P/R \leq 1,7$  (рис. 1). Максимальное значение коэффициента нелинейности  $K_p = 2,5$ . Если учитывать, что характерной особенностью слабых грунтов считается низкое значение модуля деформации, как правило в диапазоне  $E < 7,0$  МПа, то даже незначительное превышение расчетного сопротивления под подошвой фундамента ведет к существенному увеличению расчетной осадки.

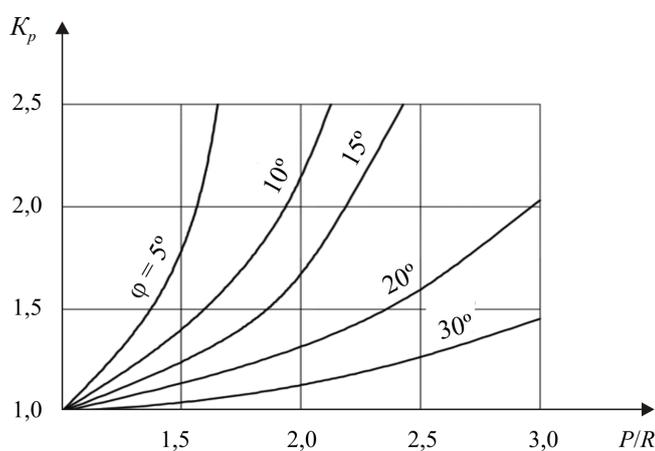


Рис. 1. Графики для определения коэффициента  $K_p$   
Fig. 1. Graphs for determining the coefficient  $K_p$

В случае с прочными грунтами, для которых  $\varphi \geq 30^\circ$ , даже при значительном превышении расчетного сопротивления, к примеру  $P/R = 3,0$  коэффициент  $K_p = 1,4$ .

Следовательно, расчетная осадка увеличивается в этом случае в пределах 40 %. Напрашивается вывод, что для прочных грунтов расчеты деформаций грунтового основания с учетом нелинейности имеют хорошую экономическую перспективу с обеспечением требуемой надежности.

К серьезному недостатку данного метода следует отнести достоверность оценки осредненного значения угла внутреннего трения грунта и неучет удельного сцепления для пылевато-глинистых грунтов. Указанные прочностные характеристики являются опреде-

ляющими при оценке прочностного состояния грунтового основания (первая группа предельных состояний).

В качестве примера по указанному способу выполнен расчет осадки фундаментов в нелинейной постановке для характерных отношений  $P/R$  и грунтового основания с углом внутреннего трения  $\varphi = 15^\circ$  и расчетным сопротивлением  $R = 300$  кПа. В примере приняты три значения расчетных осадок в линейной постановке  $S_R$  при давлении под подошвой  $P = R$ :  $S_R = 2,5; 5,0$  и  $10,0$  см. Расчет функции  $S_p = f(P)$  при исходных граничных условиях  $\varphi = 15^\circ, R = 300$  кПа представлен в табл. 1.

Таблица 1

Результаты расчетов  $S_p = f(P)$

Table 1

Results of calculations  $S_p = f(P)$

| Давление под уширением $P$ , кПа                         | 300  | 450  | 600  | 750  |
|--|------|------|------|------|
| Соотношение $P/R$  | 1,0  | 1,5  | 2,0  | 2,5  |
| Коэффициент нелинейности $K_p$                           | 1,0  | 1,2  | 1,7  | 2,5  |
| Нелинейные осадки $S_p$ при расчетных осадках $S_R$ , см |      |      |      |      |
| $S_R = 2,5$ см   | 2,5  | 3,0  | 4,25 | 6,25 |
| $S_R = 5,0$ см   | 5,0  | 6,0  | 8,5  | 12,5 |
| $S_R = 10,0$ см  | 10,0 | 12,0 | 17,0 | 25,0 |

На рис. 2 приведены зависимости  $S = f(P)$  при указанных граничных условиях.

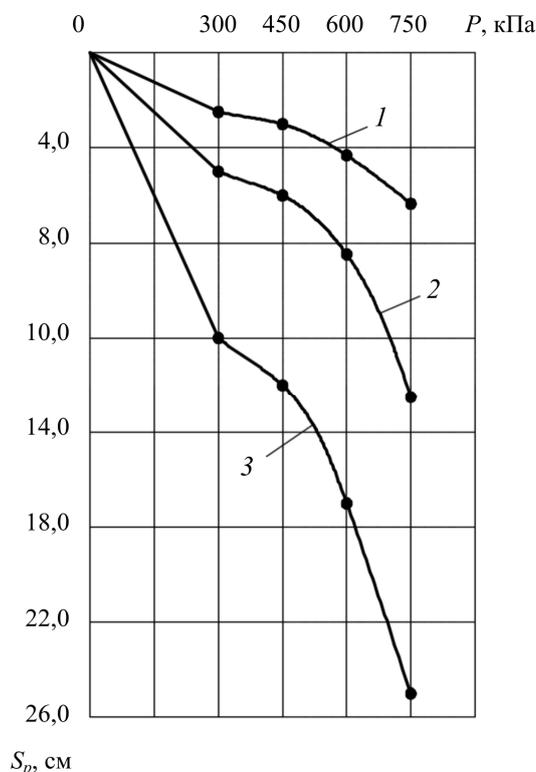


Рис. 2. Графики зависимости  $S_p = f(P)$  при соотношении:

1 –  $P/R = 1,5$ ; 2 –  $P/R = 2,0$ ; 3 –  $P/R = 2,5$

Fig. 2. Plots of the dependence  $S_p = f(P)$  at the ratio:

1 –  $P/R = 1,5$ ; 2 –  $P/R = 2,0$ ; 3 –  $P/R = 2,5$

Из графиков видно (рис. 1), что при соотношении  $P/R = 1,5$  коэффициент нелинейности равен  $K_p = 1,2$ . При этом, согласно графику зависимости  $S_p = f(P)$ , нелогично уменьшается приращение линейной осадки. Далее при соотношении  $P/R = 2,0$  указанный коэффициент увеличивает приращение осадки, практически соответствуя линейной расчетной схеме. И только при  $P/R = 2,5$  приращение осадки увеличивается по сравнению с линейной частью зависимости  $S = f(P)$ .

Можно сделать вывод, что способ расчета нелинейных деформаций грунтовых оснований по СП 23.13330 для гидротехнических сооружений не соответствует реальным условиям работы фундаментов, в определенной мере снижая надежность расчетов.

Следует обратить внимание на способ расчета осадок с учетом нелинейности, предложенный Н.В. Орнатским и рассмотренный в работах [9–11]. Способ основан на решении дифференциального уравнения относительно зависимости  $S = f(P)$ . В результате получены решения, отражающие особенности плавного перехода осадки из линейной в нелинейную область в точке  $P = R$  и получения бесконечных осадок при  $P = P_u$ .

Однако для реализации способа Н.В. Орнатского требуется определение ряда дополнительных негостированных параметров грунтового основания в отличие от метода М.В. Малышева [12].

В пособии [12] приведен способ М.В. Малышева. В основе – гиперболическая зависимость расчетного сопротивления  $R$ , осадки  $S_R$  и предельного сопротивления  $P_u$ , что позволяет зависимости  $S = f(P)$  плавно в точке  $P = R$  увеличиваться, переходя в бесконечность при приближении к предельному давлению  $P_u$ . Предложена следующая формула для определения осадки с учетом нелинейности [5]:

$$S_p = S_R \left[ 1 + \frac{(P_u - R)(P - R)}{(R - \sigma_{zg,0})(P_u - P)} \right], \quad (2)$$

где  $P$  – давление под подошвой фундамента в диапазоне  $R < P < P_u$ ;  $\sigma_{zg,0}$  – природное давление в уровне подошвы фундамента; другие обозначения приведены выше.

В формуле (2) осадка с учетом нелинейности зависит от большинства физико-механических параметров, включая деформационные характеристики основания (модуль деформации) и прочностные (угол внутреннего трения и удельное сцепление). Указанное выгодно отличает данный метод от рекомендаций СП 23.13330.

В случае приближения давления  $P$  к предельному значению  $P_u$  осадка  $S_p = \infty$ , что и соответствует потере устойчивости грунтового основания.

С практической точки зрения последнее не так важно, так как расчет основания по несущей способности (по первой группе предельных состояний) сводится к проверке условия из СП 22.13330:

$$P \leq P_{рд} = P_u \frac{\gamma_c}{\gamma_n}, \quad (3)$$

где  $P_{рд}$  – расчетно-допускаемое давление; другие обозначения соответствуют формуле (5.27) СП 22.13330.

Анализируя различные стадии работы грунтового основания следует отметить существенное отличие процесса деформирования основания при давлениях  $P \leq R$  и  $R < P \leq P_{рд}$ .

В диапазоне давлений  $P \leq R$  принято считать, что грунтовое основание деформируется благодаря главным образом процессу уплотнения и в незначительной степени в результате возникновения под краями фундамента зон предельного равновесия с допустимым развитием на глубину  $z = 0,25b$  ( $b$  – ширина подошвы). При этом расчет осадки  $S_R$  по нормам учитывает деформации в пределах активной зоны сжатия грунтового основания  $H_a$ . Указанный параметр зависит от величины давления под подошвой, ширины последней, модуля деформации слоев грунта и уровня грунтовых вод. Для большинства фундаментов в широком диапазоне грунтовых условий проектное значение давлений под подошвой оставляет порядка  $P = 100 \div 300$  кПа и толщина расчетной активной зоны сжатия  $H_a = (3,0 \div 5,0) b$ , что в  $12 \div 20$  раз превышает глубину развития зон предельного равновесия на стадии загрузки основания давлением  $P = R$ . Последнее обуславливает минимизацию влияния указанных зон на общую расчетную осадку  $S_R$ , которая и реализуется в рамках эффекта уплотнения.

При нагрузках на фундамент в диапазоне давлений  $R < P \leq P_u$  имеет место увеличение зон предельного равновесия с развитием на глубину  $z \approx b$  с формированием упругого ядра, пластических зон и зон выпирания, что и обуславливает потерю устойчивости (прочности) грунтового основания. Состояние последнего в указанном М.В. Малышевым диапазоне давлений  $R < P \leq P_u$  описывается выражением [5]:

$$K_n = 1 + \frac{(P_u - R)(P - R)}{(R - \sigma_{zg,0})(P_u - P)}, \quad (4)$$

где  $K_n$  принято считать коэффициентом нелинейности.

Объективно следует считать, что последнее выражение должно распространяться на описание деформаций основания в пределах развития зон предельного равновесия на глубину  $z \approx b$  (рис. 3). Следовательно, общую осадку фундамента с учетом нелинейности предлагается определять из выражения [13]:

$$S_p = S_p K_n + S_R, \quad (5)$$

где  $S_p$  – осадка сваи при давлении  $P = R$  от деформаций слоя грунта под уширением толщиной  $0,5D_y$  ( $D_y$  – диаметр уширения);  $S_R$  – осадка сваи от деформаций нижележащего слоя в пределах активной зоны сжатия.

Рассмотренные выше решения по определению осадок фундаментов на стадиях работы грунтового основания от начального нагружения до давления под подошвой фундамента, соответствующего предельному сопротивлению  $P_u$  основания, позволяют достаточно объективно оценивать работу грунтового основания на различных этапах нагружения фундамента. Последнее особенно касается фундаментов, технология устройства которых предполагает возможность передачи на основание достаточно значительных давлений порядка  $1000,0 \div 3000,0$  кПа.

К категории таких фундаментов относят сваи в пробитых скважинах с уширением (СПСу). Такие сваи устраиваются по технологии фундаментов в вытрамбованных котлованах [14–16]. В наибольшей степени для расчетов осадки СПСу в нелинейной постановке с достаточной степенью сходимости можно рекомендовать метод М.В. Малышева. Последний следует модернизировать с учетом процессов преобразования грунтового основания под воздействием специфических особенностей технологии устройства СПСу.

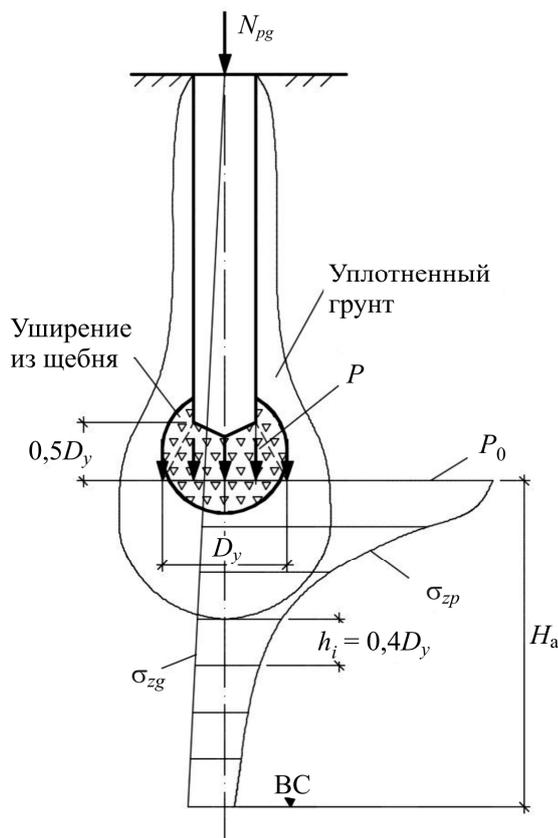


Рис. 3. Схема расчетной осадки фундамента в виде сваи в пробитой скважине с уширением  
 Fig. 3. Schematic diagram of the calculated settlement of the foundation in the form of a pile  
 in a punched hole with broadening

Авторами выполнены аналитические расчеты осадок для различных граничных условий, принятых исходя из области рационального применения СПСу. В том числе в слабых водонасыщенных пылевато-глинистых уплотненных грунтах с осредненными характеристиками: углом внутреннего трения  $\varphi_{II} = 10,0^\circ$ ; удельным сцеплением  $c_{II} = 10,0$  кПа; объемной массой  $\gamma_{II} = 10,0$  кН/м<sup>3</sup>; модулем деформации  $E = 5,0$  МПа, модулем деформации грунта в зоне уплотнения  $E_y = 15,0$  МПа и показателем текучести  $I_L = 0,6$ .

При выполнении расчетов приняты сваи СПСу со следующими параметрами, м: длина  $l = 5,0$ , диаметры ствола  $d = 0,6$  и уширения  $D_y = 1,2$ .

Расчеты по деформации в слабых грунтах показали существенное увеличение осадки свай при давлении  $P$  под уширением, превышающем расчетное сопротивление  $R_y$  уплотненного грунтового основания. К примеру, расчетная осадка  $S$  при  $P = R$  увеличивается в 2,0 раза при увеличении давления  $P$  под уширением в 1,3 раза.

Для сравнения выполнены расчеты по оценке осадок с учетом нелинейности для относительно прочного грунтового основания с характеристиками:  $\varphi_{II} = 17,0^\circ$ ;  $c_{II} = 303,0$  кПа;  $\gamma_{II} = 18,0$  кН/м<sup>3</sup>;  $E = 10,0$  МПа,  $E_y = 20,0$  МПа и  $I_L = 0,3$ .

Для данного грунта при увеличении осадки в 2,0 раза имеет место давление под уширением, в 1,8 раза превышающее расчетное сопротивление грунтового основания под уширением.

## Заключение

1. Существующие методы расчета несущей способности свай в пробитых скважинах с уширением с использованием табличных данных для назначения расчетных сопротивлений  $R$  и  $f_i$  обуславливают значительные превышения давления под уширением по сравнению с допускаемым давлением при расчете осадки фундамента с использованием расчетной модели грунтового основания в виде линейно-деформируемого полупространства.

2. Для обеспечения более достоверного результата при определении осадок необходимо вести расчеты с учетом нелинейности. В наибольшей степени для таких расчетов можно рекомендовать метод М.В. Малышева, модернизированный с учетом особенностей технологии устройства рассматриваемых свай.

3. Аналитические расчеты показывают, что учет нелинейности при определении осадок ведет к повышению надежности применения рассматриваемых свай, особенно в слабых глинистых водонасыщенных грунтах. В то же время учет нелинейности в относительно прочных грунтах позволяет подтверждать надежное использование СПСу.

**Финансирование.** Исследование не имело спонсорской поддержки.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Вклад авторов.** Все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации.

## Библиографический список

1. Krutov V.I., Kogai V.K., Glukhov V.S. Foundations formed from piles cast in punched holes // Soil Mechanics and Foundation Engineering. – 2010. – Vol. 47, no. 2. – P. 45–51. DOI: 10.1007/s11204-010-9087-3
2. Vesic A.S. Analysis of ultimate loads of shallow foundations // Journal of the soil mechanics and foundation division. – 1973. – P. 45–71.
3. Aitchison G D. Relationship of moisture and effective stress functions in unsaturated soils // Proceedings of the Conference on Pore Pressure and Suction in Soils. – L.: Butterworths, 1960. – P. 47–52.
4. Yang G. Nonlinear settlement computation of the soil foundation with the undisturbed soil tangent modulus method // Chinese Journal of Geotechnical Engineering. – 2006. – Vol. 28 (11). – P. 1927–1931. (in Chinese)
5. Masopust J., Glisnikova V. Zakladani staveb Modul M01. – 1st edition. – Brno: AN CERM, 2007. – 182 p.
6. Конюшков В.В. Анализ методов аналитических расчетов осадок фундаментов во времени // Вестник гражданских инженеров. – 2020. – № 4 (81). – С. 106–114. DOI: 10.23968/1999-5571-2020-17-4-106-114
7. Yarkin V., Kukhar H., Lobacheva V. Non-linear settlements of shallow foundation // E3S Web of Conferences: 22nd International Scientific Conference on Construction the Formation of Living Environment, 18–21 Apr. – Tashkent, 2019. – P. 04034. DOI: 10.1051/e3sconf/20199704034
8. He W., Wang G., Wang H. Nonlinear calculating method of pile settlement // Journal of Central South University of Technology. – 2008. – № 15. – P. 63–68. DOI 10.1007/s11771-008-0437-5
9. Орнатский Н.В. Механика грунтов. – М.: Изд-во Моск. гос. ун-та, 1950. – 420 с.

10. Лушников В.В. Упадёт ли Невьянская башня? Как выправляли Пизанскую кампанию. – Екатеринбург: Учебная книга, 2011. – 88 с.
11. Лушников В.В., Пономарев А.Б. Сопротивление грунтов (некоторые лекции по курсу «Механика грунтов»): учеб. пособие. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2021. – 356 с.
12. Пособие по проектированию оснований зданий и сооружений (к СНиП 2.02.01-83). – НИИОСП им. Н.М. Герсеванова. – М.: Стройиздат, 1986. – 415 с.
13. Глухова М.В., Глухов В.С. Учет нелинейной деформации грунта при осадке свай в пробитых скважинах с уширением // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. – 2019. – № 4 (11). – С. 45–52.
14. Glukhov V.S., Glukhova M.V. Calculation of widened pile settlement with regard to nonlinearity // *Journal of Physics: Conference Series*: 2, Perm, 26–28 May. – Perm, 2021. – P. 012056. DOI: 10.1088/1742-6596/1928/1/012056
15. Зоценко Н.Л., Винников Ю.Л., Седин В.Л. Современные методы проектирования и устройства набивных свай в пробитых скважинах // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – 2015. – № 10 (211). – С. 36–43.
16. Седин В.Л., Винников Ю.Л., Бикус Е.М. О влиянии повторных нагружений набивных свай в пробитых скважинах на деформативность оснований // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2014. – № 3. – С. 110–118.

## References

1. Krutov V.I., Kogai V.K., Glukhov V.S. Foundations formed from piles cast in punched holes. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2010, vol. 47, no. 2, pp. 45–51. DOI: 10.1007/s11204-010-9087-3
2. Vesic A.S. Analysis of ultimate loads of shallow foundations. *Journal of the soil mechanics and foundation division*, 1973, pp. 45–71.
3. Aitchison G.D. Relationship of moisture and effective stress functions in unsaturated soils. *Proceedings of the Conference on Pore Pressure and Suction in Soils*, London, Butterworths, 1960, pp. 47–52.
4. Yang G. Nonlinear settlement computation of the soil foundation with the undisturbed soil tangent modulus method. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, no. 28 (11), pp. 1927–1931. (in Chinese)
5. Masopust J., Glisnikova V. *Zakladani staveb Modul M01*. 1st edition. Brno, AN CERM, 2007, 182 p.
6. Konyushkov V.V. Analiz metodov analiticheskikh raschetov osadok fundamentov vo vremeni [Analysis of methods for analytical calculation of foundation settlement in time] *Vestnik grazhdanskih inzhenerov*, 2020, № 4 (81), pp. 106–114. DOI: 10.23968/1999-5571-2020-17-4-106-114
7. Yarkin V., Kukhar H., Lobacheva V. Non-linear settlements of shallow foundation. *E3S Web of Conferences: 22nd International Scientific Conference on Construction the Formation of Living Environment*, 18–21 Apr., Tashkent, 2019, pp. 04034. DOI: 10.1051/e3sconf/20199704034
8. He W., Wang G., Wang, H. Nonlinear calculating method of pile settlement. *Journal of Central South University of Technology*, 2008, no. 15, pp. 63–68. DOI: 10.1007/s11771-008-0437-5
9. Ornatskij N.V. *Mekhanika gruntov* [Soil mechanics]. Moscow, MSU, 1950, 420 p.

10. Lushnikov V.V. Upadet li Nev'yanskaya bashnya? Kak vypravlyali Pizanskuyu kampa-nilu [Will the Nevyanskaya Tower fall? How the Pisa Campanile was straightened]. Ekaterin-burg, Uchebnaya kniga, 2011, 88 p.
11. Lushnikov V.V., Ponomarev A.B. Soprotivlenie gruntov (nekotorye lektsii po kursu "Mekhanika gruntov") [Soil resistance (Some lectures on the course "Soil Mechanics")]. Perm, PNRPU, 2021, 356 p.
12. Manual on the design of foundations of buildings and structures. N.M. Gersevanov NIIOSP. Moscow, Stroyizdat, 1986, 415 p.
13. Glukhova M.V., Glukhov V.S. Uchet nelinejnoj deformacii grunta pri osadke svaj v pro-bityh skvazhinah s ushireniem [Considering the non-linear soil deformation in the settlement of pile in punched holes with broadening] *Zhilishchnoe hozyajstvo i kommunalnaya infrastruktura*, 2019, no. 4 (11), pp. 45–52.
14. Glukhov V.S., Glukhova M.V. Calculation of widened pile settlement with regard to nonlinearity. *Journal of Physics: Conference Series*, 26–28 May, Perm, 2021, pp. 012056. DOI: 10.1088/1742-6596/1928/1/012056
15. Zotsenko N.L., Vynnykov Y.L., Sedin V.L. Sovremennye metody proektirovaniya i us-trojstva nabivnyh svaj v probityh skvazhinah [Modern methods of design and arrangement of ramming piles in punched holes] *Visnik Pridniprovs'koï derzhavnoï akademii budivnictva ta arhitekturi*, 2015, № 10 (211), pp. 36-43.
16. Siedin V.L., Vynnykov Yu.L., Bikus K.M. O vliyanii povtornykh nagruzhenij nabivnykh svaj v probitykh skvazhinakh na deformativnost ikh osnovanij [Repeated loading effect on foundation distortion under filling piles cast in boreholes]. *Vestnik Permskogo natsional'no issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2014, no. 3, pp. 110-118.