



УДК 624.154.1

Ю. С. ГРИГОРЬЕВ, канд. техн. наук, проф. кафедры архитектуры;
В. В. ФАТЕЕВ, ст. преп. кафедры архитектуры

О МЕТОДИКЕ ИСПЫТАНИЙ МОДЕЛЕЙ ПРИЗМАТИЧЕСКИХ СВАЙ В МАССИВЕ ГЛИНИСТОГО ГРУНТА ВЕРТИКАЛЬНЫМИ НАГРУЗКАМИ В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ

ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»
Россия, 603952, г. Н. Новгород, ул. Ильинская, д. 65. Тел.: (831) 430-19-57;
эл. почта: yus-gri@rambler.ru, valeriy-fateev@rambler.ru

Ключевые слова: методика, глинистый грунт, модель грунтового массива, модель забивной призматической сваи, вдавливающие и выдергивающие вертикальные нагрузки.

Приводятся результаты исследований работы моделей забивных призматических свай на вертикальные вдавливающую и выдергивающую нагрузки в массиве глинистого грунта. Опыт формирования искусственного массива из глинистого грунта, погружения модели сваи в грунтовой массив, испытаний сваи осевыми вдавливающими и выдергивающими нагрузками, а также обработки выполненных исследований могут быть использованы при выполнении исследований по моделированию работы свайных фундаментов.

Целью экспериментальных исследований, выполненных авторами, являлось совершенствование методики физического моделирования работы свайных фундаментов в глинистых грунтах.

Для исследования работы моделей забивных призматических свай использовался специально сконструированный лоток прямоугольной формы размерами 1,6×0,40×1,2 м, объемом $V = 0,77 \text{ м}^3$ из водостойкой ламинированной фанеры толщиной 21 мм, предназначенный для исследования работы одиночных свай и свайных рядов на вертикальные и горизонтальные нагрузки, действующие вдоль рядов свай, позволяющий проводить испытания моделей фундаментов со сваями сечением 30×30 мм, длиной от 60 см до 100 см, с количеством свай в ряду от 1 до 12.

Особенности конструкции лотка:

1) возможность формирования в нем моделей массивов грунта различного объема;

2) разметка объема лотка по вертикали на несколько горизонтов, толщиной 40 мм, позволяющая контролировать плотность укладки грунта и таким образом формировать однородный массив с заданными характеристиками физико-механических свойств (рис. 1 цв. вклейки) [1, 2].

Для изготовления модели грунтового массива использовался лессовый суглинок, отобранный на одной из строительных площадок Нижнего Новгорода. Причиной выбора такого материала было то, что лессовые породы проблематичного генезиса четвертичной системы залегают на территории нагорной части Нижнего Новгорода сплошным однообразным покровом мощностью до 15–30 м и более, покрывающим правобережья рек Оки и Волги и подстилающимся коренными, пестроцветными отложениями татарского яруса пермской системы [3].



Отобранный суглинок рассыпался на лабораторных столах в отопляемом и проветриваемом помещении, измельчался с помощью ножа, высушивался до воздушно-сухого состояния в течение 5 суток и досушивался в специальных лотках в сушильном шкафу при температуре 105–110 °С не менее 3 часов.

Измельчение высушенного грунта до однородного порошкообразного состояния выполнялось в специально изготовленной шаровой мельнице с измельчением и просеиванием перемолотого грунта в автоматическом режиме и с выгрузкой в герметически закрывающиеся емкости объемом 20 литров. Разрушение агрегатов грунта в порошок происходило во вращающемся грунтоприемном барабане мельницы с 30 стальными шарами диаметром $d = 25,3$ мм, массой 66,5 г каждый, к внутренней цилиндрической поверхности которого крепилась тканая сетка из нержавеющей стали с размером ячеек 0,16 мм, работающая подобно абразивному инструменту, при взаимодействии с которым агрегаты и микроагрегаты грунта полностью истираются и затем просеиваются (рис. 2 цв. вклейки).

Необходимое для эксперимента количество измельченного воздушно-сухого суглинка увлажнялось расчетным количеством дистиллированной воды с помощью пульверизатора с тщательным перемешиванием в плоском лотке, после чего приготовленная паста выдерживалась в течение 3 суток в герметических емкостях, после этого выполнялось контрольное определение влажности приготовленного грунта. При несоответствии влажности (как правило, незначительном) заданной величине, грунт доувлажнялся, выдерживался в герметических емкостях и повторно подвергался контрольному исследованию.

Формирование модели грунтового массива выполнялось послойным трамбованием грунтовой пасты прямоугольной металлической трамбовкой массой 6 кг (рис. 3 цв. вклейки). При этом в лоток укладывалось заранее определенное по весу количество грунта, необходимое для формирования уплотненного слоя толщиной 40 мм с такими характеристиками физическо-механических свойств, как: плотность $\rho = 1,70$ г/см³; плотность частиц $\rho_s = 2,71$ г/см³; коэффициент пористости $e = 0,81$; влажность $w = 13,3$ %; сцепление $c = 28$ кПа; угол внутреннего трения $\varphi = 25^\circ$; модуль деформации $E = 3,5$ МПа, что соответствовало средним значениям характеристик лессовых суглинков, распространенных в пределах Нижнего Новгорода, величина которых изменяется в пределах: плотность $\rho = 16,5 \div 18,2$ г/см³; коэффициент пористости $e = 0,56 \div 1,1$ (преимущественно $e = 0,85 \div 0,95$), влажность $w = 7,5 \div 20$ %; сцепление $c = 10 \div 50$ кПа; угол внутреннего трения $\varphi = 18 \div 29^\circ$; модуль деформации $E = 3 \div 10$ МПа [3]. Между слоями уплотненного грунта были выполнены прослойки толщиной 0,4 мм из порошкообразного мела, предназначенными: 1) для контроля качества формирования однородного грунтового массива; 2) для исследования характера деформации и разрушения несущего слоя околосвайного грунта (рис. 9–12 цв. вклейки).

Конструкция модели призматической сваи была разработана с учетом одобрения VIII международным конгрессом по механике грунтов и фундаментостроению, проходившем в 1973 году в Москве, методики испытаний малоразмерных моделей фундаментов, выполненных в масштабе в пределах 1/10–1/20 [4]. Модели свай длиной 600 мм с поперечным сечением 30×30 мм были изготовлены из цельного массива отборной древесины сосны, не имеющего как естественных (сучки), так и приобретенных (усушечные трещины) пороков. При

этом отношении длины сваи к стороне ее поперечного сечения было принято равным 20, что по условиям геометрического подобия соответствовало стандартным железобетонным призматическим сваям длиной 6 м с поперечным сечением 300×300 мм [1].

В исследованиях работы свайных фундаментов под действием горизонтальных нагрузок, действующих вдоль рядов свай, необходимо обеспечивать погружение моделей свай в грунтовый массив строго в заданной вертикальной плоскости. Для этого нижний конец моделей был оснащен стальным наконечником-лидером, изготовленным из стального стержня диаметром 8 мм, длиной 100 мм, с заделкой в ствол модели на 70 мм [1]. Для обеспечения вертикального положения моделей свай в грунтовом массиве, необходимого при устройстве свайно-грунтовых диафрагм, модели свай погружалась ударным способом в лидерную скважину диаметром 10 мм, предварительно выполненную пробивкой с помощью стального стержня и направляющего кондуктора (рис. 4 цв. вклейки).

Погружение модели сваи в грунт выполнялось забивкой молотом весом 8 кг, перемещающимся по вертикальной направляющей: таким образом моделировалось погружение свай в натуральных условиях дизельмолотом (рис. 5 цв. вклейки). При этом голова модели сваи была защищена от разрушения при забивке специально разработанным инвентарным наголовником [1].

Испытания модели сваи вертикальной вдавливающей ступенчато увеличивающейся нагрузкой выполнялось загрузкой сваи тарированными гирями весом 3 кг, укладываемыми на специальную платформу и фиксирующимися в вертикальном положении направляющей в виде стального стержня. Осадка модели сваи измерялась двумя симметрично расположенными индикаторами часового типа ИЧ-10 (рис. 6 цв. вклейки). Каждая ступень нагрузки выдерживалась до условной стабилизации осадки сваи, за критерий которой была принята скорость перемещения модели сваи 0,1 мм за последние 30 мин наблюдения. Результаты испытаний в виде графика представлены на рис. 1.

Испытания модели сваи вертикальной выдергивающей ступенчато увеличивающейся нагрузкой выполнялось загрузкой сваи с помощью системы блоков и троса, соединяющего модель сваи с секторным рычагом от срезного прибора с соотношением плеч 1:10, и тарированными гирями весом 0,3 кг, укладываемыми на подвес рычага. Вертикальное перемещение модели сваи измерялось двумя симметрично расположенными индикаторами часового типа ИЧ-10 (рис. 7, 8 цв. вклейки). Каждая ступень нагрузки выдерживалась до условной стабилизации вертикального перемещения модели сваи, за критерий которой была принята скорость перемещения модели сваи 0,1 мм за последние 30 мин наблюдения. Результаты испытаний в виде графика представлены на рис. 2.

После завершения испытаний модели сваи было выполнено исследование модели грунтового массива. Для этого после снятия передней стенки лотка была выполнена срезка грунтового массива вертикальными слоями толщиной в 1 см, в процессе которой было установлено следующее:

1. Модель сваи занимает строго вертикальное положение (рис. 11, 12, 14, 15 цв. вклейки).

2. На расстоянии от вертикальной плоскости массива до вертикальной плоскости, расположенной на расстоянии от боковой поверхности модели сваи равном размеру поперечного сечения сваи d , не было обнаружено каких-либо

**К СТАТЬЕ Ю. С. ГРИГОРЬЕВА, В. В. ФАТЕЕВА
«О МЕТОДИКЕ ИСПЫТАНИЙ МОДЕЛЕЙ ПРИЗМАТИЧЕСКИХ СВАЙ
В МАССИВЕ ГЛИНИСТОГО ГРУНТА ВЕРТИКАЛЬНЫМИ
НАГРУЗКАМИ В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ»**



Рис. 1. Лоток и паста из лессового суглинка, подготовленные для формирования модели грунтового массива



Рис. 2. Шаровая мельница. Лессовый суглинок до и после помола



Рис. 3. Формирование модели массива из лессового суглинка металлической трамбовкой с высоты 30-40 мм



Рис. 4. Устройство вертикальной лидерной скважины с помощью специального шаблона и стального стержня диаметром 10 мм



Рис. 5. Погружение сваи с инвентарным наголовником в грунтовой массив с помощью молота весом 8 кг



Рис. 6. Испытание модели сваи вертикальной вдавливающей нагрузкой

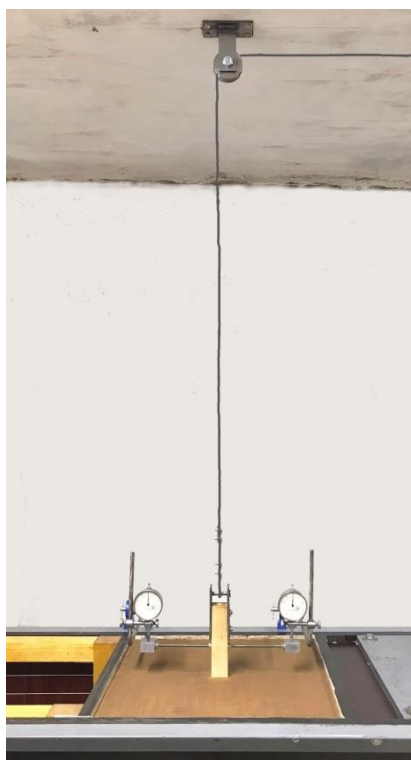


Рис. 7. Испытание модели сваи вертикальной выдергивающей нагрузкой

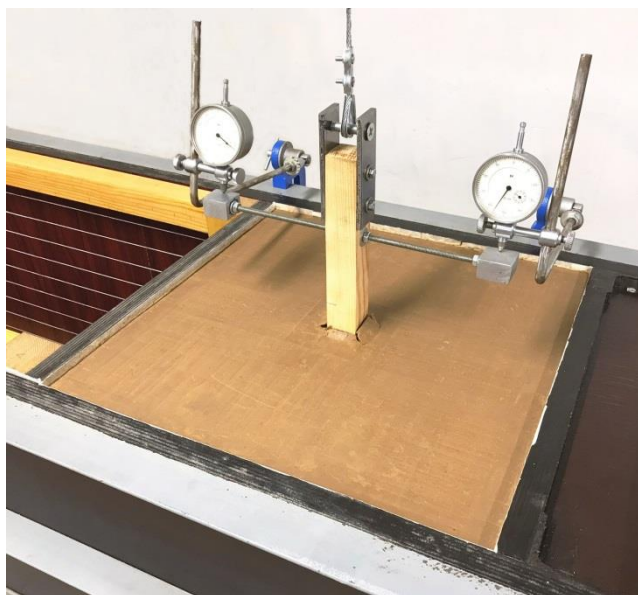


Рис. 8. Срыв модели сваи в испытаниях на вертикальную нагрузку



Рис. 9. Массив из лессового суглинка с погруженной в него моделью сваи после снятия лицевой стенки лотка



Рис. 10. Однородный по плотности сложенный массив из лессового суглинка



Рис. 11. Массив из лессового суглинка с деформированной областью околосвайного грунта после испытаний вертикальными нагрузками



Рис. 12. Деформация несущей области околосвайного грунта шириной $3d$



Рис. 13. Кольца с грунтом, отобранным из несущего массива околосвайного грунта

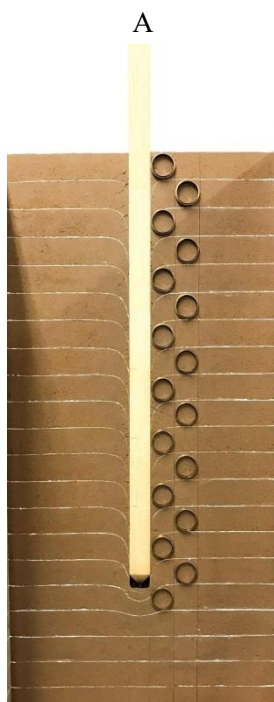


Рис. 14. Отбор образцов околосвайного грунта: А – у боковой поверхности модели сваи; Б – под острием модели сваи

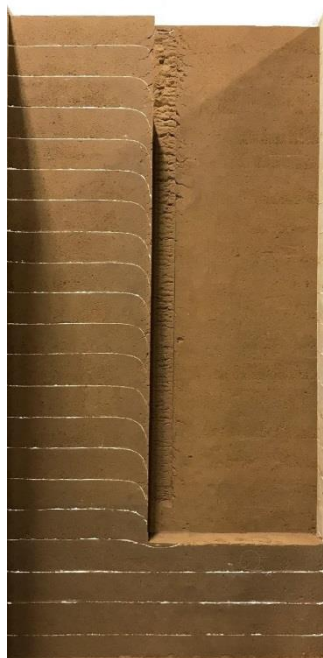


Рис. 15. Разрушение несущего слоя грунта у боковой поверхности модели сваи после испытания на выдергивание

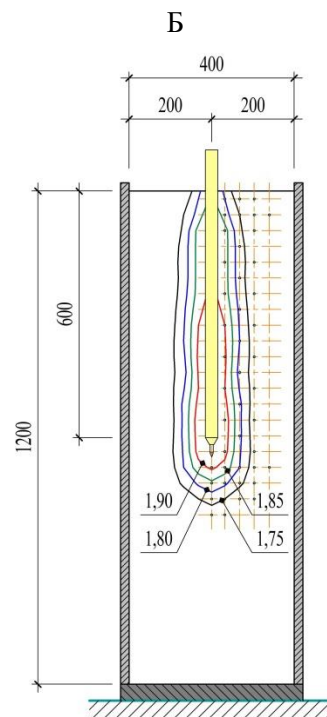
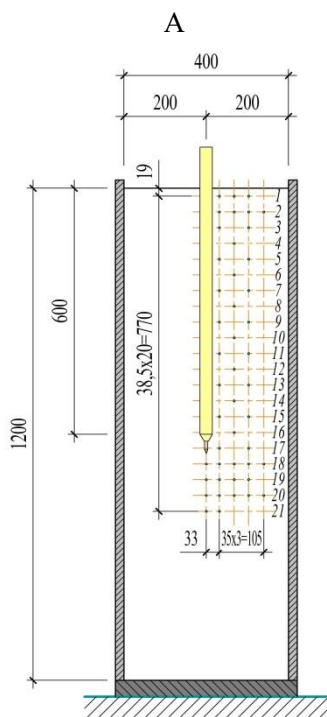


Рис. 16. А – схема расположения точек отбора образцов околосвайного грунта; Б – изолинии плотности околосвайного грунта в г/см^3

искривлений горизонтальных меловых полос, что подтвердило однородность приготовленного для исследований модели массива из лессового суглинка (рис. 9–12 цв. вклейки).

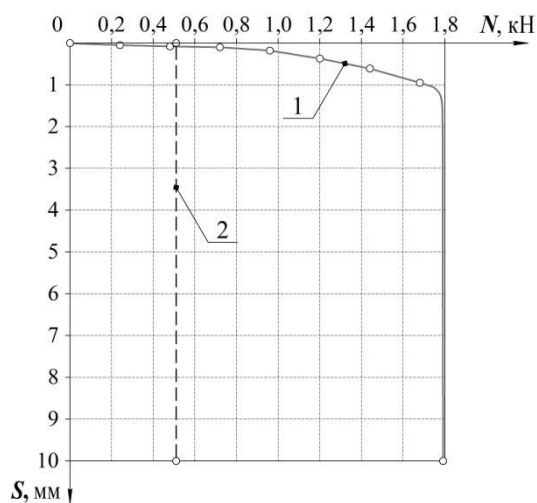


Рис. 1. График зависимости осадки модели сваи S , мм, от вертикальной вдавливающей нагрузки N , кН: 1 – график развития осадки модели сваи; 2 – несущая способность сваи на выдергивающую нагрузку (см. рис. 2)

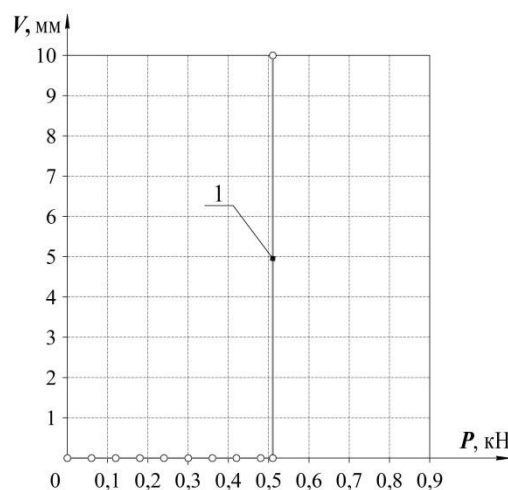


Рис. 2. График зависимости вертикальных перемещений модели сваи V , мм, от вертикальной выдергивающей нагрузки P , кН

3. Деформации несущего слоя околосвайного грунта были обнаружены в объеме грунтового массива радиусом (относительно оси модели сваи) равном $3d$ (рис. 11–12 цв. вклейки).

4. В испытаниях на выдергивание при достижении предельной величины несущей способности происходит разрушение околосвайного грунта в объеме радиусом $1,5d$ (рис. 15 цв. вклейки).

Исследования плотности сложения околосвайного грунта было выполнено по завершении испытаний с помощью специально изготовленных латунных колец с тонкими стенками (рис. 13–16 цв. вклейки), в результате которых было установлено (рис. 16 цв. вклейки):

1. При погружении модели сваи грунт уплотняется в пределах околосвайного массива радиусом относительно оси модели сваи равным $3d$.

2. Радиус области уплотнения постепенно увеличивается с глубиной по мере приближения к нижнему концу модели сваи.

3. Уплотнение грунта под нижним концом модели сваи происходит на глубину $4d$.

Результатом выполненных исследований стала успешная апробация методики испытаний моделей призматических свай в массиве глинистого грунта вертикальными нагрузками, подтвердившая соответствие предъявляемым к методике таким требованиям, как: реалистичность, воспроизводимость, наглядность, соответствие целям и задачам планируемого эксперимента, результативность, качественное совпадение результатов испытаний модели сваи с результатами аналогичных испытаний натурных свай.



БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Григорьев, Ю. С. Моделирование работы свайных фундаментов в лабораторных условиях / Ю. С. Григорьев, В. В. Фатеев // Приволжский научный журнал / Нижегород. гос. архитектур.-строит. ун-т. – Нижний Новгород, 2021. – № 2 (58). – С. 46–53.
2. Григорьев, Ю. С. Экспериментальная установка для испытаний моделей горизонтально нагруженных свайных фундаментов / Ю. С. Григорьев, В. В. Фатеев // Приволжский научный журнал / Нижегород. гос. архитектур.-строит. ун-т. – Нижний Новгород, 2021. – № 3 (59). – С. 56–61.
3. Григорьев, Ю. С. О теоретических основах прогнозирования процессов подтопления территорий градостроительства в сложных инженерно-геологических условиях / Ю. С. Григорьев, И. Н. Гришина ; Нижегород. гос. архитектур.-строит. ун-т. – Нижний Новгород : ННГАСУ, 2002. – 124 с. – Текст : непосредственный.
4. Труды к VIII Международному конгрессу по механике грунтов и фундаментостроению. [6-12 августа 1973 г.] / Под ред. засл. деят. науки и техники, чл.-кор. АН СССР, д-ра техн. наук, проф. Н. А. Цытовича ; Науч.-исслед. ин-т оснований и подземных сооружений Госстроя СССР. Нац. ассоц. СССР по механике грунтов и фундаментостроению. – Москва : Стройиздат, 1973. – 423 с. : ил.

GRIGOREV Yuri Semyonovich, candidate of technical sciences, professor of the chair of architecture; FATEEV Valery Valerevich, senior teacher of the chair of architecture

ABOUT METHODOLOGY OF TESTING MODELS OF PRISMATIC PILES IN AN MASSIF OF CLAY SOIL BY VERTICAL LOADS IN LABORATORY CONDITIONS

Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering
65, Iljinskaya St., Nizhny Novgorod, 603952, Russia. Tel.: +7 (831) 430-19-57;
e-mail: yus-gri@rambler.ru, valeriy-fateev@rambler.ru

Key words: methodology, clay soil, model of a soil massif, model of a driven prismatic pile, pressing and pulling vertical loads.

The article presents the results of research on the operation of models of scoring prismatic piles on vertical pressing and pulling loads in a massif of clay soil. The experience of forming an artificial massif of clay soil, immersion of the pile model into the soil massif, testing the pile with axial pressing and pulling loads, as well as processing the performed studies can be used when performing research on modeling the work of pile foundations.

REFERENCES

1. Grigorev Yu. S., Fateev V. V. Modelirovanie raboty svaynykh fundamentov v laboratornykh usloviyakh [Modeling the work of pile foundations in laboratory conditions] Privolzhskiy nauchny zhurnal [Privolzhsky Scientific Journal]. Nizhegor. gos. arkhitekt.-stroit. un-t. Nizhny Novgorod. 2021. № 2 (58). P. 46–53.
2. Grigorev Yu. S., Fateev V. V. Eksperimentalnaya ustanovka dlya ispytaniy modeley gorizontально nagruzhennykh svaynykh fundamentov [Experimental installation for testing models of horizontally loaded pile foundations]. Privolzhskiy nauchny zhurnal [Privolzhsky Scientific Journal]. Nizhegor. gos. arkhitekt.-stroit. un-t. Nizhny Novgorod. 2021. № 3 (59). P. 56–61.



3. Grigorev Yu. S., Grishina I. N. O teoreticheskikh osnovakh prognozirovaniya protsessov podtopleniya territoriy gradostroitelstva v slozhnykh inzhenerno-geologicheskikh usloviyakh [On the theoretical fundamentals of forecasting the processes of flooding of urban planning territories in complex engineering and geological conditions]. Nizhegor. gos. arkhitektur.-stroit. un-t. Nizhny Novgorod. 2002. 124 p.

4. Trudy k VIII mezhdunarodnomu kongressu po mekhanike gruntov i fundamentostroeniyu 6-12 avgusta 1973 g. [Proceedings of the VIII International Congress on Soil Mechanics and Foundation Engineering. [August 6-12, 1973 g.] / Pod red. zasl. deyat. nauki i tekhniki, chl.-kor. AN SSSR, d-ra tekhn. nauk, prof. N. A. Tsytovicha ; Nauch.-issled. in-t osnovaniy i podzemnykh sooruzheniy Gosstroya SSSR. Nats. assots. SSSR po mekhanike gruntov I fundamentostroeniyu. – Moscow: Stroyizdat, 1973. – 423 p. : il.

© Ю. С. Григорьев, В. В. Фатеев, 2023

Получено: 04.10.2023 г.