

УДК 624.138.4

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-2\[29\]-76-87](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-2[29]-76-87)

# ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СДВИГОВОЙ ПРОЧНОСТИ ПЕСЧАНОГО ГРУНТА, ПРОПИТАННОГО ПОЛИАКРИЛАМИДНЫМ РАСТВОРОМ

## LABORATORY STUDIES OF SHEAR STRENGTH OF SANDS PERVADED BY POLYACRYLAMIDE SOLUTION

В. С. ЛЕСНИЦКИЙ

Е. М. ХАЙБУЛИНА, канд. техн. наук

*Представлены результаты исследования сопротивления песчаных грунтов сдвигу, а также сопротивления сдвигу по контактной поверхности «бетон – грунт» при заполнении пор грунта полиакриламидными полимерными растворами.*

*Results of investigations of shear resistance of sandy soils as well as shear resistance at concrete-soil contact surface when ground pores are filled with polyacrylamide polymer solutions are presented.*

### Ключевые слова:

*Бетон, контактная поверхность, несущая способность сваи, полиакриламид, полимерный буровой раствор, сопротивление сдвигу*

### Key words:

*Concrete, contact surface, pile bearing capacity, polyacrylamide, polymer drilling mud, shear resistance*

### Введение

В строительной практике в качестве бурового раствора для изготовления стены в грунте или буровых свай наиболее часто используется глинистая суспензия, чаще всего из специально подготовленных бентонитовых глин. Другие буровые растворы применяются крайне редко, во многом из-за сложившейся практики, а также из-за недостаточного опыта использования альтернативных буровых растворов. Действующий СП 45.13330.2017 [2, п.12.2.1] допускает использование полимерных буровых растворов, однако опыт такого рода в России еще недостаточен, в частности, не исследован вопрос влияния полимерных растворов на несущую способность будущих свай (баретт).

Зарубежные авторы активно исследуют возможности использования полимерных буровых растворов [6-13]. В 2019 г. Европейской федерацией фундаментных подрядчиков – European Federation of Foundation Contractors (EFFC) [13] – были разработаны рекомендации по использованию полимерных растворов при выполнении буровых свай, баретт и ограждений котлованов. В указанном документе приведены основные сведения о буровых растворах, их взаимодействии с частицами грунта и подземными водами, определены технологии использования полимерных растворов, указана область их применения. Однако так же как и в российских нормах, не рассматривается вопрос влияния полимерных буровых растворов на несущую способность конструкций в грунте. Согласно указаниям, приведенным в тексте документа, исследования данного фактора будут завершены в 2021 г.

Работа по исследованию полимерных растворов выполняется в НИИОСП им. Н. М. Герсевича с 2018 г. при финансовой поддержке ФАУ «ФЦС» в рамках НИОКР ««Разработка рекомендаций по применению водорастворимых высокомолекулярных полимеров для устройства фундаментов из буронабивных свай, баретт и стены в грунте в песчаных грунтах». На первоначальном этапе, по результатам анализа зарубежных исследований был выбран наиболее перспективный вариант полимерного бурового раствора на основе полиакриламидного полимера. Согласно Большой российской энциклопедии [17], полиакриламид – синтетический полимер общей формулы  $[-CH_2-CH(CONH_2)-]_n$ , аморфное вещество белого цвета, плотностью  $1302 \text{ кг/м}^3$ , молекулярная масса  $2 \cdot 10^5 - 6 \cdot 10^6$ , при соприкосновении с водой образует гель высокой вязкости (рис. 1). В качестве буровых растворов используются анионные полиакриламиды, которые представляют собой отрицательно заряженные полимеры, что позволяет им притягивать к себе частицы грунта, глины или песка. Этот вид полиакриламида также применяют в медицине, в системах орошения почв и культур, в обработке продуктов жизнедеятельности животных, в добыче полезных ископаемых.

На первом этапе оценивалась возможность полиакриламидного раствора удерживать стенки песчаной траншеи от обрушения [16]. В процессе исследования оценивалось, как рабочие свойства полимерных растворов, такие как плотность, вязкость, кислотность и т. п., оказывают влияние на устойчивость стенок траншей.



Рис. 1. Полиакриламидный раствор

Сравнивая полиакриламидные растворы с хорошо известным бентонитовым раствором, следует указать на различие в механизмах удержания стенок траншеи от обрушения. Так, бентонитовая суспензия образует на поверхности грунта тонкую (0,5 – 30 мм), но достаточно плотную и прочную пленку, которая не допускает проникновения воды из суспензии в грунт и перераспределяет гидростатическое давление, удерживающее от обрушения вертикальные откосы траншей. Как известно, указанная пленка сохраняется после бетонирования конструкций и формирует поверхность скольжения между грунтом и бетоном, снижая трение по боковой поверхности. Так, согласно СП 24.13330.2011 [3 п.7.2.6.] коэффициент условий работы грунта на боковой поверхности сваи, выполненной под защитой глинистого (бентонитового) раствора, составляет 0,6, а снижение прочностных свойств грунта на боковой поверхности ограждающей конструкции котлована в этих же условиях должен приниматься 0,33...0,5 [1, п.9.16.].

Полиакриламидные растворы пленку на поверхности грунта не формируют, а медленно проникают в массив грунта, в результате чего вдоль поверхности откоса траншеи образуется зона замачивания (рис. 2). Очевидно, что на несущую способность будущей сваи должны оказывать прочностные свойства зоны замачивания или контакт указанной зоны с поверхностью бетона. Оценка этого фактора была выполнена лабораторных условиях.

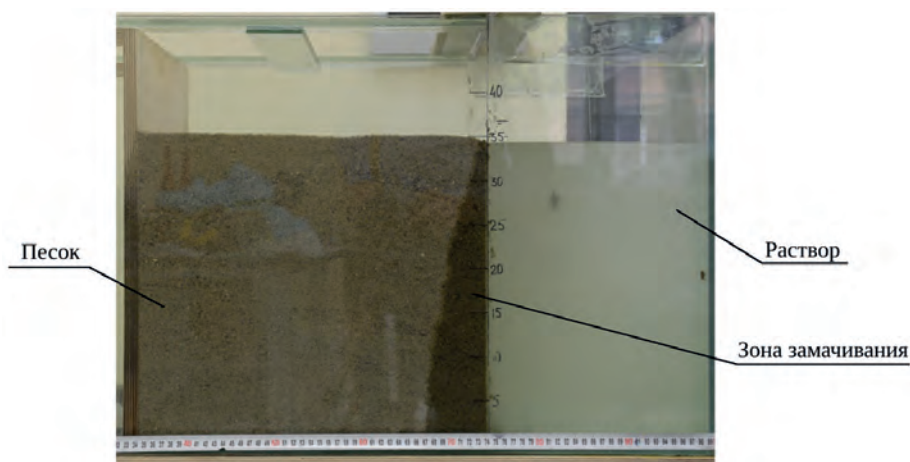


Рис. 2. Зона замачивания, зафиксированная при лотковых испытаниях

### Лабораторные исследования

Первый вид исследования заключался в испытании образцов грунта по схеме консолидировано-дренированного (медленного) одноплоскостного среза в соответствии с п. 5.1.4 ГОСТ 12248-2010 при возрастании сдвиговой нагрузки ступенями (статический режим) в приборах ПИА «ГЕОТЕК СТАНДАРТ».

Вторая группа испытаний была направлена на исследование прочности контакта бетон – грунт и заключалась в сдвиге образца грунта по бетонной поверхности. Ранее подобные испытания выполняли Тер-Мартirosян А. З., Сидоров В. В. [14] и Исаев О. Н., Шарафутдинов Р. Ф. [15] при исследовании прочности контакта грунта с подземными конструкциями. Для возможности проведения испытаний на одноплоскостной срез по контактному слою бетон – песчаный грунт использовались приборы одноплоскостного среза конструкции

«Гидропроекта» ПСГ-3М, в которых вместо нижнего штампа (нижней обоймы срезывателя) закреплялись бетонные плашки, выверенные по высоте. Общий вид модернизированного прибора приведен на рис. 3.

Одноплоскостной срез проводился на модернизированном приборе путем приложения сдвигающей нагрузки грузами через секторный рычаг, нормальное давление на образец передавалось с помощью сектора. Конструкция модернизированного срезывателя представлена на рис. 3.

Значения нормальных давлений составляли 100, 200 и 300 кПа, значения ступеней давления при предварительном уплотнении песков выбирались в соответствии с табл. 5.1 ГОСТ 12248-2010 [5]. Время выдержки нормальной нагрузки на образец составляло 5 мин в соответствии с рекомендациями п. 5.1.4.6 ГОСТ 12248-2010 [5]. Испытания проводились при возрастании нагрузки ступенями (статический режим). Время выдерживания ступеней составляло не менее 5 мин в соответствии с рекомендациями табл. 5.3 ГОСТ 12248-2010. Показания индикатора ИЧ-10 снимались оператором каждые 30 с от момента приложения первой ступени нагрузки и до конца испытания. Испытание считалось законченным, если при приложении очередной ступени срезающей нагрузки происходил мгновенный срез (срыв) верхней части образца срезывателя по отношению к бетонной плашке.

В лабораторных исследованиях были использованы пески из карьера в г. Дзержинске, Московской обл., крупного, среднего и мелкого состава (по ГОСТ 25100-2011 [4]) табл. 1 и 2.



**Рис. 3.** Испытание на прочность контакта бетон – грунт: слева – общий вид прибора ПСГ-3М; справа сверху – образец грунта в кольце, установленный на бетонную плашку; справа снизу – образец грунта после проведения испытания

В качестве растворов при лабораторных исследованиях были использованы водные растворы торговых марок Вагер и НПО Полифлок с характеристиками представленными в табл. 3.

Таблица 1

**Гранулометрический состав песков**

>10 мм	10-5 мм	5-2 мм	2-1 мм	1-0,5 мм	0,5-0,25 мм	0,25-0,10 мм	0,010-0,05 мм	0,05-0,001 мм	0,001-0,002 мм	> 0,002 мм	Наименование грунта по ГОСТ 25100-20111
---	0,2	6,6	38,9	51,4	2,1	0,4	0,4	---	---	--	Песок крупный, однородный
---	---	---	---	22,2	58,4	17,9	1,5	---	---	---	Песок средней крупности, однородный
---	---	---	---	3,8	27,2	56,0	13,0	---	---	---	Песок мелкий, однородный

Таблица 2

**Физические свойства песчаных грунтов**

Наименование грунта	Степень плотности	Плотность грунта, г/см <sup>3</sup>	Плотность сухого грунта, г/см <sup>3</sup>	Плотность частиц грунта, г/см <sup>3</sup>	Коэф. пористости	Степень влажности, д.е.	Влажность
Песок крупный	Плотный	2,06	1,71	2,65	0,549	0,98	20,4
	Сред. плот	2,03	1,66	2,65	0,596	1,0	22,6
	Рыхлый	1,94	1,55	2,65	0,701	0,93	24,5
Песок средней крупности	Плотный	2,07	1,72	2,65	0,541	1,0	20,4
	Сред. плот	2,03	1,66	2,65	0,596	1,0	22,6
	Рыхлый	1,94	1,56	2,65	0,701	0,93	24,5
Песок мелкий	Плотный	2,00	1,66	2,66	0,600	0,90	20,3
	Сред. плот	1,99	1,61	2,66	0,649	0,96	23,4
	Рыхлый	1,89	1,52	2,66	0,752	0,87	24,5

Таблица 3

**Основные свойства полиакриламидных растворов**

Наименование бурового раствора	Основные показатели	
	Расход сухого вещества кг/м <sup>3</sup>	Вязкость по воронке Марша
Полиакриламидный раствор Bauer SLURRY LTP 709	1,6	100
Полиакриламидный раствор Bauer SLURRY LTP 703	5,25	80
Полиакриламидный раствор Полифлок 1520	1,8	120

Испытание сопротивления одноплоскостному срезу выполнено для трех видов песка по крупности (крупный, средний и мелкий в соответствии с ГОСТ 25100-2011 [4]), испытание на сдвиг по бетонной поверхности – для песка крупного и мелкого. Каждый вид песка уплотнялся с плотностями: плотный, средней плотности и рыхлый и 4 состояниями (водонасыщенное и пропитанный тремя видами полиакриламидных растворов (см. табл. 3)). Опыт для каждого сочетания повторялся не менее трех раз. В каждом опыте выполнялись



испытания с вертикальными нагрузками: 100, 200 и 300 кПа. Всего в рамках лабораторных испытаний было выполнено 227 опытов.

#### **Методика водо- и полимеронасыщения**

Заранее взвешенная навеска песка послойно утрамбовывалась (засыпалась) в кольцо до достижения заданного коэффициента пористости. Подготовленные кольца с песком помещали между специальными пластинами-держателями. Для предотвращения контакта поверхности песка с материалом пластины и вымывания мелких частиц в воду или в полимер на кольцо сверху и снизу размещали диски из фильтровальной бумаги, вырезанные по диаметру кольца. Пластины – держатели опускали в поддон, который затем наполняли дистиллированной водой или полимером с заданной вязкостью таким образом, чтобы уровень воды или полимера в поддоне не превышал половину высоты кольца для обеспечения равномерного водо- или полимеронасыщения снизу посредством капиллярного эффекта (рис. 4).

Образцы оставались в таком положении до момента появления влаги или полимера в верхнем торце кольца, о чем судили по изменившемуся цвету песка.

После появления полимера в верхнем торце кольца, на образец сверху дополнительно с помощью мерной градуированной пипетки подавали очень медленно порциями по 1 мл полимер общим объемом 10 мл для достижения равномерного полимеронасыщения верхних слоев песка в кольце вследствие вязкости полимера. После достижения полного водо- или полимеронасыщения образец песка в кольце аккуратно перемещали в съемную каретку прибора одноплоскостного среза.



**Рис. 4.** Процесс насыщения образцов песка

С целью анализа результатов лабораторных исследований рассматривались не прочностные показатели (угол внутреннего трения и сцепление), а фактические значения сопротивлений сдвигу (табл. 4 и 5), графически результаты представлены на рис. 5, 6, 7.

Таблица 4

**Результаты испытаний образцов грунта консолидировано-дренированному (медленному) одноплоскостному срезу**

Состояние грунта	Полученные значения касательное напряжений, кПа, для песков								
	плотных			средней плотности			рыхлых		
	при нормальном напряжении, кПа			при нормальном напряжении, кПа			при нормальном напряжении, кПа		
	100	200	300	100	200	300	100	200	300
Песок крупный									
Водонасыщение	<u>80...99</u> 90	<u>179...190</u> 183	<u>254...285</u> 270	<u>85...90</u> 87	<u>159...170</u> 166	<u>244...254</u> 249	<u>80...94</u> 85	<u>160...180</u> 170	<u>225...255</u> 235
Пропитан. полимером	<u>70...104</u> 89	<u>149...190</u> 177	<u>225...285</u> 256	<u>70...95</u> 82	<u>140...190</u> 166	<u>209...270</u> 238	<u>70...90</u> 83	<u>140...170</u> 160	<u>210...254</u> 228
Песок средней крупности									
Водонасыщенное	<u>80...100</u> 89	<u>180...189</u> 186	<u>253...285</u> 268	<u>70...70</u> 70	<u>140...150</u> 143	<u>209...210</u> 210	<u>70...70</u> 70	<u>110...129</u> 120	<u>195...195</u> 195
Пропитан. полимером	<u>74...94</u> 81	<u>140...170</u> 154	<u>209...240</u> 223	<u>70...85</u> 79	<u>120...150</u> 137	<u>195...225</u> 212	<u>74...85</u> 78	<u>130...152</u> 140	<u>179...225</u> 197
Песок мелкий									
Водонасыщенное	<u>54...55</u> 54	<u>140...149</u> 144	<u>179...180</u> 179	<u>45...51</u> 49	<u>120...130</u> 125	<u>150...165</u> 160	<u>45...55</u> 50	<u>109...124</u> 118	<u>150...165</u> 160
Пропитан. полимером	<u>65...90</u> 83	<u>149...170</u> 159	<u>210...254</u> 236	<u>70...85</u> 79	<u>129...170</u> 153	<u>209...225</u> 220	<u>54...74</u> 66	<u>120...140</u> 127	<u>165...210</u> 191
Примечание:	В ячейках таблицы данные приведены по следующей схеме: $\frac{\min \dots \max}{\text{среднее}}$								

Таблица 5

**Результаты исследования прочности контакта бетон – грунт**

Состояние грунта	Полученные значения касательное напряжений, кПа, для песков								
	плотных			средней плотности			рыхлых		
	при нормальном напряжении, кПа			при нормальном напряжении, кПа			при нормальном напряжении, кПа		
	100	200	300	100	200	300	100	200	300
Песок крупный									
Водонасыщенное	<u>55...68</u> 61	<u>119...129</u> 126	<u>162...185</u> 173	<u>60...70</u> 65	<u>114...140</u> 124	<u>172...188</u> 180	<u>60...70</u> 65	<u>115...124</u> 119	<u>175...188</u> 180
Пропитан. полимером	<u>58...65</u> 62	<u>114...130</u> 124	<u>170...190</u> 181	<u>60...70</u> 65	<u>112...139</u> 122	<u>165...190</u> 179	<u>56...66</u> 63	<u>110...127</u> 119	<u>164...188</u> 174

Состояние грунта	Полученные значения касательное напряжений, кПа, для песков								
	плотных			средней плотности			рыхлых		
	при нормальном напряжении, кПа			при нормальном напряжении, кПа			при нормальном напряжении, кПа		
	100	200	300	100	200	300	100	200	300
Песок мелкий									
Водонасыщенное	<u>55...60</u> 58	<u>112...120</u> 116	<u>170...177</u> 174	<u>55...55</u> 55	<u>115...116</u> 115	<u>168...168</u> 168	<u>50...55</u> 52	<u>97...112</u> 105	<u>148...158</u> 154
Пропитан. полимером	<u>55...68</u> 59	<u>115...130</u> 122	<u>170...190</u> 177	<u>55...60</u> 59	<u>113...125</u> 119	<u>165...174</u> 169	<u>53...63</u> 57	<u>106...123</u> 115	<u>162...173</u> 168
Примечание:	В ячейках таблицы данные приведены по следующей схеме: $\frac{\min \dots \max}{\text{среднее}}$								

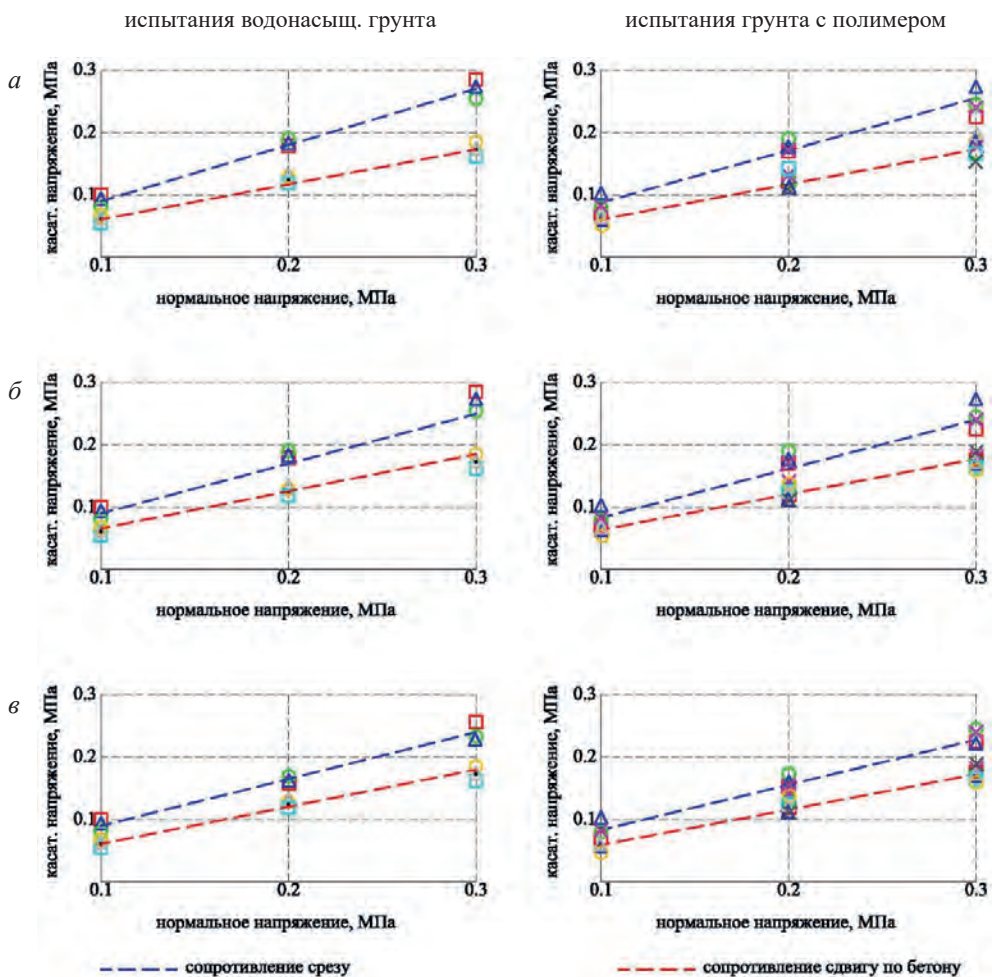


Рис. 5. Результаты испытания песка крупного: а – плотный; б – средней плотности; в – рыхлый



Сравнивая результаты проведенных испытаний образцов грунта, пропитанных полимерным раствором и дистиллированной водой, можно сделать вывод о том, что для песков средней крупности и крупных, разница в полученных значения не превышает статистический разброс значений, т. е. наличие полиакриламидного раствора не оказывает существенное влияние на прочностные свойства песков различной крупности и плотности. В случае образцов из мелкого песка сопротивление сдвигу при наличии полиакриламидного раствора в среднем на 30% выше, чем сопротивление водонасыщенного грунта.

Сравнивая результаты испытания прочности контакта бетон – грунт, можно сделать вывод о том, что разница в полученных значениях не превышает статистический разброс значений, и наличие полиакриламидного раствора не оказывает существенное влияние на прочностные свойства контакта бетон – песчаный грунт.

Сравнивая результаты сдвиговых испытаний образцов грунта и контакта бетон – грунт, обращаем внимание, что сопротивление сдвига грунта по бетонной поверхности в среднем на 25% ниже сопротивления срезу образцов грунта.

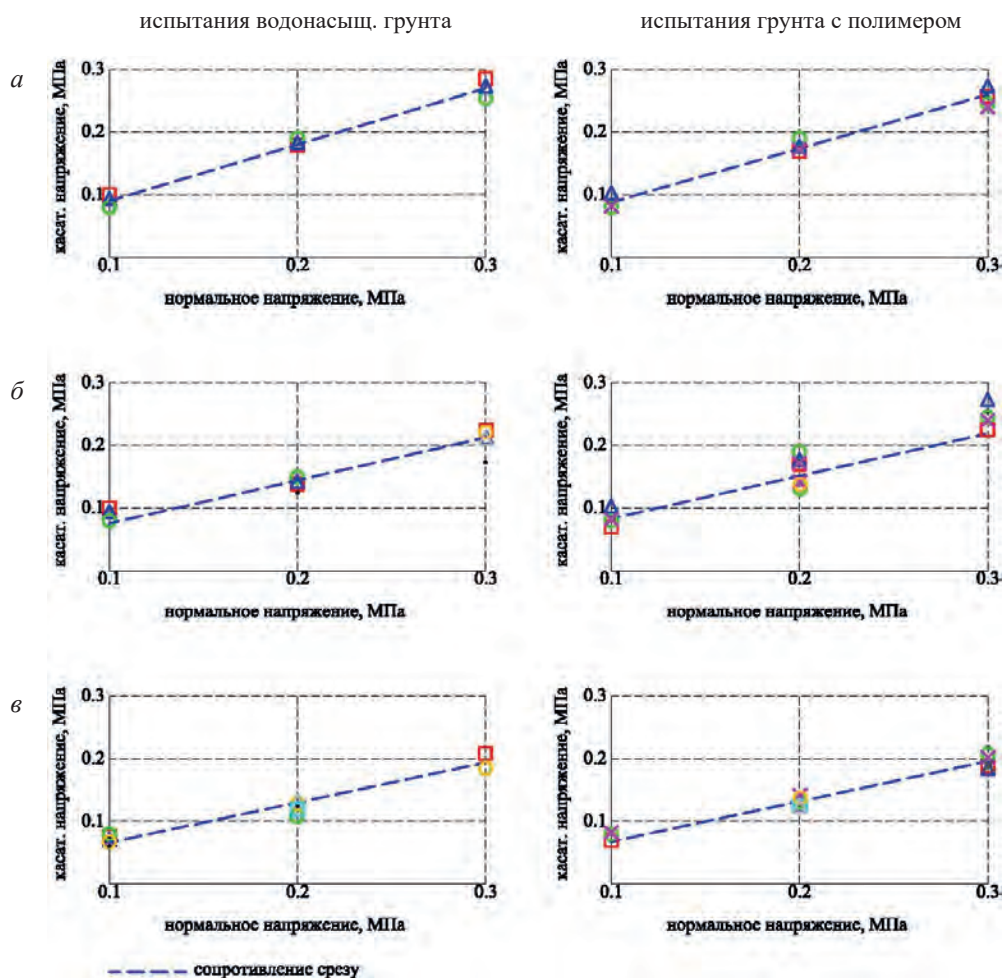


Рис. 6. Результаты испытания песка средней крупности: *а* – плотный; *б* – средней плотности; *в* – рыхлый

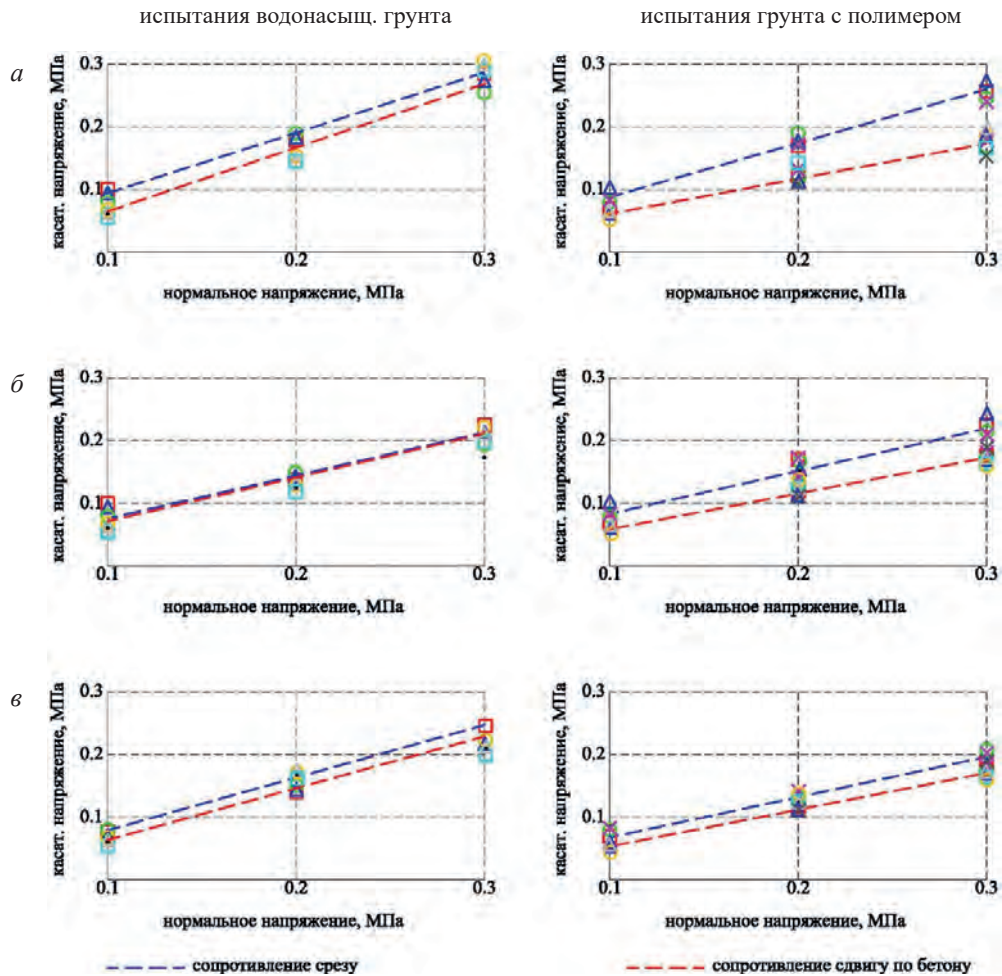


Рис. 7. Результаты испытания песка средней крупности: а – плотный; б – средней плотности; в – рыхлый

## Заключение

В рамках исследования возможности использования полиакриламидного полимерного раствора для устройства свай, баретт и стены в грунте выполнена серия лабораторных исследований по оценке влияния полиакриламидного бурового раствора на прочностные свойства окружающего массива грунта.

Ранее выполненные исследования показали, что при устройстве грунтовой выемки под защитой полимерного бурового раствора указанный раствор замачивает окружающий массив грунта, изменяя его свойства.

В рамках проведенной работы была выполнена серия лабораторных испытаний образцов песчаного грунта по схеме консолидировано-дренированного (медленного) среза. По результатам сравнения результатов проведенных испытаний образцов грунта, пропитанных полимерным раствором и дистиллированной водой, сделан вывод о том, что для песков средней крупности и крупных разница в полученных значения не превышает статистический

разброс значений, т. е. наличие полиакриламидного раствора не оказывает существенное влияние на прочностные свойства песков различной крупности и плотности. В случае образцов из мелкого песка, сопротивление сдвигу при наличии полиакриламидного раствора в среднем на 30% выше, чем сопротивление водонасыщенного грунта.

Для оценки влияния полиакриламидного раствора на прочность контакта бетон – грунт была выполнена серия сдвиговых испытаний, в которых образцы сдвигались по бетонной поверхности. В результате сравнения результатов проведенных испытаний образцов грунта, пропитанных полимерным раствором и дистиллированной водой, сделан вывод о том, что так же как и в описанном выше случае сдвиговых испытаний разница в полученных значениях не превышает статистический разброс значений. Наличие полиакриламидного раствора не оказывает существенное влияние на прочностные свойства контакта бетон – песчаный грунт.

Результаты выполненных лабораторных исследований позволяют предположить, что использование полиакриламидного бурового раствора не окажет негативного влияния на несущую способность конструкций, выполненных под его защитой.

Сравнивая результаты сдвиговых испытаний образцов грунта и контакта бетон – грунт, обращаем внимание, что сопротивление сдвига грунта по бетонной поверхности в среднем на 25% ниже сопротивления срезу образцов грунта.

## Библиографический список

1. СП 22.13330.2016 Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83\*.
2. СП 45.13330.2017 Земляные сооружения, основания и фундаменты. Актуализированная редакция. СНиП 3.02.01-87.
3. СП 24.13330.2011 Свайные фундаменты. Актуализированная редакция СНиП 2.02.03-85.
4. ГОСТ 25100-2011 Грунты. Классификация.
5. ГОСТ 12248-2010 Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости.
6. *Jefferis S.A.* Polymer support fluids: use and misuse of innovative fluids in geotechnical works / Proc. of the 18th Int. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris, 2013.
7. *Lam C., Jefferis S.A. and Goodhue K.G., Jr.* Observations on viscosity reduction of PHPA polymer support fluids / Proc. of Sessions of GeoShanghai 2010 Int. Conf., Shanghai, China, Geotechnical Special Publications No. 205, American Society of Civil Engineers, 184–191.
8. *Lam C., Jefferis S.A.* Performance of Bored Piles Constructed Using Polymer Fluids: Lessons from European Experience/ [egl@environmentalgeotechnics.com](mailto:egl@environmentalgeotechnics.com)
9. *Lam C., Troughton V., Jefferis S. and Suckling T.* Effect of support fluids on pile performance – a field trial in east London // Ground Engineering 43 (10), 28–31.
10. *Lam C.* Properties and applications of polymer support fluids in geotechnical engineering. DPhil thesis, University of Oxford, UK.
11. *Lennon D.J., Ritchie D., Parry G.O. and Suckling T.P.* Piling projects constructed with vinyl polymer support fluid in Glasgow, Scotland / Proc. of the 10th Int. Conf. on Piling and Deep Foundations, Amsterdam, the Netherlands, Deep Foundations Institute, 499–506.
12. *Schünmann D.* Fisherman's friend // Ground Engineering 37 (12), Proc. of the 19th Christian VederKolloquium, Graz, Austria, 73–89 (in German).

13. *Thasnanipan N., Aye Z.Z. and Boonyarak T.* Behaviour of polymer-based slurry for deep-seated bored piles in multi-layered soil of Bangkok / Proc. of the 4th Int. Geotechnical Seminar on Deep Foundations on Bored and Auger Piles (BAP IV), Ghent, Belgium, Millpress, 267–274. Guide to Support Fluids for Deep Foundations, Edition 1./EFFC-DFI 2019

14. *Тер-Мартиросян А.З., Сидоров В.В., Алмакаева А.С.* Особенности и сложности определения прочности на контакте грунтового и конструкционного материалов // Геотехника, 2019. Том XI, №4. С. 30-40.

15. *Исаев О.Н., Шарафутдинов Р.Ф.* Исследования сопротивления грунта сдвигу по контактной поверхности конструкций // ОМФГ. 2020, №6. С. 23-29.

16. *Шулятьев О.А., Шулятьев С.О., Мозгачёва О.А., Лесницкий В.С.* Применение водорастворимых высокомолекулярных полимеров для устройства фундаментов из буронабивных свай, баретт и «стены в грунте» в песчаных грунтах / Вестник АО «НИЦ Строительство», 2020. Вып. №20, С. 131-139.

17. Большая Российская энциклопедия / web. ресурс.//<https://bigenc.ru/chemistry/text/3152711>.

## Авторы:

Виталий Сергеевич ЛЕСНИЦКИЙ, старший научный сотрудник лаборатории освоения подземного пространства городов, НИИОСП им. Н. М. Герсееванова АО «НИЦ «Строительство», Москва

Vitaliy LESNITSKIY, Senior researcher of Laboratory of development of underground space of the cities, NIIOSP named after N. M. Gersevanov JSC Research Center of Construction, Moscow  
e-mail: lesnitsky.v@yandex.ru

Евгения Михайловна ХАЙБУЛИНА, канд. техн. наук, заведующая лабораторией исследований свойств грунтов и воды ОИГИ, НИИОСП им. Н. М. Герсееванова АО «НИЦ «Строительство», Москва

Evgeniya KHAYBULINA, Ph. D. (Engineering), Head of the Laboratory for Research of Soil and Water Properties of the Department of Engineering and Geological Surveys, NIIOSP named after N. M. Gersevanov JSC Research Center of Construction, Moscow  
e-mail: khaibulina@mail.ru