

На правах рукописи



Сальный Иван Сергеевич

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ БУРОИНЪЕКЦИОННЫХ СВАЙ
С ГРУНТОВЫМ ОСНОВАНИЕМ**

2.1.2. Основания и фундаменты, подземные сооружения

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Тюмень – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Тюменский индустриальный университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Пронозин Яков Александрович

Официальные оппоненты: **Тер-Мартirosян Армен Заенович**
доктор технических наук,
ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский
Московский государственный строительный
университет», профессор кафедры «Механика
грунтов и геотехника»

Конюшков Владимир Викторович
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет», доцент
кафедры «Геотехника»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Казанский государственный
архитектурно-строительный университет»

Защита состоится 06 июля 2023 года в 14:00 часов (по местному времени) на заседании диссертационного совета 24.2.419.02, созданного на базе ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», по адресу: 625001, г. Тюмень, ул. Луначарского, д. 2, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет» и на сайте <http://www.tyuiu.ru>.

Автореферат разослан «19» апреля 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Степанов Максим Андреевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. На сегодняшний день надежной, востребованной и широко применяемой технологией в строительстве является буроинъекционная технология устройства свай, чему способствовала возможность производства работ по данной технологии в широком диапазоне грунтовых и климатических условий и в условиях максимальной стесненности. Несмотря на большое разнообразие технологий устройства буроинъекционных свай (далее – БИС) общий процесс их выполнения сводится к бурению и промывке скважины требуемой глубины и диаметра и ее заполнению рабочим раствором, как правило, под избыточным давлением опрессовки.

Многими исследователями установлено, что в процессе устройства БИС, особенно с созданием по стволу избыточного давления опрессовки, происходит изменение напряженно-деформированного состояния (далее – НДС) окружающего грунтового массива и его физико-механических характеристик, что способствует повышению расчетного сопротивления грунта по боковой поверхности и под пятой сваи. Определение зависимостей и характера изменения НДС и физико-механических свойств окружающего грунта является *актуальной задачей* для корректной оценки несущей способности и осадки БИС, так как испытания показывают, что их фактическая несущая способность отличается от определенной по нормативным документам до 2 и более раз.

Степень разработанности темы исследования. Основной объем работ по разработке, совершенствованию, расчету и внедрению БИС в практику были выполнены следующими учеными: Бартоломей А.А., Бахолдин Б.В., Бобровский Я.М., Богомоллов В.А., Готман А.Л., Готман Н.З., Далматов Б.И., Дегиль Г.О., Джантимиров Х.А., Ильичев В.А., Конюшков В.В., Клейнер И.М., Лапшин Ф.К., Лушников В.В., Малинин А.Г., Малоян Э.Л., Мангушев Р.А., Мариничев М.Б., Маршалка А.Ю., Мишаков В.А., Мохаммад Х.М., Никитенко М.И., Никифорова Н.С., Нуждин Л.В., Нуждин М.Л., Перлей Е.М., Петухов А.А., Полищук А.И., Пономарев А.Б., Попова О.В., Пронозин Я.А., Прыгунов М.А., Раюк В.Ф., Самарин Д.Г., Самохвалов М.А., Сахаров И.И., Сбитнев А.В., Смолин Б.С., Соболевский Д.Ю., Соболевский Ю.А., Тарасов А.А., Тер-Мартirosян А.З., Тер-Мартirosян З.Г., Улицкий В.М., Фадеев А.Б., Федоров Б.С., Федоровский В.Г., Чернявский Д.А., Шалгинов Р.В., Шашкин А.Г., Шулятьев О.А., Barley A.D., Bayesteh H., Bruce D.A., Bustamante M., Elaziz A., Estephan R., Gomez J., Hanna T.H., Katzenbach R., Lahuta H., Lei W., Lizzi F., Naggar M., Ostermayer H.I., Pachla H., Soliman N., Spencer I.M., Telford W., Xanthakos P., Zhu X.R. и др.

Объект исследования: грунтовое основание, сложенное слабыми пылевато-глинистыми грунтами, с изготовленными в нем БИС, в том числе с созданием по стволу избыточного давления опрессовки.

Предмет исследования: изменение НДС и физико-механических свойств грунтового основания, происходящее в процессе устройства и статического нагружения БИС, в том числе устраиваемых под избыточным давлением опрессовки.

Цель диссертационной работы: выявление закономерностей изменения НДС и физико-механических характеристик грунтового основания, сложенного дисперсными, преимущественно слабыми пылевато-глинистыми грунтами, при устройстве БИС, в том числе с созданием избыточного давления опрессовки, для прогнозирования их несущей способности и осадки.

Задачи исследования:

- произвести анализ технологий устройства БИС малого диаметра (до 0,35 м) и выполнить усовершенствование технологии изготовления и конструктивного решения БИС, выполняемых в условиях дисперсных, преимущественно слабых пылевато-глинистых грунтов, которая обеспечит контролируемость технологических и геометрических параметров и повысит надежность свайных фундаментов;

- выявить на основе проведения экспериментальных исследований закономерности изменения физико-механических характеристик и НДС пылевато-глинистых грунтов при устройстве БИС малого диаметра, выполняемых с созданием избыточного давления опрессовки и без него;

- установить на основе проведения экспериментальных исследований характер изменения сопротивления грунта по боковой поверхности БИС малого диаметра в зависимости от технологических и геометрических параметров их устройства, от характеристик грунта;

- разработать усовершенствованную методику определения несущей способности БИС малого диаметра, выполняемых с избыточным давлением опрессовки, с учетом экспериментально выявленных закономерностей изменения сопротивления грунта по боковой поверхности и под пятой;

- разработать усовершенствованную методику определения осадки БИС малого диаметра, выполняемых с избыточным давлением опрессовки, с учетом экспериментально выявленных закономерностей изменения сопротивления грунта по боковой поверхности и под пятой, и его физико-механических характеристик.

Научная новизна работы состоит в разработке усовершенствованных методик определения несущей способности и осадки БИС малого диаметра с учетом выявленных закономерностей изменения физико-механических характеристик и НДС пылевато-глинистых грунтов, и в совершенствовании технологии устройства БИС, повышающей надежность свайного фундамента.

В рамках исследования получены следующие научные результаты:

- предложена усовершенствованная технология изготовления и конструктивного решения БИС применительно к основаниям, сложенным дисперсными, преимущественно слабыми пылевато-глинистыми грунтами, обеспечивающая контролируемость технологических и геометрических параметров, и повышающая надежность свайного фундамента;

- в результате выполненных экспериментальных исследований выявлены закономерности изменения физико-механических характеристик и НДС грунтового

основания при устройстве БИС малого диаметра, выполняемых с созданием избыточного давления опрессовки и без него;

– с учетом экспериментально выявленных закономерностей изменения сопротивления грунта по боковой поверхности и под пятой БИС малого диаметра и физико-механических характеристик грунта контактного слоя, разработаны усовершенствованные методики определения несущей способности и осадки БИС;

– определены параметры для моделирования БИС в специализированных геотехнических программных комплексах, используя подход, когда сваи задаются одномерным стержневым элементом, а взаимодействие сваи и грунта задается свайными интерфейсами (набором виртуальных пружин).

Теоретическая значимость работы заключается в экспериментальном выявлении закономерностей изменения физико-механических характеристик и НДС пылевато-глинистых грунтов при устройстве БИС малого диаметра, выполняемых в том числе с созданием избыточного давления опрессовки, и разработке аналитических решений по определению сопротивления грунта по боковой поверхности и под пятой свай.

Практическая значимость работы заключается в совершенствовании технологии изготовления БИС малого диаметра в дисперсных, преимущественно слабых пылевато-глинистых грунтах, которая повышает надежность, и совершенствовании методик определения несущей способности и осадки свай, учитывающей технологические особенности их устройства.

Методология и методы исследования:

Методологической основой работы послужили: анализ нормативной и научно-технической литературы, отражающей особенности устройства и работы БИС; проведение лабораторных и натурных экспериментальных исследований; использование известных и апробированных аналитических решений.

Личный вклад автора состоит: в совершенствовании технологии устройства БИС; в проведении экспериментальных исследований и выявлении зависимостей изменения физико-механических характеристик и НДС грунтового основания при устройстве БИС; в разработке усовершенствованных методик определения несущей способности и осадки БИС.

Положения, выносимые на защиту:

– обоснование усовершенствованной технологии устройства БИС в дисперсных, преимущественно слабых пылевато-глинистых грунтах, которая обеспечивает контролируемость технологических и геометрических параметров и повышает надежность свайного фундамента;

– результаты экспериментальных исследований по установлению закономерностей изменения физико-механических характеристик и НДС грунтового основания при устройстве БИС, выполняемых с созданием избыточного давления опрессовки и без него;

– результаты экспериментальных исследований по выявлению характера изменения сопротивления грунта по боковой поверхности и под пятой БИС в зависимости от технологических и геометрических параметров их устройства, а также от характеристик грунта;

– разработанная усовершенствованная методика определения несущей способности и осадки БИС малого диаметра, выполняемых с избыточным давлением опрессовки, с учетом экспериментально выявленных закономерностей изменения физико-механических характеристик и НДС пылевато-глинистых грунтов, в зависимости от технологических параметров устройства.

Достоверность защищаемых положений обеспечивается:

– использованием методов исследования, основанных на современных принципах механики грунтов;

– применением поверенных и оттарированных приборов, оборудования и средств измерений;

– применением сертифицированных и верифицированных программных комплексов, основанных на использовании метода конечных элементов;

– согласованностью теоретических данных с результатами экспериментальных исследований;

– результатами внедрения разработок на строительных объектах.

Апробация работы. Основные результаты работы были доложены и обсуждены на международных и всероссийских научных конференциях в Москве, Санкт-Петербурге, Тюмени, Перми, Новосибирске, Екатеринбурге (2018–2022 гг.).

Публикации. Основные научные результаты опубликованы в 8 научных работах, из которых 2 работы опубликованы в рецензируемых журналах согласно перечню ВАК, и 3 работы опубликованы в журналах, индексируемых в международных реферативных базах Scopus.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы. Общий объем составляет 161 страницу, включает 23 таблицы, 71 рисунок и фотографию, список литературы из 142 источников.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Согласно полученным научным результатам, диссертация соответствует п. 7, п. 10, п. 15 паспорта специальности **2.1.2. Основания и фундаменты, подземные сооружения.**

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность и общая характеристика диссертации.

В первой главе приведена история возникновения БИС и особенности их взаимодействия с грунтовым основанием.

На основе анализа технологий устройства БИС малого диаметра выделено две основные технологические операции их выполнения: бурение скважины и ее заполнение рабочим раствором, как правило, под избыточным давлением опрессовки. Важной составляющей устройства БИС является контроль их качества. Общий контроль качества включает регулирование скорости бурения и погружения буровых штанг в грунт, измерение удельного веса рабочего раствора и испытание контрольных образцов раствора. Однако, при бурении сложно оценить момент, когда промывочный раствор будет полностью вытеснен рабочим. В противном случае БИС может содержать включение бурового шлама.

БИС принято относить к висячим сваям, поэтому при их проектировании традиционным считается подход, который не учитывает вклад пяты в общую несущую способность. Однако, в последнее время многими авторами отмечается, что нельзя недоучитывать несущую способность по пяте БИС, так как в ряде случаев она может достигать 50% от общей величины.

Выявлено, что воздействие избыточным давлением опрессовки приводит к существенному изменению НДС и физико-механических характеристик околосвайного грунта: плотность может быть увеличена до 25%, влажность уменьшена до 30%, модуль деформации увеличен до 70%, удельное сцепление до 50%, угол внутреннего трения до 3°. Сопротивление грунта сдвигу по контакту «свая-грунт» увеличивается до 2 и более раз.

Произведен анализ подходов по определению несущей способности БИС. Установлено, что расчетные методы, как правило, разработаны для конкретной технологии и учитывают в основном ее специфические особенности. Большинство расчетных методов используют табличные данные сопротивления грунта по боковой поверхности, полученные на основе обработки статических испытаний. Используемые значения не учитывают глубины залегания слоя и величины избыточного давления опрессовки, а после устройства БИС требуется обязательное проведение статических испытаний.

В результате обзора литературы сформулированы *цель и задачи исследования*.

Во второй главе представлены результаты лабораторных экспериментов по выявлению и уточнению характера и особенностей взаимодействия БИС с глинистым грунтовым основанием при воздействии избыточным давлением опрессовки.

Фрагменты БИС диаметром 0,2 м и длиной $\approx 1,0$ м выполнялись герметичными из эластичной мембраны. Лоток состоял из двух симметричных частей размерами 1,2x0,6x1,0 м. В лотке осуществлялась послойная укладка суглинках мягкопластичной ($I_L \approx 0,50-0,60$) консистенции. Было выполнено 4 серии опытов: создание избыточного давления опрессовки в пределах 85-100 кПа на условной глубине 3,0 м, 5,0 м, 7,0 м и в пределах 150-160 кПа на условной глубине 3,0 м. Давление опрессовки создавалось нагнетанием избыточного количества раствора. На рисунке 1 представлены основные этапы проведения эксперимента.



Рисунок 1 – Основные этапы проведения лоткового эксперимента:

а – общий вид фрагмента БИС, *б* – заполнение лотка грунтом и размещение мессдоз, *в* – проведение статических испытаний, *г* – отбор образцов грунта.

На рисунке 2 представлено распределение радиальных напряжений в грунте.

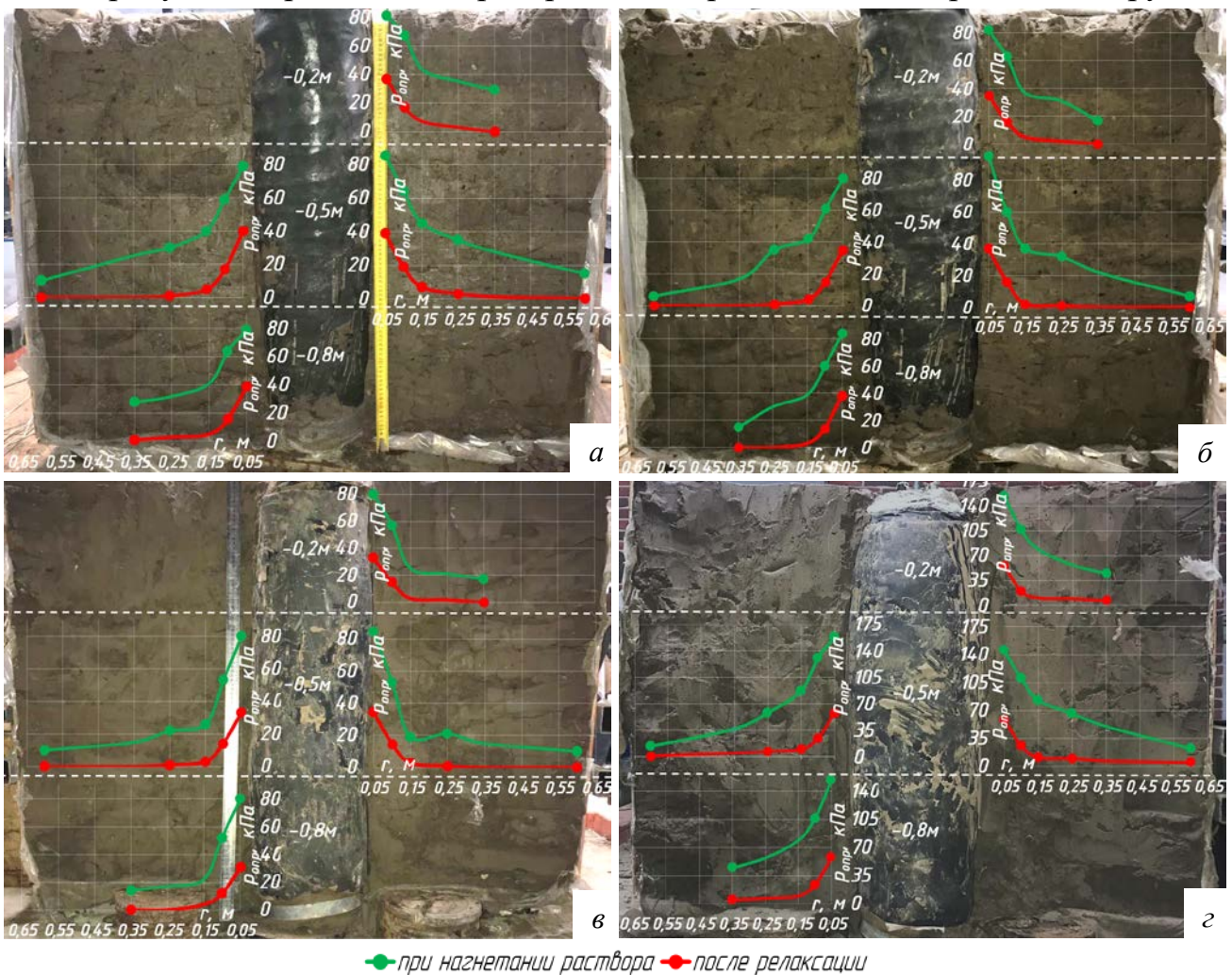


Рисунок 2 – Распределение радиальных напряжений при устройстве БИС:

избыточное давление опрессовки в пределах 85-100 кПа на условной глубине 3,0 м (а), 5,0 м (б), 7,0 м (в), в пределах 150-160 кПа на условной глубине 3,0 м (г).

Изменение радиальных напряжений в процессе устройства БИС (σ_r) и после релаксации напряжений ($\sigma_{r,ост}$) в зависимости от величины избыточного давления $p_{опр}$ (кПа), глубины h (м), начального радиуса скважины R_0 (м) и радиального удаления от

ствола сваи r (м) предложено выполнять на основании следующих полученных зависимостей, в основу которых положена «формула Лямэ»:

$$\sigma_r = p_{онп} \left[-0,029h - 0,459 + \frac{0,004h + 0,538}{(R_0 + r)^{0,5}} \right] \quad (1)$$

$$\sigma_{r,ост} = p_{онп} \left[-0,0015h - 0,028 + \frac{-0,0001h + 0,004}{(R_0 + r)^{2,5}} \right] \quad (2)$$

Используя зависимость (1) возможно оценивать зону изменения напряженного состояния грунта и подбирать шаг размещения БИС. Зависимость (2) позволяет оценивать изменение дополнительного обжимающего давления по длине сваи, что важно при расчете несущей способности БИС.

Максимальное значение плотности грунта получено в контактном слое ($\approx 0,2 d$) и в зависимости от глубины и величины избыточного давления опрессовки составило 4-7%. На основании многочисленных данных (в т.ч. полученных автором) предложена зависимость, характеризующая изменение плотности грунта контактного слоя в зависимости от начального значения ρ_0 , консистенции I_L , глубины расположения h и величины избыточного давления опрессовки $p_{онп}$:

$$\begin{aligned} \rho_{онп} = & -0,0001 + 3,982I_L + 7,45 \cdot 10^{-5}h + 0,392p_{онп} + 0,263\rho_0 + 0,131I_L^2 + 0,0003h^2 - 0,01p_{онп}^2 + \\ & + 0,320\rho_0^2 - 0,017I_Lh - 0,092I_Lp_{онп} - 1,847I_L\rho_0 + 0,0004hp_{онп} + 8,14 \cdot 10^{-5}h\rho_0 - 0,135p_{онп}\rho_0 \end{aligned} \quad (3)$$

Изменение влажности глинистого грунта при опрессовке скважины составляет 15-30%, поэтому изменение влажности контактного слоя грунта можно оценить как:

$$W_{онп} = (0,7 - 0,8)W_0 \quad (4)$$

Механические характеристики грунта контактного слоя после опрессовки скважины предлагается определять по следующему алгоритму:

- Вычисляется плотность скелета грунта и коэффициент пористости:

$$\rho_d = \frac{\rho_{онп}}{1 + 0,01 \cdot W_{онп}} \quad e_{онп} = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1 \quad (5)$$

- Используя $e_{онп}$ по выражениям, полученным в результате аппроксимации полиномов табличных данных, приведенных в таблицах А.2 и А.3 СП 22.13330, определяются значения $C_{онп}^{норм}$, $E_{онп}^{норм}$ и $\varphi_{онп}^{норм}$:

Для супесей:

$$C_{онп}^{норм} = 39,29e_{онп}^2 - 73,575e_{онп} + 44,99 \quad (6)$$

$$\varphi_{онп}^{норм} = -25,70e_{онп}^2 + 11,30e_{онп} + 28,50 \quad (7)$$

$$E_{онп}^{норм} = 85,714e_{онп}^2 - 175,429e_{онп} + 93,90 \quad (8)$$

Для суглинков:

$$C_{онп}^{норм} = 95,846 - 32,485I_L - 128,695e_{онп} + 12,406I_L^2 + 51,984e_{онп}^2 + 14,688I_Le_{онп} \quad (9)$$

$$\varphi_{онп}^{норм} = 26,595 - 2,842I_L + 5,287e_{онп} - 3,797I_L^2 - 11,508e_{онп}^2 - 6,561I_Le_{онп} \quad (10)$$

$$E_{онп}^{норм} = 80,978 - 9,497I_L - 127,134e_{онп} + 4,387I_L^2 + 58,532e_{онп}^2 - 4,804I_Le_{онп} \quad (11)$$

Для глин:

$$C_{онп}^{норм} = 188,032 - 86,520I_L - 232,678e_{онп} - 10,789I_L^2 + 82,850e_{онп}^2 + 81,540I_Le_{онп} \quad (12)$$

$$\varphi_{онп}^{норм} = 14,927 + 2,828I_L + 23,334e_{онп} - 10,610I_L^2 - 22,422e_{онп}^2 - 7,786I_Le_{онп} \quad (13)$$

$$E_{onn}^{норм} = 51,846 - 17,384I_L - 44,726e_{onn} + 1,907I_L^2 + 7,831e_{onn}^2 + 5,041I_L e_{onn} \quad (14)$$

• По зависимостям (6)-(14) определяются значения величин в природном состоянии $C_0^{норм}$, $E_0^{норм}$ и $\varphi_0^{норм}$, т.е. при $e=e_0$ и при $p_{опр}=0$.

• Находятся коэффициенты K_C , K_φ и K_E :

$$K_C = \frac{C_{опр}^{норм}}{C_0^{норм}} \quad K_\varphi = \frac{\varphi_{опр}^{норм}}{\varphi_0^{норм}} \quad K_E = \frac{E_{опр}^{норм}}{E_0^{норм}} \quad (15)$$

• Зная начальные значения характеристик по результатам ИГИ, вычисляют их значение в контактном слое после опрессовки избыточным давлением:

$$C_{опр} = C_0 \cdot K_C \quad \varphi_{опр} = \varphi_0 \cdot K_\varphi \quad E_{опр} = E_0 \cdot K_E \quad (16)$$

Предложенный алгоритм в среднем дает отклонение 15% с данными прямых лабораторных определений.

На рисунке 3 представлены результаты испытаний фрагментов БИС длиной 1,0 м. Несущая способность формировалась только за счет боковой поверхности, т.к. лоток имел круглое отверстие на дне и пята сваи не имела опирания. Анализ графиков позволяет выделить два участка их работы: *линейный* и *нелинейный*. На линейном участке графики первых 3-х

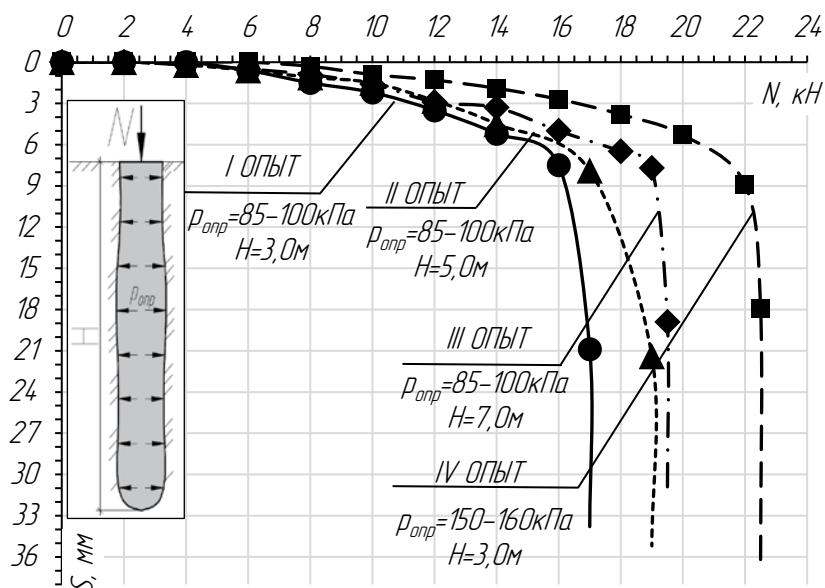


Рисунок 3 – Результаты испытаний фрагментов БИС.

опытов практически совпадают, а график IV опыта оказался выше и линейный участок продолжительнее, таким образом, продолжительность линейного участка работы БИС зависит только от величины избыточного давления опрессовки. На нелинейном участке с ростом глубины увеличивается предельная нагрузка, которую может воспринимать свая: при $p_{опр}=85-100$ кПа на условной глубине 3 м предельная нагрузка составила 16 кН, на глубине 5 м – 18,5 кН и 19,5 кН на глубине 7 м. Выявлено, что увеличение избыточного давления опрессовки позволяет повысить несущую способность БИС: при увеличении давления в 2 раза на условной глубине 3 м предельная нагрузка увеличилась на 30%.

Зная геометрические параметры БИС и величину предельной нагрузки, определены фактические значения сопротивления грунта по боковой поверхности в зависимости от глубины устройства и избыточного давления опрессовки (рис. 4).

Установлено, что величина фактического сопротивления грунта по боковой поверхности БИС может в половину отличаться от нормативной величины: при $p_{опр}=150-160$ кПа на условной глубине 3 м сопротивление по боковой поверхности

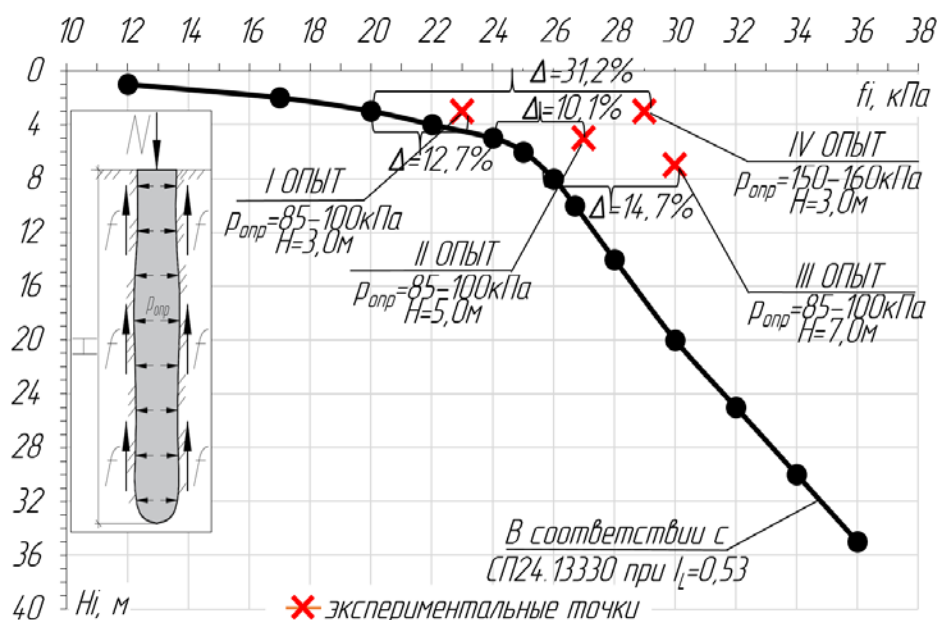


Рисунок 4 – Изменение сопротивления грунта по боковой поверхности БИС в зависимости от глубины устройства (H) и давления опрессовки ($p_{опр}$) для суглинка при $I_L=0,53$.

и показателя текучести, построенные по данным СП 24.13330, можно выделить нелинейный (до глубины 6 м) и условно линейный (с глубины 6 м) участки. Используем функцию следующего вида для их описания:

$$f(h, I_L) = A h^\alpha + k(h-6) \quad (17)$$

где A и α – амплитуда и показатель степени степенной функции, k – угловой коэффициент линейной части.

В результате получена зависимость для определения сопротивления глинистых грунтов по боковой поверхности:

$$f(h, I_L) = \begin{cases} e^{-3,95I_L+4,35} h^{0,414 I_L+0,22}; & \text{при } h \leq 6 \\ e^{-3,95I_L+4,35} 6^{0,414 I_L+0,22} + 5,9e^{-6I_L}(h-6); & \text{при } h > 6 \end{cases} \quad (18)$$

Допустив, что характер зависимости (18) при действии избыточного давления опрессовки не изменяется, а изменяются лишь величины показателя степени и амплитуды, в зависимости от значения остаточных напряжений получаем:

$$f(h, I_L, p_{опр} \neq 0) = \begin{cases} A_{опр}(I_L, p_{опр} \neq 0) \cdot h^{\alpha_{опр}}; & \text{при } h \leq 7 \\ A_{опр}(I_L, p_{опр} \neq 0) \cdot 7^{\alpha_{опр}} + 5,9e^{-6I_L}(h-7); & \text{при } h > 7 \end{cases} \quad (19)$$

$$A_{опр}(I_L, p_{опр} \neq 0) = e^{-3,95I_L+4,35+1,19 \sigma_{r,ост}^2-0,06\sigma_{r,ост}+0,4} \quad (20)$$

$$\alpha_{опр}(I_L, p_{опр} \neq 0) = 0,414 I_L + 0,1 \quad (21)$$

где $\sigma_{r,ост}$ определяется в соответствии с выражением (2).

Использование формулы (19) обосновано для глинистых грунтов при $I_L > 0,4$ и $p_{опр} \leq 400$ кПа. Для глинистых грунтов другой консистенции и большего избыточного давления опрессовки требуется проверка при проведении дополнительных экспериментальных исследований.

составило 29 кПа при нормативном 20 кПа. Выявлено, что на величину сопротивления грунта по боковой поверхности БИС при $I_L = const$ влияет как глубина (аналогично СП 24.13330), так и величина давления опрессовки (СП 24.13330 не учитывается).

Анализируя графики сопротивления грунта по боковой поверхности в зависимости от глубины

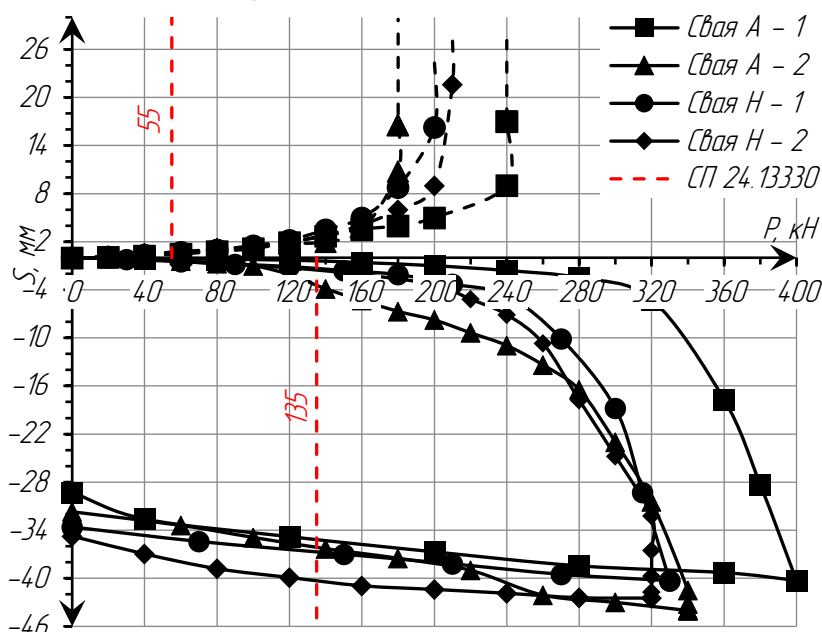
В третьей главе приведены результаты полевых исследований. На площадке №1 было испытано 9 БИС (рис.5) длиной 6,0 м начальным диаметром 0,2 м и 0,34 м, выполненных по технологии с теряемым (А-1, А-2) и извлекаемым сердечником (Н-1–Н-6) без создания избыточного давления опрессовки, и буронабивной сваи (БН). Результаты испытаний представлены на рисунке 6. Грунтовые условия характеризуются наличием техногенных грунтов в верхней зоне мощностью до 1,6 м, суглинка мягкопластичного (мощностью до 5,0 м, $\rho=1,95\text{г/см}^3$, $W=24\%$, $e=0,74$, $I_L=0,53$, $c=9\text{кПа}$, $\varphi=22^\circ$, $E=8,8\text{МПа}$), подстилаемым песком мелким средней плотности ($\rho=2,02\text{г/см}^3$, $W=24\%$, $e=0,60$, $\varphi=37^\circ$, $E=17,9\text{МПа}$).



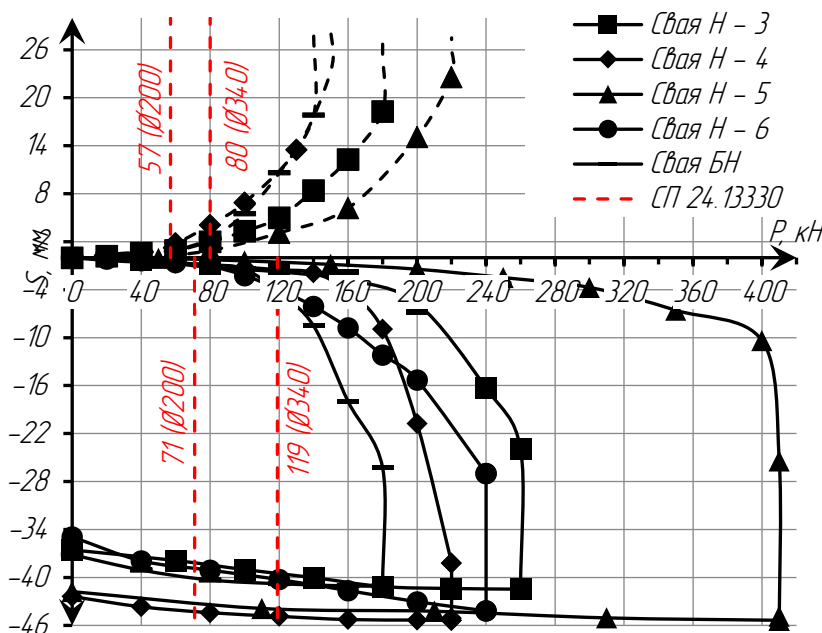
Рисунок 5 – Схема расположения БИС на площадке №1.

Графики А-2, Н-1 и Н-2 практически совпадают, что доказывает то, что технологическая операция по извлечению дорогостоящего сердечника и погружению армирующего элемента не снижает несущей способности БИС. Свая А-1 имеет несущую способность выше, что обусловлено уширением по стволу в результате заполнения полости в грунте.

В случае опирания БИС в слой песка мелкого средней плотности выделено 3 характерных участка работы: *начальный линейный участок*, который сохраняется до нагрузки 25–30% от максимальной при осадке до 1,0 мм (малая величина осадки обусловлена упругим сжатием ствола). *Второй линейный участок*, который сохраняется до нагрузки 60–70% от максимальной при осадке в конце 3,5–11,0 мм. *Нелинейный участок* с выраженной нелинейной зависимостью осадки от нагрузки. В случае опирания БИС в слой суглинка мягкопластичного отмечено 2



а



б

Рисунок 6 – Результаты испытаний БИС на площадке №1: опирание свай в слой песка мелкого средней плотности (а) и суглинка мягкопластичного (б).

характерных участка работы: *линейный* (сохраняющийся до нагрузки 45–60% от максимальной при осадке до 2,0 мм) и *нелинейный* участки.

Установлено, что фактическая несущая способность БИС при действии выдергивающей и вдавливающей нагрузки превосходит до 3,5 раз несущую способность, определенную по СП 24.13330.

Экспериментально выявлено, что пята БИС вносит существенный вклад в общую несущую способность: до 45% в случае опирания в песчаный слой грунта и до 35% в случае опирания в пластичный глинистый грунт.

При откопке БИС выявлено увеличение плотности контактного слоя грунта до 10% в пределах залегания техногенных грунтов и до 5% в пределах залегания глинистых грунтов за счет спрессовывания частиц грунта и проникновения цементного раствора в его поры. Установлено повышение модуля деформации грунта контактного слоя до 21% и удельного сцепления до 11%.

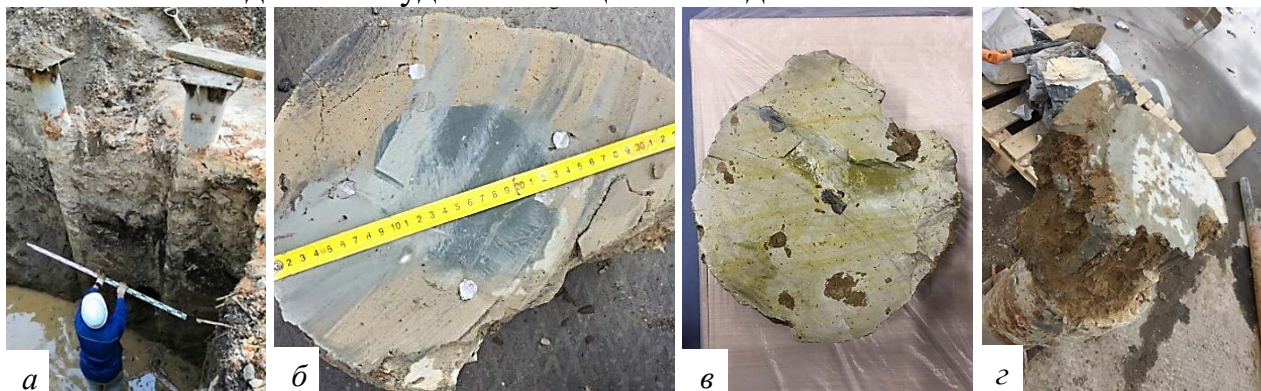


Рисунок 6 – Откопка БИС (а) и дефекты их стволов:

б - перемешивание раствора с грунтом по периметру свай; *в* - вклинивание грунта в тело свай; *г* - обильное вклинивание грунта у устья скважины.

Выявлены дефекты стволов БИС (рис. 6 б-г): перемешивание раствора с грунтом по периметру, вклинивание грунта в тело свай, обильное вклинивание грунта у устья скважины. Дьяконов И.П. выделяет следующие основные дефекты, характерные для буровых свай: вклинивание грунта в тело свай, изменение сечения сваи по высоте, фильтрация воды через тело свай, расслоение бетонной смеси по высоте и т.д.

В результате анализа дефектов и причин их образования разработан усовершенствованный способ устройства БИС для дисперсных, преимущественно слабых пылевато-глинистых грунтов. Технический результат усовершенствованного способа состоит в повышении технологичности и качества устройства БИС, в повышении надежности свайного фундамента. Результат достигается обеспечением заданного диаметра свай по всей длине за счет использования соединительных муфт, оснащенных винтовыми лопастями одного с долотом диаметром; использованием разработанных автором рабочих растворов, обладающих высокой плотностью, низкой усадкой и высокой прочностью; сокращением расхода промывочных и рабочих растворов и контролем полного заполнения скважины рабочим составом посредством применения окрашенной «сигнальной пробки», сущность которой заключается в использовании красящего пигмента, добавляемого при первом замесе рабочего состава; контролем и регулированием величины давления и времени опрессовки скважины посредством установки в устье герметичной быстросъемной «тампонажной обоймы», за счет чего достигается преднапряжение основания, повышается сопротивление грунта по боковой поверхности и пяте свай (рисунок 7).

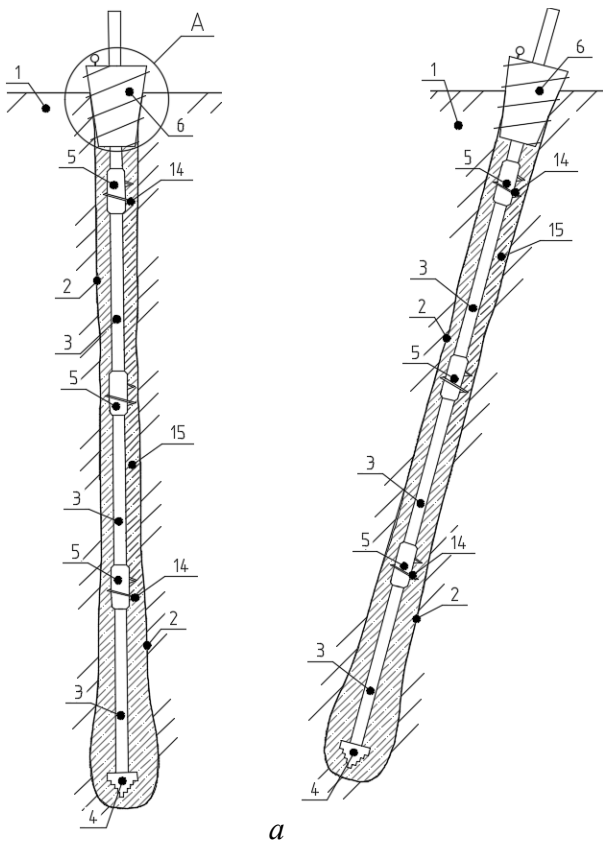


Рисунок 7 – Общий вид устраиваемой сваи (а) и «тампоной обоймы» (б):
 1 – основание, 2 – скважина, 3 – анкерные тяги, 4 – долото, 5 – соединительная муфта, 6 – «тампоная обойма», 7 – корпус обоймы, 8 – реборда, 9 – металлическая трубка с маслом, 10 – мембрана, 11 – манометр, 12 – труба, 13 – внутренняя коническая резьба, 14 – буровые винтовые лопасти, 15 – тело сваи

По усовершенствованной технологии было выполнено устройство и испытание 3-х БИС длиной 14 м начальным диаметром 0,2 м на площадке №2. Свая Б-1 выполнялась без избыточного давления, свая Б-2 с созданием избыточного давления опрессовки 200 кПа, свая Б-3 - 350 кПа. Результаты представлены на рисунке 8. Грунтовые условия характеризуются наличием с поверхности до глубины 8 м суглинка мягкопластичного ($\rho=1,78\text{г/см}^3$, $W=39,2\%$, $e=0,71$, $I_L=0,63$, $E=4,5\text{МПа}$, $c=12\text{кПа}$, $\varphi=13^\circ$), далее залегает суглинок тугопластичный ($\rho=1,86\text{г/см}^3$, $W=29,6\%$, $e=0,60$, $I_L=0,32$, $E=7,8\text{МПа}$, $c=23\text{кПа}$, $\varphi=19^\circ$).

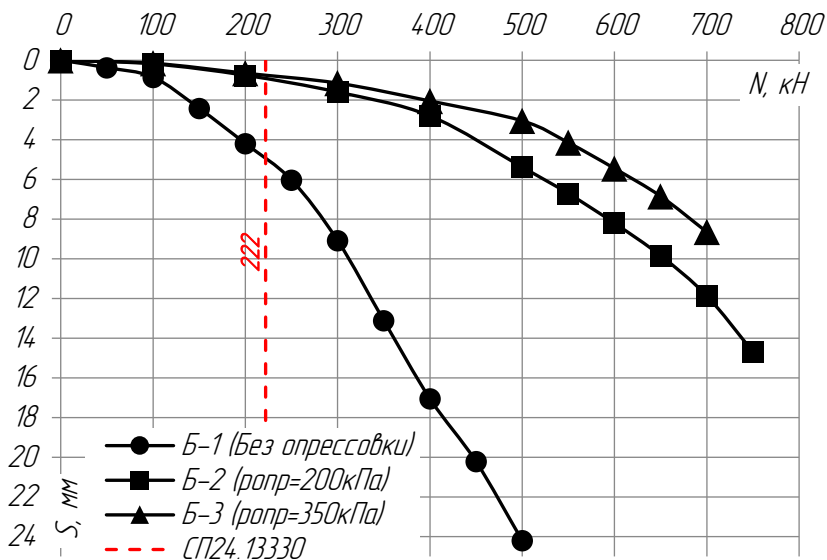


Рисунок 8 – Результаты испытаний свай Б-1 – Б-3.

Установлено, что опрессовка скважины позволяет повысить несущую способность БИС. За несущую способность принималась нагрузка при допустимой дополнительной осадке 10 мм, определенной исходя из технического состояния объекта: для сваи Б-1 составила ≈ 300 кН, сваи Б-2 650 кН, сваи Б-3 ≈ 700 кН. Прирост несущей способности свай Б-2 и Б-3 по отношению к Б-1 составил 55% и 60%. Прирост несущей способности сваи Б-3 к Б-2-10% при увеличении давления в 1,8 раз.

При опрессовке скважины избыточным давлением отмечено увеличение первого линейного участка работы: для сваи Б-2 он сохраняется до приложения нагрузки 40% от максимальной и 55% для сваи Б-3 при осадке в пределах 2 мм. Малая

величина осадки объясняется преимущественным упругим сжатием материала ствола сваи. Выявлено, что на характер первого линейного участка работы влияет величина давления опрессовки и при ее увеличении осадка уменьшается, а продолжительность участка возрастает. Установлено, что фактическая несущая способность до 3,5 превосходит определенную по СП 24.13330, при том, что срыв свай не наступил. Сделан вывод, что нормативная методика определения несущей способности БИС не позволяет получать достоверных результатов и не учитывает эффекта опрессовки.

В четвертой главе изложена разработанная усовершенствованная методика определения несущей способности и осадки БИС, выполняемых с созданием избыточного давления опрессовки, с учетом экспериментально выявленных зависимостей.

Несущая способность БИС определяется, используя известный принцип о раздельной работе грунта по боковой поверхности и по пяте:

$$F_d = u \sum_{i=1}^n \gamma_{cf,i} f_i h_i + \gamma_{cR} RA \quad (22)$$

Значения коэффициентов $\gamma_{cf,i}$ и γ_{cR} следует принимать равными 1,0.

Для определения геометрических параметров БИС в результате опрессовки скважины обосновано использование аналитической зависимости *Abd Elaziz and El Naggat* по изменению диаметра сваи от количества нагнетаемого рабочего раствора ($V_{смеси}$) в скважину:

$$r_c = r_0 \left(1 + 0,35 \frac{V_{смеси} - V_{скв.}}{V_{скв.}} \right) \quad (23)$$

Сопротивление грунта по боковой поверхности БИС определяется в соответствии с полученным уравнением (19). Для более точного определения данного параметра дополнительно предложено учитывать остаточное давление бетонной смеси на стенки скважины ($\sigma_{b,i}$) и дополнительные обжимающие напряжения ($\sigma_{p,i}$), вызванные давлением рядом расположенных фундаментов мелкого заложения.

С учетом исследований Мамонова В.М. и Ерошкина П.М. остаточное давление бетонной смеси на стенки БИС $\sigma_{b,i}$: определяется как:

$$\sigma_{b,i} = 0,2 p_{бет} \quad (24)$$

где $p_{бет}$ – давление бетонной смеси на стенки скважины в момент устройства.

Параметр $\sigma_{b,i}$ используется только в пределах ствола БИС, где давление бетонной смеси превышает горизонтальное бытовое давление грунта.

Обжимающие напряжения $\sigma_{p,i}$ на сваи, устраиваемые под плитой фундамента определяются как:

$$\sigma_{p,i} = \frac{g}{1-g} \sigma_{zp} \quad (25)$$

В случае устройства вне контура фундамента:

$$\sigma_{p,i} = (\sigma_3 \cos \alpha + \sigma_1 \sin \alpha) \quad (26)$$

где σ_{zp} – напряжения от действия фундамента на рассматриваемой глубине, σ_1 и σ_3 – главные напряжения от действия фундамента, определяемые по Митчелу.

Таким образом, в формуле (19) следует использовать радиальные обжимающие напряжения $\sigma_{r,i}$, определяемые как:

$$\sigma_{r,i} = \sigma_{r осм,i} + \sigma_{b,i} + \sigma_{p,i} \quad (27)$$

Профессором Тер-Мартirosяном З.Г. показано, что сопротивление грунта под пятой сваи зависит не только от прочностных характеристик грунта и глубины, но также и от деформационных характеристик. Грунт сопротивляется перемещению в

стороны как за счет сил трения и сцепления, так и в результате упругого сжатия, что приводит к возникновению упругого отпора грунта. Исходя из этого при расчете сопротивления им предложено дополнительно учитывать величину упругого отпора:

$$R = p_2 \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} + \frac{2c \cdot \cos \varphi + 2\gamma H \xi_0 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (28)$$

где p_2 – реактивное напряжение, оказывающее сопротивление боковому расширению грунта при нагружении сваи, кПа.

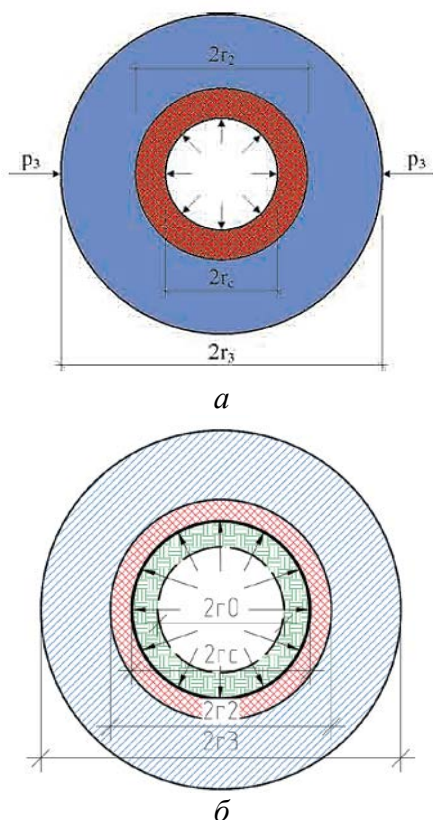


Рисунок 9 – Расчетная схема к определению НДС вокруг сваи: *а* – для забивной сваи по Тер-Мартirosяну З.Г, *б* – для БИС.

Напряжение p_2 определяется из рассмотрения НДС грунтового цилиндра с внутренним диаметром $2r_c$, равным диаметру сваи, и внешним диаметром $2r_3 = 2kr_c$ (где $k = 3..6$ – коэффициент влияния). Расчетная схема представлена на рисунке 9а. Решение по указанной схеме известно как «решение Лямэ» в перемещениях. В силу технологических особенностей устройства БИС на первом этапе формируется скважина диаметром $2r_0$, при этом грунт разбуривается, и буровой шлам удаляется из скважины. На втором этапе происходит нагнетание рабочего раствора под избыточным давлением, что способствует формированию окончательного диаметра сваи $2r_c$. Диаметр $2r_2$ формируется в результате увеличения диаметра скважины за счет упругого отжатия грунта. Преобразованная для БИС расчетная схема представлена на рисунке 9б. Приращение радиуса $u(r)$ в решении «Лямэ» за счет упругого отжатия грунта определяется из допущения о равенстве объемов грунта в условном полем цилиндре с толщиной стенки $(r_c - r_0)$ и условном полем цилиндре с толщиной стенки $(r_2 - r_c)$. В результате получаем:

$$p_2 = \frac{(Ek^2 - E)\sqrt{2z^2 - 1} + [(2p_3 - E)k^2 + E]z}{z[(k^2 - 1)z + k^2 + 1]} \quad (29)$$

где $z = (1 + 0,35 \frac{V_{смеси} - V_{скв.}}{V_{скв.}})$, k – коэффициент влияния, назначаемый в зависимости от глубины погружения, вида грунта и величины давления опрессовки.

Преимуществом формул (28)-(29) является возможность учета количества раствора, нагнетаемого в скважину при устройстве БИС, что не учитывается нормами. Предложенный подход определения сопротивления грунта под пятой БИС дополнительно позволяет получать данные для глинистых грунтов при $I_L > 0,6$.

С учетом экспериментально выявленных особенностей взаимодействия БИС с грунтовым основанием определение осадки предложено выполнять в соответствии с исследованиями Акулецкого А.С. и профессора Тер-Мартirosяна З.Г. В качестве основных допущений принято, что свая имеет постоянный диаметр по длине, деформирование грунта происходит за счет сдвиговых деформаций, объемные деформации грунта не учитываются, не учитывается сжатие ствола сваи.

Осадка пяты сваи в упругопластической постановке определяется как:

$$S_R = p_R \cdot \frac{\pi r (1 - \vartheta_R) \omega K_l}{4 G_R} \cdot \frac{p_R^*}{p_R^* - p_R} \quad (30)$$

где ω – коэффициент формы, принимаемый согласно профессору Готману А.Л. для свай круглого сечения равным 1,0, K_l – коэффициент, учитывающий глубину расположения пяты сваи, $K_l < 1$.

Алгоритм определения осадки представлен на рисунке 10.

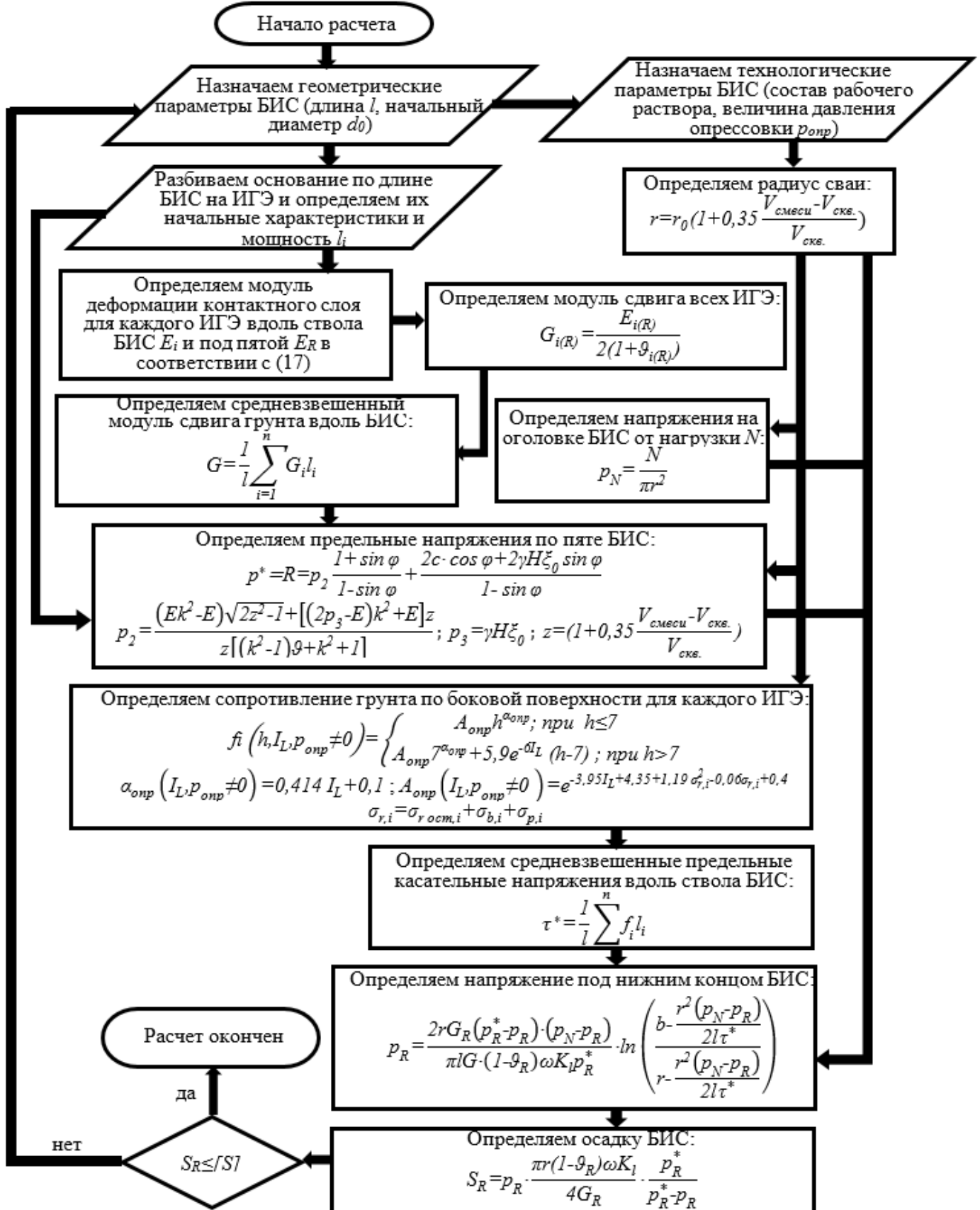


Рисунок 10 – Блок-схема к определению осадки БИС.

На рисунке 11 представлено сравнение экспериментальных значений осадки БИС, выполненных под избыточным давлением опрессовки, и вычисленных аналитически по (30).

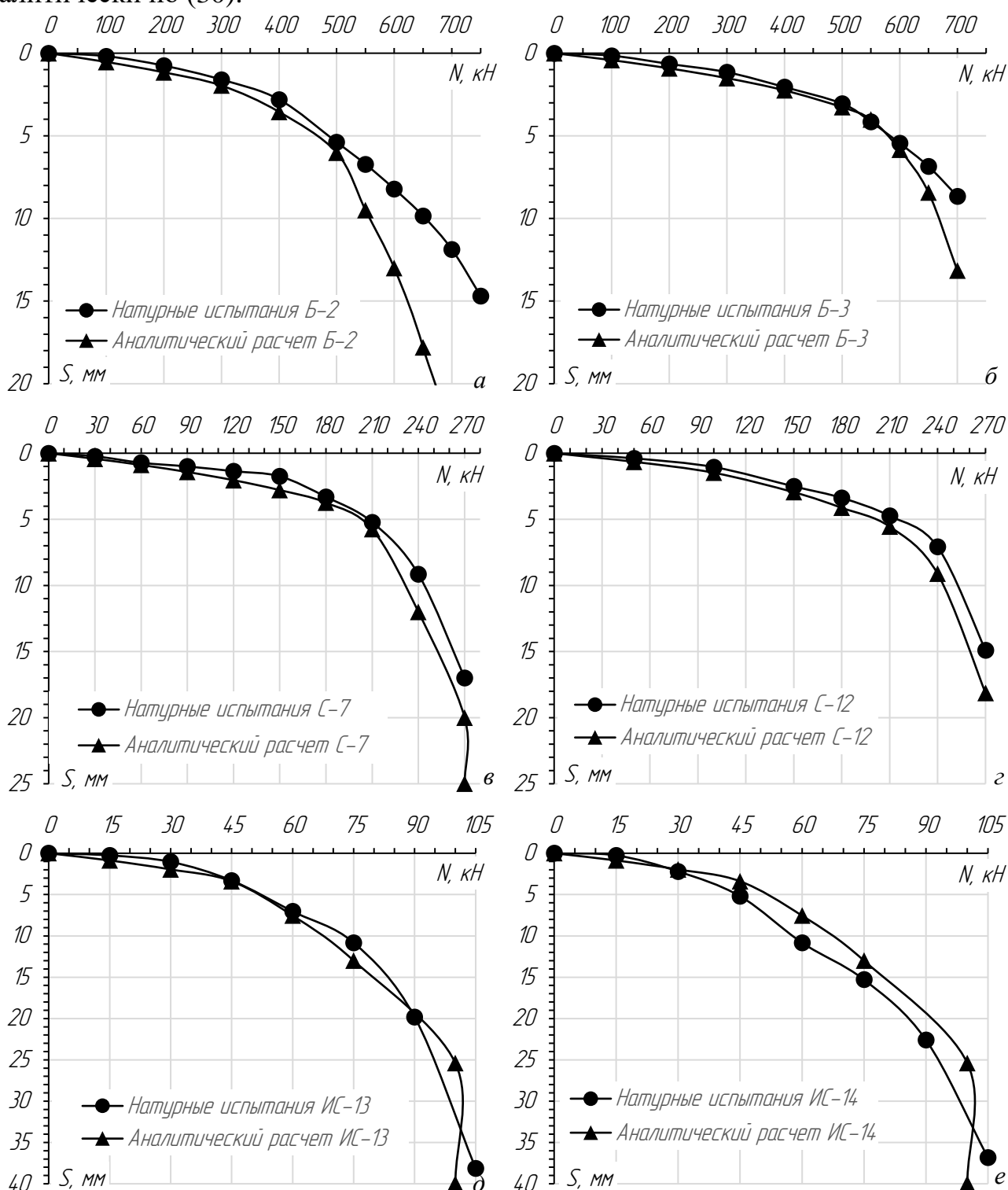


Рисунок 11 – Графики зависимости осадки от нагрузки для БИС:

а, б – сопоставление с испытаниями автора, *в, г* – сопоставление с испытаниями Тарасова А.А., *д, е* – сопоставление с испытаниями Петухова А.А.

Усовершенствованная методика позволяет получать кривую «нагрузка-осадка», повторяющую характер экспериментальной кривой. Среднее отклонение от фактических значений составляет до 25% в запас несущей способности БИС.

Были определены параметры для моделирования БИС, выполняемых с созданием избыточного давления опрессовки, используя подход, когда сваи задаются

одномерным стержневым элементом, а взаимодействие свай и грунта свайными интерфейсами (набором виртуальных пружин). Установлено, что наибольшей сходимости удается получить при выделении контактной области вокруг стержневого элемента размерами в плане $(2..3)dx(2..3)d$ и ее разбиении на гексаэдрические конечные элементы размерами $1,5d$. В модель следует вводить свайные интерфейсы с учетом измененных характеристик грунта контактного слоя. Расчетное сопротивление по боковой поверхности следует определять в соответствии с выражениями (19) и (27). Расчетное сопротивление грунта под пятой определяется по формуле (28), осадка БИС определяется по (30). Данный подход позволяет существенно сократить разницу с результатами натуральных испытаний: расхождение в осадке в среднем составляет до 35%, что, учитывая простоту такого подхода моделирования, может успешно применяться на практике.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенного исследования в соответствии с поставленной целью сформулированы следующие основные научные выводы, основанные на получении новых теоретических и практических знаний:

1. Усовершенствована технология устройства БИС малого диаметра применительно к основаниям, сложенным дисперсными, преимущественно слабыми пылевато-глинистыми грунтами. Усовершенствование достигается:

- сокращением расхода промывочных и рабочих растворов, а также контролем полного заполнения скважины рабочим составом посредством применения окрашенной «сигнальной пробки»;

- обеспечением заданного диаметра свай по всей длине за счет соединительных муфт, оснащенных винтовыми лопастями одного с долотом диаметра;

- контролем и регулированием требуемой величины давления и времени опрессовки скважины посредством установки в устье герметичной быстросъемной «тампонажной обоймы».

Конструктивное решение и технологические особенности разработанного способа позволяют исключить образование дефектов, характерных для БИС, что повышает надежность свайного фундамента.

2. На основе экспериментальных исследований получена аналитическая зависимость для определения возникающих при устройстве БИС дополнительных начальных и остаточных радиальных напряжений в грунтовом массиве с учетом глубины устройства, величины избыточного давления опрессовки и начальных геометрических параметров скважины. Установлено, что при избыточном давлении опрессовки свыше 200 кПа зона изменения напряженного состояния в радиальном направлении распространяется менее интенсивно, что приводит к концентрации напряжений на стенках скважины с возможным последующим образованием гидроразрывов в слабых грунтах. Зависимость позволяет оценивать дополнительное давление, вызывающее обжатие ствола БИС, которое существенно изменяется по длине, и точнее определять несущую способность и осадку БИС. Разработан алгоритм определения механических характеристик грунта, основанный на нахождении коэффициентов, показывающих отношение характеристик контактного слоя грунта до и после устройства БИС.

3. На основе экспериментальных исследований установлено, что величина сопротивления грунта по боковой поверхности БИС существенно повышается в

результате формирования в грунте остаточных радиальных напряжений, вызывающих дополнительное обжатие ствола, что действующими нормами не учитывается. Для глинистых грунтов при $I_L > 0,4$ получена зависимость для определения сопротивления грунта по боковой поверхности, учитывающая избыточное давление опрессовки $p_{опр} \leq 400$ кПа. Для определения сопротивления грунта под пятой БИС предложено использование зависимости, учитывающей не только прочностные, но и деформационные характеристики грунта, а также избыточное количество раствора, нагнетаемого в скважину. Предложенный подход дополнительно позволяет получать сопротивление грунта под пятой БИС для глинистых грунтов при $I_L > 0,6$. При устройстве БИС без опрессовки избыточным давлением, определенные по полученным зависимостям сопротивление грунта по боковой поверхности и под пятой соответствуют рекомендуемым нормами данным.

4. На основе выполненных экспериментально-теоретических исследований разработана усовершенствованная методика определения несущей способности БИС, выполняемых с опрессовкой избыточным давлением. Для определения геометрических параметров БИС обосновано использование аналитической зависимости *Abd Elaziz and El Naggat* по изменению диаметра сваи от количества нагнетаемого раствора. Для определения сопротивления грунта по боковой поверхности предложена экспериментально-теоретическая зависимость, учитывающая возникающие от воздействия избыточным давлением опрессовки и давления бетонной смеси остаточные радиальные напряжения и дополнительные обжимающие напряжения, вызванные давлением зданий и сооружений на основания под фундаментами мелко заложения. Сопротивление грунта под пятой БИС предложено определять в зависимости от прочностных и деформационных характеристик, с учетом избыточного количества нагнетаемого в скважину раствора, и коэффициента влияния, назначаемого в зависимости от глубины погружения нижнего конца сваи и величины давления опрессовки. Использование данной методики дает хорошую сходимость с экспериментальными данными: в среднем отклонение в рабочем диапазоне нагрузок составляет до 20%, обеспечивая запас по несущей способности.

5. Используя подход о раздельной работе грунта по боковой поверхности и по пяте сваи, на основе экспериментально-теоретических исследований разработана усовершенствованная методика определения осадки БИС, выполняемых с опрессовкой избыточным давлением. Предложенная методика позволяет учитывать выявленные зависимости изменения сопротивления грунта по боковой поверхности и под пятой БИС в зависимости от технологических особенностей их устройства. Дополнительно учитываются значения деформационных характеристик грунта кантатного слоя, измененных в результате воздействия избыточным давлением опрессовки и определяемых в соответствии с разработанным алгоритмом. Методика позволяет получать кривую «нагрузка-осадка», повторяющую характер экспериментальной кривой, при этом средние величины отклонений от фактических значений составляют до 25% в запас несущей способности БИС.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы исследования: изучение характера взаимодействия БИС в свайном фундаменте, устраиваемых с созданием избыточного давления опрессовки с песчаными основаниями, а также с пылевато-глинистыми грунтами при $I_L < 0,4$ и избыточном давлении опрессовки $p_{опр} > 400$ кПа.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий:

1. **Salnyi, I.S.**, Pronozin, Ya. A., Karaulov, A.M. Interaction of drill-injection piles with the surrounding soil. Magazine of Civil Engineering. 2021. 104(4). Article No. 10407. DOI: 10.34910/MCE.104.7.

2. **Сальный И.С.** Растворы для формирования буроинъекционных свай / **И.С. Сальный**, Я.А. Пронозин, Л.А. Бартоломей [и др.] // Construction and Geotechnics. – 2020. – Т. 11. – № 4. – С. 69-80. – DOI 10.15593/2224-9826/2020.4.06.

Статьи, опубликованные в журналах, индексируемых в международных реферативных базах Scopus, Web of Science и др.

3. **Salnyi, I.S.** Experience in application of drilled injection piles for building and structure strengthening / **I.S. Salnyi**, Y.A. Pronozin, J.V. Naumkina, A.M. Karaulov // Journal of Physics: Conference Series : 2, Perm, 26–28 мая 2021 года. – Perm, 2021. – P. 012010. – DOI 10.1088/1742-6596/1928/1/012010.

4. **Salnyi, I.S.** "Normal" bored injection pile with increased bearing capacity / Y.A. Pronozin, **I.S. Salnyi**, D.V. Volosyuk // Proceedings of GFAC 2019, Saint Petersburg, 06–08 февраля 2019 года. – Saint Petersburg: Taylor & Francis Group, 2019. – P. 296-300. – DOI 10.1201/9780429058882-58.

5. **Salnyi, I.S.** Experience in strengthening foundations and foundations on technogenic soils / I. Salnyi, M. Stepanov, A. Karaulov // E3S Web Conf. 363 02004 (2022). – DOI: 10.1051/e3sconf/202236302004.

Статьи, опубликованные в других журналах и изданиях:

6. **Сальный И.С.** Использование буроинъекционных свай в условиях распространения многолетнемерзлых грунтов / Я.А. Пронозин, А.П. Малышкин, **И.С. Сальный** // Современные исследования трансформации криосферы и вопросы геотехнической безопасности сооружений в Арктике, Салехард, 03–12 ноября 2021 года. – Салехард: Б. и., 2021. – С. 353-356. – DOI 10.7868/9785604610848095.

7. **Сальный И. С.** Влияние технологии изготовления и типа армирования буроинъекционных свай на их несущую способность / **И.С. Сальный**, Я.А. Пронозин, Д.В. Волосюк // Информационные технологии в обследовании эксплуатируемых зданий и сооружений : Материалы 18-ой Международной научно-практической конференции, Новочеркасск, 22 октября 2019 года. – Новочеркасск: ООО «Лик», 2019. – С. 183-186.

8. **Сальный И. С.** Определение несущей способности свай типа «Атлант» / Я.А. Пронозин, **И.С. Сальный**, Е.П. Брагарь // Нефть и газ: технологии и инновации : Материалы Национальной научно-практической конференции, Тюмень, 07–08 ноября 2019 года / Отв. редактор П.В. Евтин. – Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2019. – С. 135-138.