

На правах рукописи

ПОВАРНИЦЫН Сергей Викторович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ
СООРУЖЕНИЯ СКВАЖИН В ПЕСЧАНЫХ И ГЛИНИСТЫХ ГРУНТАХ**

Специальность: 25.00.14. – Технология и техника геологоразведочных работ

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Томск – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Рудаченко Александр Валентинович

Официальные оппоненты: Рябчиков Сергей Яковлевич
доктор технических наук, профессор
Национального исследовательского
Томского политехнического университета,
профессор кафедры Бурения скважин

Ламбин Анатолий Иванович
кандидат технических наук, доцент
Иркутского государственного технического
университета,
доцент кафедры Нефтегазового дела

Ведущая организация: Сибирский федеральный университет,
г. Красноярск

Защита диссертации состоится «27» марта 2013 г. в 15-00 часов на заседании диссертационного совета Д212.269.07 при Национальном исследовательском Томском политехническом университете по адресу: 634004 г. Томск, пр. Ленина, 2а, строение 5, корпус 20, ауд. 504.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Автореферат разослан «___» февраля 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д212.269.07,
доктор геол.минер. наук, профессор

С. И. Арбузов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. В настоящее время существует необходимость в бурении наклонных и горизонтальных скважин в горных породах I–IV категории по буримости (далее – грунтах). Область их применения включает геологоразведочные, инженерно-геологические, геофизические скважины, а также технические скважины для последующей прокладки трубопроводов и коммуникаций.

При бурении скважин в грунтах наибольшее распространение получил способ вращательного бурения. Повышение эффективности сооружения наклонных и горизонтальных скважин заключается в совершенствовании технологии бурения и породоразрушающего инструмента, а также в разработке метода расчета породоразрушающего инструмента (ПРИ) вращательно-раскатывающего действия для бурения скважин в песчаных и глинистых грунтах.

Значительный вклад в развитие способов сооружения наклонных и горизонтальных скважин внесли работы ученых: Б. И. Воздвиженского, В. С. Владиславлева, С. С. Сулакшина, Н. В. Соловьева, Б. М. Ребрика, И. С. Афанасьева, А. С. Волкова, К. Л. Ларина, Ф. А. Шамшева, А. С. Юшкова, К. В. Иогансена, П. П. Бородавкина, И. И. Мазура, Ю. И. Спектора, Б. Ф. Белецкого и др. В этой области много сделали научные институты, ВУЗы и предприятия: ВНИИСТ, РГУНГ им. И. М. Губкина, ТПУ, УГТНУ и др.

Существует большое разнообразие способов и реализующих их устройств для бурения наклонных неглубоких скважин в грунтах. Данные способы достаточно эффективны и широко используются, но не лишены недостатков, к которым относятся: необходимость закрепления скважин в неустойчивых слабых грунтах, незначительная глубина бурения, высокие энергозатраты, низкая скорость бурения, трудоемкость вспомогательных операций, большое количество спуско-подъемных операций, низкое качество получаемой геологической информации.

Наиболее перспективным способом бурения горизонтальных скважин является горизонтально-направленное бурение (ГНБ). Однако, способ ГНБ имеет ряд ограничений, главным из которых является высокая стоимость работ за счет использования бурового раствора. Увеличение эффективности ГНБ достигается за счет многоэтапного расширения скважины, бурения пилот-скважин с противоположных площадок, использования ПРИ вращательно-раскатывающего для бурения пилот-скважины и последующего ее расширения.

Совершенствование ПРИ невозможно без совершенствования метода расчета силовых и деформационных параметров его взаимодействия с грунтом.

Решению комплекса вопросов, связанных с проблемой определения параметров силового взаимодействия ПРИ с грунтом, посвящено большое количество исследований, о чем свидетельствуют работы В. Ф. Горбунова, А. Ф. Эллера, В. В. Аксенова, А. Н. Зеленина, Н. Г. Домбовского, Ю. В. Ветрова, О. Д. Алимова, В. П. Горячкина, В. Lapos, D. N. Chapman, M. Marshall, Г. Г. Болдырева и др.

Экспериментальные исследования по определению силовых характеристик и деформационных процессов в грунтах в области восстановления трубопроводов бестраншейным способом проведены В. Lapos. Экспериментальное исследование деформационных процессов, возникающих в результате взаимодействия щитового проходческого агрегата с грунтом, выполнено D. N. Chapman и M. Marshall.

Вопросам моделирования деформационных процессов в грунтах посвящены работы В. В. Алешина, В. Е. Селезнева, Г. Г. Болдырева, G. Lasey, E. Susila, S. I. Woo, D. Sheng, J. Walker.

Несмотря на значительный объем исследований, выполненных авторами, на сегодняшний день нет общего подхода к решению проблемы расчета ПРИ вращательно-раскатывающего действия, а использование существующих методов не представляется возможным, так как данные методы не в полной мере отражают всю сложность деформационного и силового процесса взаимодействия составных элементов ПРИ с грунтом при бурении скважины.

Данная работа является актуальной, так как направлена на совершенствование способов бурения наклонных и горизонтальных скважин, а также на разработку метода расчета силовых характеристик ПРИ вращательно-раскатывающего действия, возникающих в результате его взаимодействия с грунтом.

Идея работы. Идея работы заключается в создании нового метода расчета ПРИ вращательно-раскатывающего действия, основанного на экспериментальных исследованиях и математическом моделировании деформационного и силового взаимодействия элементов ПРИ с грунтом и позволяющего совершенствовать технологию и технические средства сооружения скважин.

Цель диссертационной работы. Повышение эффективности сооружения скважин в песчаных и глинистых грунтах за счет совершенствования технологии бурения скважин и метода расчета ПРИ вращательно-раскатывающего действия.

Объектом исследования является ПРИ вращательно-раскатывающего действия для бурения скважин.

Предмет исследования – выявление закономерностей деформационного и силового взаимодействия ПРИ вращательно-раскатывающего действия с грунтом.

В соответствии с поставленной целью в работе предусматривается решение следующих задач:

- анализ способов бурения горизонтальных и наклонных скважин в грунтах с целью выявления их преимуществ и недостатков;
- анализ ПРИ вращательно-раскатывающего действия, используемого для бурения неглубоких скважин в слабых и неустойчивых грунтах без закрепления стенок;
- разработка математической модели взаимодействия ПРИ вращательно-раскатывающего действия с грунтом;
- разработка метода расчета ПРИ вращательно-раскатывающего действия;
- экспериментальная проверка силовых параметров взаимодействия опытного образца ПРИ вращательно-раскатывающего действия с грунтом и сравнение с результатами математического моделирования;
- определение зависимости силовых параметров процесса бурения скважин в грунте ПРИ вращательно-раскатывающего действия от его геометрических параметров и режимов работы;
- выявление зависимости деформационных процессов в грунте от геометрических параметров элементов ПРИ вращательно-раскатывающего действия.

Методы исследований. С целью достижения поставленных задач в работе использовались следующие методы исследований: научное обобщение опыта сооружения наклонных и горизонтальных скважин; метод численного анализа; экспериментальные исследования, методы планирования и обработки экспериментальных данных; метод определения скоростей полей деформаций в грунте, методы оптимизации.

Обработка экспериментальных данных осуществлялась с помощью ПЭВМ с использованием пакета прикладных программ.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. Достоверный расчет силовых характеристик ПРИ вращательно-раскатывающего действия может быть выполнен при использовании метода, основанного на разработанной математической модели, воспроизводящей процесс силового взаимодействия ПРИ с окружающим грунтом.
2. Научный анализ деформационного и силового процесса взаимодействия ПРИ вращательно-раскатывающего действия с грунтом, выполненный на базе экспериментального исследования и математического описания, позволил установить зависимость силовых характеристик бурения скважины от геометрических параметров ПРИ.
3. Разработанная программа-макрос для оптимизации геометрических параметров ПРИ вращательно-раскатывающего действия позволяет эффективно и с высокой степенью точности определять оптимальные

параметры геометрии в зависимости от режима работы силового оборудования.

Достоверность и обоснованность научных положений обеспечивается удовлетворительной сходимостью результатов математического моделирования и экспериментальных данных.

Научная новизна:

- экспериментально определены силовые показатели взаимодействия конусного элемента ПРИ с грунтом. Установлена зависимость усилия вдавливания конусного элемента от угла раскрытия конуса, которая описывается уравнением полиномиального вида;
- экспериментально определены скорости полей деформаций в грунте для конусных элементов диаметром 100 мм с углом раскрытия конуса 120, 90, 60°;
- разработан новый метод расчета силовых характеристик взаимодействия ПРИ вращательно-раскатывающего действия с грунтом на основе математической модели, воспроизводящей процесс силового взаимодействия ПРИ с окружающим грунтом;
- установлены оптимальные геометрические параметры ПРИ вращательно-раскатывающего действия. Установлены зависимости осевой реакции и момента вращения ПРИ вращательно-раскатывающего действия от его геометрических параметров, которые описываются уравнениями полиномиального вида.

Практическая ценность работы заключается в том, что на основании выполненных теоретических и экспериментальных исследований:

- разработан и предложен для практического использования метод расчета ПРИ вращательно-раскатывающего действия;
- разработана программа-макрос для расчета и оптимизации геометрии ПРИ вращательно-раскатывающего действия;
- разработан лабораторный стенд для определения силовых и деформационных показателей взаимодействия элементов ПРИ с грунтом.

Личный вклад автора. Лично автору принадлежат практически все результаты, изложенные в диссертации. Автор лично разработал программу экспериментальных и аналитических исследований, принимал непосредственное участие в проведении всех лабораторных и полевых испытаний.

Реализация и внедрение результатов работы:

- разработанный автором метод расчета силовых характеристик взаимодействия ПРИ вращательно-раскатывающего действия с окружающим грунтом, а также результаты экспериментальных исследований приняты к внедрению в ООО «НПЦ Горные машины и

технологии» (г. Кемерово), что подтверждено соответствующим актом (прил. А);

- теоретические и практические результаты выполненных исследований реализованы в патентах на изобретения РФ; заявителем и патентообладателем являются ОАО «Томский научно-исследовательский и проектный институт нефти и газа» и Национальный исследовательский Томский политехнический университет;
- метод расчета ПРИ вращательно-раскатывающего действия используется при проведении лабораторных работ в Национальном исследовательском Томском политехническом университете по дисциплине «Машины и оборудование газонефтепроводов».

Апробация работы. Основное содержание и результаты работы докладывались на научно-производственном форуме «Экологические проблемы и техногенная безопасность строительства, эксплуатации и реконструкции нефтегазопроводов. Новые технологии и материалы», 1–4 марта 2005 г., Томск; на Второй международной научно-практической конференции «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности», 7–9 января 2006 г., Санкт-Петербург; на ежегодном международном научном симпозиуме имени академика М. А. Усова студентов и молодых ученых, 2005 г., 2006 г.; на Десятой международной научно-практической конференции «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности», 9–11 декабря 2010 г., Санкт-Петербург; на IV Международной научно-практической конференции Чтение памяти В. Р. Кубачека «Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности», 7–8 апреля 2011 г., Екатеринбург; на научных семинарах в Институте геологии и нефтегазового дела Томского политехнического университета; на научных семинарах Томского научно-исследовательского и проектного института нефти и газа.

Публикации. Основные результаты исследований опубликованы в 14 статьях (в том числе 5 статей в журналах, рекомендованных ВАКом), в 2 патентах на изобретения и в 1 патенте на полезную модель.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения и списка используемой литературы из 123 наименований. Основной текст изложен на 163 страницах машинописного текста и содержит 82 рисунка, 7 таблиц и 7 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи, приведены научная новизна и практическая значимость работы, а также основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе выполнен анализ способов бурения наклонных и горизонтальных скважин. Представлен обзор теоретического и экспериментального исследования силовых характеристик взаимодействия ПРИ с окружающим грунтом.

В настоящее время для бурения наклонных неглубоких и горизонтальных скважин в грунтах применяют следующие способы бурения: вращательный, вибрационный, ударный, а также способ задавливания и горизонтально-направленного бурения (ГНБ).

Перечисленные способы достаточно эффективны и широко используются при бурении геологоразведочных, инженерно-геологических и технических скважин, но не лишены недостатков, к которым относятся: необходимость закрепления скважин в неустойчивых слабых грунтах, незначительная глубина бурения, высокие энергозатраты, низкая механическая скорость бурения, трудоемкость вспомогательных операций, большое количество спуско-подъемных операций.

Анализ способов и ПРИ, используемого при бурении наклонных и горизонтальных скважин в грунтах, показал, что наиболее эффективным способом является способ вращательного бурения без промывки скважины. Для проходки наклонных и горизонтальных скважин без закрепления стенок целесообразно применять специальный ПРИ вращательно-раскатывающего действия, позволяющий уплотнять стенки скважины.

Проведенный анализ теоретических и экспериментальных исследований, связанных с проблемой определения параметров силового взаимодействия ПРИ с грунтом, показал, что использовать существующие методы применительно к ПРИ вращательно-раскатывающего действия не представляется возможным.

Анализ математических моделей показал, что на сегодняшний день не существует моделей точного описания процесса взаимодействия ПРИ вращательно-раскатывающего действия с грунтом, также как и общего подхода к решению проблемы расчета ПРИ вращательно-раскатывающего действия.

На основе выполненного анализа были сформулированы цель и задачи исследования.

Во второй главе приведены методы исследования, используемые в решении поставленных задач: метод численного анализа; экспериментальные исследования, методы планирования и обработки экспериментальных данных; метод определения скоростей полей деформаций в грунте, метод оптимизации.

Исследование деформационных и силовых показателей процесса взаимодействия ПРИ вращательно-раскатывающего действия с грунтом выполнено на спроектированном и изготовленном автором лабораторном стенде (рис. 1).

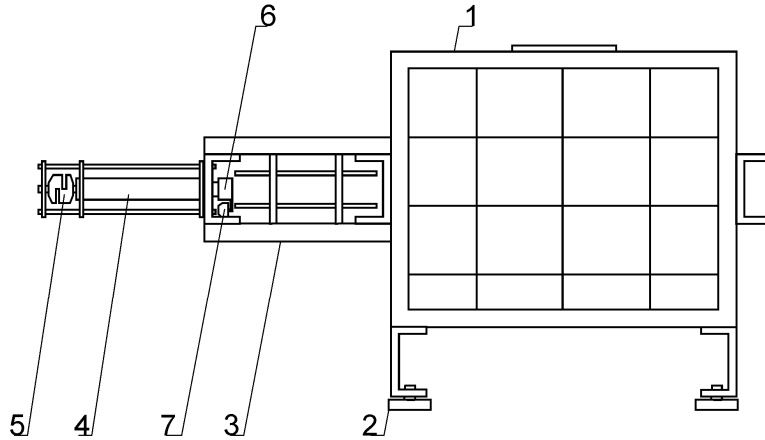


Рис. 1. Лабораторный стенд

1 – емкость с грунтом, 2 – виброоснование, 3 – направляющая рама, 4 – гидроцилиндр, 5 – весоизмерительный датчик, 6 – шток гидроцилиндра, 7 – поводковый датчик перемещения.

Стенд включает в себя корпус, гидравлическое и контрольно-измерительное оборудование. Корпус состоит из емкости с грунтом 1, установленной на виброоснование 2, направляющей рамы 3 для размещения гидроцилиндра 4. Передняя стенка корпуса выполнена из полиметилметакрилата (оргстекло). В основании гидроцилиндра в горизонтальном положении закреплен весоизмерительный датчик 5, на штоке гидроцилиндра 6 зафиксирован поводок датчика перемещения 7, а его корпус закреплен на направляющей раме.

Метод определения скоростей полей деформаций использовался для определения зависимостей деформационных процессов в грунте от геометрических параметров элементов ПРИ вращательно-раскатывающего действия. Обработка экспериментальных данных осуществлялась с использованием программы MatPIV.

Определение прочностных и деформационных параметров образцов грунта было выполнено с использованием методов лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости по ГОСТ 12248–2010. Испытания грунта проведены с использованием оборудования учебно-научно-исследовательской лаборатории «Грунтоведение и механика грунтов» при Национальном исследовательском Томском политехническом университете.

Моделирование взаимодействия ПРИ вращательно-раскатывающего действия с грунтом выполнено с использованием метода конечных элементов.

С целью определения оптимальных параметров геометрии ПРИ вращательно-раскатывающего действия в зависимости от режимов бурения скважины использовался метод оптимизации Эволюционная стратегия (ЭС).

В третьей главе изложены результаты экспериментальных исследований, разработана и обоснована математическая модель для анализа деформационного и силового процесса взаимодействия ПРИ вращательно-раскатывающего действия с грунтом.

На разработанном лабораторном стенде экспериментально установлена зависимость усилия вдавливания конусных элементов ПРИ в грунт от их геометрических параметров. В ходе экспериментальных исследований выполнены серии операций по вдавливанию конусных элементов с углом раскрытия конуса 120, 90, 60°. Результаты исследований приведены на рис. 2.

Общим для кривых (рис. 2) является то, что они содержат прямолинейный участок, соответствующий линейной зависимости усилия вдавливания от деформации, участок с нелинейной зависимостью (пластическая деформация) и участок разрушения грунта. Максимальное усилие вдавливания зафиксировано для элемента с углом раскрытия конуса 120° и составило 3,744 кН, случайная ошибка – 0,187 кН, достоверная вероятность – 0,95 д.ед.

Методом регрессионного анализа определено эмпирическое уравнение, выражающее зависимость максимального усилия вдавливания от угла раскрытия конусного элемента,

$$y = 0,0011x^2 - 0,133x + 6,752, \quad (1)$$

где y – усилие вдавливания, кН; x – угол раскрытия конусного элемента, град.

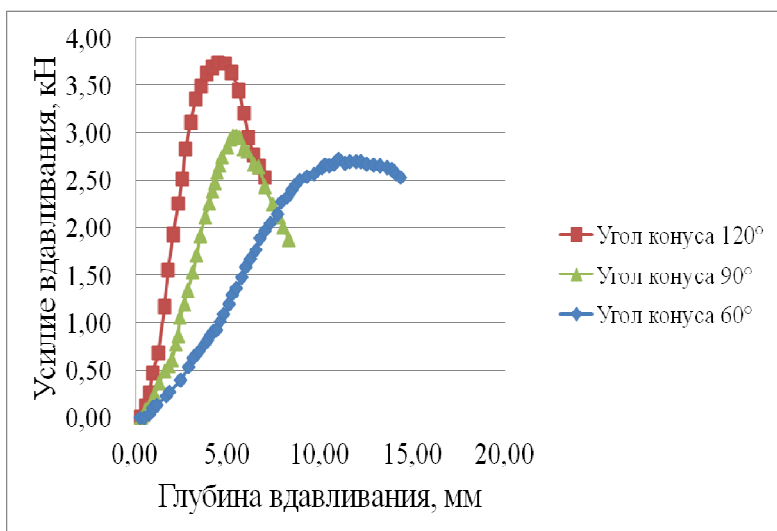


Рис. 2. Осредненные зависимости усилия вдавливания от глубины вдавливания для конусных элементов с углом раскрытия 120, 90, 60°

В рамках экспериментальных исследований изучен характер деформационного процесса, протекающего в грунте в результате силового взаимодействия с конусными элементами ПРИ. В результате обработки изображений определены направления векторов скоростей полей деформаций грунта для конусных элементов ПРИ с углом раскрытия конуса 120, 90, 60° (рис. 3).

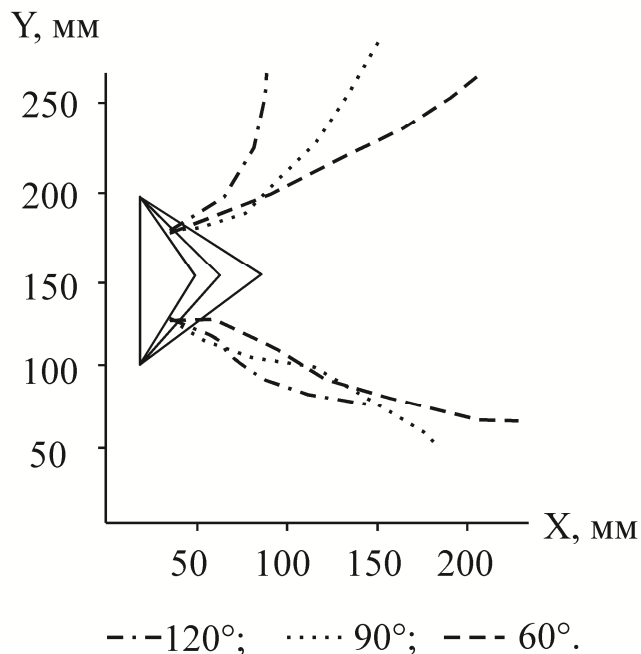


Рис. 3. Зависимость характера деформационного процесса в грунте от угла раскрытия конусных элементов ПРИ

По результатам обработки изображений (рис. 3) можно судить о том, что для конусных элементов с углом раскрытия 120, 90° характерно образование уплотненной зоны по ходу движения элементов, в то же время формирование уплотненной зоны для конусного элемента с углом раскрытия 60° не наблюдалось.

В работе разработана трехмерная конечно-элементная упругопластическая цифровая модель для анализа деформационного и силового процесса взаимодействия ПРИ вращательно-раскатывающего действия с грунтом. Обоснование параметров модели, таких как параметры физического уравнения грунта, границы области моделирования, выполнены на основе полунатурных штамповых испытаний. В качестве физической модели грунта принята расширенная модель Друкера-Прагера с упрочнением. Параметры физического уравнения определены на этапе лабораторных испытаний: плотность 1470,5 кг/м³; модуль деформации 12 МПа; коэффициент Пуассона

0,3 д.ед.; коэффициент сцепления 0,001 МПа; коэффициент трения 0,4 д.ед.; угол внутреннего трения $29,52^\circ$.

Геометрия цифровой модели изображена на рис. 4. Грунт занимает объем $300 \times 300 \times 200$ мм ($a \times b \times c$), а штамп имеет радиус r 50 мм и толщину h 20 мм. Краевые и начальные условия для модели приняты следующими: перемещения (по осям X, Y, Z) $u=v=w=0$ для всех узлов, принадлежащих поверхностям $ABCD$; перемещения (по оси X) $u=0$ для всех узлов, принадлежащих поверхностям $AEFB$, $DHGC$; перемещения (по оси Y) $v=0$ для всех узлов, принадлежащих поверхностям $AEHD$, $BFGC$; узлу O по оси Z задана линейная скорость $v=0,01$ м/с.

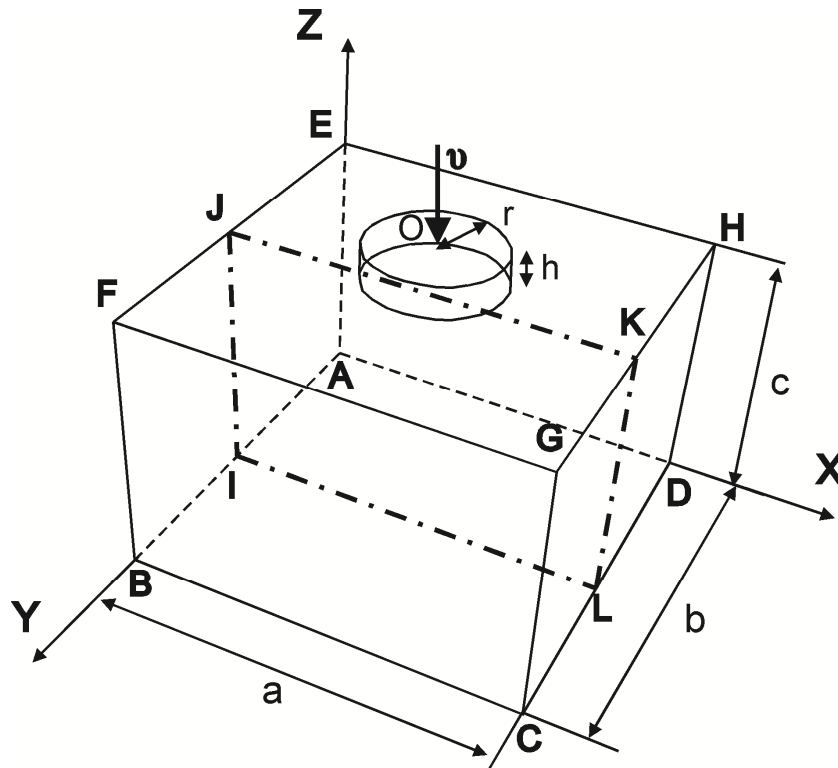


Рис. 4. Геометрия конечно-элементной модели

Результатами расчета модели являются карты изолиний эквивалентных напряжений, деформаций, скоростей деформаций, построенные в плоскости разреза $IJKL$, а также осевая реакция R_z в узле O .

Экспериментальные исследования по определению усилия внедрения штампа в грунт выполнены с использованием машины МИРИ-500К.

В результате сопоставления расчетного (реакция R_z в узле O) и экспериментального максимального усилия внедрения штампа в грунт, соответствующего точке начала сдвиговой деформации, их расхождение составило 5,94 % при величине доверительной вероятности 0,95. Таким

образом, обоснованы принятые параметры физического уравнения грунта, границы области моделирования.

В четвертой главе выполнено исследование влияния параметров геометрии ПРИ вращательно-раскатывающего действия на силовые характеристики бурения скважины. Разработан и предложен для практического применения метод расчета ПРИ вращательно-раскатывающего действия, а также программа-макрос для определения оптимальных параметров геометрии ПРИ вращательно-раскатывающего действия в зависимости от режима работы силового оборудования. Выполнены полевые испытания ПРИ вращательно-раскатывающего действия.

На основании анализа существующих методов расчета ПРИ, выполненного комплекса экспериментальных исследований и математического моделирования разработан и обоснован метод расчета ПРИ вращательно-раскатывающего действия. Данный метод включает в себя этапы: лабораторное определение деформационных и прочностных параметров грунта; математическое моделирование деформационного и силового процесса взаимодействия ПРИ вращательно-раскатывающего действия с грунтом; оптимизацию параметров геометрии ПРИ вращательно-раскатывающего действия в зависимости от режима работы силового оборудования; определение функции полиномиального вида силовых параметров бурения скважины в зависимости от параметров геометрии ПРИ вращательно-раскатывающего действия; рекомендации по проведению испытаний опытного образца ПРИ вращательно-раскатывающего действия в полевых условиях.

Разработанный метод расчета ПРИ вращательно-раскатывающего действия позволяет с высокой точностью определять силовые параметры бурения скважины в зависимости от параметров геометрии ПРИ и режима работы силового оборудования.

Блок-схема программы-макрос для оптимизации параметров геометрии ПРИ вращательно-раскатывающего действия в зависимости от режима работы силового оборудования приведена на рис. 5.

Программа-макрос выполняет следующие процедуры: задается начальный вариант геометрии ПРИ; выполняется построение сетки конечных элементов (КЭ) ПРИ; подготавливается файловая система математической модели и выполняется ее расчет. Затем по результатам расчета определяются значения целевого функционала F . Далее с помощью алгоритма ЭС генерируется новый набор параметров ПРИ и цикл повторяется. Программа будет завершена по истечению заданного числа циклов.

В работе выполнено исследование влияния параметров геометрии ПРИ вращательно-раскатывающего действия на силовые характеристики бурения скважины.

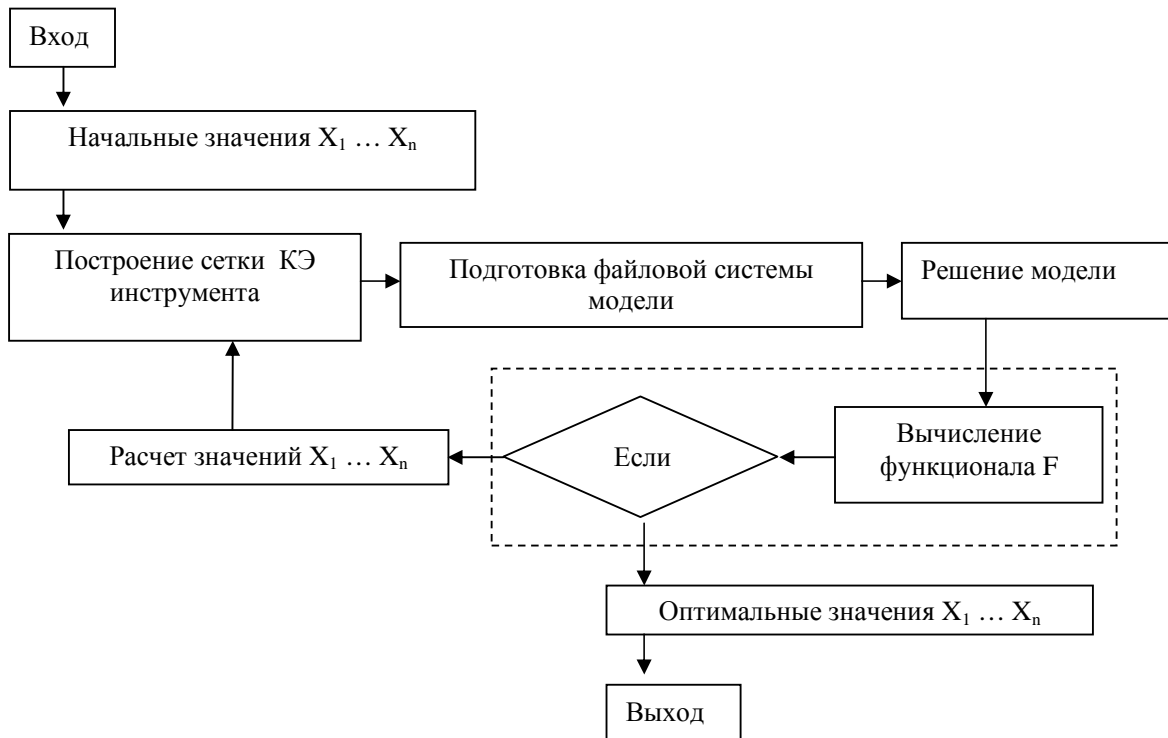


Рис. 5. Блок-схема программы-макрос

Краевые и начальные условия конечно-элементной модели приняты следующими (рис. 6): перемещения (по осям X , Y , Z) $u=v=w=0$ мм для всех узлов, принадлежащих поверхностям $ABCD$; перемещения (по оси X) $u=0$ мм для всех узлов, принадлежащих поверхностям $AEFB$, $DHGC$; перемещения (по оси Y) $v=0$ мм для всех узлов, принадлежащих поверхностям $AEND$, $BFGC$; узлу O по оси Z задана постоянная линейная $v=0,1$ м/с и угловая $\omega=120$ об/мин скорости. Параметры физического уравнения модели определены и обоснованы на этапе штамповых испытаний.

Изменение геометрии ПРИ осуществляется путем варьирования числовых значений конечного числа параметров X_1, \dots, X_n , задающих его форму. В процессе оптимизации варьировались координаты центра оси вращения уплотняющих элементов X_i и Y_i .

К постоянным параметрам геометрии ПРИ относятся радиус R и длина L секций, максимальное значение радиуса секций – 50 мм, общая длина ПРИ составляет 165 мм. Массив грунта представлен объемом $300 \times 300 \times 300$ мм ($a \times b \times c$). В результате расчета конечно-элементной модели определяются параметры: осевая реакция R_z , радиальные реакции R_x и R_y , а также момент вращения M_z и изгибающие моменты M_x , M_y . Из полученных результатов наиболее оптимальным по заданным ранее критериям является вариант геометрии ПРИ с расчетными параметрами $R_z = 0,596$ кН, $M_z = 34,1$ Н×м.

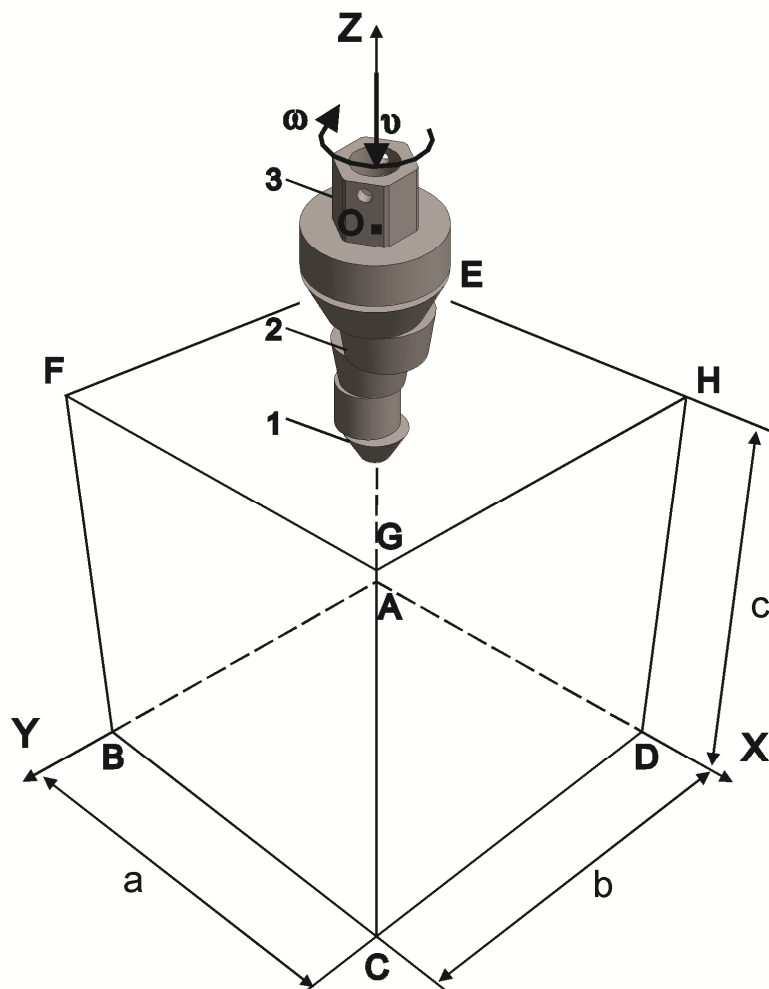


Рис. 6. Расчетная схема модели

1 – конусный наконечник; 2 – уплотняющий элемент; 3 – шестигранное соединение

Используя результаты расчета оптимизационного алгоритма методом полиномиальной интерполяции, определены функции полиномиального вида 2-го порядка с различными наборами коэффициентов для момента вращения M_z и осевой реакции R_z в зависимости от варьируемых параметров геометрии ПРИ.

В работе также выполнен анализ влияния границ области моделирования на показатели бурения скважины. В итоге, по модели с грунтовым массивом объемом $1000 \times 1000 \times 1000$ мм ($a \times b \times c$) максимальные расчетные значения R_z и M_z для рассмотренного ранее оптимального варианта геометрии ПРИ составили соответственно 0,564 кН и 39,5 Н×м, а их расхождение 5,7 и 1,2 %. Таким образом, принятые параметры грунтового массива ($300 \times 300 \times 300$ мм) позволили

сократить время расчета модели с 40 до 4 мин. и обеспечить приемлемую точность.

Для полевых испытаний был спроектирован и изготовлен ПРИ в соответствии с параметрами геометрии оптимального варианта. Полевые испытания выполнены на строительной площадке, расположенной на территории Лагерного сада г. Томск. В геологическом строении данная территория изучена на глубину 40 м; от 0 до 5 м массив грунта сложен суглинками с параметрами: плотность 2700–2740 кг/м³; модуль деформации 13,56–5,98 МПа; коэффициенты сцепления 0,068–0,041 МПа; угол внутреннего трения 23–22°. Для бурения скважины ПРИ использовано оборудование ручного бурения «Сдвигомер-крыльчатка». Бурение скважины осуществлялось на глубину до 2 м с угловой скоростью 20 об/мин, линейной скоростью 0,15 м/мин и постоянной осевой нагрузкой 1,0 кН. Осевая нагрузка задавалась навеской грузов на буровую штангу. В итоге, по результатам статистической обработки экспериментальных данных среднее значение момента вращения составило 37,6 Н×м, среднеквадратичное отклонение – 3,1 Н×м, коэффициент вариации – 8,2%. Таким образом, данный ПРИ, параметры геометрии которого определены с использованием метода расчета ПРИ вращательно-раскатывающего действия, возможно использовать для бурения скважин в песчаных и глинистых грунтах.

С учетом анализа ПРИ вращательно-раскатывающего действия автором предложен вариант его компоновки для бурения наклонных геологоразведочных скважин с отбором керна интегрированными вдавливаемыми грунтоносами. Породоразрушающий инструмент со съемным грунтоносом (рис. 7) позволяет выполнять отбор керна по всей скважине без подъема буровой колонны. Процесс отбора керна осуществляется следующим образом: через полую колонну труб грунтонос спускают на тросе лебедки до его фиксации на забое, после проходки интервала 0,5–1,5 м спускают ловитель, которым извлекают грунтонос на поверхность.

С использованием разработанного метода расчета ПРИ вращательно-раскатывающего действия, основанного на математической модели, а также программы-макрос, определены оптимальные параметры ПРИ со съемным грунтоносом для заданного режима работы силового оборудования с параметрами: линейная скорость – 0,1 м/с, угловая скорость – 120 об/мин.

В итоге, для ПРИ с постоянными геометрическими параметрами (внешний диаметр – 150 мм, внутренний диаметр – 105 мм; длина – 300 мм) определены параметры осевого положения уплотняющих элементов и параметры винтовой спирали, обеспечивающие минимальные расчетные значения осевой реакции R_z – 1,54 кН и момента вращения M_z – 308 Н×м.

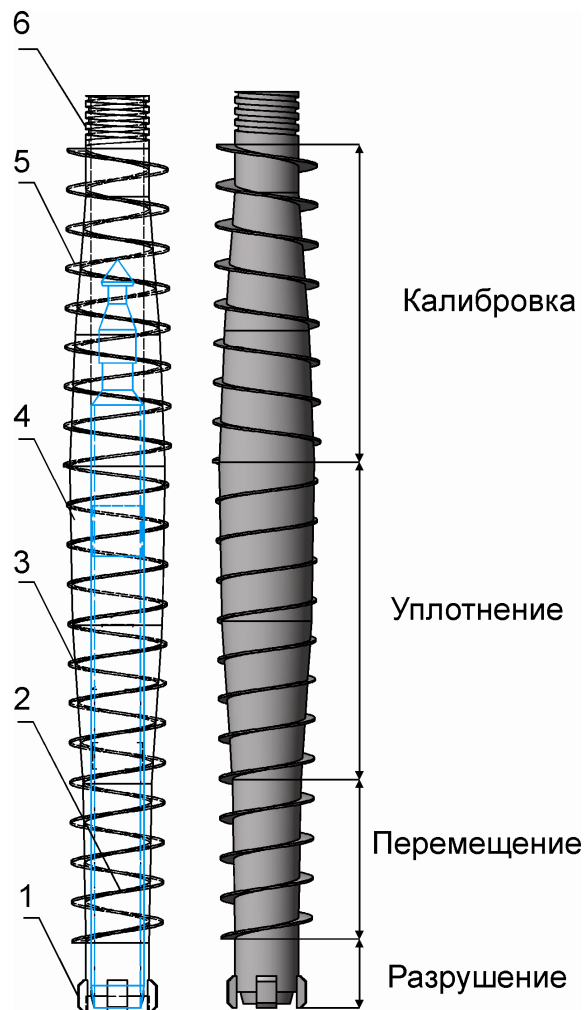


Рис. 7. Породоразрушающий инструмент со съемным грунтоносом

1 – долото; 2 – грунтонос; 3 – винтовая спираль; 4 – уплотняющие элементы;
5 – обратная винтовая спираль; 6 – резьбовое соединение

По результатам расчета оптимизационного алгоритма определены функции полиномиального вида 2-го порядка для момента сопротивления вращению M_z и осевой реакции R_z в зависимости от варьируемых параметров геометрии ПРИ.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В работе изложены результаты исследований взаимодействия ПРИ вращательно-раскатывающего действия с грунтом при бурении скважины, разработан научно обоснованный метод расчета силовых параметров работы

ПРИ вращательно-раскатывающего действия в зависимости от его геометрических параметров и режимов работы, что является существенным вкладом в решение задачи повышения эффективности технологии и технических средств бурения скважин в грунтах.

На основании выполненных исследований были сделаны следующие выводы:

- Определена зависимость усилия вдавливания конусного элемента ПРИ от угла раскрытия конуса, которая описывается уравнением полиномиального вида.
- Экспериментально определены скорости полей деформаций грунта для конусных элементов ПРИ с углом раскрытия конуса 120, 90, 60°.
- Разработана математическая модель для анализа деформационного и силового процесса взаимодействия ПРИ вращательно-раскатывающего действия с грунтом. Результаты расчета модели сопоставлены с данными эксперимента, расхождение составило 5,94 % при величине доверительной вероятности 0,95.
- Разработан и предложен для практического применения метод расчета ПРИ вращательно-раскатывающего действия, который отличается тем, что позволяет с высокой точностью определять силовые характеристики его работы в зависимости от геометрических параметров и режимов бурения скважины.
- Разработана программа-макрос для выполнения оптимизации геометрии ПРИ вращательно-раскатывающего действия.
- Определена оптимальная форма ПРИ вращательно-раскатывающего действия для бурения скважин в песчаных и глинистых грунтах.
- Исследовано влияние параметров геометрии ПРИ вращательно-раскатывающего действия на силовые характеристики бурения скважины.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Рудаченко А. В., Поварницын С. В. Бестраншейная проходка трубопроводов // Горный журнал, специальный выпуск «Цветные металлы». – 2006. – № 4. – С. 37–38.
2. Поварницын С. В., Рудаченко А. В. Лабораторный стенд для определения перемещений грунта, возникающих в процессе прокладки бестраншейного трубопровода // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 320. – № 1. – С. 166–169.
3. Поварницын С. В., Рудаченко А. В., Ревазов А. М. Определение деформаций грунта в процессе бестраншейной прокладки трубопровода //

- Управление качеством в нефтегазовом комплексе. – 2012. – № 4. – С. 61–63.
4. Поварницын С. В., Рудаченко А. В. Методика расчета силовых характеристик взаимодействия инструмента вращательно-вдавляющего действия с окружающим грунтом // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2012. – № ОВЗ. – С. 391–398.
 5. Рудаченко А. В., Поварницын С. В. Методика проведения конечно-элементного анализа строительства подземных сооружений // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2012. – № ОВЗ. – С. 398–403.
- В других изданиях:
6. Рудаченко А. В., Поварницын С. В. Развитие бестраншейных методов прокладки трубопроводных систем транспорта нефти // Сборник материалов Форума, 1 марта 2005 г., Томск., Институт физики прочности и материаловедения СО РАН. – Томск, 2005. – С. 70–71.
 7. Рудаченко А. В., Поварницын С. В. Кинематический и силовой анализ оборудования для бестраншейной прокладки трубопроводов // IX Международный научный симпозиум имени академика М. А. Усова студентов и молодых ученых «Проблемы геологии и освоения недр», Томск, 11–15 апреля, 2005 г. – Томск, 2005. – С. 551–554.
 8. Рудаченко А. В., Поварницын С. В. Концепция разработки способа бестраншейной прокладки трубопроводных систем // IV Международная научно-техническая конференция «Материалы и технологии XXI века», Пенза, 23–24 марта, 2006 г. – Пенза, 2006. – С. 236.
 9. Рудаченко А. В., Поварницын С. В. Способ бестраншейной прокладки трубопроводных систем // X Международный научный симпозиум имени академика М. А. Усова студентов и молодых ученых «Проблемы геологии и освоения недр», Томск, 3–7 апреля, 2006 г. – Томск, 2006. – С. 463–464.
 10. Рудаченко А. В., Поварницын С. В. Определение внутренних усилий в несущих элементах секций проходческого агрегата // X Международный научный симпозиум имени академика М. А. Усова студентов и молодых ученых «Проблемы геологии и освоения недр», Томск, 3–7 апреля, 2006 г. – Томск, 2006. – С. 464–465.
 11. Рудаченко А. В., Поварницын С. В. Устройство для замены или строительства подземных трубопроводов // Доклады: научно-практический семинар, 11 апреля, 2006 г. – К. Экотехнология. – С. 29.
 12. Рудаченко А. В., Поварницын С. В. Совершенствование способа и устройства бестраншейной прокладки трубопроводных систем большей протяженностью // Высокие технологии, фундаментальные и прикладные исследования, образование. – Сборник трудов Второй международной

- научно-практической конференции «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности», 7–9 января 2006 г., Санкт-Петербург, Россия. / Под ред. А. П. Кудинова, Г. Г. Матвиенко, В. Ф. Самохина. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2006. – Т. 6. – С. 255–257.
13. Рудаченко А. В., Поварницын С. В. Конечно-элементная модель бестраншейной прокладки трубопровода // Высокие технологии и фундаментальные исследования. Сборник трудов Десятой международной научно-практической конференции «Исследование, разработка и применения высоких технологий в промышленности», 9–11 декабря 2010 г., Санкт-Петербург, Россия / под ред. А. П. Кудинова. – СПб.: Из-во Политехн. Ун-та, 2010. – Т. 4. – С. 253–257.
14. Поварницын С. В., Рудаченко А. В. Лабораторная установка бестраншейной прокладки трубопровода способом управляемого прокола // Сборник докладов IV Международной научно-практической конференции «Чтение памяти В. Р. Кубачека», Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности, 7–8 апреля, 2011 г., Екатеринбург. – Екатеринбург, 2011. – С. 323–326.
15. Пат. 71347 РФ. E02F5/16. Устройство для бестраншейной прокладки трубопровода / Рудаченко А. В., Поварницын С. В. – 2007130178/22; заявлено 06.08.2007; опубл. 10.03.2008.
16. Пат. 2326284 РФ. F16L1/028. Способ бестраншейной прокладки трубопровода / Рудаченко А. В., Поварницын С. В., Зыков В. М. – 2006136734/06; заявлено 16.10.2006; опубл. 10.06.2008.
17. Пат. 2338111 РФ. F16L1/00. Способ бестраншейной прокладки трубопровода / Рудаченко А. В., Поварницын С. В. – 2007114440/06; заявлено 16.04.2007; опубл. 10.11.2008.