

Министерство образования и науки Российской Федерации



Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт природных ресурсов

Направление подготовки (специальность): «Нефтегазовое дело» («Строительство глубоких нефтяных и газовых скважин в сложных горно-геологических условиях»)

Кафедра бурения скважин

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
«Разработка и апробация математической модели шароструйного бурения скважин»

УДК 622.243.43:519.876

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
2БМ5Д	Плетнев Сергей Эдуардович		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Ковалев Артем Владимирович	к.т.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Шарф Ирина Валерьевна	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ассистент	Немцова Ольга Александровна	—		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
бурения скважин	Ковалев Артем Владимирович	к.т.н.		

ВВЕДЕНИЕ

Возрастание объемов бурения скважин в твердых и крепких горных породах в мировой практике бурения скважин заставляет еще более совершенствовать породоразрушающий инструмент. Но несмотря на постоянную модернизацию ПРИ, бурение в породах высокой твердости производится с низкой механической скоростью и малой проходкой на долото. Поэтому актуальными становятся разработки альтернативных способов разрушения крепких горных пород.

Для решения ряда проблем, возникающих при бурении крепких горных пород, предлагается использовать гидромониторный способ разрушения горных пород. Одним из таких способов является шароструйный способ бурения скважин. Суть его заключается в том, что разрушение горной породы происходит ударами высокоскоростных шаров, которые непрерывно циркулируют в призабойной зоне скважины.

Уровень теоретической и экспериментальной проработки данного способа находится на довольно низком уровне и имеет ряд своих недостатков, за счет чего пока не получил широкого применения. Для устранения этих недостатков необходимо разработать новые технические средства, методики расчета оптимальных геометрических параметров буровых снарядов и рациональных технологических параметров режима шароструйного бурения.

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит 61 с., 18 рис., 11 табл., 34 литературных источника.

Ключевые слова: шароструйное бурение, математическая модель, шароструйно-эжекторный буровой снаряд, шар, твердые и крепкие горные породы, лабораторный стенд.

Объект исследования: шароструйное бурение.

Цель работы: разработать математическую модель процессов шароструйного бурения скважин.

В процессе проводились аналитические и экспериментальные исследования.

В результате исследования была разработана математическая модель процессов шароструйного бурения скважин, которая позволит рассчитать предполагаемую механическую скорость бурения.

Значимость работы: выполненные теоретические и экспериментальные исследования помогли получить необходимую информацию для повышения эффективности разработанной технологии и техники шароструйного бурения скважин. В результате, модернизация лабораторного стенда позволила исследовать технологические процессы шароструйного бурения при изменением зенитного угла. Также была разработана математическая модель шароструйного бурения.

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	3
1. Литературный обзор	4
1.1 Анализ существующих конструкций шароструйно-эжекторных буровых снарядов.....	4
1.2 Анализ конструкции снаряда с целью определения основных параметров и выявления путей модернизации	10
2. Методика проведения экспериментальных исследований	13
2.1 Лабораторный стенд для исследования технологических процессов шароструйного бурения.....	13
2.2. Методика определения параметров струйных аппаратов.....	16
2.3. Методика экспериментальных исследований при забурке скважины с образованием криволинейного забоя.....	17
2.4. Методика статистической обработки результатов исследований	18
3. Исследование влияния геометрических параметров буровых снарядов и технологических режимов на эффективность бурения.....	19
3.1. Определение основных рабочих параметров струйного аппарата	20
3.2. Исследование влияния диаметра сопла на эффективность шароструйного бурения	22
4. Разработка математической модели шароструйного бурения скважин.....	23
5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	25
5.1 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения.....	25
5. 2 Проведение анализа безубыточности инженерного проекта	27
5.3 Составление бюджета разработки и внедрения инженерных решений	29
5.4 Оценка эффективности инженерных решений	34
6. Социальная ответственность	36
6.1 Производственная безопасность.....	36
6.1.1 Анализ вредных производственных факторов и обоснование мероприятий по их устранению.	36
6.2 Анализ опасных производственных факторов и обоснование мероприятий по их устранению	41

6.3 Экологическая безопасность.....	43
6.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	46
6.5 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.	49
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	52
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	53
Приложение А	57

1. Литературный обзор

1.1 Анализ существующих конструкций шароструйно-эжекторных буровых снарядов

Шароструйное бурение представляет собой процесс, в ходе которого разрушение горной породы происходит под действием большого количества стальных шаров, многократно соударяющихся с забоем с определенной скоростью.

Разгон шаров в данном способе осуществляется с помощью струи жидкости. И так как бурение производится за счет соударения шаров с породой, слагающей забой скважины, создание осевой нагрузки на забой скважины массой инструмента, а также его вращения не требуется. Более того, поскольку шары являются единственным породоразрушающим элементом, подверженным износу, замену или дополнение их можно производить путем добавления новой порции шаров, не извлекая при этом буровую головку из скважины [1].

Непрерывную циркуляцию шаров в призабойной зоне при шароструйном способе бурения скважин реализуют с помощью шароструйно-эжекторного бурового снаряда (ШЭБС). Впервые, исследованием данного способа занялась группа американских ученых нефтяной компании «Картер Ойл К^о». Ими были выделены следующие преимущества относительно роторного бурения [2]:

- увеличение продолжительности рейса за счет того, что он ограничивается лишь износостойкостью шароструйного аппарата, т.к. возможна замена износившихся шаров новыми в процессе бурения;
- простота конструкции бурового снаряда;
- в создании осевых нагрузок на долото нет необходимости;
- бурения возможно без вращения, поэтому уменьшается износ бурильных труб, также существует возможность использования легкосплавных бурильных труб.

Для проведения полевых испытаний исследователями использовался названный ими «гравитационно-инжекционный» буровой

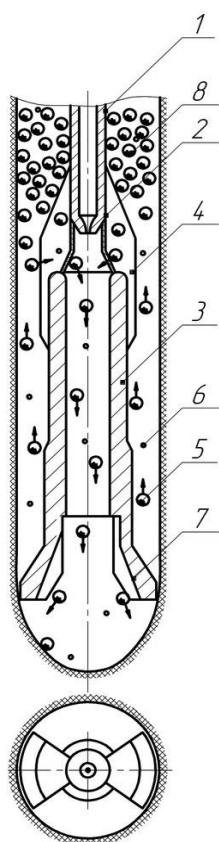


Рисунок 1.1 - «Гравитационно-инжекционный» буровой снаряд:
 1 – колонна бурильных труб; 2 – сопло; 3 – камера смешения; 4 – ребра;
 5 – породоразрушающие шары; 6 – шлам выбуренной породы; 7 – лапы; 8 – «облако резервных шаров»

снаряд [3] (Рисунок 1.1). Принцип его действия заключается в следующем. Для поддержания расстояния между забоем скважины и долотом в конструкцию снаряда были включены специальные лапы 7. Порция шаров 5 засыпается на забой скважины, после чего включается буровой насос. Ускорение рабочей жидкости происходит в сопле 2 и с большой скоростью истекает в камеру смешения 3. При этом в пространстве между соплом 2 и камерой смешения 3 образуется зона разрежения, благодаря которой происходит всасывание рабочей жидкости со взвешенными шарами 5 и частицами шлама 6 из затрубного пространства. Затем смешанный поток проходит через камеру смешения и осуществляет разрушение горной породы, ударяясь об неё.

После контакта с забоем скважины шары 5 попадают в кольцевой зазор между долотом и стенками скважины. Затем они поднимаются выше сопла 2, и вследствие увеличения кольцевого пространства и уменьшения количества жидкости за счет ее инъекции останавливаются, образуя «облако резервных шаров» 8, откуда благодаря силам гравитации опускаются с последующим всасыванием.

Рассмотренная конструкция имеет ряд своих недостатков:

- повышенный износ лап за счет контакта с горными породами и ударов циркулирующих шаров;

- необходимость вращения бурового снаряда для разрушения зон забоя, перекрываемых лапами;
- перекрытие лапами значительной площади забоя, в связи с чем уменьшается эффективность шароструйного бурения;
- необходимость поддержания строго заданного расхода жидкости, т.к. при его уменьшении «облако резервных шаров» будет располагаться ниже сопла, а при повышении расхода жидкости – выше, что приведет к снижению расхода шаров в камере смешения, следовательно, уменьшению эффективности шароструйного бурения.

Вышеперечисленные недостатки конструкции «гравитационно-инжекционного» бурового снаряда, а также отход от первоначальной концепции шароструйного бурения предопределили дальнейшие работы исследователей и производителей. К настоящему времени разработано множество различных конструкций шароструйно-эжекторных буровых снарядов [4], обеспечивающих:

- поддержание требуемого диаметра скважины;
- поддержание оптимального расстояния между долотом и забоем;
- оптимальную траекторию движения шаров в призабойной зоне.

Выбор и обоснование конструкции ШЭБС для бурения в твердых и крепких горных породах является важной исследовательской задачей.

Заурбеков С.А. в своей работе [1] указал на малый расход шаров в камере смешения и предложил снаряд с соплом 6 и камерой смешения 9 кольцевой формы, при этом разрушение центральной части забоя скважины производилось с помощью опоры 8 с твердосплавными зубьями 11 (Рисунок 1.2).

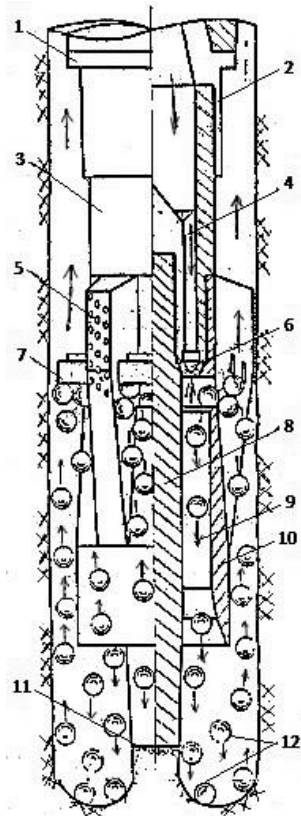


Рисунок 1.2 - Шароструйно-эжекторный буровой снаряд с соплом и камерой смешения кольцевой формы:

1 – калибратор; 2 – переводник; 3 – присоединительная головка; 4 – подводящие жидкость каналы; 5 – калибрующе-центрирующие ребра; 6 – кольцевое сопло; 7 – задерживающее устройство; 8 – опора снаряда; 9 – кольцевая камера смешения; 10 – корпус снаряда; 11 – твердосплавные зубья; 12 – шары

Также опорой обеспечивалось поддержание оптимального расстояния между долотом и забоем в процессе бурения, а использование задерживающего устройства 7 позволяло снять ограничения на максимальный расход промывочной жидкости и направлять шары во впускные окна.

Однако данная конструкция имеет свои недостатки:

- наличие сопла щелевидной формы усложняет изготовление бурового снаряда;
- наличие опоры, разрушающей центральную часть забоя скважины, приводит к быстрому ее износу, особенно при бурении твердых и крепких ГП;
- для работы снаряда необходимы вращение и осевая нагрузка на долото, что противоречит первоначальной концепции шароструйного бурения и усложняет процесс бурения;
- разрушение забоя комбинированным способом (периферийной части – шароструйным, центральной – вращательным) приводит к разной скорости разрушения, т.е. к сложности управления за процессом бурения;
- конструкция снаряда предусматривает использование шаров с меньшим максимально возможным диаметром, чем при использовании сопла и камеры смешения цилиндрической формы, в связи с чем, согласно [2, 6-7] уменьшается эффективность шароструйного бурения;

- большое отношение ($>0,8$) диаметра используемых шаров к диаметру камеры смешения приводит к необходимости увеличения расстояния между долотом и забоем для поддержания требуемого диаметра скважины, в связи с чем, согласно [2, 6-7] уменьшается эффективность шароструйного бурения.

Некоторые авторы [1, 4, 8] считают эффективной конструкцию ШЭБС, в основе которой лежит струйный аппарат с соплом и камерой смешения цилиндрической формы, периферия при этом разрушается механическим вооружением лопастного (Рисунок 1.3) и дробового (Рисунок 1.4) типов.

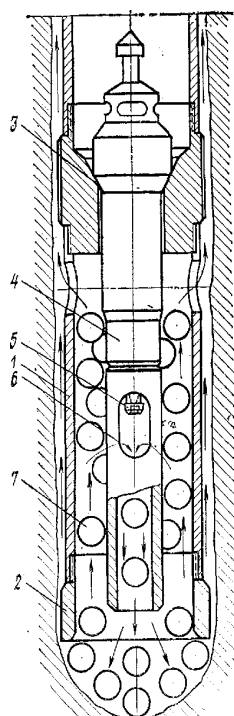


Рисунок 1.3 - Шароструйно-эжекторный буровой снаряд с механическим вооружением лопастного типа:
 1 – корпус; 2 – породоразрушающий опорный башмак; 3 – гнездо;
 4 – струйный аппарат; 5 – сопло;
 6 – камера смешения с окнами; 7 – шары

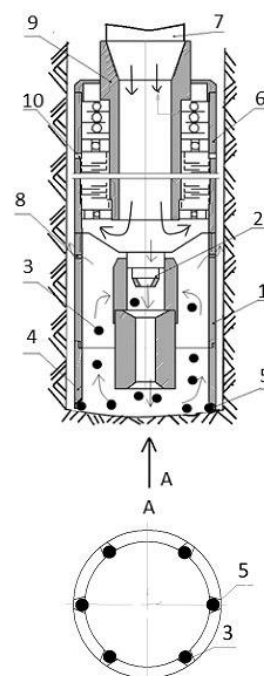


Рисунок 1.4 - Шароструйно-эжекторный буровой снаряд с механическим вооружением дробового типа:
 1 – корпус; 2 – струйный аппарат;
 3 – породоразрушающие шары;
 4 – породоразрушающее кольцо;
 5 – посадочные гнезда; 6 – турбинный аппарат; 7 – колонна бурильных труб;
 10 – отверстия

Но комбинированное разрушение имеет такие недостатки как: износ механического вооружения снаряда, необходимость во вращении и осевой нагрузке и сложность управления за процессом бурения.

Делая выводы по предыдущим конструкциям, следует отметить, что они эффективны лишь для бурения в горных породах малой и средней твердости. Проектирование конструкции ШЭБС для бурения в интервалах твердых горных пород должно соответствовать следующим требованиям:

- не должно быть постоянного контакта бурового снаряда с забоем скважины, т.е. буровые снаряды с лапами, опорой и опорным башмаком являются нерациональными;
- необходимо избегать вращения бурового снаряда, а также создания осевой нагрузки, что усложняет процесс бурения;
- желательно, чтобы в основе конструкции лежал струйный аппарат с соплом и камерой смешения цилиндрической формы с их последовательным осевым расположением;
- камера смешения бурового снаряда должна оканчиваться диффузором, использование которого позволит шарам более интенсивно разрушать периферийную часть забоя скважины, тем самым можно поддерживать минимальное значение расстояния между долотом и забоем, что увеличит эффективность шароструйного бурения;
- необходимо использовать задерживающее устройство, позволяющее снять ограничения на расход промывочной жидкости, значение которого будет высоким для оптимального разрушения твердых и крепких горных пород;
- в процессе бурения необходимо осуществлять контроль над поддержанием оптимального расстояния между долотом и забоем и требуемого диаметра скважины;
- в конструкции бурового снаряда должна быть предусмотрена возможность замены изношенных шаров новыми в процессе рейса;
- конструкция бурового снаряда должна отличаться простотой устройства и эксплуатации.

Применяя перечисленные требования, в Томском политехническом университете на кафедре бурения скважин была разработана конструкция

шароструйно-эжекторного бурового снаряда (Рисунок 1.5). Она включает в себя задерживающее устройство 3 конической формы, позволяющее снять ограничения на расход промывочной жидкости, а также направляющее шары непосредственно в камеру всасывания 4. Снаряд заканчивается диффузором 6, который обеспечивает лучшую разработку скважины по диаметру.

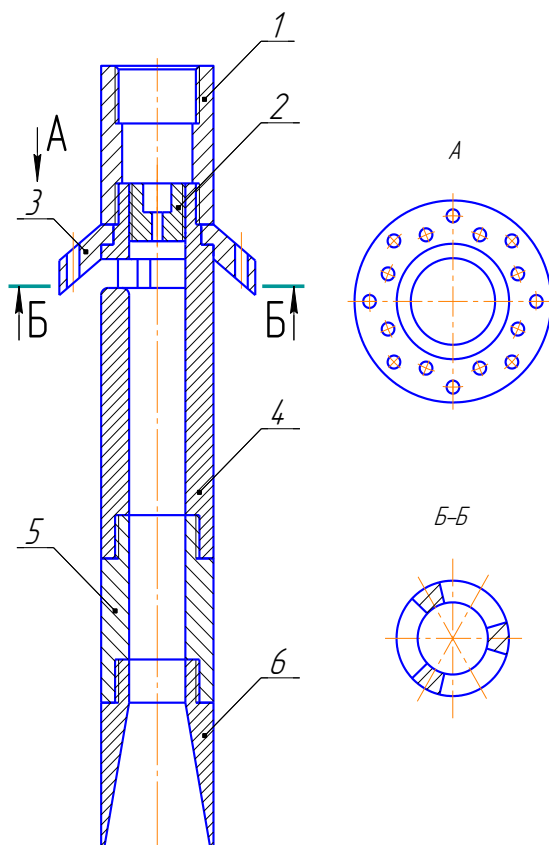


Рисунок 1.5 - Шароструйно-эжекторный буровой снаряд:

1 – переходник на нагнетательную магистраль; 2 – сопло; 3 – задерживающее устройство; 4 – камера всасывания; 5 – камера смешения; 6 – диффузор

1.2 Анализ конструкции снаряда с целью определения основных параметров и выявления путей модернизации

При работе струйного аппарата в камере смешения образуется турбулентный режим течения рабочего и инжектируемого потоков, следовательно износ камеры смешения увеличивается, и уменьшается дальность струи. При высокочастотном звуковом облучении струи

жидкости в диапазоне числа Струхаля $s = 2 - 5$ вблизи сопла в приосевой части струи наблюдается уменьшение нормальных и сдвиговых рейнгольдсовых напряжений, что приводит к увеличению длины начального участка и вследствие этого к возрастанию дальнотбойности струи [9]. Для реализации этого эффекта возможно использование измененной геометрии струйного течения, которое обуславливает возникновение самовозбуждения струи [10]. При этом будет иметь место интенсификация процессов разрушения горных пород за счет эффекта кавитации.

Американские авторы [2, 11], основываясь на результатах исследований по изучению распределения гидравлической энергии бурового насоса при шароструйном бурении, заключили вывод о низком значении его КПД, который не превышает 3%, что связано с низким значением КПД струйных аппаратов (30–40%). По этим результатам, некоторые отечественные исследователи [4] характеризовали «ударно-дробовой способ бурения» как малоперспективный для бурения глубоких скважин. После чего Штрассер В.В. опровергнул это мнение, доказав, что на разрушение породы затрачивается около 6–8 % поверхностной энергии [6]. Однако ни одним из исследователей не была разработана методика гидравлического расчета промывки скважины при шароструйном бурении, в которую входят выбор параметров и расхода жидкости, расчет давлений, выбор типа и числа насосов и режимов их работ. Кроме того, в рамках этих исследований можно провести оценку применимости способа для бурения глубоких скважин с использованием современной серийно выпускаемой буровой техники.

Проведенные исследования показали, что наибольшие механические скорости бурения наблюдаются при использовании в качестве промывочной жидкости воды [2]. Однако при шароструйном бурении к промывочным жидкостям предъявляют целый ряд дополнительных требований, которым не отвечает вода. Известно, что при ударах шаров забой покрывается сетью трещин, в связи с чем возможно эффективное использование понизителей

твердости [7]. Поэтому актуальны исследование и разработка различных рецептур промывочных жидкостей для шароструйного бурения.

Эффективность шароструйного бурения определяется свойствами горных пород, геометрическими параметрами скважины, геометрическими параметрами бурового снаряда и технологическими режимами бурения (Рисунок 1.6).



Рисунок 1.6 - Классификация факторов, определяющих эффективность шароструйного бурения

Одной из важнейших групп является группа геометрических параметров снаряда. Результаты исследований по изучению влияния данных параметров на эффективность разрушения горных пород приведены в различной литературе [1, 2, 7]. Однако в предложенных методиках расчета струйных аппаратов присутствует большой разброс рекомендованных значений. В связи с этим необходимо более детальное изучение оптимальных геометрических параметров снарядов с целью выбора правильной методики расчета шароструйно-эжекторных снарядов.

На основании проведенного анализа результатов предыдущих ученых были сделаны следующие выводы:

- 1) не установлены зависимости влияния диаметра сопла, расхода жидкости на эффективность шароструйного бурения скважин;
- 2) не установлены зависимости влияния свойств материала шаров на эффективность шароструйного бурения скважин;
- 3) отсутствует математическая модель шароструйного бурения скважин, позволяющая рассчитывать ожидаемую механическую скорость проходки.

Следующие главы не указываются в связи с тем, что они имеют коммерческую тайну:

2. Методика проведения экспериментальных исследований

2.1 Лабораторный стенд для исследования технологических процессов шароструйного бурения

2.2. Методика определения параметров струйных аппаратов

2.3. Методика экспериментальных исследований при забурке скважины с образованием криволинейного забоя

2.4. Методика статистической обработки результатов исследований

3. Исследование влияния геометрических параметров буровых снарядов и технологических режимов на эффективность бурения.

3.1. Определение основных рабочих параметров струйного аппарата

3.2. Исследование влияния диаметра сопла на эффективность шароструйного бурения

4. Разработка математической модели шароструйного бурения скважин

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований технологических процессов шароструйного бурения. На их основании разработаны технические средства и математическая модель процессов шароструйного бурения, внесшие существенный вклад в повышение эффективности данного способа.

Основываясь на полученные результаты исследований были выведены следующие заключения:

- наиболее перспективным способом бурения скважин в твердых и крепких горных породах является шароструйный способ;
- для исследования процессов шароструйного бурения с изменением зенитного угла был модернизирован оригинальный лабораторный стенд;
- по полученным результатам экспериментальных исследований разработана математическая модель процессов шароструйного бурения, которая позволит рассчитывать предполагаемую механическую скорость бурения;

Направление дальнейших работ заключается в повышении эффективности способа и применения его на практике буровых работ за счет исследований следующих вопросов:

- 1) Максимально приблизить условия проведения экспериментов к реальным;
- 2) Изучить энергетический вопрос с целью установления коэффициента полезного действия шароструйного бурения;
- 3) Исследовать влияние различных типов промывочных жидкостей, в том числе добавок понизителей твердости, на эффективность шароструйного бурения.

Modeling pellet impact drilling process

1. Introduction

Currently, there is a global trend to drill hard rock for various purposes. Hard rock drilling is characterized by low drilling rate and low rate of penetration. New materials and new design of drill bits for mechanical drilling can improve drilling efficiency. Despite the continuous improvement, the enhanced hard rock drilling is still a challenge.

Therefore, new alternative methods for rock drilling are urgent now. According to some researchers [1, 4, 6], one of the most promising drilling methods is hydro-dynamic drilling by highspeed fluid. This method ensures transmission of significant energy to the bottom hole with the multifold increase in the drilling rate, as well as the rate of penetration. Furthermore, this method is easy to apply within the current mechanical drilling technology where mud is used for cutting transport. However, hydro-dynamic drilling in its traditional version is not enough efficient for hard rock drilling.

Pellet impact drilling implies rock destruction by metal pellets circulating constantly in the bottom hole, which will solve a number of engineering problems connected with hydro-dynamic drilling. This method is characterized by a number of significant advantages: simplicity of drill bit design, no need for drill bit rotation and axial load. According to the data on drilling performance [3, 9] pellet impact drilling is associated with the increase in the drilling rate and the rate of penetration in comparison with the traditional drill bits.

We have proved that the most effective method to drill hard rock is to use ejector pellet impact drill bit with the nozzle and the tubular mixing chamber arranged consequently in line [5]. The efficiency of this drill bit is connected with the accuracy of geometric bit design and drilling parameters. The existing methods of pellet impact drill bit engineering design are limited in application and appropriate to design a particular drill bit only. Therefore, designing a specified model of pellet

impact drilling process is currently urgent since it would create a scientific and methodological basis for engineering design under different geological and technical conditions.

2. Designing a pellet impact drilling process

Designing a pellet impact drilling process was made on the basis of experimental data, in a particular, high-speed photography. A hydrodynamic layout of drill bit performance is shown in Figure 1.

Pellets are used in the following operations:

- 1) pellets are lifted in annular space 1 up to suction zone 2;
- 2) pellet are sent to mixing chamber 3 from suction zone 2;
- 3) pellets move in mixing chamber 3 and diffuser 4;
- 4) pellets move between the drill bit and bottom hole 5

A distinctive feature of a fluid jet is circulation of drilling mud and pellets. [3]. Thus, the circulation of drilling mud (Q_{dm}) and pellets ($Q_{p\ db}$, $Q_{p\ as}$) is observed in the process of drilling by the drill bit. It is necessary to note that operation mode of a fluid jet is changed by adding pellets in drilling mud.

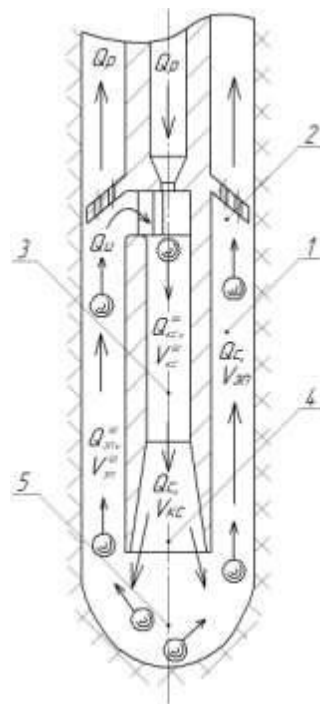


Figure 1 A hydrodynamic layout of drill bit performance: 1 – annular space; 2 – suction zone; 3 – mixing chamber; 4 – diffuser; 5 – a space between drill bit and bottom hole; Q_{dm} – consumption of drilling mud supplying to the drill bit; Q_i – injected drilling mud consumption; Q_{mc} – mixed mud consumption; V_{as} , V_{mch} – mud velocity in annulus space and drill bit; $Q_{p\ mch}$, $V_{p\ mch}$ – pellet consumption and pellet velocity in mixing chamber; $Q_{p\ as}$, $V_{p\ as}$ – pellet consumption and pellet velocity in annulus space.

3. Hoisting pellets in annulus space

The analysis of pellet movement in annulus space (Figure 2) obviously shows its unequal character.



Figure 2. Stroboscopic image of pellet movement in annulus space.

Average velocity of pellets hoisting (m/s) in the case of even movement can be defined by:

$$V_{p\ as} = V_{as} - U, \quad (1)$$

where V_{as} – velocity of drilling mud circulation in annulus space, defined by the equality of mixed mud consumption in mixing chamber and annulus space

$$V_{as} = \frac{V_{mch} \cdot d_{mch}^2}{(D_{well}^2 - d_{db}^2)}, \quad (2)$$

where d_{mch} – diameter of a mixing chamber; D_{well} – well diameter; d_{db} – outer diameter of the drill bit.

U – free-falling velocity of pellets in drilling mud for transient and turbulent regime of flow (m/s), defined by Rittinger's formula

$$U = \omega * \sqrt{\frac{d_p * (\rho_p - \rho_{dm})}{\rho_{dm}}}, \quad (3)$$

where ω - Rittinger's constant for pellet in average 5,11 , d_p – pellet diameter, ρ_p – density of pellets, ρ_{dm} – density of drilling mud.

The maximum number of pellets in annulus space (N_{asmax}^p) is defined using our derived formula, based on the continuous motion of pellets. It is assumed that pellets are arranged in several rows.

$$N_{asmax}^p = \left(\frac{l_{db}}{d_p}\right) * \left(\frac{\pi * (d_{db} + D_{well})}{2 * d_p}\right), \quad (4)$$

where l_{db} – length of the drill bit.

According to the results of high-speed photography, it is possible to observe that within a pellet portion supply, there are gaps between pellets within a row, as well as between rows, even if the number of pellets is optimal. Therefore, the number of pellets can be defined by the following formula:

$$N_{as}^p = \left(\frac{l_{db}}{d_p * C_1}\right) * \left(\frac{\pi * (d_{db} + D_{well})}{2 * d_p * C_2}\right), \quad (5)$$

where C_1 – coefficient of a gap between rows; C_2 – coefficient of a gap between pellets in a row.

Formula (5) is appropriate for calculation of an optimal portion of pellets supply. Validity of the formula is testified by the results of experimental research of the influence of the length of the mixing chamber on pellet impact drilling efficiency. The increase in length of the mixing chamber necessitates a greater number of pellets, which is shown in the mentioned-above formula.

It should be noted that efficient cutting transport may be ensured through:

- increasing the capacity of an arrestor;
- choosing the optimal coefficient of ejection that ensures the appropriate velocity of pellets in the mixing chamber.

4. Pellet supply to the drill bit

In upper part of the drill bit, pellets lifted up by rising current interact with the arrestor and then are sent to the mixing chamber through the process windows.

To prevent pellets jamming under the arrestor the following condition should be satisfied:

$$Q_{pas} \leq Q_{pmch}, (6)$$

According to the tests, formula (6) is valid if the coefficients of ejection are more than 2.

5. Pellet movement in the mixing chamber and the diffuser

Pellet movement trajectory from the mixing chamber to the diffuser (figure 3) has been studied with high-speed photography. It was revealed that pellets in the mixing chamber do not move parallel to its axis due to the fact that velocity vector is directed at the angle to an axis of a well at the point of pellets' entrance in a mixing chamber.

Therefore, the ricochet of pellets after hitting a wall is observed in the mixing chamber. At the same time, the trajectory deviation of pellets is not detected in the diffuser.

Furthermore, the analysis of video sequences shows when the pellets enter the mixing chamber; they are accelerated by the drilling mud flowing from a nozzle. At a distance from the inlet section of the mixing chamber the velocity profile of the fluid jet becomes equal; pellet velocity reduces to velocity V_{pmch} and remains constant.



Figure 3. Stroboscopic image of pellet movement in the drill bit.

Pellet velocity in the mixing chamber is defined as:

$$V_{mch}^p = \theta * V_{mch} , (7)$$

where θ – coefficient depending on the ratio of the mixing chamber diameter to the pellet diameter, pellet consumption in a mixing chamber and drilling mud properties [7].

V_{mch} – velocity of drilling mud in the mixing chamber defined as:

$$V_{mch} = \frac{4 * Q_p * (1 + n_e)}{\pi * d_{mch}^2} , (8)$$

where n_e – coefficient of ejection of the fluid jet.

The maximum number of pellets in the drill bit is defined as:

$$N_{db\ max}^p = 2 * \left(\frac{l_{db}}{d_p} \right) , (9)$$

Pellets consumption is equal to

$$Q_{mch}^p = \frac{N_{db\ max}^p}{t} , (10)$$

where t – the time of drilling.

Substituting (9) into (10) in case of even movement, we will obtain:

$$Q_{db}^p = \frac{2 * l_{db}}{t * d_p} = \frac{2 * V_{mch}^p}{d_p} , (11)$$

In fact, not all pellet in the drill bit move in a row and there is a certain distance between the rows. In this regard, formula (11) should be corrected by adding coefficient C_3 taking into account the gaps between pellets in a row and the rows.

$$Q_{db}^p = C_3 * \frac{2 * V_{mch}^p}{d_p}, (12)$$

It should be noted that the empirical dependence of pellets consumption in the mixing chamber on pellets velocity is confirmed by the American researchers as well [2].

6. Pellet movement in bottom-hole zone

After leaving the diffuser pellets hit the rock and crush it. Figure 2 shows that the distance between the drill bit and bottom hole is gradually filled up with pellets because of considerable flow turbulence of drilling mud after its interaction with the bottom hole and pellets encounter as well. In addition, a comparison of the actual geometric dimensions of the bit, pellets and the distance between the drill bit and the bottom hole, as well as trajectory analysis show that the marginal zone of bottom hole is crashed mostly by ricocheted pellets and supplied pellets. This once again confirms the justification of a minimum distance between the drill bit and bottom-hole in drilling of a well.

7. Conclusion

The suggested model of pellet impact drilling process creates a scientific and methodological basis for engineering design of drilling operations under different geo-technical conditions, and ensures through:

- to calculate pellet consumption and pellet movement velocity in annulus space and the drill bit;
 - to ensure the efficient cutting transport from bottom hole;
 - to prevent pellets jamming under the arrestor of the drill bit;
- to calculate the optimal portion of pellet supply for the drill bit.