

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН



Институт металлургии и промышленной инженерии

УДК 622.24.053

На правах рукописи

Желеуов Дулат Бойрашұлы

### МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

На соискание академической степени магистра техники и технологий

Название диссертации «Исследования гидродинамических процессов протекающих в призабойной зоне скважины направленных на создание устройства по извлечению крупных предметов с забоя»

Направление подготовки 7M07111 – Цифровая инженерия машин и оборудования

Научный руководитель  
канд.техн.наук, профессор  
(ученая степень, звание)

Зарубеков С.А.  
подпись " 18 " 06 2021г. Ф.И.О.

Рецензент  
докт.техн.наук, профессор  
(ученая степень, звание)

Кудайкулова Г.А.  
подпись " 18 " 06 2021г. Ф.И.О.

Нормоконтроль

А.Т.Н., ассистент-профессор  
(ученая степень, звание)

Бортебаев С.А.  
подпись " 21 " 06 2021г. Ф.И.О.

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ  
НАО «КазНУ им.К.И.Сатпаева»  
Институт Металлургии и  
Промышленной инженерии

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ  
Заведующий кафедрой

Технологические машины, транспорт и логистика  
(наименование кафедры)

к.т.н. ассоциированный профессор  
(ученая степень, звание)  
Елемесов К.К.  
подпись " 18 " 06 2021г. Ф.И.О.

Алматы 2021

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Satbayev University

Институт металлургии и промышленной инженерии  
Кафедра "Технологические машины, транспорт и логистика"

7M07111 – Цифровая инженерия машин и оборудования

**УТВЕРЖДАЮ**

Заведующий кафедрой ТМТиЛ  
канд. техн. наук, ассоц. проф.

 К.К. Елемесов

"04" 12 2019 г.

**ЗАДАНИЕ**

**на выполнение магистерской диссертации**

Магистранту Желеулову Дулату Бойрашұлы

Тема: «Исследования гидродинамических процессов протекающих в призабойной зоне скважины направленных на создание устройства по извлечению крупных предметов с забоя»

Утверждена приказом *руководителя университета №435* - м "03" 12 2019 г.

Срок сдачи законченной диссертации "15" 06 2021 г.

Исходные данные к магистерской диссертации: глубина скважин на нефть и газ не менее 1000 м; диаметр скважины не менее 190 мм; подача насосов не менее  $20 \times 10^{-3} \text{ м}^3$ ; давление насосов не менее 20 Мпа.

Перечень подлежащих разработке в магистерской диссертации вопросов:

- а) основные причины аварии в процессе бурения скважин;
- б) классификация ловильного инструмента;
- в) устройства, устанавливаемые в КНБК;
- г) устройства, для очистки забоя, периодически спускаемые в скважину;
- д) обзор литературных и патентных источников по извлечению посторонних предметов с забоя скважин;
- е) выбрать аналоги и прототип;
- ж) описание конструкции разработанной модели шламометаллоуловителя (ШМУС);
- з) расчет извлечения посторонних предметов с забоя скважин с применение предложенной конструкции ШМУС.

Заключение



Перечень презентационного материала;

а) цель и задачи,

б) обзор различных ШМУС на рынке РК;

в) конструкция нового ШМУС;

г) результаты гидродинамических исследований;

д) результаты исследования.

Рекомендуемая основная литература:

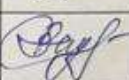
1. Пустовойтенко И.П. Предупреждение и ликвидация аварий в бурении. - М.: Недра, 1988.
2. Технология подготовки ствола и забоя скважины перед спуском алмазного породоразрушающего инструмента: Тематич. науч.-техн. обзор / Э.А.Аканов и др. - М.: ВНИИОЭНГ, 1975.
3. Акопов Э.А. Очистка забоев глубоких скважин - М»: Недра, 1970.
4. А.с. 855188 СССР. Металлоуловитель/ ЦНИЛ ПО "Куйбышевнефть" /7 Бюл. № 30. - 1981.
5. Гидромеханический паук для подъема крупных кусков металла с забоя скважин. - М.: ВНИИОЭНГ, 1979 (Научн.-техн. сб. / ВНИИОЭНГ; Вып.7).
6. И.К. Бикбулатов, С.А.Заурбеков, М.М.Майлибаев Совершенствование технических средств для очистки забоев нефтяных скважин. Аналит.обзор. Алма-Ата,1991.
7. А.Х.Мирзаджанзаде, В.М.Ентов Гидродинамика в бурении.-М.: Недра, 1985.
8. Абрамович Г.Н. Турбулентное течение при взаимодействии объемных сил и автомодельность. -М.:Машиностроение,1975г.

#### ГРАФИК

подготовки магистерской диссертации

| Наименование разделов,<br>перечень разрабатываемых<br>вопросов | Сроки представления<br>научному<br>руководителю | Примечание |
|----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|------------|
| 1 Аналитическая часть                                          | 1.03.2021                                       | Выполнено  |
| 2 Расчетно-конструкторская<br>часть                            | 1.04.2021                                       | Выполнено  |
| 3 Экспериментальная часть                                      | 1.05.2021                                       | Выполнено  |

Подписи консультантов и нормоконтролера на законченную магистерскую диссертацию с указанием относящихся к ним разделов диссертации

| Наименования разделов               | Консультанты,<br>Ф.И.О. (уч. степень,<br>звание) | Дата<br>подписания | Подпись                                                                             |
|-------------------------------------|--------------------------------------------------|--------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 Аналитическая часть               | К.т.н., профессор<br>Заурбеков С.А.              | 1.03.2021          |  |
| 2 Расчетно-конструкторская<br>часть | К.т.н., профессор<br>Заурбеков С.А.              | 1.04.2021          |  |
| 3 Экспериментальная часть           | К.т.н., профессор<br>Заурбеков С.А.              | 1.05.2021          |  |
| Нормоконтролер                      | К.т.н., ассис.проф.<br>Бортебаев С.А.            | 10.05.2021         |  |

Научный руководитель

(подпись)

Заурбеков С.А.  
(Ф.И.О.)

Задание принял  
к исполнению обучающийся

(подпись)

Желеулов Д.К.  
(Ф.И.О.)

Дата "21" "06" 2021 г.

## АНДАТПА

Деби және патенттік іздеу және талдау негізінде дерексіз ақ төменгі жағынан шетелдік органдарының өндіру үшін құрылғы екі негізгі топқа бөлінеді деп табылды:

- бұрғылау ұңғымаларын процесінде БГҚ (ВНА) қаласында vstraevymue;
- тезгіл дефляторы және жақсы бастап өтелетін.

Шламометаллоуловители (ШМУС) 1-топ ұңғымалардан оларды ірі шетелдік объектілерін сою бар экстракциялық ұңғымаларды қолдануға мүмкіндік бермейді ғана шағын элементтерді және шламды, үзінді бергені, атап айтқанда, бір ірі кемшілігі бар. ең сенімді және пайдалану гидравликалық қағидатына негізделген SHMUS жұмыс істеуге оңай shlamometallouloviteley екінші топтағы арасында.

Үлкен және кіші шетелдік объектілерін ұңғымаларды түбінен алу үшін shlamometallouloviteleya жобалау жобаланған теориялық және эксперименттік зерттеулер негізінде. жүзеге асырылатын

Далалық сынақтар жоғары сенімділігін және өнімділігін SHMUS жаңа дизайны растады.

## АННОТАЦИЯ

На основе проведенного литературно-патентного поиска и анализа установлено, что устройства для извлечения посторонних предметов с забоя скважин подразделяются на две основные группы:

- встраиваемые в компоновку низа бурильной колонны (КНБК) в процессе бурения скважин;
- периодически спускаемые и извлекаемые из скважины.

Шламометаллоуловители (ШМУС) 1-ой группы имеют один основной недостаток, а именно обеспечивают извлечение из скважин только мелких предметов и шлама, что не позволяет их применить для извлечения с забоя скважин крупных посторонних предметов.

Среди шламометаллоуловителей 2-ой группы наиболее просты и надежны в работе ШМУС основанные на гидравлическом принципе работы.

На основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований разработана конструкция шламометаллоуловителя для извлечения с забоя скважин крупных и мелких посторонних предметов.

Проведенные промысловые испытания подтвердили высокую надежность и эффективность работы ШМУС новой конструкции.

## ANNOTATION

On the basis of literary and patent search and analysis found that the device for the extraction of foreign bodies from the well bottom are divided into two main groups:

- in vstraevymye BHA (BHA) during drilling;
- periodically deflated and recoverable from the well.

Shlamometallouloviteli (SHMUS) group 1 have one major drawback, namely, providing an extract from the wells only small items and sludge, which does not allow them to apply for the extraction wells with the slaughter of large foreign objects.

Among shlamometallouloviteley second group of the most reliable and easy to work SHMUS based on the hydraulic principle of operation.

On the basis of theoretical and experimental studies designed shlamometalloulovitelya design to extract from the bottom of wells of large and small foreign objects.

Carried out field tests have confirmed the high reliability and performance SHMUS new design.

## СОДЕРЖАНИЕ

|     |                                                                                                              |    |
|-----|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
|     | Введение                                                                                                     | 8  |
| 1   | Обзор и анализ технических средств для очистки забоев нефтяных скважин                                       | 10 |
| 1.1 | Анализ износа долот при наличии на забое твердосплавных предметов                                            | 10 |
| 1.2 | Устройства для очистки забоя скважин от посторонних предметов                                                | 13 |
| 1.3 | Устройства, устанавливаемые в компоновке бурильной колонны                                                   | 14 |
| 1.4 | Устройства для очистки забоя, периодически спускаемые в скважину                                             | 20 |
|     | Выводы                                                                                                       | 31 |
| 2   | Методика расчета шламометаллоуловителя для извлечения крупных и мелких предметов                             | 32 |
| 2.1 | Назначение и область применения разрабатываемого шламометаллоуловителя                                       | 32 |
| 2.2 | Струйные течения. Истечение из насадков и отверстий. Измерение скорости потока                               | 33 |
| 2.3 | Обтекание тел потоком. Подъемная сила и лобовое сопротивление                                                | 37 |
| 2.4 | Установление рационального соотношения диаметра тела и ширины проходного сечения кольцевого вторичного сопла | 41 |
| 2.5 | Описание конструкции разрабатываемого шламометаллоуловителя                                                  | 46 |
|     | Выводы                                                                                                       | 47 |
| 3   | Создание опытной конструкции шламометаллоуловителя и результаты экспериментальных исследований               | 48 |
| 3.1 | Описание экспериментального стенда для гидродинамических исследований                                        | 48 |
| 3.2 | Методика проведения экспериментов и обработка результатов исследований                                       | 53 |
| 3.3 | Разработка конструкции экспериментальной модели шламометаллоуловителя                                        | 56 |
| 3.4 | Результаты экспериментальных гидродинамических исследований                                                  | 57 |
| 3.5 | Влияние условного диаметра поднимаемых посторонних предметов на критическую скорость вымывания               | 59 |
| 3.6 | Достоверность экспериментальных исследований                                                                 | 62 |
|     | Выводы                                                                                                       | 64 |
| 4   | Программа промысловых испытаний устройства для извлечения посторонних предметов из скважины                  | 65 |
|     | Выводы                                                                                                       | 68 |

|                                  |    |
|----------------------------------|----|
| Заключение                       | 69 |
| Список использованной литературы | 70 |



## ВВЕДЕНИЕ

### **Актуальность**

В последние годы бурение нефтяных и газовых скважин опережает их устройство. Увеличение скорости проходки позволяет не только обеспечить открытие новых месторождений, но и приращивать фонд эксплуатационных скважин.

С целью обеспечения надежного вскрытия пласта без осложнений и на высоких механических скоростях, получения объективного промыслово-геофизического материала в интервалах продуктивности большое внимание уделяется чистоте забоя, т.е. отсутствию металлических предметов.

В рыхлых породах металлические предметы часто вдавливаются в стенку скважины и на каротажной диаграмме отражаются как низкоомные непродуктивные слои.

Для избавления от лишних металлических и других твердых предметов, обломков скважинного оборудования разрабатываются приспособления по извлечению их из забоя, разрушения крупных обломков до песчаной фракции и выноса их промывкой. Этот наиболее распространенный способ с применением магнитного фреза требует больших затрат времени.

Вопросы очистки забоя необходимо рассматривать в свете создания техники и технологии извлечения особо твердых крупных и тяжелых по плотности предметов, начиная с клиньев ротора, челюстей АКБ, отработанных шарошек, сухарей и кончая зубьями долот, шариковыми опорами турбобуров и шарошечных долот. При наличии металла в количестве 3...5 кг процесс бурения затягивается во времени на 6...8 % от общего срока строительства скважины глубиной бурения 3...4.5 тыс.м.

За последние 10...12 лет получены ускорения бурения, однако уровень работ по очистке забоя находится на стадии экспериментов с редким выходом на промышленное внедрение.

**Идея работы** состоит в научном обосновании рациональной конструкции устройства для извлечения с забоя скважин крупных и мелких посторонних предметов.

Предметом исследования являются гидравлические призабойные процессы, определяющие эффективность очистки.

### **Задачи исследования**

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- анализ конструкций устройств для извлечения с забоя скважин крупных и мелких посторонних предметов (шламометаллоуловителя);
- обзор и анализ ранее полученных результатов исследований по очистке забоев скважин;
- обоснование принципиально новой конструкции шламометаллоуловителя, обеспечивающего высокую эффективность очистки забоя скважин от посторонних крупных и мелких предметов;
- выбор и обоснование методов исследований технологических процессов

по очистке забоев скважин;

- экспериментальные исследования влияния геометрических параметров снаряда и на эффективность очистки забоев скважин;

**Методика исследований.** Для решения поставленных задач применялись следующие методы исследований:

- обобщение, систематизация и анализ литературных источников;
- комплекс теоретических и экспериментальных исследований;
- статистическая обработка результатов исследований.

**Научная новизна.** В процессе исследований получены следующие результаты, имеющие научную новизну:

1) доказана принципиальная возможность извлечения с забоя скважин крупных металлических предметов гидравлическим способом;

2) разработана принципиально новая конструкция устройства для извлечения крупных посторонних предметов с забоя скважин;

3) установлена взаимосвязь геометрических параметров снаряда на эффективность очистки;

**Практическая значимость работы** заключается в том, что на основании выполненных теоретических и экспериментальных исследований получена необходимая информация для разработки технологии и техники очистки забоев скважин.

# 1 Обзор и анализ технических средств для очистки забоев скважин

## 1.1 Анализ износа долот при наличии на забое твердосплавных предметов

Падение скорости проходки находится в обратной зависимости от массы металла на забое, а увеличение расхода промывочной жидкости, особенно при роторном бурении, незначительно снижает влияние металлошлама.

Авторы изучали механическую проходку по аргиллитам, известнякам и абразивным песчаникам карбона и перми поисково-разведочного бурения в Чу-Сарысуйской впадине силами Южно-Казахстанского нефтеразведочного предприятия ПРО Южказгеология.

При бурении скв. 23-г на площади Учарал в интервале кварц-полевошпатовых песчаников с небольшими прослойками углистых аргиллитов турнейского яруса нижнего карбона дважды обратной промывкой и магнитным фрезом избавлялись от металла, что и позволило резко увеличить механическую скорость и проходку на долото (рис.1.1).

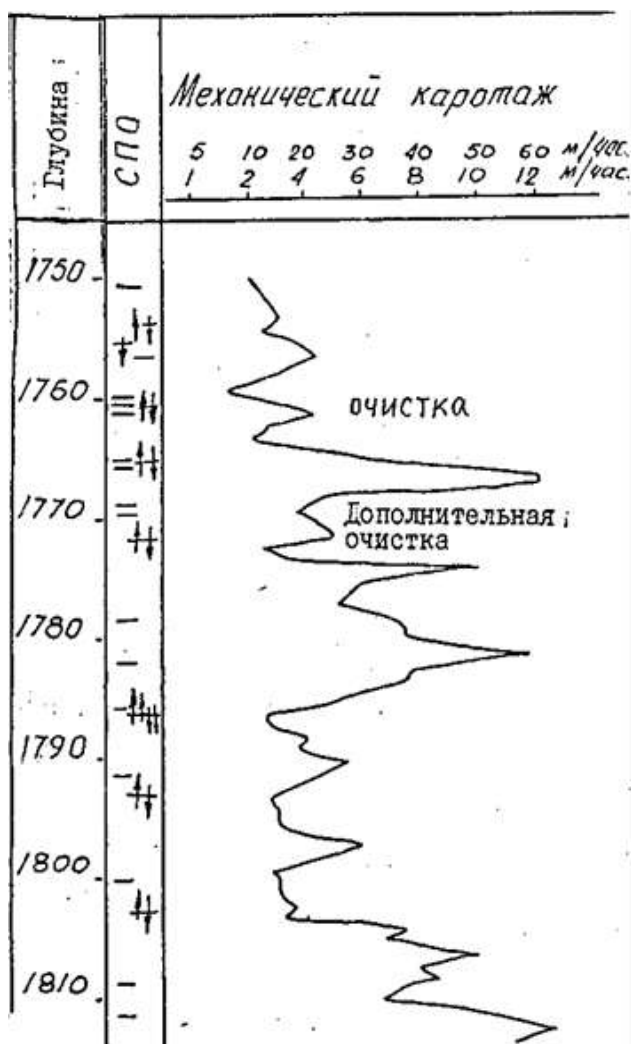


Рисунок 1.1 - Газокаратажная диаграмма скважины № 23-г площади Уч-Арал

На площади Придорожной при проходке конгломератов верхнего девона в скважине 4-г также наблюдался процесс идеального ускорения бурения и увеличение проходки на долото при стабильных типах долот (типа СТ), режимах, бурения и качества промывочной жидкости (рис.1.2).

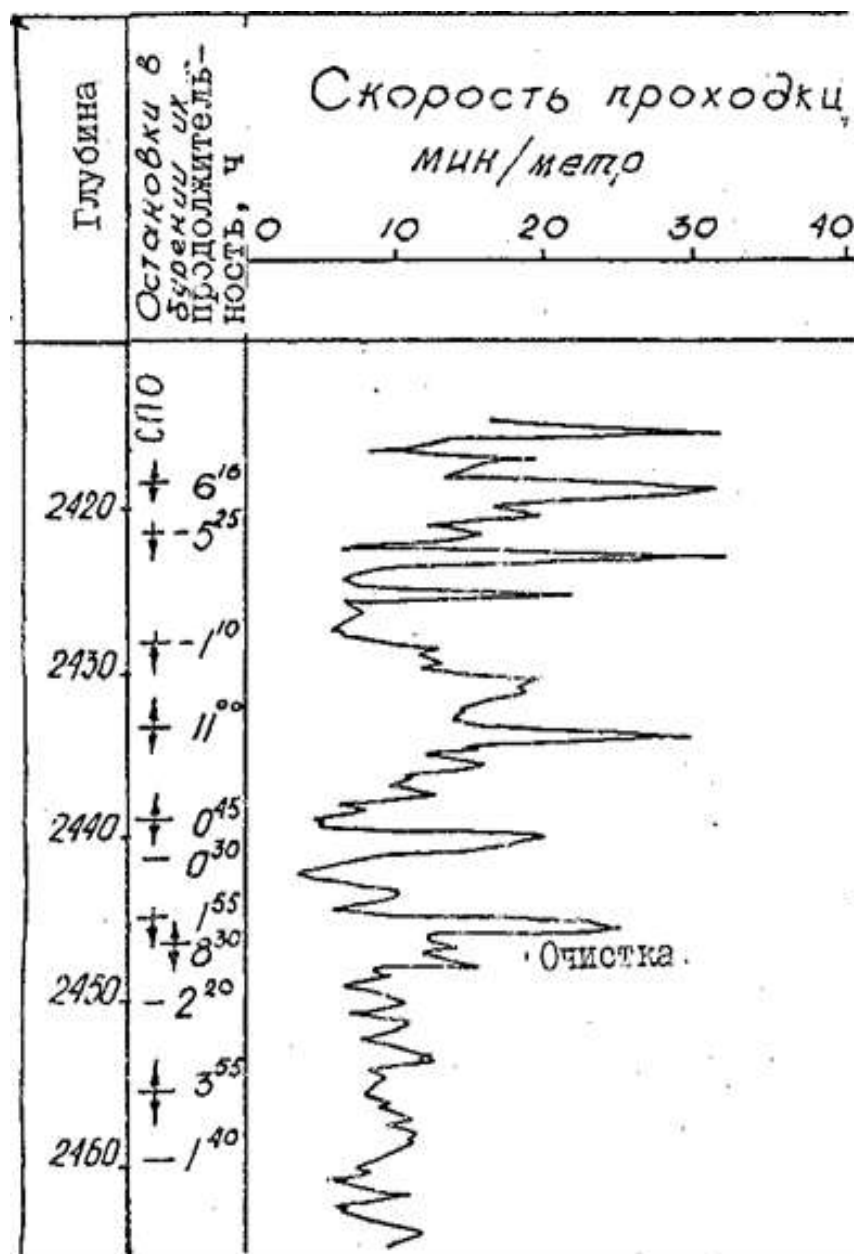


Рисунок 1.2 - Газокаратажная диаграмма скважины № 4-г площади Придорожная

Особого внимания заслуживает неполная очистка забоя при проходке по грубозернистым песчаникам скважины 1-г Милибулак, где ярко выражены скачки как механической скорости, так и проходки на долото. Количество извлеченного металла не подвергалось сортировке, однако количество сухарей от механических ключей не уступало количеству твердосплавных зубьев долот (рис.1.3).

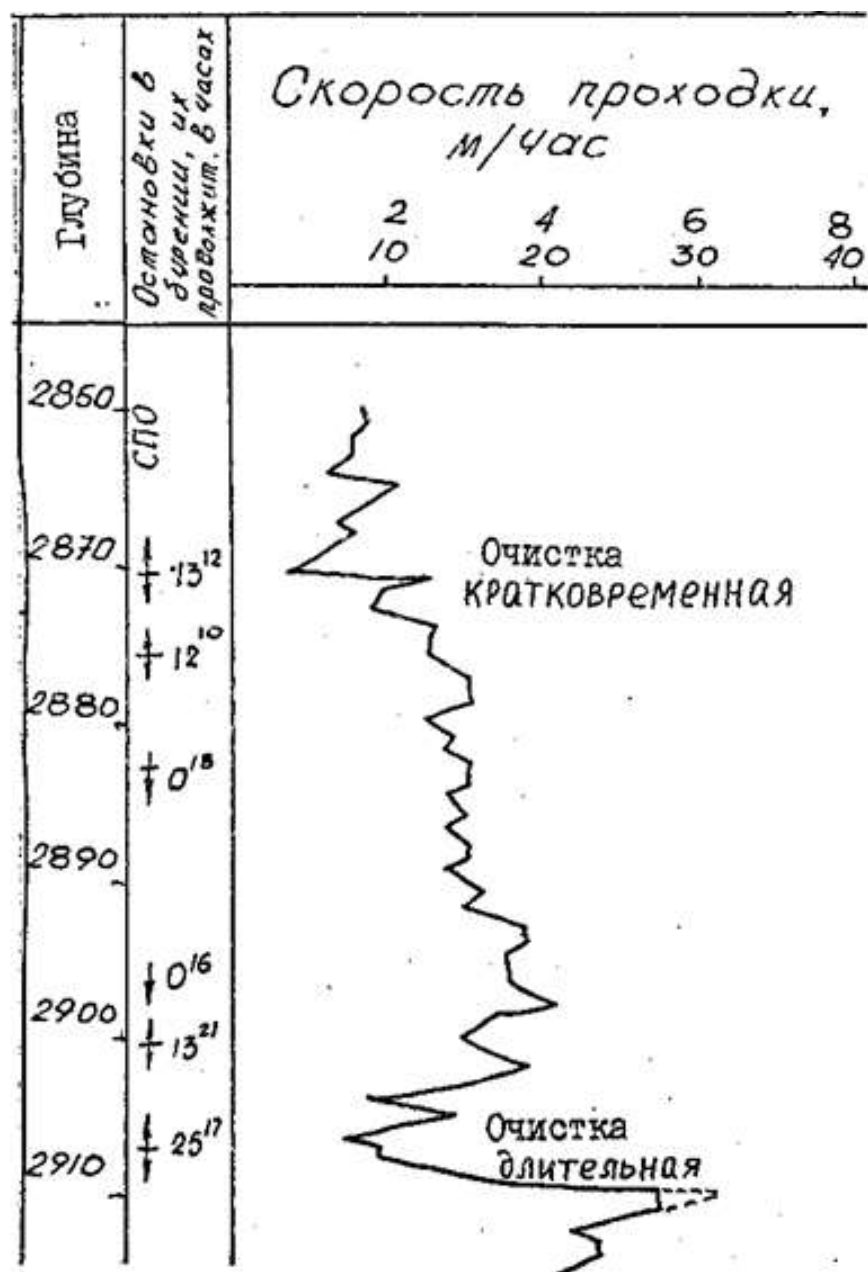


Рисунок 1.3 - Газокатажная диаграмма скважины № 1-г площади Милибулак

Способы, извлечения металлошлама с забоя были однообразные: паук, изготовленный из соответствующей обсадной трубы; магнитный фрез с размещением над ним обычного цилиндрического ШМУСа. Дополнительные спуско-подъемные операции (СПО) производились для определения крупных предметов, таких, как челюсти АКБ и шарошек, когда невозможно было без извлечения продолжать бурение. В случае скв., 4-г Придорожной площади голым концом в течение 1,5 ч осуществлялась обратная промывка, позволившая резко увеличить скорость бурения, что подтверждает полную очистку забоя от металла массой 7 кг.



Проводилось извлечение шаров специальным эжекторным ШМУСом в скв. 28-г на площади А лимбе т, а также обратной промывкой.

Установлено, что при наличии в нефтяной или газовой скважине предметов из сталей и твердых сплавов в количестве более 4 кг скорость проходки уменьшается почти в 3 раза, а на долото - в 2...2,5 раза.

В глинисто-песчаных разрезах таких изменений не чувствуется, так как этот забойный металл часто впрессовывается в стенку скважины и редко выпадает, а если и выпадает, то распределяется уже в нижележащих кавернах, образуемых в прослоях песка, реже - алеврита. Примером могут служить кавернозные стенки скважин на площади Жетыбай, где с помощью эжекторного забойного дворника искали 300 шаров, опор турбобура, доставленных на забой по бурильным трубам специально. Все они, за исключением одного, не оказались на забое, а рассосались по кавернам (извлечен был один, который прилип на наружной стенке корзины забойного дворника). Таким образом, поиск устройств и способов очистки забоя скважин - необходимость острая и должна включаться в технологию строительства.

## **1.2 Устройства для очистки забоя скважин от посторонних предметов**

В процессе проводки глубоких нефтяных и газовых скважин на забое скапливаются различные металлические предметы, например, случайно упавшие с поверхности детали, элементы качения опор и обломки твердосплавного вооружения отработанных долот, а иногда и шарошки долот. Наличие постороннего металла на забое снижает показатели работы долот и приводит к преждевременному выходу их из строя, следовательно, значительно увеличивает непроизводительные затраты времени на СПО в процессе строительства скважин, особенно глубоких и- сверхглубоких /1/.

Для очистки забоя от металлических предметов применяются устройства, которые подразделяют на две основные группы: первая - устройства, устанавливаемые в компоновке бурильной колонны; вторая - устройства, периодически спускаемые в скважину.

К первой группе относятся устройства, устанавливаемые непосредственно над долотом, в основу работы которых положен гидравлический способ очистки забоя; ко второй относятся устройства, периодически спускаемые в скважину, в основу работы которых положен механический, магнитный или гидромеханический способ захвата и очистки забоя, как наиболее перспективный.

Недостатком устройств первой группы является быстрое заполнение ловушки шламом и по этой причине - низкая эффективность улавливания металлических предметов, причем шлам в ловушке обычно оказывается настолько сильно спрессованным, что часто не поддается извлечению. В этом случае изделие непригодно к дальнейшему использованию или требует капитального ремонта. Кроме того, устройствами данной группы возможно извлечение только очень мелких металлических предметов с забоя, которые

могут поместиться в щель уловителя, имеющей пределы 16...28 мм.

Недостатком устройств второй группы является необходимость осуществления специальных рейсов бурильного инструмента (СПО), на что затрачивается непроизводительное время, а также трудности улавливания сравнительно мелких металлических предметов большого удельного веса.

С целью повышения эффективности очистки забоя от металлических предметов ведется дальнейшее усовершенствование устройств как первой, так и второй групп, но принципиальная схема их в корне не меняется.

### 1.3 Устройства, устанавливаемые в компоновке бурильной колонны

С целью повышения эффективности улавливания металлических предметов непосредственно в процессе бурения в ПО "Куйбышевнефть" разработана конструкция металлоуловителя гидравлического типа, представленная (на рис.1.4).

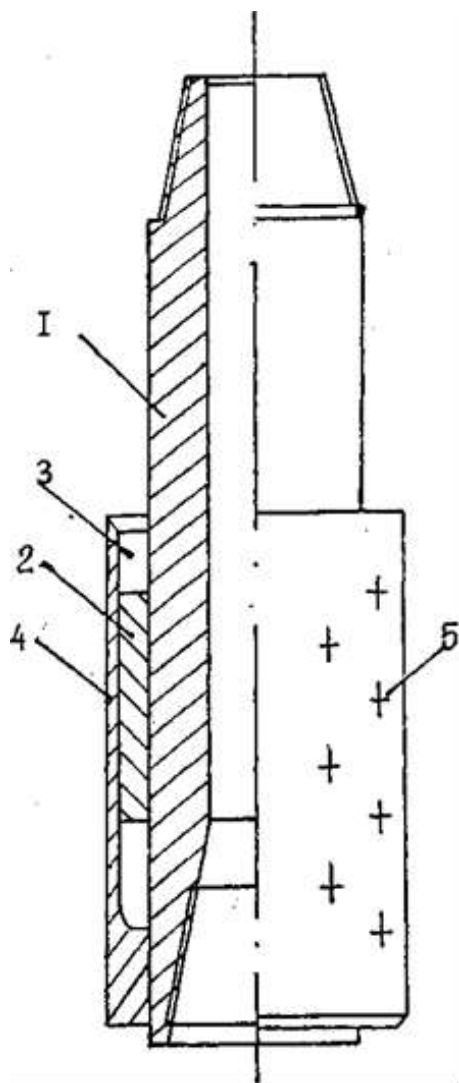


Рисунок 1.4 - Металлоуловитель

В процессе бурения шлам, а также мелкие металлические предметы, находящиеся на забое скважины, поднимаются восходящим потоком жидкости выше верхнего среза кожуха 4. В этой зоне скорость потока падает и металлические предметы вместе с крупным шламом осаждаются в накопительную полость 3. Очистка полости от мелкого шлама теоретически рассчитана, в процессе нормальной циркуляции бурового раствора, осуществляется через отверстия 5 в кожухе. Суммарная площадь отверстий в горизонтальных рядах уменьшается снизу вверх, что практически должно обеспечивать равномерную устойчивую выносную способность потока внутри накопительной полости благодаря перепаду давления по длине полости и в процессе ее заполнения металлическими предметами.

Однако из-за незначительного поперечного сечения полости данным металлоуловителем возможно извлечение только мелких или плоских металлических предметов, которые не выносятся скоростью промывочной жидкости в затрубье. Из-за отверстий скорость за кожухом постепенно уменьшается, что также не доносит предметы.

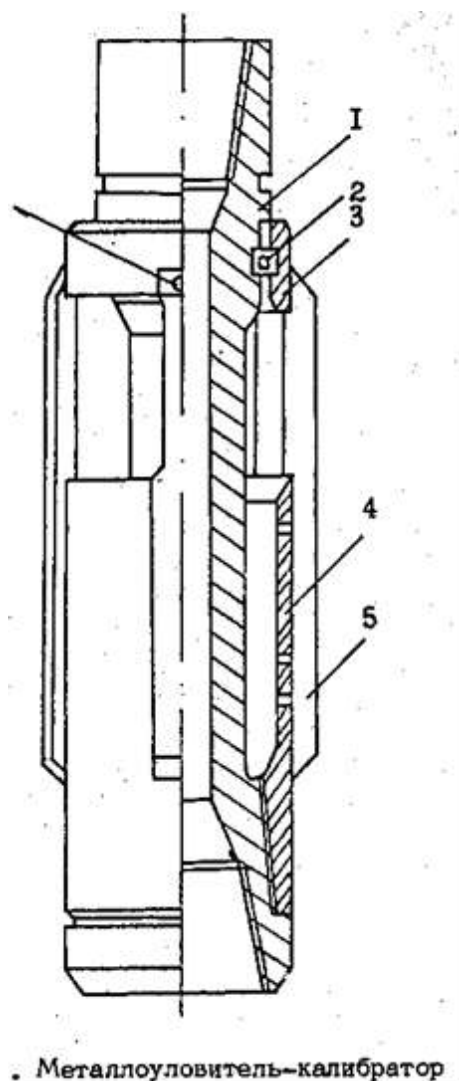


Рисунок 1.5 - Маталлоуловитель – калибратор

Во ВНИИБТ разработана совмещенная конструкция металл уловителя-калибратора, представленная на рисунке 1.5 отличается от описанного металлоуловителя тем, что ого кожух выполнен как одно целое с калибрующими лопастями. Кожух имеет отверстия на боковой поверхности для прохождения раствора. Калибровочные лопасти армированы твердым сплавом.

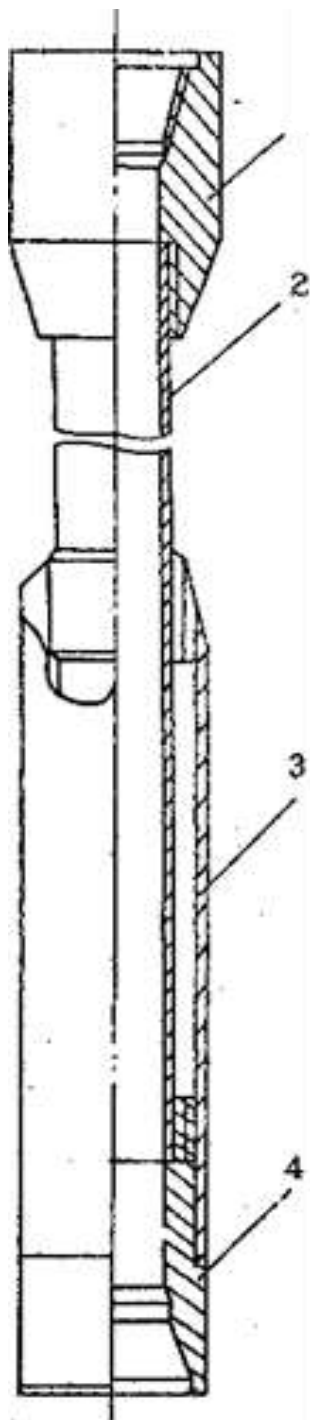


Рисунок 1.6 - Шламометаллоуловитель открытого типа (ШМУ-О)

Металлоуловитель-калибратор собирается следующим образом. С помощью замковой резьбы на корпус 1 навинчивается кожух 4 с калибрующими лопастями 5 и болтами 6 закрепляется на корпусе. Для облегчения развинчивания кожуха в направляющей втулке 3 устанавливается

разрезное пружинное кольцо 2.

Металлоуловитель-калибратор собранный, как показано на рис.5, присоединяется к долоту, к нему подсоединяют элемент бурильной колонны и всю колонну спускают в призабойную зону скважин. Восстанавливают интенсивную циркуляцию промывочной жидкости и металлоуловитель калибратор с проработкой спускают до забоя, а затем продолжают бурение скважины. Частицы металла, попавшие в кольцевое пространство между корпусом и кожухом, удаляются после подъема металлоуловителя-калибратора струей воды, направленной в кольцевое пространство, и постукиванием по кожуху. При износе калибрующие лопасти заменяются вместе с кожухом /2/.

Широкое распространение при очистке забоя от мелких металлических предметов получили конструкции шламометаллоуловителя, разработанные во ВНИИБТ. На рисунке 1.6 представлена конструкция шламометаллоуловителя открытого типа (ШМУ-О).

Устройство собирается следующим образом. С помощью трубной резьбы к валу 2 присоединяются трубный переводник 1 и переводник - база 4. При помощи левой трубной резьбы к переводнику-базе присоединяется кожух 3, к верхнему кожуху которого приварены центрующие косынки.

Длина ШМУ-0 достигает 8 м, при этом кожух изготавливают на 1...1,5 м короче вала, что обеспечивает оседание металлических предметов в карман кольцевой формы между кожухом и валом.

Таблица 1.1 - Техническая характеристика шламометаллоуловителей ШМУ-0

| Диаметр скважины<br>мм | Площадь сечения скважины,<br>мм <sup>2</sup> | Диаметр ШМУ-О,<br>мм | Сечение ШМУ-О, мм <sup>2</sup> | Кольцевой зазор,<br>мм | Сечение кольцевого зазора, мм <sup>2</sup> | Рекомендуемая скорость в кольц. зазоре, м/с | Расход жидкости<br>дм <sup>3</sup> /с |
|------------------------|----------------------------------------------|----------------------|--------------------------------|------------------------|--------------------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------|
| 1                      | 2                                            | 3                    | 4                              | 5                      | 6                                          | 7                                           | 8                                     |
| 145                    | 16515                                        | 127                  | 12568                          | 18                     | 3945                                       | 2                                           | 8                                     |
|                        |                                              |                      |                                |                        |                                            | 2,54                                        | 10                                    |
|                        |                                              |                      |                                |                        |                                            | 3,4                                         | 13,5                                  |
|                        |                                              |                      |                                |                        |                                            | 4,05                                        | 25                                    |
| 190                    | 28353                                        | 168                  | 22167                          | 22                     | 6186                                       | 4,65                                        | 30                                    |
|                        |                                              |                      |                                |                        |                                            | 5,82                                        | 36                                    |
|                        |                                              |                      |                                |                        |                                            | 3,09                                        | 25                                    |
| 215,9                  | 35968                                        | 194                  | 29559                          | 21                     | 6409                                       | 4,68                                        | 30                                    |
|                        |                                              |                      |                                |                        |                                            | 5,62                                        | 36                                    |
|                        |                                              |                      |                                |                        |                                            | 2,54                                        | 25                                    |
| 243                    | 47143                                        | 219                  | 37668                          | 24                     | 9475                                       | 3,16                                        | 30                                    |
|                        |                                              |                      |                                |                        |                                            | 3,8                                         | 36                                    |
|                        |                                              |                      |                                |                        |                                            | 2,58                                        | 25                                    |
| 269                    | 56832                                        | 245                  | 47143                          | 24                     | 9689                                       | 3,1                                         | 30                                    |
|                        |                                              |                      |                                |                        |                                            | 3,72                                        | 36                                    |

| Диаметр вала, мм | Сечение вала, мм <sup>2</sup> | Зазор между стенкой скважины и валом, мм | Сечение зазора, мм <sup>2</sup> | Рекомендуемая скорость раствора, м/с | Перепад скорости потока под кожухом, раз |
|------------------|-------------------------------|------------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------------|
| 9                | 10                            | 11                                       | 12                              | 13                                   | 14                                       |
| 60               | 2827                          | 83                                       | 13223                           | 0,61                                 | 3,7                                      |
|                  |                               |                                          |                                 | 0,75                                 |                                          |
|                  |                               |                                          |                                 | 1,02                                 |                                          |
|                  |                               |                                          |                                 | 1,13                                 |                                          |
| 89               | 6221                          | 101                                      | 22132                           | 1,36                                 | 3,58                                     |
|                  |                               |                                          |                                 | 1,62                                 |                                          |
|                  |                               |                                          |                                 | 0,97                                 |                                          |
| 114              | 10207                         | 100                                      | 25641                           | 1,17                                 | 4,0                                      |
|                  |                               |                                          |                                 | 1,4                                  |                                          |
|                  |                               |                                          |                                 | 0,79                                 |                                          |
| 141              | 15614                         | 104                                      | 31529                           | 0,95                                 | 3,28                                     |
|                  |                               |                                          |                                 | 1,15                                 |                                          |
|                  |                               |                                          |                                 | 0,61                                 |                                          |
| 141              | 15614                         | 128                                      | 41218                           | 0,73                                 | 4,28                                     |
|                  |                               |                                          |                                 | 0,87                                 |                                          |

Недолговечность резьбового соединения кожуха ШМУ-0 с переводником-базой, которое к тому же затрудняет развинчивание узлов для удаления металла, подтверждена на производстве. В таблице 1.1 представлена техническая характеристика ШМУ-0 серийных выпусков.

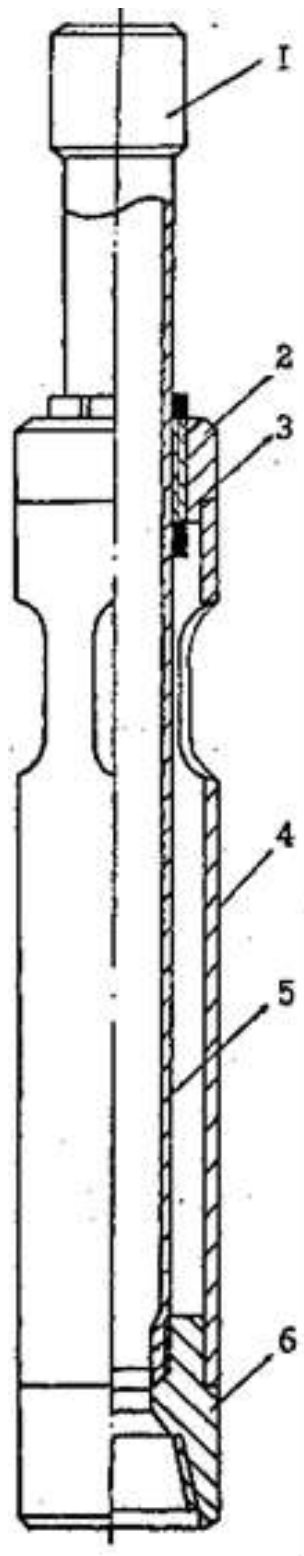
На рисунке 1.7 представлена конструкция шламометаллоуловителя закрытого типа ШМУ-3, разработанного также во ВНИИБТ.

Конструкция ШМУ-3 отличается от ШМУ-0 тем, что кожух свободно посажен на переводник и в верхней части крепится и центрируется с помощью гайки и резьбовой втулки. Это немного облегчает удаление из него металла, но снять его с помощью гайки и резьбы бывает очень затруднительно /3/.

ШМУ-0 и ШМУ-3 работают следующим образом. ШМУ спускают в скважину и, не доводя до забоя на 5...8 м, осуществляют интенсивную, с максимальной подачей циркуляцию промывочной жидкости и с вращением плавно опускают до забоя, здесь производят ловильные работы. При интенсивной циркуляции рекомендуется приподнимать ШМУ 3...4 раза на 10...15 м. Общее время работы должно составлять не менее 1 ч, скорость восходящего потока промывочной жидкости должна быть не менее 3,7 м/с. Частицы металла, попадая в кольцевой зазор между кожухом ШМУ и стенками скважины, уносятся далеко вверх, восходящим потоком.

На уровне верхнего торца скорость потока резко уменьшается из-за увеличения кольцевого сечения и металлические частицы частично попадают в зону завихрения - осаждаются в кольце покоя между кожухом и валом /4/.





1 - центратор; 2 - гайка; 3 - резьбовая втулка; 4 - втулка; 5 - вал; 6 - переводник

Рисунок 1.7 - Шламометаллоуловитель закрытого типа (ШМУ-3)

Шламометаллоуловители ШМУ-0, ШМУ-3 получили наиболее широкое использование в компоновке с ловильным инструментом других типов. В таблице 1.2 приведены сведения о существующих конструкциях ШМУ-3. Однако необходимо увеличить зазор камеры, а также гидросистему очистки

камеры перед началом улавливания металлошлама.

Таблица 1.2 - Номенклатурный ряд шламометаллоуловителей ШМУ-3

| Номер ШМУ-3 | Диаметр скважины, мм | Наружный диаметр кожуха ШМУ, мм | Зазор между стенками скважины и ШМУ, мм | Диаметр вала ШМУ, мм | Перепад скорости потока под кожухом ШМУ, раз |
|-------------|----------------------|---------------------------------|-----------------------------------------|----------------------|----------------------------------------------|
| 6           | 145                  | 127                             | 18                                      | 73                   | 3,2                                          |
|             | 165                  | 126                             | 39                                      | 41,85                |                                              |
| 7           | 161                  | 141                             | 20                                      | 89                   | 3,0                                          |
|             | 203                  | 156                             | 47                                      | 62                   |                                              |
| 8           | 190                  | 168                             | 22                                      | 114                  | 2,9                                          |
|             | 183                  | 220                             | 63                                      | 102                  |                                              |
| 9           | 214                  | 194                             | 20                                      | 114                  | 4,3                                          |
|             | 360                  | 300                             | 60                                      | 102                  |                                              |
| 10          | 243                  | 219                             | 26                                      | 141                  | 3,5                                          |
|             | 464                  | 376                             | 88                                      | 156                  |                                              |
| 11          | 269                  | 245                             | 24                                      | 168                  | 3,6                                          |
|             | 568                  | 470                             | 98                                      | 221                  |                                              |
| 12          | 295                  | 273                             | 22                                      | 168                  | 4,6                                          |
|             | 685                  | 585                             | 100                                     | 168                  |                                              |

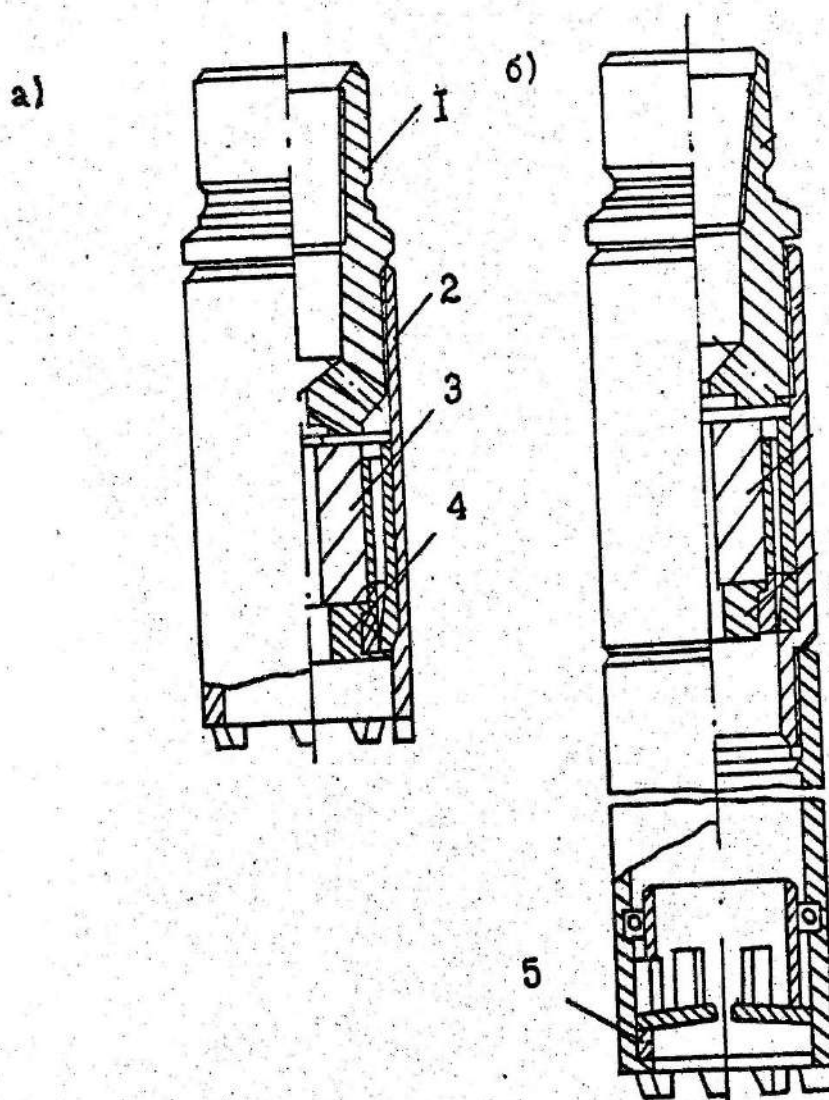
#### 1.4 Устройства для очистки забоя, периодически спускаемые в скважину

По степени эффективности очистки забоя скважин от посторонних металлических предметов устройства данной группы значительно превосходят шламометаллоуловители, устанавливаемые в компоновку буровой колонны в процессе бурения.

По способу очистки забоя устройства данной группы можно, подразделить на следующие типы: магнитные, механические, гидравлические, гидромеханические.

К устройствам магнитного типа относят фрезеры - ловители, предназначенные для извлечения из скважины металлических предметов, обладающих ферромагнитными свойствами, как путем их прямого захвата, так и с предварительной обработкой. Фрезы-ловители изготавливаются двух видов: без механического захвата ФМ (рис.8а) и с механическим захватом ФМЗ (рис.8б).

Перед спуском фрезы - ловителя в скважину надо определить ее подъемную магнитную силу, а также возможность захвата извлекаемого путем приложения и отрыва от полюса магнита, аналогичного извлекаемому. Фрезы - ловители хорошо притягивают металлические предметы, если они находятся на расстоянии 1...2 см от полюса /6/.



а – типа ФМ; б – типа ФМЗ; 1 – переводник; 2 – корпус; 3 – магнитная система; 4 – нижний полюс; 5 – захватный узел

Рисунок 1.8 - Фрезер – ловитель магнитный

Работы по очистке забоя фрезами - ловителями осуществляют следующим образом. Фрезер опускают в скважину, присоединив к бурильной колонне. Следует соблюдать особую осторожность в процессе спуска в зонах резкого изменения азимута кривизны, а также в интервалах нахождения каверн и уступов. Непосредственно перед забоем, на расстоянии 10...15 м, необходимо осуществить циркуляцию бурового раствора и вращать бурильную колонну с частотой 20...60 мин<sup>-1</sup> с вращением колонны и уже потом опускать фрезер и вращать его не менее 10 мин. При наличии на забое крупных предметов необходимо применять фрезеры с механическим захватом (стационарным или выдвигаемым).

Данными фрезерами рекомендуется работать совместно со шламометаллоуловителями с целью захвата последними неферромагнитных

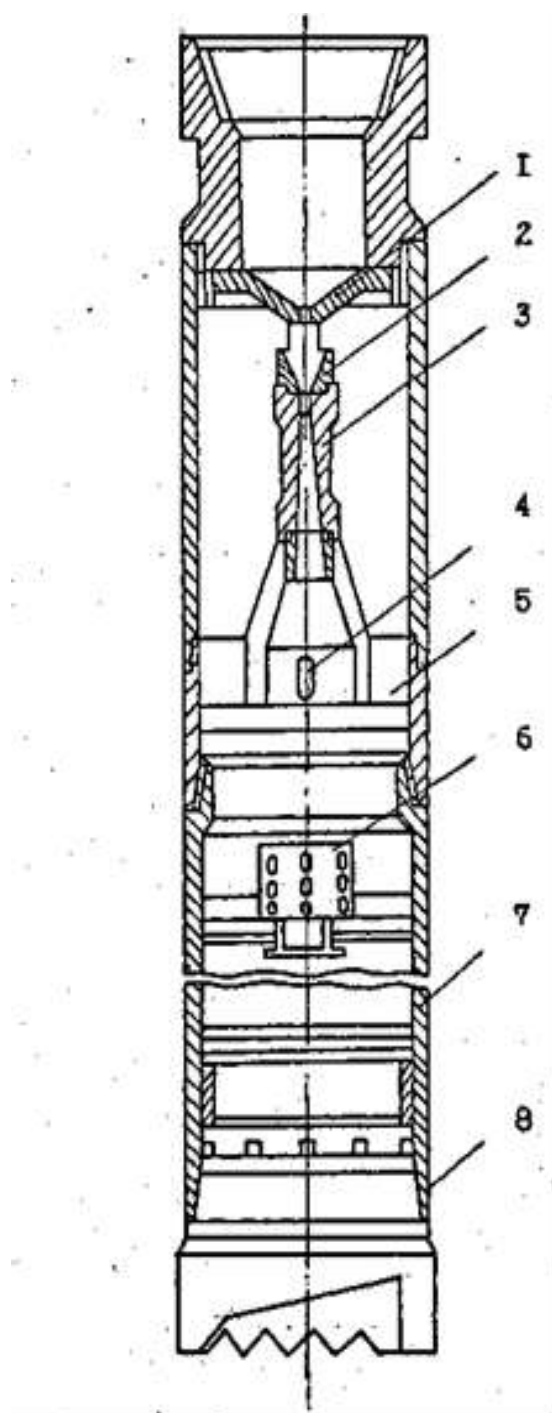
предметов (зубьев, штыревых долот), металлических предметов и немагнитных сплавов и т.д.).

В таблице 1.3 представлены данные о всех выпускаемых серийно фрезерах - ловителях магнитных.

Таблица 1.3 – Основные параметры фрезеров – ловителей магнитных

| Шифр    | Условная грузоподъемная сила, Н | Диаметр корпуса, мм | Суммарная длина, мм | Присоединительная резьба | Рекомендуемый режим работы        |                                      | Масса, кг |
|---------|---------------------------------|---------------------|---------------------|--------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|-----------|
|         |                                 |                     |                     |                          | подача насоса, дм <sup>3</sup> /с | осевая нагрузка при фрезеровании, кН |           |
| ФМ-86   | 400                             | 86                  | 245                 | 3-62                     | 12                                | 3                                    | 8         |
| ФМ-88   | 700                             | 88                  | 380                 | 3-66                     | 12                                | 3                                    | 10        |
| 19ФМ-88 | 700                             | 88                  | 480                 | 3-66                     | 12                                | 3                                    | 19        |
| Ф10М-93 | 850                             | 93                  | 265                 | 3-62                     | 12                                | 3                                    | 10        |
| ФМ-103  | 800                             | 103                 | 400                 | 3-76                     | 12                                | 4                                    | 23        |
| ФМ-103  | 800                             | 103                 | 520                 | 3-76                     | 12                                | 4                                    | 25        |
| ФМ-115  | 950                             | 115                 | 330                 | 3-62                     | 12                                | 5                                    | 18        |
| ФМ-118  | 1000                            | 118                 | 440                 | 3-76                     | 12                                | 5                                    | 24        |
| ФМЗ-118 | 1000                            | 118                 | 550                 | 3-76                     | 12                                | 5                                    | 26        |
| ФМ-135  | 1200                            | 135                 | 440                 | 3-88                     | 12                                | 6                                    | 38        |
| ФМЗ-135 | 1200                            | 135                 | 580                 | 3-88                     | 12                                | 6                                    | 45        |
| ФМ-150  | 2400                            | 150                 | 450                 | 3-121                    | 12                                | 7                                    | 45        |
| ФМЗ-150 | 2400                            | 150                 | 600                 | 3-121                    | 12                                | 7                                    | 50        |
| ФМ-170  | 2800                            | 170                 | 460                 | 3-121                    | 20                                | 8                                    | 55        |
| ФМЗ-170 | 2800                            | 170                 | 610                 | 3-121                    | 20                                | 8                                    | 65        |
| ФМ-195  | 3250                            | 195                 | 470                 | 3-121                    | 20                                | 9                                    | 110       |
| ФМЗ-195 | 3250                            | 195                 | 620                 | 3-121                    | 20                                | 9                                    | 120       |
| ФМ-225  | 560                             | 225                 | 550                 | 3-147                    | 20                                | 1                                    | 130       |
| ФМЗ-225 | 560                             | 225                 | 700                 | 3-147                    | 20                                | 1                                    | 140       |
| ФМ-270  | 680                             | 270                 | 600                 | 3-147                    | 20                                | 1,1                                  | 160       |
| ФМЗ-270 | 680                             | 270                 | 750                 | 3-147                    | 20                                | 1,1                                  | 170       |
| ФМ-315  | 1200                            | 315                 | 700                 | 3-147                    | 20                                | 1,2                                  | 210       |
| ФМЗ-315 | 1200                            | 315                 | 850                 | 3-147                    | 20                                | 1,2                                  | 230       |

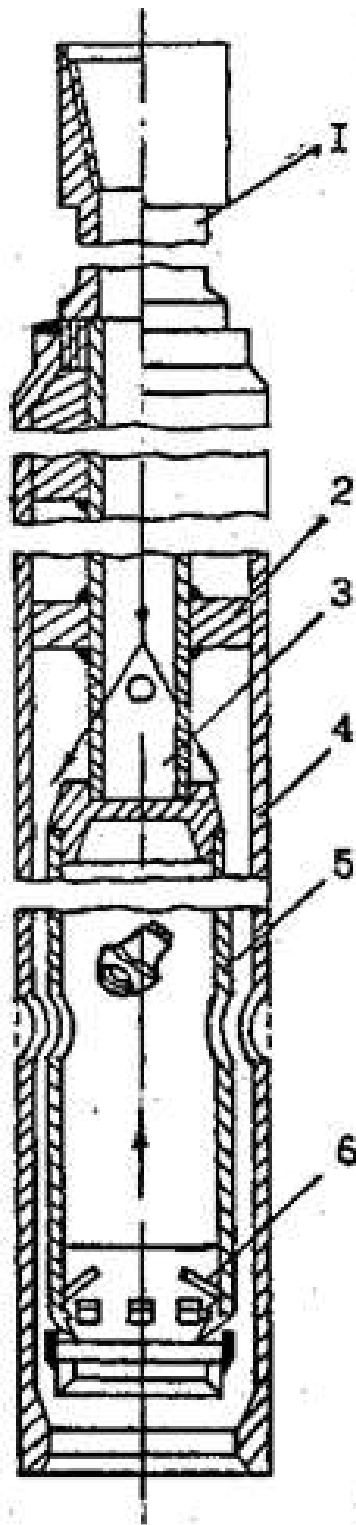
К устройствам, основанным на гидравлическом принципе очистки забоя и периодически опускаемых в скважину, относится "Металлоуловитель" разработки Е.М.Курнева и Н.И.Лукинова (рис.9).



1 - сопло насоса; 2 - горловина; 3 - диффузор; 4 — каналы; 5 - воронка; 6 - фильтр; 7 - каналы вертикальные; 8 – переводник

Рисунок 1.9 - Metalлоуловитель Е.М.Курнева и Н.И.Лукина

В металлоуловителе Е.М.Курнева и Н.И.Лукина размещен струйный насос (эжектор), посредством которого создается обратная циркуляция в призабойной зоне через каналы 4, вследствие чего происходит заталкивание предметов, находящихся в скважине, во внутреннюю полость металлоуловителя.



1 - переводник; 2 - заглушка; 3 - корпус; 4, 5 - наружный корпус; 6 – лепестки

Рисунок 1.10 - Гидравлический ловитель Г.Н.Кириянова

Принципиальные схемы и принцип работы металлоуловителей, представленных на рисунок 10,11,12, идентичны металлоуловителю Е.М.Курнева и Н.И.Лукина. Их общим недостатком является сложность конструкции, что хорошо видно из рисунков.

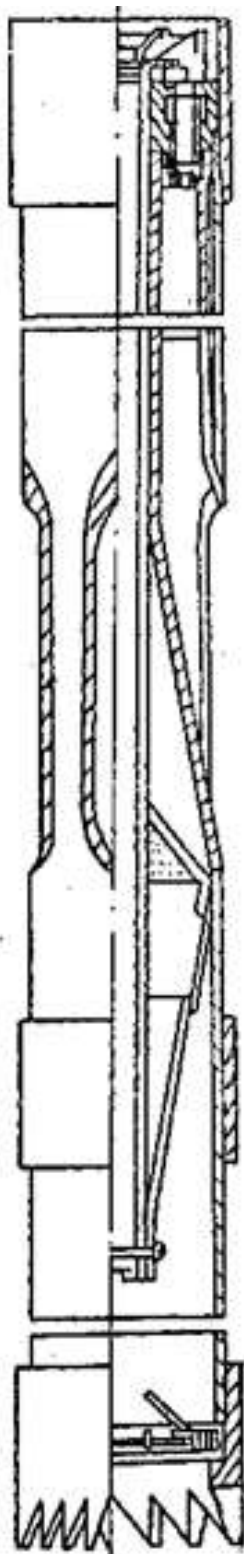
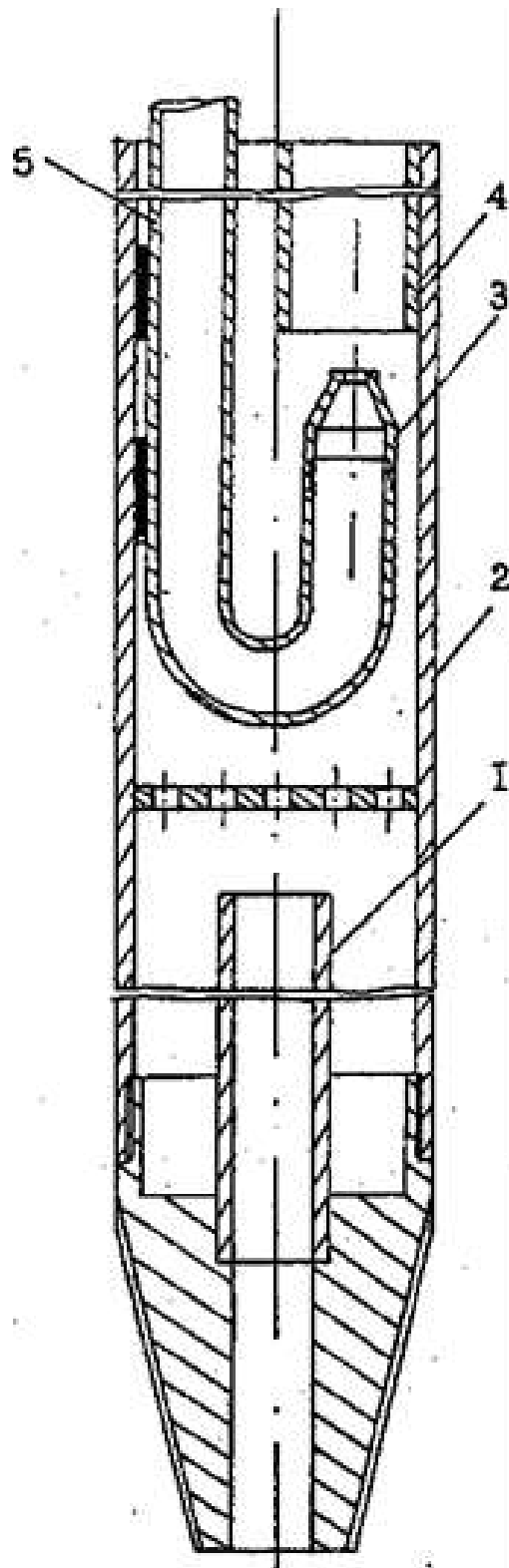


Рисунок 1.11 - Металлоуловитель Р.С.Яремейчука и З.И.Узумова

Для повышения эффективности очистки забоя скважин от посторонних предметов разработан целый ряд конструкций металлоуловителей гидравлического типа.



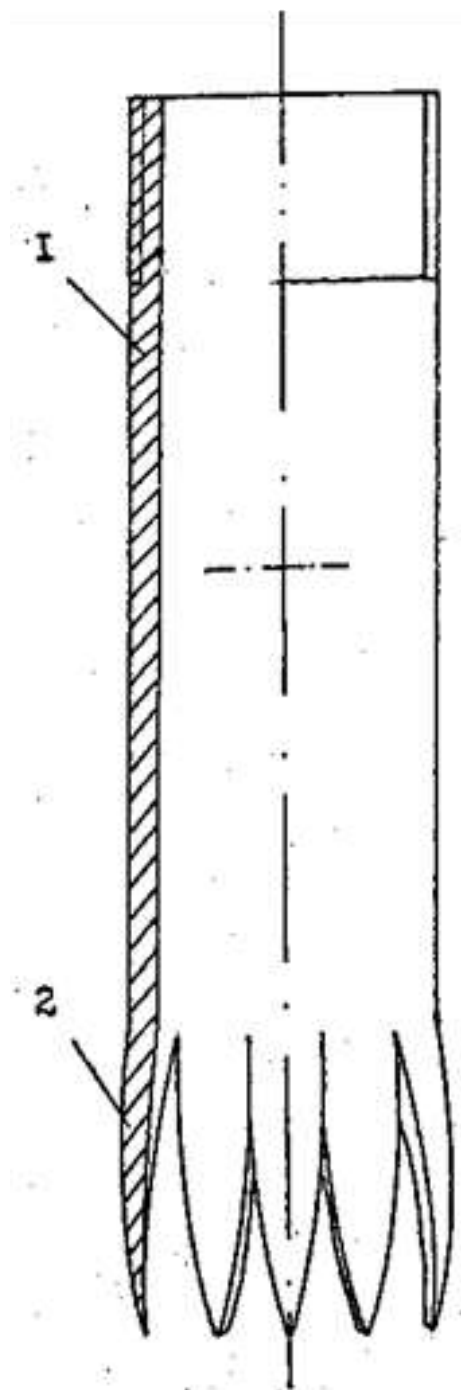
1 - труба всасывающая; 2 - корпус; 3 - сопло; 4 - корпус; 5 - бурильная труба

Рисунок 1.12 - Струйный металлоуловитель

Устройство, основанное не механическом принципе очистки забоя от посторонних предметов, представленное на рисунке 1.13, получило название "Трубный паук". Основным назначением является очистка забоя от крупных



металлических предметов (лап, шарошек, кувалд, челюстей, сухарей, клиньев и т.п.). Его изготавливают из обсадной трубы определенного диаметра (в зависимости от диаметра скважины) длиной 1,5...2,5 м, что обеспечивает возможность повторного использования устройства.



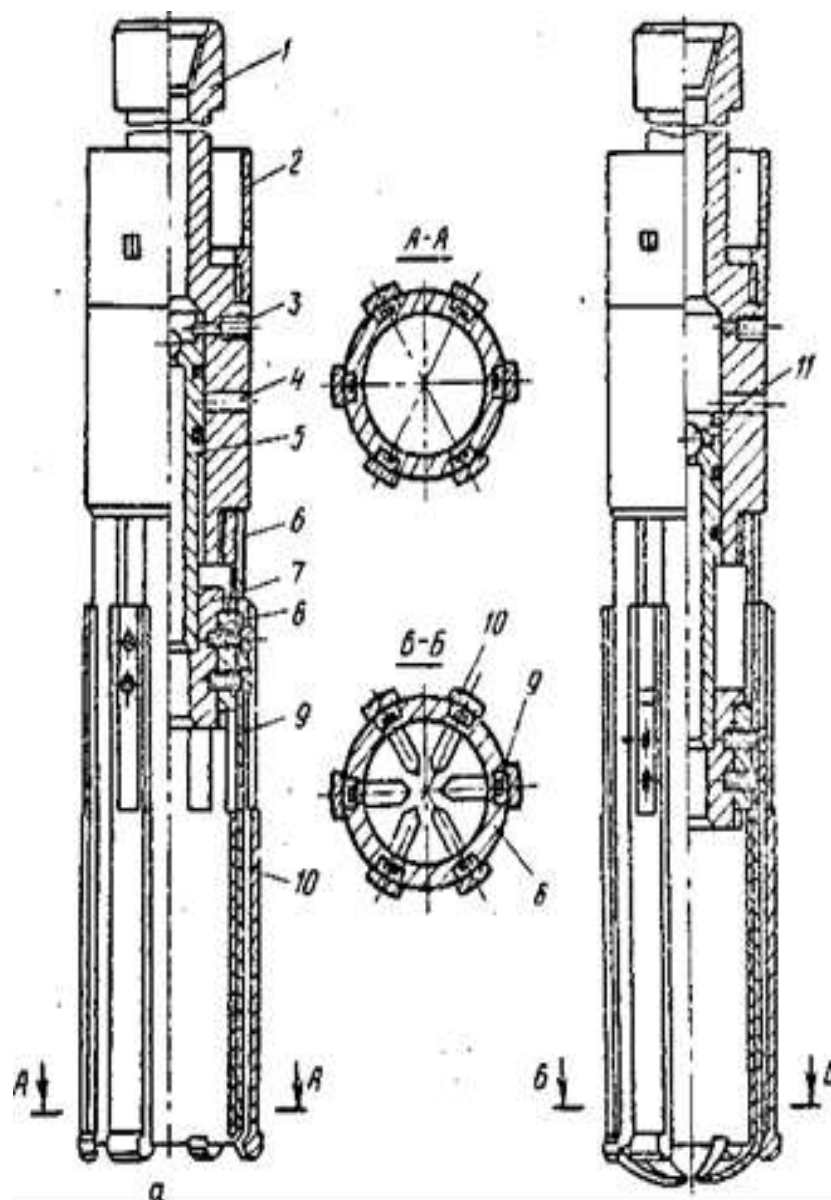
1 - корпус; 2 - захватывающие зубья

Рисунок 1.13 - Трубный паук

В нижней части трубы нарезают зубья высотой 20...35 см, которые затем подвергают нагреву (отпускают металл). Для предупреждения преждевременного загиба зубья делают слегка выпуклыми наружу (бочкообразными).

Перед спуском паука необходимо проработать призабойную зону скважины на 2 - 3 м выше забоя и пикообразным долотом углубить скважину на 0,3 – 0,5 м. Затем «паук» опускают на забой и создают осевую нагрузку на него. Зубья «паука» сходятся по образующей конуса, посторонний предмет вместе с частью породы забоя заходит внутрь и остается в пауке.

Паук гидромеханический представлен на рисунке 1.14, так же, как и трубный паук, предназначен для извлечения крупных металлических предметов с забоя скважин, но имеет более сложную конструкцию, обеспечивающую в отличии от предыдущего его многоразовое использование.



1 - переводник; 2 - кожух; 3 - стопорные шпильки; 4 - отверстия; 5 - поршень; 6 - пазы; 7 - захват; 8 - стопорные шпильки захвата; 9 — захватывающие зубья; 10 — накладки зубьев; 11 - шар

Рисунок 1.14 - Гидромеханический паук

Гидромеханический паук на бурильных трубах опускают на забой скважины и не доходя до него, начинают вращать ротор с низкой частотой и

опускают паук на забой до упора. Затем бросают шар 11, который садится в седло, при этом, поршень под давлением бурового раствора срезает шпильки захвата 8 и толкателем выводит подвижные захватывающие зубья 9, которые перемещаются по пазам, смыкаясь (завальцовываясь) в центре (см. рис. 1.14б) захватывают посторонний предмет на забое скважины. Циркуляция раствора осуществляется через отверстия 4.

В таблице 1.4 приведены основные данные гидромеханических пауков.

Таблица 1.4 – Основные технические данные гидромеханических пауков

| Диаметр скважины, мм | Шифр    | Наружный диаметр захвата, мм | Длина, мм | Присоединительная резьба | Масса, кг |
|----------------------|---------|------------------------------|-----------|--------------------------|-----------|
| 140                  | ПГН-138 | 138                          | 1685      | 3-88                     | 81        |
| 161                  | ПГН-158 | 158                          | 1685      | 3-88                     | 92        |
| 190                  | ПГН-188 | 188                          | 1800      | 3-121                    | 159       |
| 216                  | ПГН-212 | 212                          | 1800      | 3-121                    | 172       |
| 243                  | ПГН-240 | 240                          | 1970      | 3-147                    | 234       |
| 269                  | ПГН-266 | 266                          | 1970      | 3-147                    | 264       |
| 295                  | ПГН-292 | 292                          | 2230      | 3-171                    | 433       |
| 320                  | ПГН-316 | 316                          | 2230      | 3-171                    | 472       |

Широко также используется металлоуловитель представленный на рисунке 1.15, состоящий из корпуса 1, с каналом 2 для подачи промывочного агента на забой скважины, конуса 3, жестко соединенного с корпусом и образующей с ним полости 4 для сбора металлического скрапа. В корпусе выполнены калиброванные отверстия 5, соединяющий канал с полостью.

В результате увеличения проходного сечения над полостью скорость промывочного агента снижается, уменьшается его подъемная сила и кусочки металла, например, твердого сплава, падают в полость, а шлам по затрубному пространству скважины выносятся на поверхность. Благодаря наличию отверстий в полости создается направленное движение промывочного агента со скоростью, создающей подъемную силу, достаточную для предотвращения оседания в полости бурового шлама, но не препятствующую оседанию частиц твердого сплава. Создание необходимой скорости движения промывочного агента в полость обеспечивается путем подбора проходного сечения.

Недостатком известных устройств для улавливания металла и шлама является низкая эффективность гидравлической чистки забоя от металлических предметов различной величины, плотности и форм. В описанных инструкциях сечение общей накопительной полости составляет около 20 % от сечения ствола скважины и поэтому с учетом разделения полости на 2 сегмента создается возможность улавливания на забое только мелких предметов, составляющих в поперечнике 0,2...0,25 диаметра ствола скважины. Дополнительным недостатком является отсутствие эффекта инъекции в накопительной полости через радиальные отверстия в кожухе, что не позволяет, например, при

перекрытии отверстий шламом увеличивать улавливающие свойства накопителя.

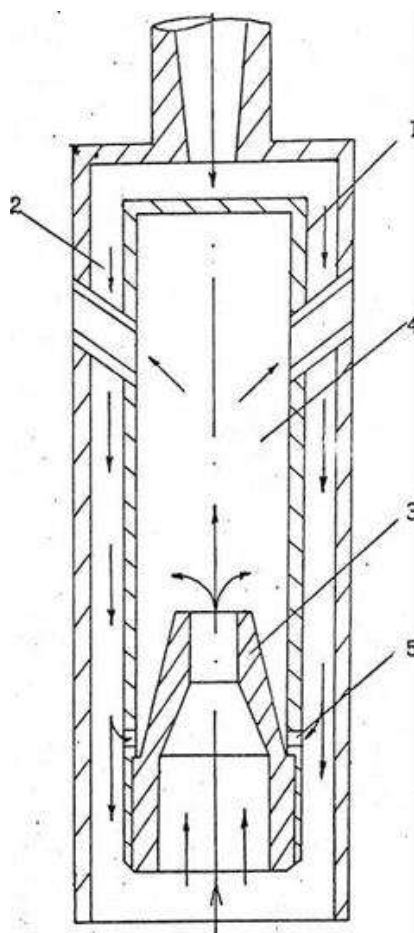


Рисунок 1.15 -Metalлоуловитель

## ВЫВОДЫ

Проблема очистки забоя скважин ставит все новые задачи, решение которых приводит к эффективному использованию назначения этой горной выработки. Особым вниманием пользуются поисковые, разведочные и эксплуатационные скважины, строительство которых ускоряется во времени на 2...15 %, что вполне оправдывает затраты на создание новых технологий и техники извлечения шлама и металлических предметов из забоя.

Устройства для извлечения посторонних предметов с забоя скважин делятся на две основные группы:

- устройства, устанавливаемые в компоновке бурильной колонны;
- устройства, периодически спускаемые в скважину.

Устройства, устанавливаемые в компоновке бурильной колонны наряду с рядом достоинств имеют один существенный недостаток, а именно они позволяют извлекать только шлам или мелкие частицы посторонних предметов.

Перспективным направлением при создании конструкций шламометаллоуловителей следует считать направление по созданию устройств периодически спускаемых в скважины.

Отсутствуют конструкции шламометаллоуловителей позволяющие извлекать крупные предметы с забоя скважин, например шарошку долота.

## **2 Методика расчета шламометаллоуловителя для извлечения крупных и мелких предметов**

### **2.1 Назначение и область применения разрабатываемого шламометаллоуловителя**

Извлечение крупных, посторонних предметов с забоя скважин с увеличением их глубин становится все более трудно решаемой задачей, требующей значительных материальных, временных затрат. При этом, в настоящее время отсутствуют конструкции снарядов обеспечивающих высокую эффективность очистки при простоте конструкции и высокой надежности в работе.

С целью повышения эффективности очистки забоя скважин от металлических крупных и мелких предметов различной плотности и формы, а также промывки накопителя от шлама горной породы и надежности всасывания, затем улавливания этих предметов в накопитель, исключая интенсивное вращение устройства на забое и увеличение гидropотерь нами разработано принципиально новое устройство для извлечения крупных и мелких предметов с забоя скважины.

Предлагаемая конструкция ШМУС предназначен для извлечения с забоя скважины посторонних крупных металлических предметов, например, челюстей и сухарей трубных ключей, обломанных шарошек.

Рекомендуется для применения в геологоразведочных и нефтедобывающих организациях, занимающихся строительством глубоких скважин.

Поставленная цель достигается за счет конструктивного решения по размещению в ограниченном поперечном сечении скважины шламометаллоуловителя с большим поперечным сечением подъемного канала. Очистка происходит за счет того, что в накопителе ассиметрично размещен усеченный подводный канал промывочной жидкости, за счет уменьшения подводного канала по сравнению с бурильными трубами под корпусом для подъемного канала, а накопитель имеет одну полость, размещенную в секторе ассиметрии и сообщаемую с подводным каналом при помощи эжекторных отверстий или щелей, приближенных ко дну накопителя.

Наименьшее сечение подводного канала ускоряет движение промывочной жидкости, уменьшая сегмент площади забоя, занятый подводным каналом, и освобождая сечение ствола скважины для подъемного канала и накопителя. Ускорение течения промывочной жидкости снижает давление напротив отверстий или щелей у дна накопителя, что создает эжекция через накопительную полость и увеличивает расход через сечение подъемного канала, по которому металлические предметы быстро поставляются в накопитель. При попадании мелкого шлама в накопитель предусмотрена возможность промывки накопительной полости путем плотного прилегания к забою, когда циркуляция промывочной жидкости идет через щели и накопитель.

Это и есть наиболее перспективное направление по созданию шламометаллоуловителей для использования бурения глубоких и сверхглубоких скважин.

## 2.2 Струйные течения. Истечение из насадков и отверстий. Измерение скорости потока

Классической областью применения уравнения Бернулли являются задачи истечения жидкостей из отверстий и насадков с образованием струй (рис. 2.1). Здесь возникает та типичная ситуация быстропеременного потока, которая обеспечивает возможность применения уравнения Бернулли, если только скорость потока не слишком мала [7].

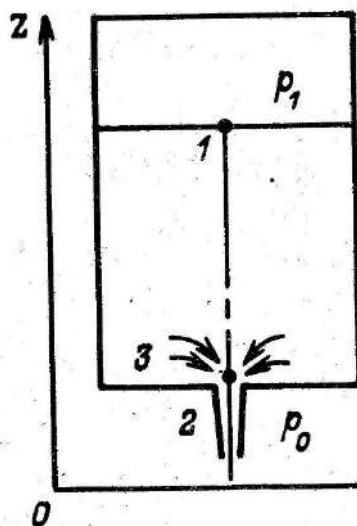


Рисунок 2.1 - Схема истечения струи из сосуда

Рассмотрим струю, вытекающую через узкое отверстие в стенке сосуда, в котором поддерживается повышенное давление (см. рис.2.1). В струе вне сосуда давление практически постоянно и равно внешнему давлению  $p_0$ . Внутри сосуда вдали от входа в отверстие скорость жидкости мала по сравнению со скоростью в струе, поскольку из условия несжимаемости

$$v_1 S_1 = v_2 S_2; \quad S_1 \gg S_2, \quad v_2 \gg v_1$$

Запишем уравнение Бернулли для трех точек одной линии тока — точек 1 и 3 внутри сосуда и точки 2 в струе:

$$H = z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} = z_3 + \frac{p_3}{\rho g} + \frac{v_3^2}{2g} \quad (2.1)$$

Поскольку скорости  $v_1$  и  $v_3$  малы, из уравнения (2.1) следует, что

$$z_1 + \frac{P_1}{\rho g} = z_3 + \frac{P_2}{\rho g} = H \quad (2.2)$$

Внутри сосуда давление распределено гидростатически, а полный напор равен сумме геометрического ( $z$ ) и пьезометрического ( $\frac{P}{\rho g}$ ) напоров. Из первого равенства

$$\frac{v_2^2}{2g} = H - z \frac{P_2}{\rho g} = \frac{P_1 - P_2}{\rho g} + z_1 - z_2 = H - H_2 \quad (2.3)$$

$$v_2 = \sqrt{2g \cdot (H - H_2)}$$

Эта формула называется формулой Торричелли. Фактически скорость жидкости в струе несколько меньше теоретического значения, даваемого формулой Торричелли, это связано с потерями энергии на выходе. В гидравлике принято учитывать эти потери введением поправочного множителя — коэффициента скорости  $\varphi$  :

$$v = \varphi \sqrt{2g \cdot (H - H_2)} \quad (2.4)$$

Если бы сечение сформировавшейся струи было равно сечению отверстия  $S_0$ , то расход потока был бы равен произведению скорости на площадь отверстия; фактически сечение струи несколько меньше сечения отверстия; это отличие обычно учитывается коэффициентом сжатия струи:  $S_2 = e \cdot S_0$ . В результате

$$Q = vS_2 = \varphi \cdot e \sqrt{2g(H - H_2)S_0} = \mu \sqrt{2g\Delta H S_0} \quad (2.5)$$

$\mu$  - коэффициент расхода.

В гидравлике имеются подробные данные относительно коэффициентов скорости и расхода для различных форм насадков и отверстий. Для бурения наибольший интерес представляет использование высокоскоростных струй в гидромониторных долотах. Основная задача — достижение при данном перепаде напора в промывочных отверстиях максимальной скорости. Поэтому целесообразно использовать насадки с максимально близким к единице коэффициентом скорости. Экспериментально установлено, что этому условию удовлетворяют сужающиеся "коноидальные" насадки, форма которых повторяет форму начального участка свободной струи. Практически часто используют сужающиеся насадки более простой формы. До сих пор мы говорили о свободной струе (например, о струе жидкости в воздухе). Однако основные результаты оказываются применимыми к начальным участкам затопленных струй, т.е. струй жидкости, вытекающих из отверстий в пространство, заполненное той же жидкостью. В этом случае  $\Delta H$  — разность напоров между жидкостью внутри сосуда, из которого вытекает струя, и



жидкостью в пространстве, куда она втекает.

В известном смысле обратной к рассмотренной является задача об определении давления струи на преграду. Пусть струя, имеющая скорость  $g$ , набегаёт на стенку и растекается по ней. Вначале предположим, что скорость жидкости в струе перпендикулярна к стенке. Тогда картина течения будет соответствовать рисунку 4.2, причем из соображений симметрии ясно, что найдется точка, в которой поток останавливается (т. О на рис. 2.2).

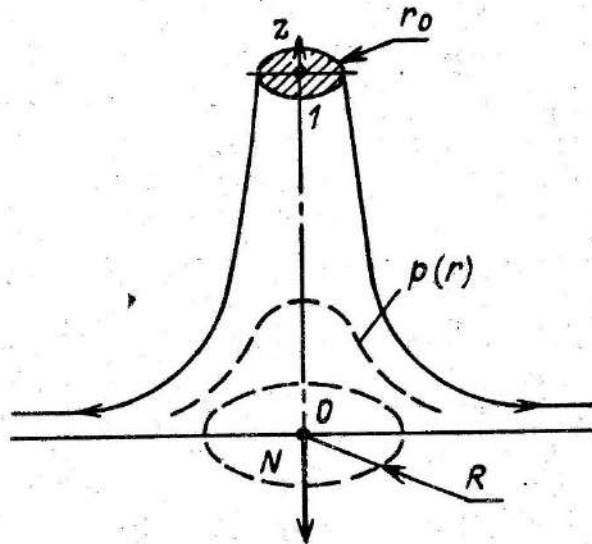


Рисунок 2.2 - Схема давления струи на преграду

Рассмотрим линию тока, начинающуюся вдали от стенки и приходящую в эту точку. Составляя для двух ее точек (О и 1) уравнение Бернулли, получаем

$$z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = z_0 + \frac{P_0}{\rho g} + \frac{v_0^2}{2g} \quad (2.6)$$

В данном случае,  $v_0 = 0$ ,  $z_1 = z_0$

$$P_0 = P_1 + \frac{\rho v_1^2}{2} \quad (2.7)$$

Давление в точке торможения (оно иногда называется давлением торможения) струи превышает давление в струе на величину динамического давления  $\frac{1}{2}\rho v^2$ .

Попробуем теперь определить полную силу давления струи на стенку. Для этого воспользуемся соотношениями, следующими из теоремы импульсов, взяв в качестве первого сечения удаленное сечение струи, а в качестве второго — кольцевое сечение в "разбежавшейся" струе; роль боковой поверхности трубки тока при этом будет играть стенка. Имеем  $N_x = 0$ , а

$$N = -N_y = \rho v Q = \rho v^2 S \quad (2.8)$$

(Здесь давление отсчитывается от уровня давления вне струи  $P$ ,  $S$  — площадь сечения струи). Естественно, что давление в зоне действия струи на поверхность постепенно снижается от центра к периферии. Если приближенно заменить такое распределение давления ступенчатым, то из соотношений (2.8) и (2.7) получим, что площадь зоны действия избыточного давления

$$S_0 \approx \frac{N}{P} = \frac{\rho v^2 S}{\rho v^2} = 2S \quad (2.9)$$

Таким образом, динамическое действие струи на поверхность стенки приближенно представляется давлением величины

$$P_d = \frac{1}{2} \rho v^2 ,$$

равномерно распределенным по площадке, сечение которой вдвое больше сечения струи.

В тех случаях, когда желательно более точно описать распределение давления на стенку (например, при оценке возможности разрушения препятствия потоком), удобно задать "колоколообразное" распределение давления

$$P(r) \approx P_0 \exp\left(-\frac{r^2}{R^2}\right) \\ N = \int_0^\infty 2\pi r P(r) dr = \pi P_0 R^2 = \frac{1}{2} \pi \rho v^2 R^2 \quad (2.10)$$

и с учетом (2.8)

$$R = \sqrt{2S/\pi} = \sqrt{2}r_0 \quad (2.11)$$

где  $r_0$  — радиус струи.

Представим себе, что мы сделали в стенке вблизи точки торможения небольшое отверстие, провели от него тонкую трубку и присоединили ее к одному колену дифференциального манометра, а к другому колену присоединили трубку, второе отверстие которой помещено в струе параллельно потоку. Давление во втором колене (если нам удалось слабо возмутить поток внесением датчика) будет равно давлению в струе, а давление в первом колене — давлению в точке торможения. Поэтому их разность, измеряемая дифференциальным манометром,  $p_0 - p = \frac{1}{2} \rho v^2$ , и по ней можно измерять скорость потока.

Эта идея воплощена в так называемой трубке Пито — Прандтля — миниатюрном датчике скорости потока, в котором давление отбирается от двух отверстий, одно из которых ориентировано поперек потока, а другое — вдоль него. При этом корпус трубки имеет обтекаемую форму, чтобы поток вблизи второго отверстия оставался по возможности невозмущенным. В соответствии с уравнением Бернулли при постоянном уровне давление уменьшается с ростом скорости, так что сумма пьезометрического и скоростного напоров остается

постоянной. Это обстоятельство используется во множестве технических устройств и прежде всего в устройствах для измерения расхода.

Так, в диафрагменном расходомере поставленная поперек потока диафрагма формирует затопленную струю. Пусть давление перед диафрагмой  $p_1$ , за ней  $p_2$ . Давление в струе равно давлению за диафрагмой, так что (см. выше) для скорости и расхода имеем

$$v = \varphi \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}} \quad (2.12)$$

$$Q = \mu S \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}} \quad (2.13)$$

где  $S$  — площадь диафрагмы;

$\varphi$  и  $\mu$  — коэффициенты скорости и расхода.

Измеряя давления дифференциальным манометром, можно определять расход потока. Коэффициенты  $\varphi$  и  $\mu$  приводятся в гидравлических справочниках и паспортах стандартных расходомеров; при необходимости можно пользоваться приведенными выше оценочными величинами для подбора диаметра отверстий диафрагмы, а уточненную характеристику расходомера определять тарировкой.

Недостаток диафрагменного расходомера состоит в том, что вся приобретаемая кинетическая энергия в последующем теряется при расширении потока, и в малонапорных потоках это может составить заметную долю полных гидравлических потерь. Чтобы избежать этого, необходимо организовать медленное и плавное расширение потока, при котором снижение скорости происходит без вихреобразования. С этой целью в месте сужения потока ставят диффузор с малым углом расхождения, и мы приходим к расходомерной трубе Вентури, в которой коэффициент расхода близок к единице, а потери напора весьма малы.

### 2.3 Обтекание тел потоком. Подъемная сила и лобовое сопротивление

Одной из принципиальных задач гидродинамики является определение сил, действующих со стороны потока на обтекаемое им тело. Предположим, что поток, движущийся слева направо со скоростью  $V$ , обтекает тело  $D$ . Будем считать, что плоскость чертежа является плоскостью симметрии тела. Тогда сила, с которой поток действует на тело, будет иметь две компоненты - по направлению потока  $D$  и поперек него  $L$ . Первая из них называется силой лобового сопротивления, а вторая — подъемной силой.

При больших скоростях, когда вязкие силы малы по сравнению с инерционными, для определения подъемной силы и силы сопротивления можно было бы воспользоваться теорией идеальной жидкости. Однако соответствующая математическая теория показывает, что сила лобового сопротивления, действующая со стороны потока идеальной жидкости на

обтекаемое им тело, равна нулю. Этот вывод находится в полном противоречии с экспериментом, и поэтому он получил название парадокса Даламбера.

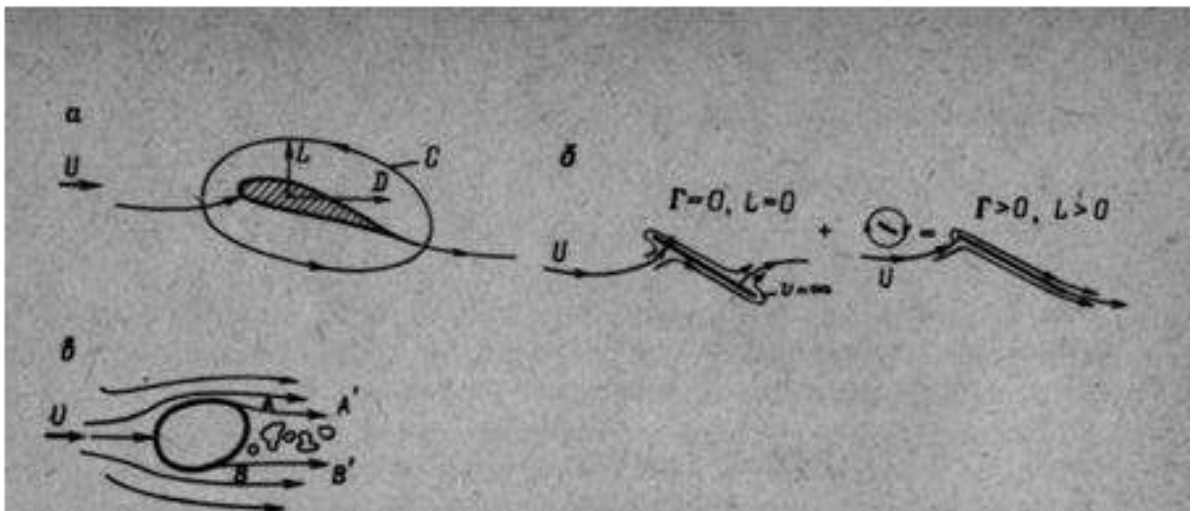
Для подъемной силы теория дает очень простое выражение. Если поток является плоским, т.е. он не меняется вдоль оси, перпендикулярной к плоскости чертежа, то на единицу длины тела действует подъемная сила

$$L = \rho \cdot U \cdot \Gamma, \quad (2.14)$$

где  $\Gamma$  - циркуляция скорости, определяемая как интеграл по некоторому замкнутому контуру  $C$ , охватывающему тело, от направленной вдоль контура составляющей скорости  $\Gamma = \int v_s \cdot d \cdot s$

Можно показать, что в безвихревом потоке идеальной жидкости циркуляция не зависит от выбора контура. Трудность, однако, состоит в том, что в рамках теории идеальной жидкости  $\Gamma$  нельзя определить, а нужно задавать независимо. Таким образом, возникает новый парадокс: выбирая  $\Gamma$  произвольно, мы можем получить любое значение подъемной силы. Этот парадокс разрешается гипотезой Жуковского — Чаплыгина: для тел, сечение которых имеет угловую точку (как обычный профиль крыла, рис. 2.1, а), циркуляция должна принимать такое значение, при котором у острой кромки скорость конечна, поток должен плавно сходиться с профиля (см. рис. 2.1, а). Эта гипотеза, позволяющая выделить единственное “Правильное” значение циркуляции, подтверждается как результатами визуализации потока, так и тем обстоятельством, что на ее основе удастся рассчитать подъемную силу для хорошо обтекаемых контуров, согласующуюся с экспериментом.

Физически причиной возникновения подъемной силы является разность давлений между нижней и верхней поверхностями профиля. На рис. 2.1, б ( $\Gamma=0$ ,  $L=0$ ) показана картина обтекания пластинки потоком идеальной жидкости при нулевой и положительной циркуляциях.



а – крыло; б – пластинка без срыва струй; в – тело со срывом струй

### Рисунок 2.3 - Схемы обтекания

В первом случае распределение скоростей симметрично относительно середины пластинки. Поскольку по теореме Бернулли

$$P = P_0 + \frac{\rho U^2}{2} - \frac{\rho v^2}{2} \quad (2.15)$$

где  $v$  — местная скорость, то и распределение давления симметрично, так что суммарная сила давления, действующая со стороны потока на пластинку сверху и снизу, одинакова.

Для того чтобы сместить точку схода потока на заднюю кромку контура (что отвечает гипотезе Жуковского), нужно, очевидно, наложить на поток (см. рис. 2.2, б) дополнительную циркуляцию по часовой стрелке. При этом скорости на верхней половине профиля уменьшатся, а на верхней увеличатся, и в соответствии с уравнением Бернулли возникает некоторое суммарное превышение давления под крылом над давлением над профилем, которое и создает подъемную силу.

Величина дополнительной циркуляции, а потому и подъемной силы будет зависеть от угла между пластинкой и направлением потока, называемого обычно углом атаки. Из соображений размерности, учитывая, что подъемная сила зависит от плотности жидкости, скорости потока, длины пластинки  $l$  и угла атаки  $\alpha$ , легко получить

$$\Gamma = \frac{1}{2} C_L(\alpha) \cdot l \cdot U; \quad L = \frac{1}{2} C_L(\alpha) \cdot \rho \cdot l \cdot U^2 \quad (2.16)$$

где  $C_L$  — коэффициент подъемной силы; множитель  $1/2$  вводится по традиции.

Аналогично принято представлять и силу сопротивления:

$$D = 1/2 C_D(\alpha) \rho \cdot l \cdot U^2 \quad (2.17)$$

Для употребляемых в технике профилей, в частности крыльев самолетов, принято изображать зависимости  $C_L(\alpha)$ ,  $C_D(\alpha)$  в виде единого графика, называемого полярой крыла, где около каждой точки графика указано отвечающее ей значение угла.

Для хорошо обтекаемых профилей на оптимальных углах атаки  $C_L > C_D$ , по существу, парадокс Даламбера служит некоторым указанием именно на это обстоятельство. Вопреки "здравому смыслу", основная сила, действующая на хорошо обтекаемое тело в потоке, направлена перпендикулярно к направлению скорости.

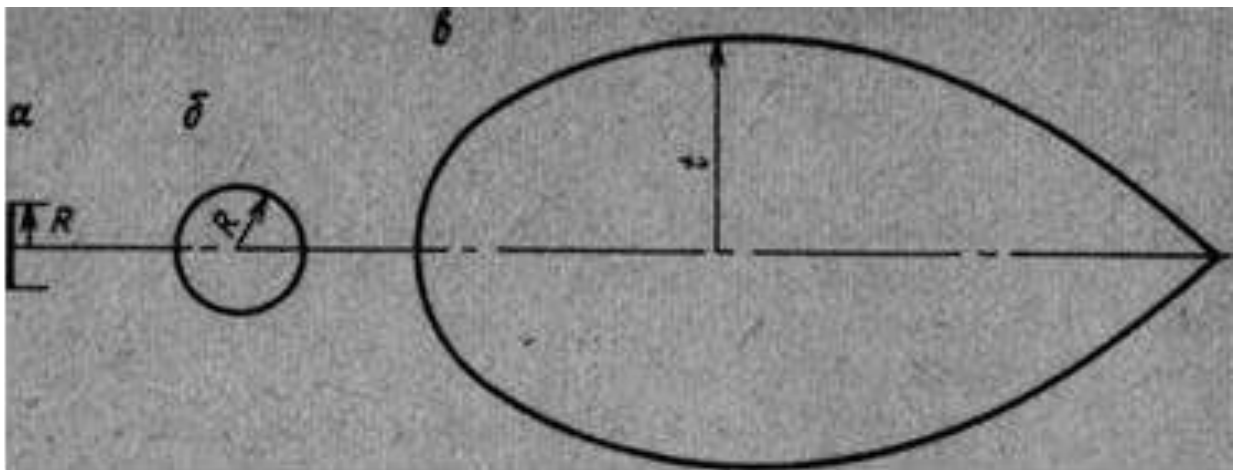
Истинная "парадоксальность" парадокса Даламбера проявляется при анализе данных, относящихся к плохо обтекаемым телам шару, цилиндру, пластинке, поставленной поперек потока. Реальные измерения показывают, что для всех этих тел при достаточно больших скоростях, т.е. там, где, казалось бы, должна "работать" теория идеальной жидкости, коэффициент сопротивления  $C_D$  оказывается величиной порядка единицы. Опыты с визуализацией потока показали, что картина потока в этом случае весьма характерна. Линии тока следуют форме тела в лобовой части, \* на задней части тела они отходят ("отрываются") и за телом образуется своего рода "тень" — область сложных вихревых движений, причем скорости здесь сравнительно малы.

Простейшей схематизацией такой картины течения служит модель обтекания со срывом струй (рис. 2.3, в). При этом в передней части тела, где происходит торможение потока, давление оказывается повышенным, а в задней части, куда не проникают линии тока, давление примерно такое, как на свободных линиях тока AA и BB и поскольку здесь скорость порядка скорости набегающего потока или несколько больше нее, давление в донной области оказывается несколько меньше, чем в набегающем потоке. Не скомпенсированная разность давлений и создает силу сопротивления

$$D \approx 1/2 C_D(\alpha) \rho \cdot S \cdot U^2 \quad (2.18)$$

где  $S$  - площадь наиболее широкого поперечного сечения тела;  
 $C_D$  - имеет значение порядка единицы.

Для того чтобы понять, какова разница в силе сопротивления при отрывном и безотрывном обтекании, на рисунке 2.4 показаны с соблюдением масштаба тела, имеющие одинаковое сопротивление, — маленький диск и шар и гораздо больших размеров тело обтекаемой формы.



а – диск с  $R=10$  см; б – шар с  $R=16$  см; в – обтекаемое тело с  $t = 50$  см.

Рисунок 2.4 - Тела равного сопротивления

## 2.4 Установление рационального соотношения диаметра тела и ширины проходного сечения кольцевого вторичного сопла

Вопросам, изучения влияния соотношения размера тела и проходного сечения трубопровода, посвящены работы /8-18/. В задачу исследований входило изучение коэффициента сопротивления шара в стесненном потоке как в горизонтальных, так и вертикальных трубопроводах.

В работе /18/ эксперименты проводили в вертикальной гидравлической установке. Вдоль оси трубы, заполненной жидкостью, сбрасывались шары различного диаметра и плотности. Коэффициент сопротивления шара потоку устанавливали на основании скорости равномерного движения шара под действием силы тяжести за вычетом архимедовой силы. Результаты проведенных экспериментов при различных значениях коэффициента сопротивления шара получившего в технической литературе, посвященной вопросам гидравлики, название коэффициента загромождения ( $Q$ ) представлены на рисунке 2.5.

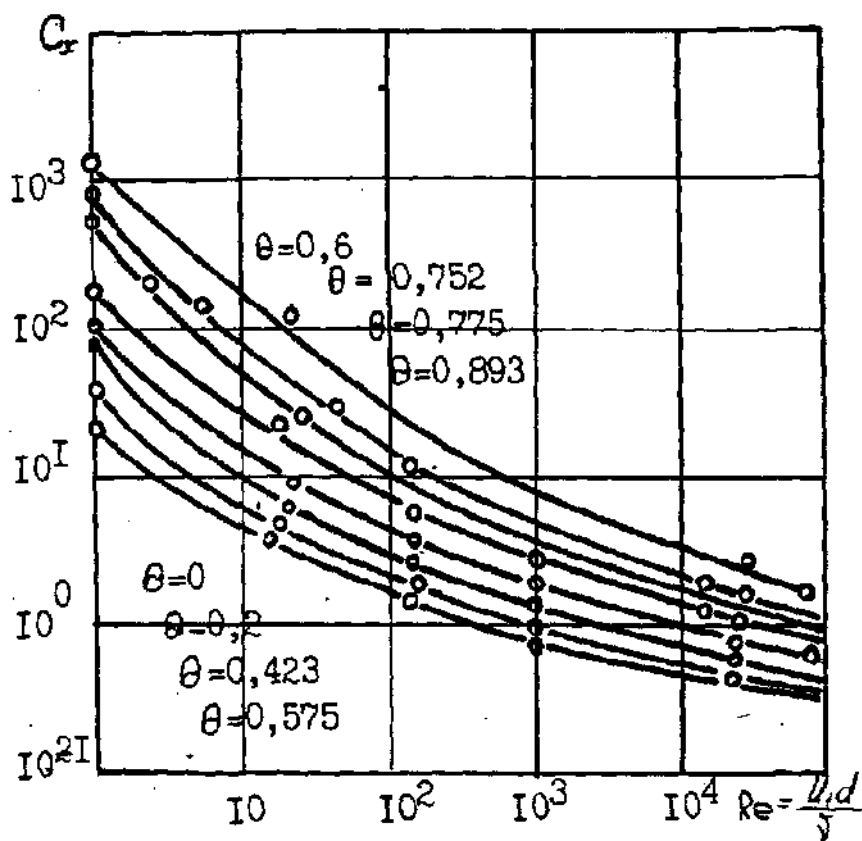


Рисунок 2.5 - Коэффициент загромождения при падении шаров в вертикальном трубопроводе

Известно /14,18/, что коэффициент сопротивления тяжелых тел в трубопроводе ( $C_x$ ) есть функция числа Рейнольдса ( $Re$ ), отношения скорости тела к средней скорости жидкости ( $U_{ш}/U$ ), коэффициента сопротивления трубопровода ( $\lambda$ ) и геометрических параметров ( $Q = r_{ш}/b_2$ ), характеризующих

относительные размеры, форму и объемную концентрацию тел.

В работе /14/ не измерялась скорость жидкости в трубе, следовательно, по результатам экспериментов невозможно определить скорость обтекания потоком шара и пересчитать соответствующие коэффициенты сопротивления и числа Рейнольдса, а также трудно оценить кинематический параметр ( $I_{ш}/I$ ).

В работе /18/ представлены результаты экспериментальных исследований сопротивления неподвижно закрепленных шаров различного диаметра в вертикальных трубах. Результаты измерений представлены на рисунке 2.6.

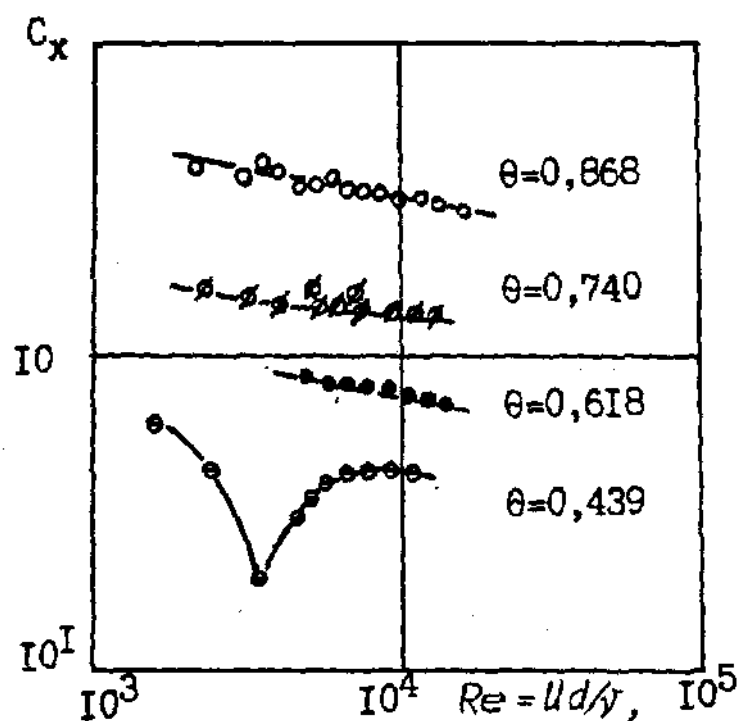


Рисунок 2.6 - Коэффициент сопротивления неподвижных шаров в вертикальном трубопроводе

По опытным данным, соответствующим числам Рейнольдса  $Re = 2b_2I/v$  порядка  $(2-3) \times 10^4$ , получена интерполяционная формула для расчета сопротивления тел ( $C_x$ ) на режиме трогания в рассмотренном диапазоне коэффициента загромождения  $0,44 < Q < 0,83$  :

$$\tilde{N}_\delta = \left( \frac{Q^{0,1828}}{1 - Q^{2,1475}} \right)^{1,9357}, \quad (2.19)$$

Также известно /14/, что согласно данным аналогичных исследований для горизонтальных трубопроводов зависимость коэффициента сопротивления сферических тел  $C_x$  от  $Q$  заметно изменяется на разных числах Рейнольдса (см. рис.2.5).

Из анализа приведенных материалов следует, что коэффициент сопротивления шара в стесненном потоке резко возрастает при коэффициентах



загромождения  $Q > 0,5$  и несколько уменьшается при увеличении числа Рейнольдса, зависящего от проходного сечения.

По-видимому, не имеется экспериментальных данных, на основании которых можно было бы оценить зависимость коэффициента сопротивления сферических тел от скорости их движения ( $I_{ш}/I$ ) и объемной концентрации в трубопроводе ( $T_v$ ).

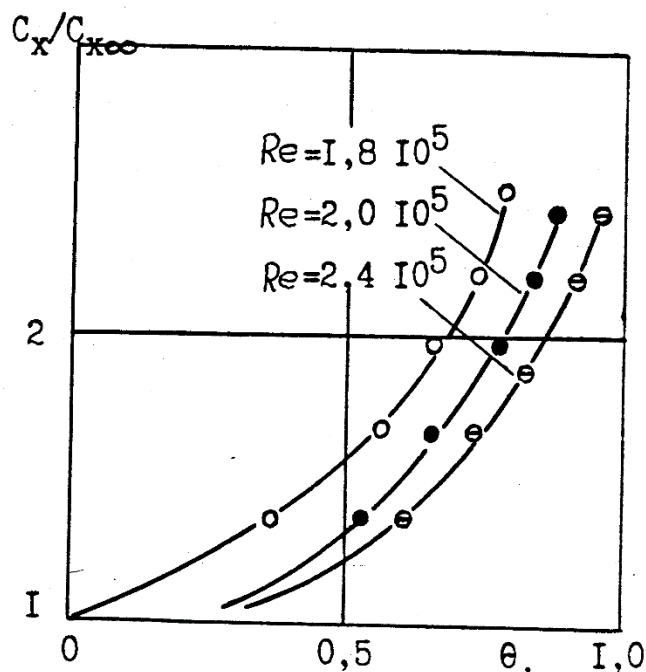


Рисунок 2.6 - Влияние коэффициента загромождения и числа Рейнольдса на коэффициент сопротивления неподвижных шаров

Основываясь на результатах исследований, с короткими цилиндрическими телами, приведенных в монографии /13/ и приняв для сферических тел  $L_{ш} = 2r_{ш}$ , можно ожидать, что повышение скорости движения и объемной концентрации, будет приводить к уменьшению коэффициента сопротивления каждого тела. Вместе с тем, из рисунка 2.4 видно, что с увеличением числа Рейнольдса коэффициент сопротивления уменьшается пропорционально  $Re$  с показателем степени, близким 0,25.

Таким образом, при работе струйного аппарата шароструйного снаряда необходимо, чтобы коэффициент загромождения  $Q = d_{ш}/b_2$  во вторичном сопле стремился к максимально допустимому своему значению, что обуславливает рост коэффициента сопротивления  $C_x$ , а следовательно, ведет к увеличению гидродинамической силы ( $R$ ), действующей на тело со стороны несущей жидкости, определяемой по формуле:

$$R = C_x S \rho (I - I_{ш})^2 / 2, \quad (2.20)$$

где  $I, I_{ш}$  - соответственно скорость потока жидкости и шара в этом

потоке;

$S$  - площадь наиболее широкого поперечного сечения шара;

$\rho$  - плотность материала шара.

которая, точно указывает влияние степени загромождения на величину значения гидродинамической силы, действующей на шар со стороны жидкости.

## **2.5 Описание конструкции разрабатываемого шламометаллоуловителя**

На рисунке 2.7 изображен общий вид скважинного шламометаллоуловителя для извлечения больших и мелких предметов с забоя скважин.

Устройство состоит из бурильной трубы 1, в нижней части которого образуется усеченный проводящий канал 2 со сквозным проходом - соплом 3 для промывочной жидкости. По периферии приварен кожух 4 накопителя 5, который отделен от полости 6 ассиметрической перегородкой 7. Сквозной проход соединен с накопителем, отверстием или щелями 8. Дно 9 накопителя прочное и плоское, но в отдельных случаях допустима возможность крепления небольших скребков 10 с целью отрыва от забоя налипших, затертых металлических предметов.

Устройство работает следующим образом. После спуска и установки на забой скважины осуществляется промывка его через бурильную трубу 1 и усеченный проводящий канал 2 по сквозному проходу 3.

Плотное прилегание к забою дна накопителя 9 позволяет частично перекрыть сквозной проход-сопло 3 и промывку частично осуществить через отверстия-щели 8 в накопителе 9, освободив его от шламов горной породы.

В дальнейшем с постепенным подъемом и низкооборотным правым вращением устройства достигается отрыв скребками 10 и гидромонитором из сквозного прохода - сопла 3 металлических предметов, которые через подъемную полость 6, образованную ассиметричной перегородкой 7 и стенкой скважины, попадают и засасываются в накопитель 5, благодаря эжекторному эффекту в усеченном проводящем канале 2 через отверстия 8. Усеченный проводящий канал 2 со сквозным проходом - соплом 3 в нижней торцевой части устройства направляет струю – гидромонитор под углом к забою или под углом - при вращении.

Определяющими параметрами работы шламометаллоуловителей основанных на гидравлическом принципе являются величина давления струи жидкости, скорость движения восходящего потока обеспечивающиеся подачей буровых насосов.

Величина давления струи ( $P_c$ ) на преграду определяется по формуле:

$$P_c = \rho \cdot Q \cdot g_c (1 - \cos \alpha), \quad (2.21)$$

где  $\rho$  - плотность промывочной жидкости;  
 $Q$  - производительность буровых насосов;  
 $\vartheta_c$  - скорость истечения струи из сопла 3;  
 $\alpha = 30^\circ$  - приведенный угол направления струи к забою.

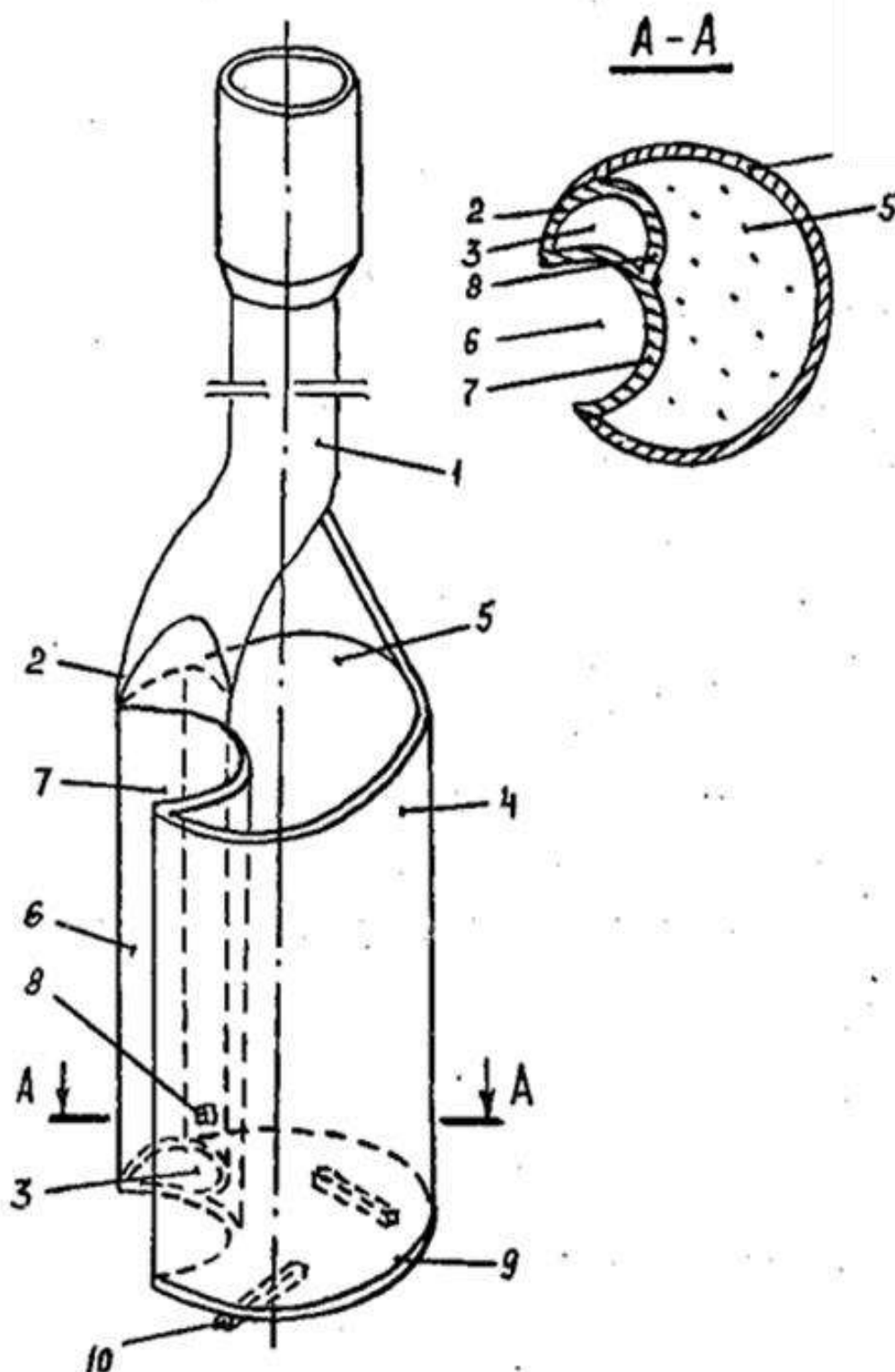


Рисунок 2.6 - Шламометаллоуловитель

### 2.5.1 Гидравлический расчет работы шламометаллоуловителя

Из формулы (2.21) видно, что, чем больше угол  $\alpha$ , тем выше давление на препятствие. Площадь проходного сечения сопла 3 определяют из формулы:

$$\lim \vartheta_c = Q / S_c, \quad (2.22)$$

т.е.

$$S = Q / \vartheta_c,$$

тогда диаметр ( $d$ ) и количество ( $n$ ) отверстий находим по формуле:

$$d = \sqrt[2]{\frac{4F}{\pi \cdot n}} \quad (2.23)$$

при соблюдении условия:

$$\lim_{Q \rightarrow \max} \vartheta_c \gg \vartheta_{II} = w \sqrt{(d_{III} - d_{III}) \Delta \rho / \rho}, \quad (2.24)$$

где  $\vartheta_{II}$  – скорость падения металлического предмета в жидкости;

$d_{III}, d_{III}$  – приведенные диаметры сечения подъемной полости 4 и извлекаемого металлического предмета;

$\Delta \rho = \rho_{III} - \rho$  - перепад плотностей металлического предмета и жидкости;

$w = 5,11 m^{1/2} / c$  - расчетный коэффициент для шарообразных тел.

Оседание в полость – накопитель металлических (или других) предметов происходит из-за увеличения проходного сечения выше накопительной полости, скорость восходящего потока резко падает и предмет попадает в накопитель.

## **ВЫВОДЫ**

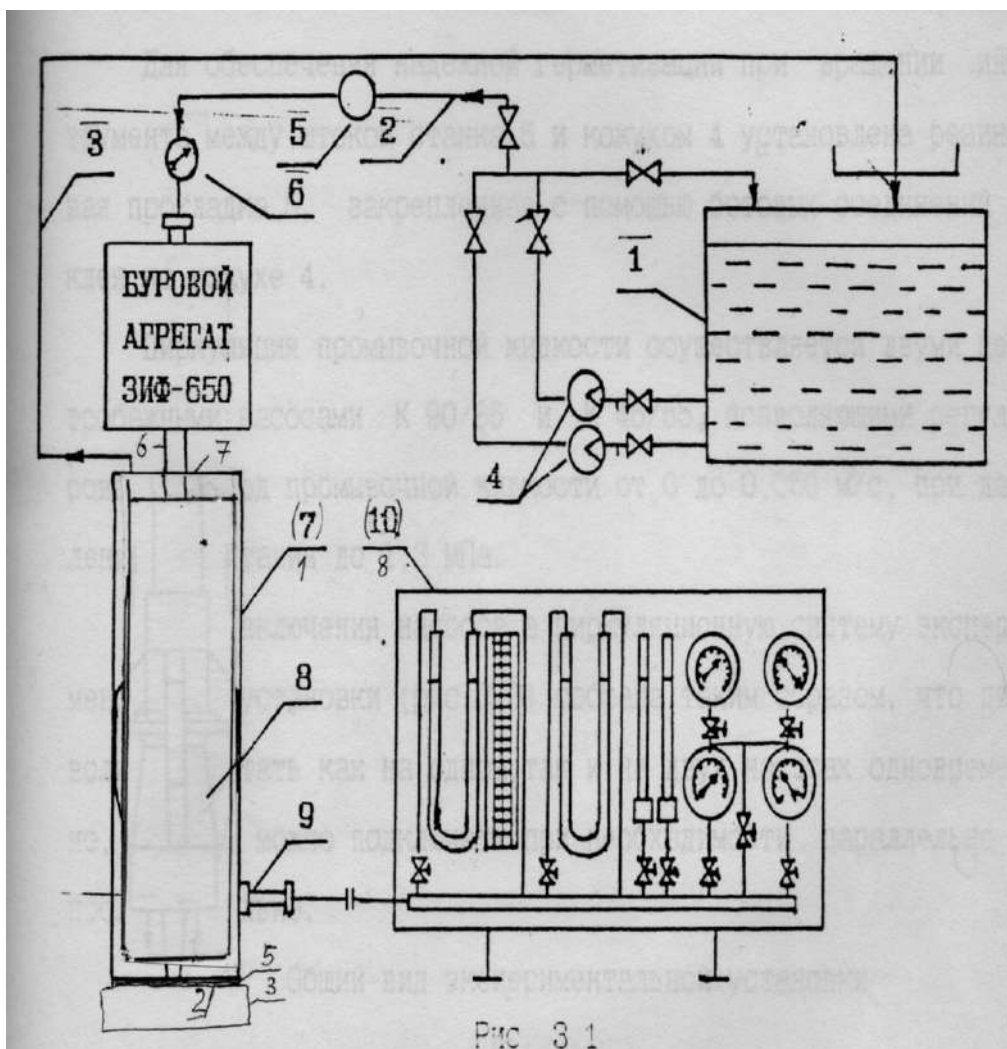
На основе проведенных теоретических исследований установлено:

- 1 Гидравлический способ, обеспечивает извлечение крупных и мелких посторонних предметов с забоя скважин ;
- 2 Размер и форма извлекаемых предметов не значительно влияет на их извлечение с забоя скважин;
- 3 Предложена методика гидравлического расчета работы шламометаллоуловителя новой конструкции.

### 3 Создание опытной конструкции шламометаллоуловителя и результаты экспериментальных исследований

#### 3.1 Описание экспериментального стенда для гидродинамических исследований

Для исследования гидродинамических процессов, протекающих в призабойной зоне и промывочных узлах долот, при различных схемах их компоновки, нами разработан стенд по аналогии с стендом предложенным в работе /45/, в конструкцию которого внесены ряд усовершенствований. Стенд позволяет качественно и количественно оценить совершенство узла промывки натуральных образцов диаметром от 90 до 394 мм (см. рис.3.1 и 3.2).



1 —емкость с жидкостью; 2 — линия движения жидкости; 3 — обратная линия подачи жидкости в емкость; 4 - манометры; 5 - расходомер; 6 —манометр на входе в призабойную зону; 7 — прозрачный оргстеклянный стакан; 8 — объект исследования; 9 — координатник; 10 — щит с блоком манометров

Рисунок 3.1 - Принципиальная схема экспериментальной установки

В качестве бурового агрегата использован буровой станок ЗИФ650А-12, установленный на бетонном основании высотой 1,5 м при помощи сварной рамы - подставки. Это позволило увеличить высоту прозрачной части призабойной зоны до 1500 мм, что позволяет визуально проследить движение потока жидкости, осуществлять замер давлений в любой точке призабойной зоны. Стенд, позволяет моделировать забойные условия долот и различных гидравлических снарядов, а также исследовать широкую гамму комбинаций долот, снарядов путем подбора соответствующего диаметра и высоты прозрачных патрубков рис.3.1). В качестве промывочной жидкости может быть использована техническая вода или буровой раствор любой плотности.

По всей высоте прозрачного патрубка через каждые 20 мм, просверлены два ряда отверстий 9, с ввернутыми заглушками, через которые посредством установки координатника 12 замеряют давление в любой точке призабойной зоны. Внутри патрубка помещается исследуемый объект 10 в натуральную величину, соединенный через переходник 7 со штоком 6. Роль забоя выполняет металлическая плита 3, в которой имеется ряд отверстий с заглушками для установки координатника. Плита установлена на металлическую подставку 2, закрепленную при помощи болтовых соединений с бетонным полом 16.

Поверх патрубка 1, установленного на металлическую плиту 3, надевается кожух 4 и жестко закрепляется стяжными соединениями 11 с подставкой 2. Герметичность стыковочных соединений отдельных деталей обеспечивается установкой между ними резиновых прокладок.

Для обеспечения надежной герметизации при вращении инструмента между штоком станка 5 и кожухом 4 установлена резиновая прокладка 5, закрепленная с помощью болтовых соединений и клея на кожухе 4.

Циркуляция промывочной жидкости осуществляется двумя центробежными насосами К 90/85 и К 45/55, позволяющими регулировать расход промывочной жидкости от 0 до 0,050 м<sup>3</sup>/с, при давлении нагнетания до 1,3 МПа.

Схема включения насосов в циркуляционную систему экспериментальной установки (см.рис. 3.3) собрана таким образом, что позволяет работать как на одном, так и на двух насосах одновременно, которые можно подключать при необходимости параллельно и последовательно.

#### Техническая характеристика экспериментального стенда

|                                                      |   |                     |
|------------------------------------------------------|---|---------------------|
| Привод для вращения                                  | - | бур.станок ЗИФ 650А |
| Диапазон диаметра исследуемых долот или снарядов, мм | - | 190 - 394           |
| Тип насосов                                          | - | К 45/55; К 90/85    |
| Расход жидкости, дм <sup>3</sup> /с                  | - | 11,5 - 25,0 5.      |
| Давление жидкости, МПа                               | - | 0,85                |
| Частота вращения, об/с                               | - | 1,2 - 11,0          |
| Объем жидкости в системе, дм <sup>3</sup>            | - | 5000,0              |
| Высота прозрачного патрубка, м                       | - | 1,2                 |

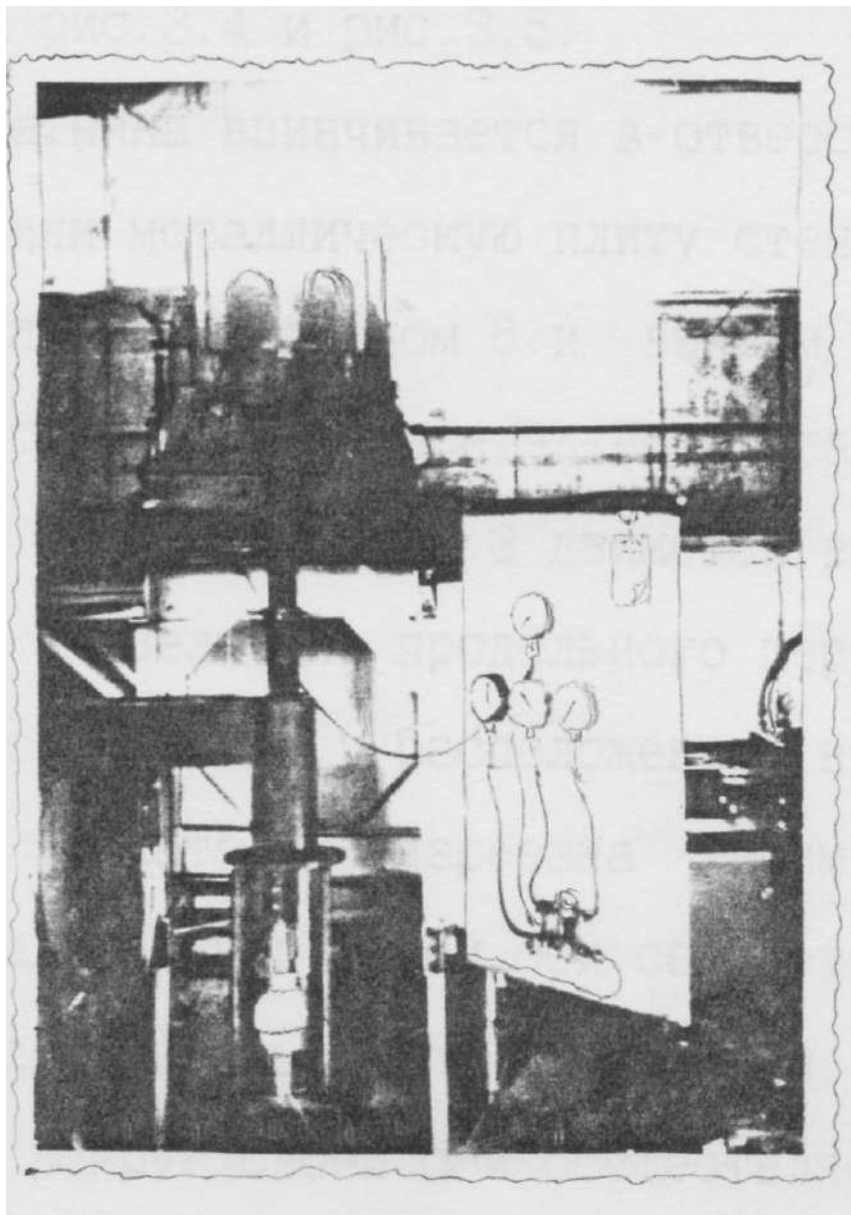


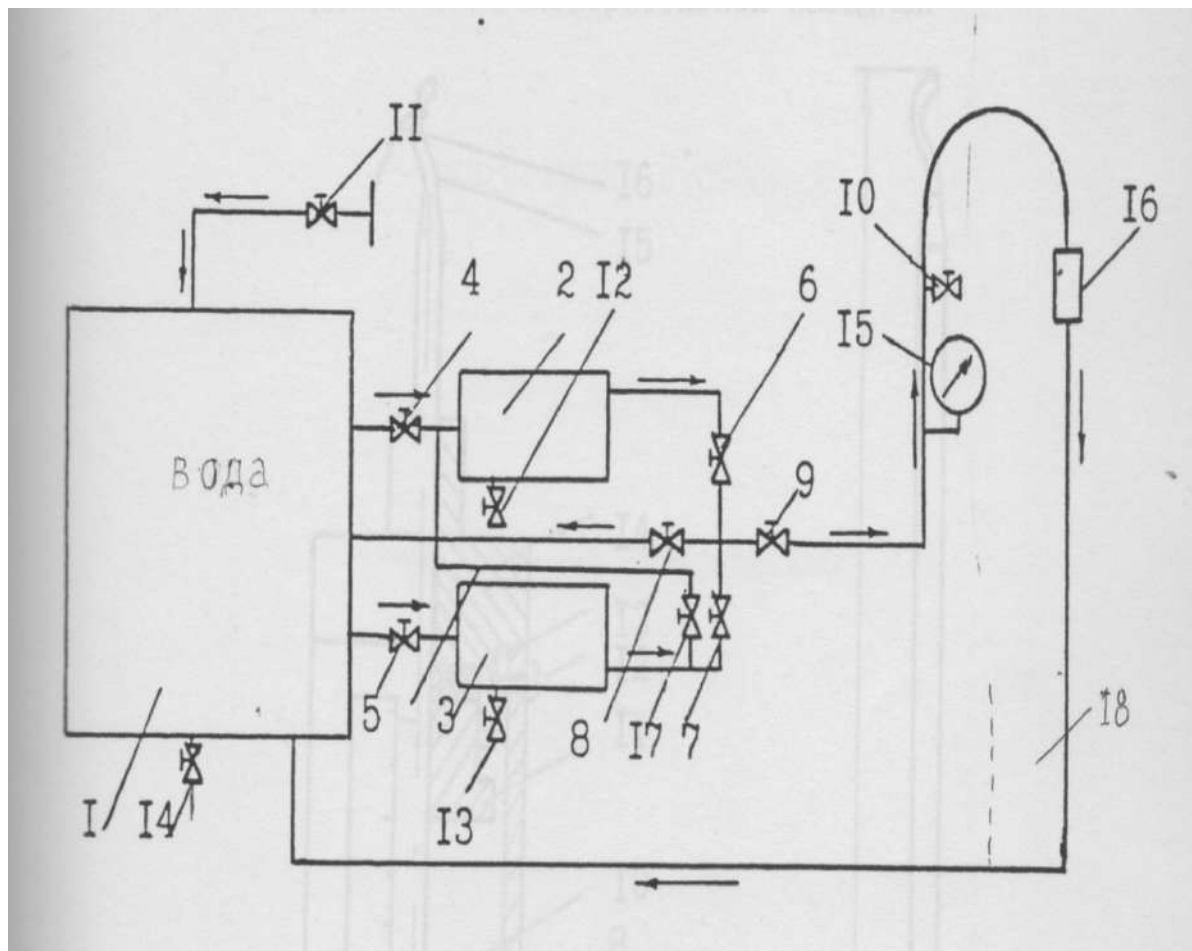
Рисунок 3.2 - Общий вид экспериментальной установки

Для установления насадки в строго определенную точку призабойной зоны и ориентирования её под необходимым углом по отношению направления потока жидкости, служит координатник общий вид которого представлен на рисунках 3.4 и 3.5.

Штуцер координатника ввинчивается в отверстие стенки патрубка из оргстекла или металлическую плиту стенда. Измерительная насадка 9 укрепляется ползуном 6 и винтом указателем 7. Для продольного перемещения измерительной насадки 9 поворачивают маховик 1. При этом толкатель 3 движется внутри корпуса 8 и перемещает ползун 6. Величина продольного перемещения насадки 9 определяется по шкале 10, расположенной на корпусе. Ленточная резьба на толкателе 3 нарезана таким образом, что один оборот маховика 1 вокруг своей оси соответствует перемещению винта-указателя вдоль шкалы 10 на 2 мм. Поворот измерительной насадки 9 вокруг своей оси



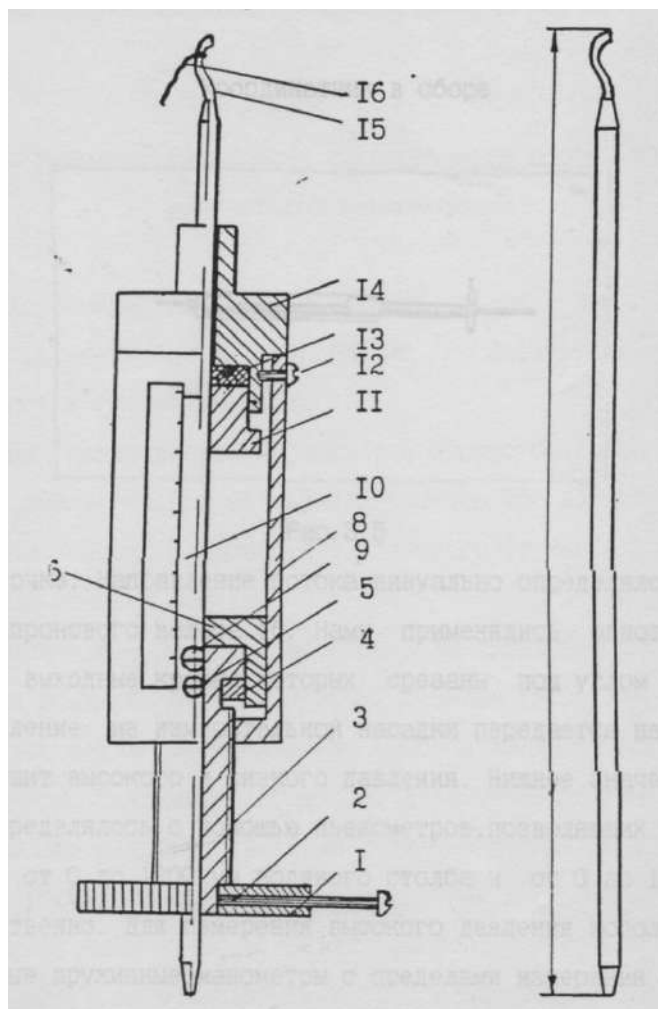
осуществляется поворотом Корпуса 8 относительно штуцера 14 после ослабления винта 12. Угол поворота насадки измеряется с помощью транспортира, закрепленного между корпусом 8 и штуцером 14.



1- приемная емкость с промывочной жидкостью; 2,3 - центробежные насосы; 4,5-задвижки на всасывающей линии; 6,7- задвижки на нагнетательной линии; 8-задвижка на сливной линии; 9 - задвижка напорной линии; 10 - сливной кран; 11 - линия наполнения емкости; 12,13 - сливные краны на насосах; 14 - слив жидкости из емкости; 15-манометр напорной линии; 16 – вертлюг; 17 – линия последовательного соединения насосов; 18-модель забоя скважины

Рисунок 3.3 - Схема циркуляционной системы экспериментальной установки

Измерительные насадки представляют собой медные трубки малого диаметра, которые с одного конца имеют припаянный патрубок 15 с тарированным отверстием. Известно, что полное давление потока 1 (пьезометрический и скоростной напор), измеряемое координатник с измерительной насадкой с помощью насадки зависит от направления и угла скоса кромки патрубка. Измеряя полное давление в данной точке потока с помощью насадки, установленной строго навстречу потоку и перпендикулярно ему, можно определить величину скорости потока в данной точке.



1- маховик; 2 - винт; 3 - толкатель; 4 - фиксатор; 5 - винт фиксатора;  
 6 - ползун; 7 - винт указатель; 8 - корпус; 9 - насадки; 10 - шкала;  
 11- гайка нажимная; 12 - винт; 13 - уплотнение; 14-штуцер;  
 15 - тарированная трубка; 16 – волосок.

Рисунок 3.4 - Координатник с измерительной насадкой

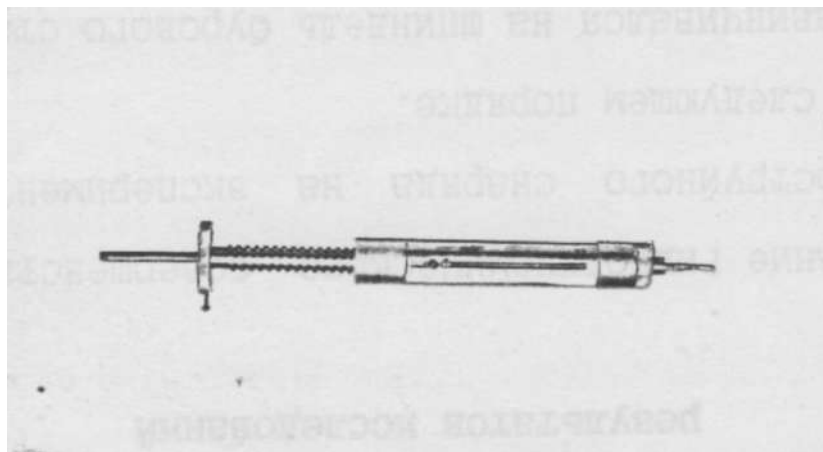


Рисунок 3.5 - Координатник в сборе

Направление потока визуально определялось с помощью капронового волоса 16. Нами применялись однотрубчатые насадки, выходные кромки которых срезаны под углом  $90^\circ$  к их оси. Давление из измерительной насадки передается на измерительный щит высокого и низкого давления. Нижнее значения давления определялось с помощью пьезометров, позволяющих измерять давление от 0 до 1200 мм водяного столба и от 0 до  $1,5 \times 10^5$  МПа, соответственно. Для измерения высокого давления использовались образцовые пружинные манометры с пределами измерения  $0...2 \times 10^5$  Па,  $0...4 \times 10^5$  Па,  $0...10 \times 10^5$  Па. Таким образом, давление может быть измерено в зависимости от его величины одним из пяти манометров. При работе задают требуемый режим промывки "скважины" и устанавливают насадку координатника в определенной точке призабойной зоны. Проворачивают насадку вокруг своей оси до совмещения плоскости среза патрубка насадки с направлением потока и замеряют скоростной напор, затем насадку проворачивают на  $90^\circ$  и замеряют пьезометрический напор. Далее устанавливают разницу напора и определяют скорость потока жидкости в данной точке.

### **3.2 Методика проведения экспериментов и обработка результатов исследований**

Исследование гидродинамического совершенства струйного аппарата шламометаллоуловителя (ШМУС) на экспериментальном стенде проводилось в следующем порядке.

ШМУС навинчивался на шпиндель бурового станка при помощи переходника. Забой из металла вместе со сварной станиной вставлялся соосно со шпинделем бурового станка и закреплялся при помощи стяжных болтов.

Прозрачная модель призабойной зоны скважины собиралась из отдельных обечаек, между которыми, с целью герметизации, устанавливались резиновые прокладки. Собранная, таким образом призабойная зона скважины закрывалась сверху специальным флянцем и прижималась к забою стальными стяжными шпильками.

В зависимости от программы испытаний в приемную емкость заливалась техническая вода или раствор, открывали задвижки и подключали к работе один или два центробежных насоса. При помощи дросселирующих задвижек обеспечивали заданный перепад давления на первичном сопле.

Определение пьезометрического и скоростного напора с помощью координатника, основанного на принципе напорных трубок Пито-Пранделя, весьма трудоемкий процесс, поскольку в каждой точке приходилось искать направление струи, измерять ее параметры, несколько раз повторять опыт при заданном расходе и достаточно близких значениях температуры ( $2 - 3^\circ\text{C}$ ). Количество характерных точек в призабойной зоне, в которых производились замеры с помощью координатника, достигало нескольких сотен.

В первой серии опытов число точек измерения выбирали таким образом,

чтобы установить закономерность движения потоков промывочного агента в призабойной зоне, а также досконально исследовать распределение поля давлений и скоростей во всех точках забоя, по высоте ШМУС, внутри подъемного канала. В дальнейшей серии опытов, замеры проводились в наиболее характерных точкам призабойной области.

В связи с тем, что в процессе проведения экспериментов изменялась конструкция исследуемого ШМУС, отверстия в оргстеклянном патрубке были пронумерованы (см.рис.3.5), что обеспечивало установку координатника на строго определенном расстоянии от забоя. Диаметр ШМУС выбирался таким образом, чтобы обеспечивалось моделирование работы в скважине диаметром 215,9 мм.

Как показано на рисунке 3.3, на нагнетательной линии у центробежных насосов имеются специальные штуцера с вентилями, открытие которых, обеспечивало подсос воздуха в прозрачную модель призабойной зоны скважины. Подмешивание воздуха в основной поток жидкости, нагнетаемой насосами, позволяло визуально наблюдать и фотографировать картину распределения потоков промывочной жидкости диспергированной воздухом по всему периметру забоя и высоте призабойной зоны. Это позволяет определить области повышенной турбулентности и застойные зоны в модели скважины с установленным в ней ШМУС.

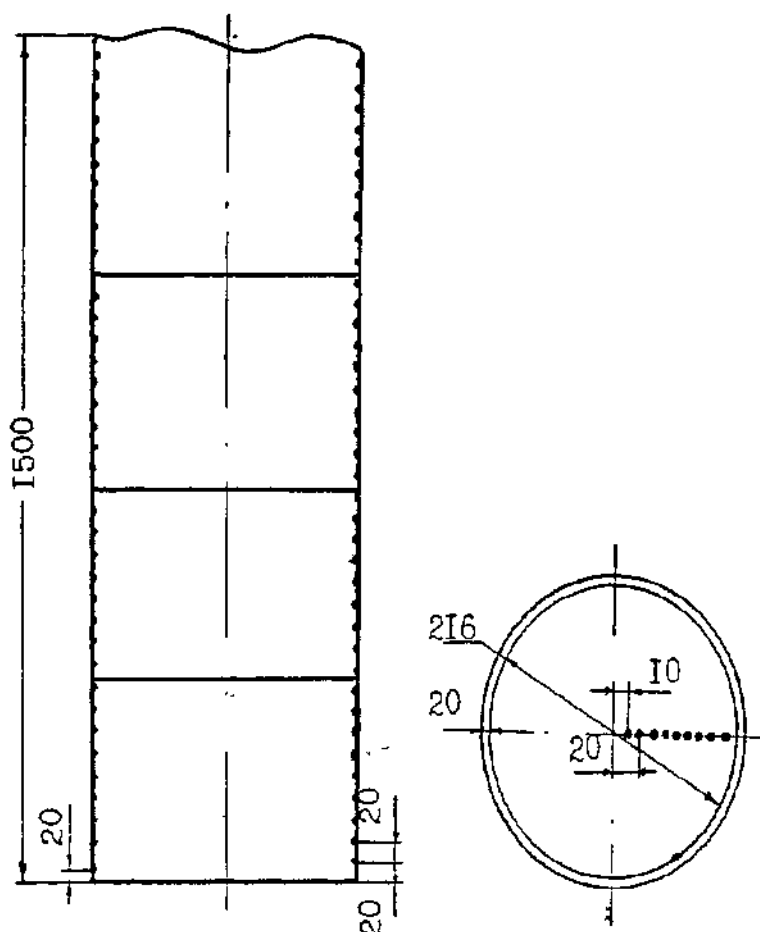


Рисунок 3.6 - Схема точек измерения скоростей и давлений на забое и призабойной зоне модели скважины

После визуальных наблюдений за путем движения потоков промывочной жидкости с воздухом, вентили перекрывались и приступали к непосредственному измерению давлений и скоростей. Измерения проводились вдоль радиуса забоя, а также по высоте и глубине прозрачной призабойной зоны скважины.

В процессе измерений ставилась задача установить распределение величин значений давления и определить скорости движения потока в призабойной зоне по высоте и глубине вторичного сопла, на выходе, из первичного сопла и на входе во вторичное сопло, в кольцевом пространстве в нижней части корпуса снаряда, а также выше камеры разряжения снаряда в кольцевом пространстве.

Зарегистрировав величину скорости и давления во всех замеряемых точках, производилась разборка и изменялся один из конструктивных параметров снаряда, затем проводились повторные измерения.

Замеры давлений и определение скоростей осуществлялись в следующей последовательности.

В исследуемой точке забоя или системе скважины вывертывалась пробка-заглушка, а на ее место устанавливался координатник с измерительной трубкой-датчиком.

Для определения статического (угнетающего) давления в исследуемой точке первоначально находилось положение измерительной трубки-датчика, когда значение скоростного полного давления ( $P_{полн}$ ) было максимальным, т.е. силовые линии потока жидкости приложены строго перпендикулярно к сечению измерительной трубки. Такое положение датчика визуально регистрировалось при помощи капроновых нитей, прикрепленных к рабочему концу насадки. Такое положение датчика визуально регистрировалось при помощи капроновых нитей, прикрепленных к рабочему концу насадки. Затем, при помощи координатника на угол  $90^\circ$  от первоначального его положения, фиксировалась величина местного статического давления жидкости.

Все измерения проводились в интервале измерений перепада давления на первичном сопле от 0,07 до 0,65 МПа, что обеспечивало изменение скорости истечения из первичного сопла от 10 до 40 м/с.

Для подтверждения ранее полученных зависимостей изменения давления в отдельных узлах ШМУС от входного давления жидкости ( $P_{вх}$ ), давление доводилось до 0,8 МПа.

На основе поставленных экспериментов, установлено, что наличие в промывочной жидкости посторонних предметов и шлама в объеме до 30 % от общего объема зоны по высоте ШМУС от поверхности забоя до камеры разряжения, сказывается незначительно на распределении поля скоростей и давлений в замеряемых точках, что дает основание проводить эксперименты по установлению значений скорости и давления при работе на жидкости без шаров.

### 3.2.1 Обработка экспериментальных данных

Замерив динамическую и статическую составляющую давления в каждой исследуемой точке забоя и призабойной зоне по высоте ШМУС, определялась скорость движения промывочной жидкости по формуле:

$$\dot{E} = \sqrt{2P_{\text{ск}} / \rho} \quad , \quad (3.1)$$

где  $\rho$  - плотность промывочной жидкости;

$P_{\text{ск}}$  - величина скоростного давления в исследуемой точке, определяется по формуле:

$$P_{\text{ск}} = P_{\text{д}} - P_{\text{ст}} \quad (3.2)$$

где  $P_{\text{д}}$  - максимальное давление в замеряемой точке;

$P_{\text{ст}}$  - статическое давление в исследуемой точке.

В процессе проведения эксперимента устанавливалось направление движения потока, и по данным замеров давления и расчета скорости движения жидкости в данной точке строились в масштабе графики, где указывались величины скоростей и давлений жидкости.

Для удобства работы и обеспечения возможности сопоставления полученных данных замеров с другими схемами ШМУС, результаты исследований представлены в безразмерных параметрах, т.е:

$$I_n/I; \quad P_{\text{ст}}/\Delta P_1; \quad r/R; \quad h/H; \quad (P_{\text{ст}} - P_{\text{пр}}) / (P_n - P_{\text{пр}}); \quad (P_n - P_{\text{пр}}) / \Delta P_1; \quad S_1/S_2 \quad (3.3)$$

где  $I_n$  - максимальная скорость потока жидкости в исследуемой точке, м/с;

$I$  - скорость истечения промывочной жидкости из сопла, м/с;

$r$  - расстояние от центра забоя до исследуемой точки забоя, мм;

$R$  - радиус забоя, мм;

$H$  - высота от забоя (по стенке скважины) до исследуемой точки, мм;

$P_n, P_{\text{пр}}$  - величина нормального и статического давления промывочной жидкости в исследуемой точке, МПа;

$\Delta P_1$  - перепад давления на первичном сопле, МПа;

$P_{\text{пр}}$  - величина противодействия в измеряемой точке, МПа;

$S_1/S_2$  - площадь проходного сечения сопла и подъемного канала,  $\text{м}^2 \cdot 10^{-6}$ .

### 3.3 Разработка конструкции экспериментальной модели ШМУС

Для проведения стендовых исследований с целью подтверждения и уточнения

методики расчета разработанной новой конструкции ШМУС с одним большим проходным каналом изготовлены опытные образцы ШМУС, геометрические размеры которых, рассчитывались на основе формул подраздела 2.2 для диаметра скважины 215,9 мм.

Экспериментальная модель ШМУС была изготовлена в натуральную величину.

Размеры для изготовления экспериментальной модели ШМУС приведены в таблицу 3.1.

Таблица 3.1 - Рекомендуемые геометрические размеры ШМУС для скважине 216 мм

| Диаметр скважины, мм | Обсадная труба корпуса, мм |                |                |      | Насосно-компрессорные трубы (бурильные), мм |                |                |                |                |                | Толщина дна, мм |
|----------------------|----------------------------|----------------|----------------|------|---------------------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|
|                      | D <sub>0</sub>             | b <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> | град | d <sub>1</sub>                              | b <sub>1</sub> | l <sub>1</sub> | d <sub>2</sub> | b <sub>2</sub> | l <sub>2</sub> |                 |
| 1                    | 2                          | 3              | 4              | 5    | 6                                           | 7              | 8              | 9              | 10             | 11             | 12              |
| 215,9                | 193,7                      | 6              | 1200           | 30   | 88,9                                        | 6,5            | 1400           | 101,6          | 6,5            | 975            | 20              |

Продолжение табл.2.1

| Длина ШМУС, L, мм | Параметры сопел |                |      | Размеры переводника |        | Гидравлические параметры            |                      |                      |
|-------------------|-----------------|----------------|------|---------------------|--------|-------------------------------------|----------------------|----------------------|
|                   | d <sub>c</sub>  | n <sub>c</sub> | град | l <sub>пер</sub>    | в град | Q <sub>н</sub> , дм <sup>3</sup> /с | P <sub>н</sub> , МПа | I <sub>c</sub> , м/с |
| 13                | 14              | 15             | 16   | 17                  | 18     | 19                                  | 20                   | 21                   |
| 2000              | 10              | 10             | 60   | 215                 | 10     | 30                                  |                      |                      |

### 3.4. Результаты экспериментальных гидродинамических исследований

Гидродинамические исследования по установлению закономерностей распределения средних скоростей и давлений в кольцевом пространстве по высоте ШМУС проводили в следующей последовательности. Установив режим течения жидкости с  $I_1=10$  м/с с помощью координатника и контрольно-измерительных приборов осуществлялись замеры гидродинамического давления в семи точках кольцевого зазора ( $b_4$ ).

По высоте снаряда изменения проводились от нижнего среза снаряда через каждые 20 мм, до верхней присоединительной муфты. Все замеры повторялись не менее пяти раз. Далее режим течения изменялся до  $I_1 = 20$  м/с, затем  $I_1 = 40$  м/с и все измерения повторялись.

На рисунке 3.7 представлен график распределения скорости потока в кольцевом пространстве на уровне подъемной полости ( $b_3$ ) и выше ее ( $b_4$ ).

Как видно из графика, максимальное значение средней скорости потока наблюдается у стенки скважины, а минимальное - вдоль корпуса снаряда. По мере движения потока вверх происходит постепенное выравнивание профиля скоростей и уменьшение абсолютной величины средней скорости за счет постепенного увеличения проходного сечения кольцевого пространства, что достигается постепенным уменьшением наружного диаметра корпуса снаряда. На уровне выше подъемной полости профиль скорости потока жидкости в кольцевом пространстве между корпусом снаряда и стенками скважины полностью выравнивается (см. кривые 3 и 4 рис.3.7).

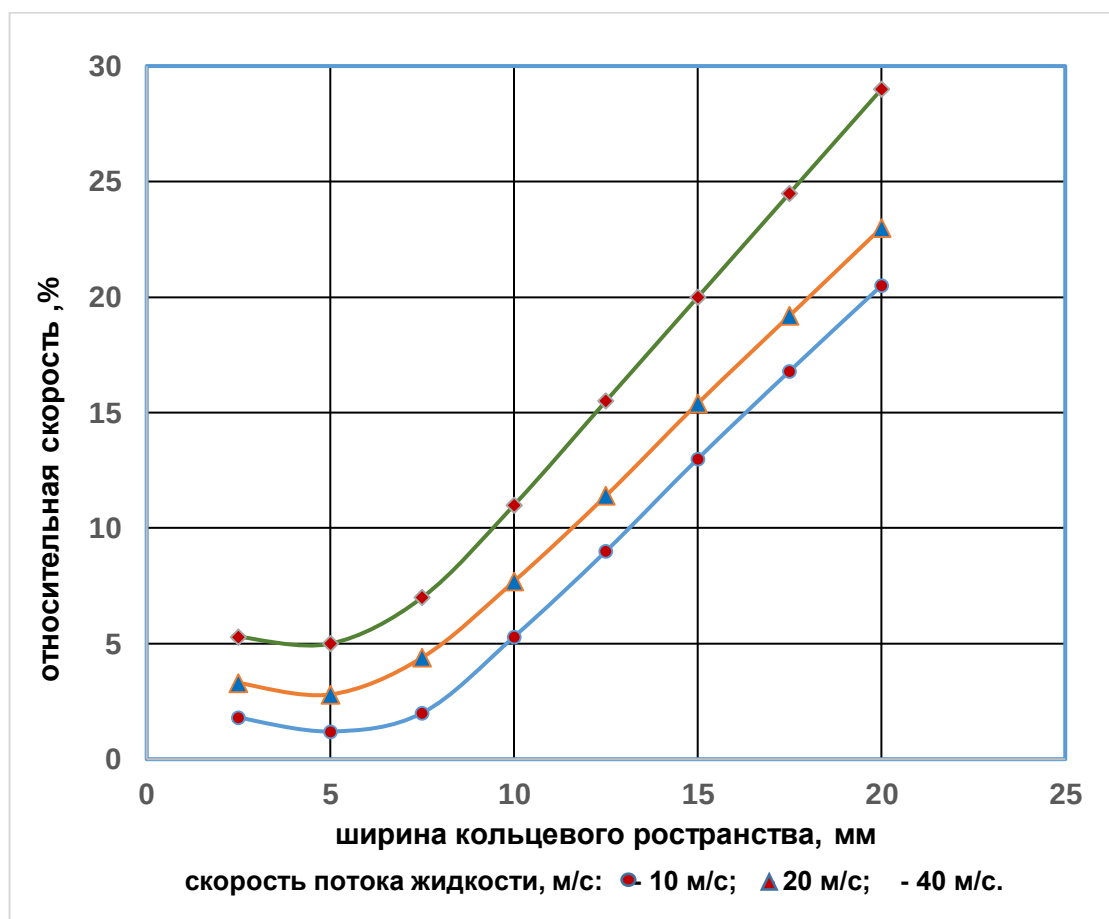


Рисунок 3.7 - Изменение скорости движения жидкости в кольцевом пространстве по высоте ШМУС

На рисунке 3.8 представлен график изменения гидродинамического давления в кольцевом пространстве по высоте снаряда, из которого хорошо видно, что на высоте выше подъемной полости происходит резкое падение величины давления, значение которого далее стабилизируется.

Анализ графиков (рис.3.7 и 3.8) показывает, что скорость потока выше подъемной полости (приемного кармана) в 3-4 раза меньше скорости течения на



уровне подъемной полости, а также в 1,5-2,0 раза уменьшается величина давления. Это подтверждает, что предмет поднимаемый потоком жидкости за счет резкого снижения скорости подъемного потока опуститься в приемный карман.

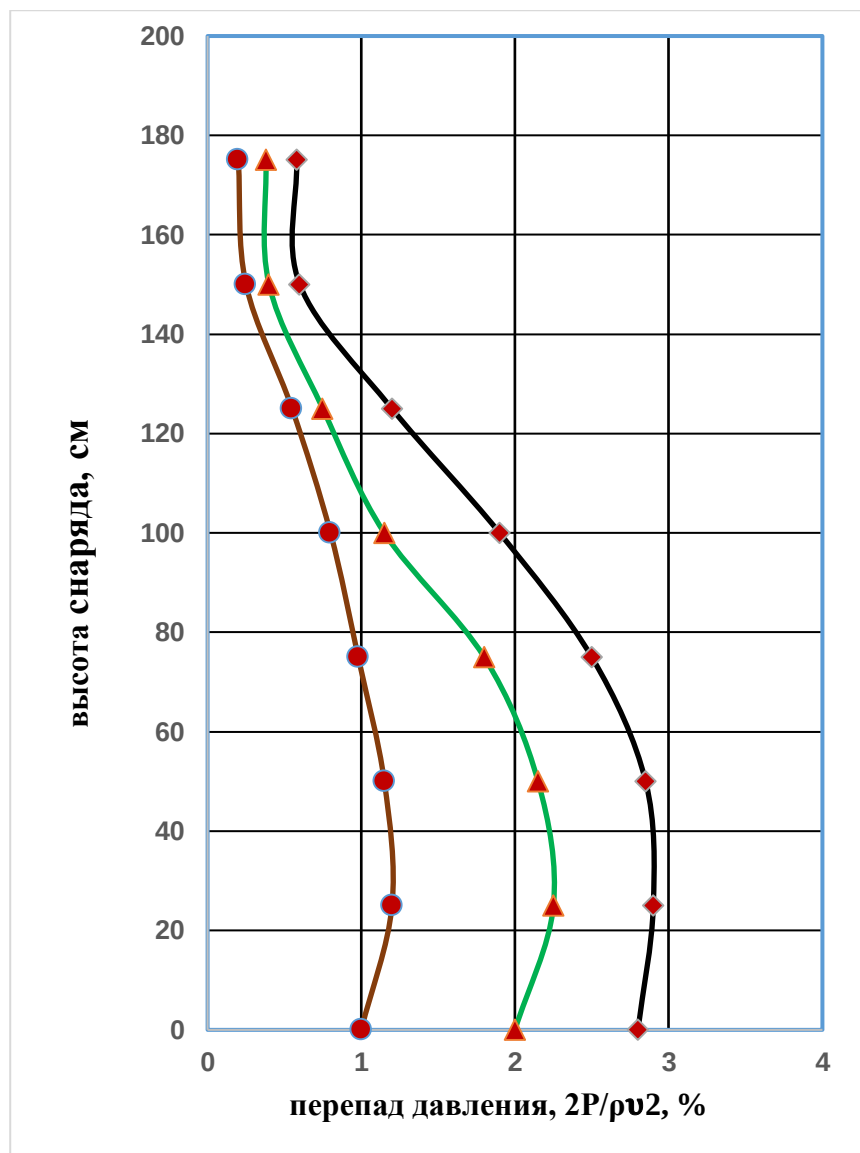


Рисунок 3.8 - Изменения гидродинамического давления в кольцевом пространстве по высоте ШМУС

### 3.5 Влияние условного диаметра поднимаемых посторонних предметов на критическую скорость вымывания

Размеры поднимаемых посторонних предметов являются одним из важных параметров, которые нужно тщательно выбирать при конструировании снарядов. В дальнейшем в качестве посторонних предметов будем рассматривать металлические шары, относящиеся к наиболее трудно извлекаемым предметам. Диаметр шаров характеризует величину максимально допустимой скорости потока жидкости в кольцевом пространстве между корпусом снаряда и стенками скважины.

В целом, для любого конкретного снаряда, для любого конкретного диаметра скважины и любой конкретной совокупности рабочих условий существует свой рациональный размер шаров /82/.

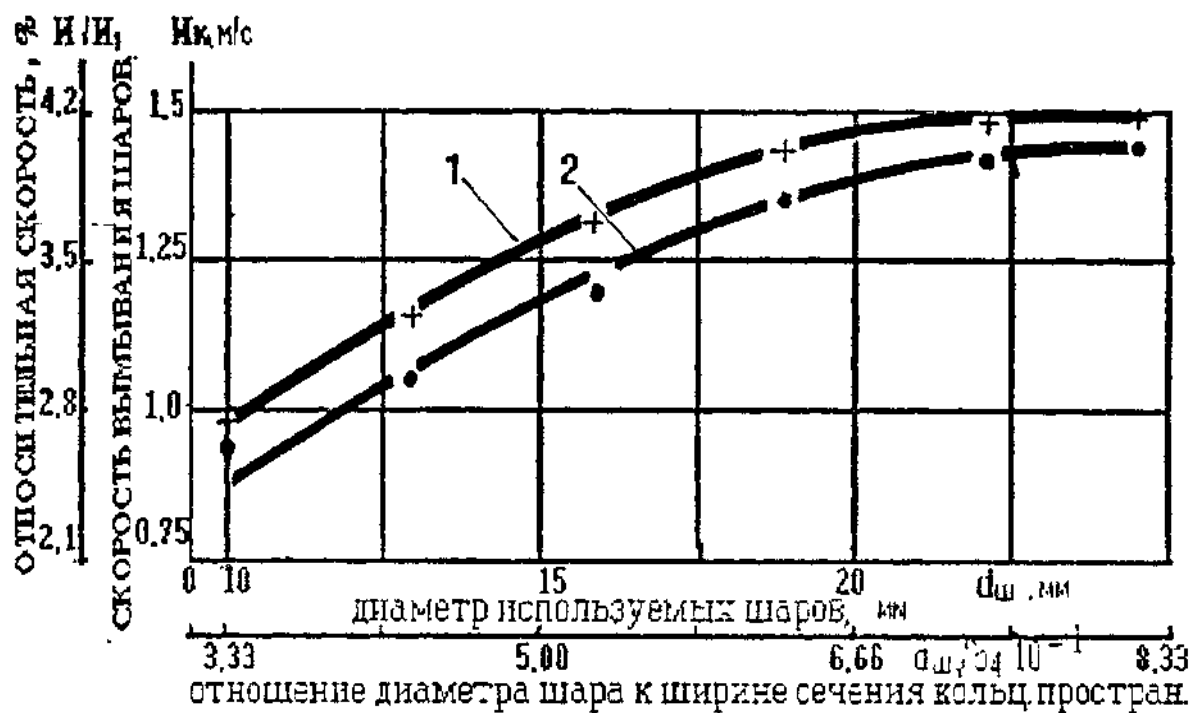
Основываясь на результаты исследований по поддержанию во "взвешенном" состоянии твердых частичек потоками жидкости, /16,31,91/, были проведены аналитические и экспериментальные исследования этого процесса.

Состояние шаров определяется как «взвешенное» в том случае, когда поднимающиеся вверх кольцевой поток жидкости распределяет заданное количество шаров по заданной глубине кольцевой зоны. Любое увеличение скорости потока приводит к «вымыванию» шаров до уровней, лежащих выше определенной высоты их подъема.

Для проведения экспериментальных исследований с целью подтверждения и уточнения методики расчета, приведенной в разделе 2, а также для установления допустимой величины гидравлической мощности, использовали стальные шары диаметрами 10, 13, 16, 19, 22, 24 мм.

Стендовые исследования строились по принципу установления критической скорости "вымывания" шаров выше снаряда по кольцевому пространству между корпусом и стенками скважины.

Эксперименты ставились в следующей последовательности: шары одного диаметра подавали (загружали на забой), собирали призабойную часть установки, включали насосы, и путем плавного регулирования расхода промывочной жидкости, определяли критическую скорость "вымывания" шаров выше снаряда по кольцевому пространству. С помощью контрольно-измерительных приборов определяли скорость движения потока в кольцевом пространстве выше камеры разряжения снаряда и скорость истечения рабочего потока из первичного сопла снаряда.



1 - экспериментально полученная; 2 - вычисленная

Рисунок 3.9 - Зависимость критической скорости вымывания шаров от их диаметра и плотности

На рисунке 3.9 приведена найденная экспериментально и вычисленная кривые скорости вымывания ( $I_k$ ) для различных диаметров шаров в абсолютных и относительных единицах, т.е.  $I_k/I_x \cdot 100\%$  и  $b_{ш}/b_4^3$ , где  $I$  - скорость истечения из первичного сопла,  $b_4^3$  - ширина кольцевого проходного сечения между корпусом снаряда стенками скважины выше приемного кармана.

Вычисления кривая, (рис.3.9) была получена с помощью базового уравнения /100/ для определения скорости осаждения круглой частички в турбулентном потоке. Базовое уравнение модифицировано путем применения корректирующих коэффициентов, учитывающих влияние зазора и несвободного осаждения, которые взяты из работы /104/.

Приведенные ниже формулы описывают способ вычисления практической скорости вымывания:

$$I_k = I_{\pi} \cdot C_1 \cdot C_2 \quad , \quad (3.4)$$

где  $I_k$  – скорость, задаваемая потоком с интенсивностью, соответствующей условию вымывания шаров, которую жидкость приобретает в кольцевом зазоре где отсутствуют шары, м/с;

$I_{\pi}$  – скорость свободного падения одного шара в бесконечно большом объеме жидкости, м/с;

$C_1$  – коэффициент коррекции, учитывающий влияние стенок;

$C_2$  – коэффициент коррекции, учитывающий несвободное оседание

$$I_{\pi} = k \sqrt{[d_{ш}(\rho_{ш} - \rho)]/\rho} \quad (3.5)$$

$$C = 1 - \left[ \frac{d_{ш}}{4R_r} \right] \quad (3.6)$$

$$C_2 = \sqrt{\rho/\rho_c} \cdot \sqrt{(\rho_{ш} - \rho_c)/(\rho_{ш} - \rho)} \quad (3.7)$$

где  $d_{ш}$  – диаметр шара;

$\rho_{ш}, \rho$  – соответственно плотность материала шара и жидкости;

$\rho_c$  – кажущаяся плотность жидкостно-шаровой смеси (которая определяется как сумма массы шаров и жидкости, деленная на объем смеси);

$R_r = (D - d_1)/2$  – гидравлический радиус кольцевого зазора;

$k = \sqrt{4g/3Gw}$  - постоянная Риттингера, для шарообразных тел принимается  $5,72 \text{ м}^{1/2}/\text{с}$ ;

$G_w = 24/Re$  – коэффициент сопротивления, при обтекании сферы потоком с числом  $Re > 60$  принимается равным 0,4.

Как видно из рисунка 3.9, экспериментально полученная и вычисленная кривые скорости жидкости в кольцевом зазоре имеют незначительное расхождение ( $< 5\%$ ), притом вычисленная кривая проходит ниже экспериментально полученной кривой, поэтому формулу 3.3 можно считать вполне приемлемой для, определения скорости жидкости в кольцевом пространстве между стенками скважины и корпусом снаряда.

Анализируя кривую 1 (рис. 3.9), можно сделать вывод, что критическая скорость вымывания шаров с увеличением их диаметра от 10 до 24 мм возрастает с 0,9 до 1,55 м/с при скорости истечения из первичного сопла 40 м/с. Начальный участок кривых, для которых диаметр шаров меняется от 10 до 19 мм, характеризуется более крутым ростом критической скорости вымывания по сравнению с участком, для которого диаметр шаров меняется с 19 до 24 мм.

Из рисунке 3.9 видно, что необходимо использовать шары максимально допустимого диаметра, это обеспечивает рост относительной скорости вымывания с 2,4 до 3,8, что позволяет увеличить подводимую к первичному соплу гидравлическую мощность на 80 %.

Известно, что оптимальным с точки зрения разгона шаров является соотношение  $d_{ш}/b_2 = 0,8$ , т.е. для каждой конкретной конструкции снаряда будет свой максимальный диаметр шаров.

Повышение общей массы шаров путем увеличения их числа при постоянном диаметре ведет к уменьшению величины критической скорости вымывания шаров, максимальное значение которой не может превышать 1,55 м/с для шаров диаметром  $d = 24$  мм и с плотностью материала  $\rho_{ш} = 7,85 \cdot 10^{-3}$  кг/м<sup>3</sup>.

### 3.6 Достоверность экспериментальных исследований

Достоверность полученных результатов замеров в процессе проведения экспериментальных исследований оценивалась необходимым числом замеров давления в каждой исследуемой точке, а также величиной значения средней скорости потока, определяемой точность установки насадки координатника.

Показания давления промывочной жидкости в каждой исследуемой точке замерялись манометром-пьезометром в см водяного столба. В каждой точке проводилось не менее 5 - 6 измерений, разброс показаний составлял от 0,1 до 1,5 см водяного столба.

При обработке результатов измерений величину среднего давления в рассматриваемой точке ( $P_{cp}$ ) определяли как среднее арифметическое значение данных всех замеров.

Величина среднего квадратичного отклонения ( $G_p$ ) от значения средней величины давления определялось по формуле:

$$G_p = \sqrt{\left[ \sum_{i=1}^n (P_i - P_{cp})^2 \right] / (n-1)}, \quad (3.8)$$

где  $P_i$  - давление, измеряемое в рассматриваемой точке;

$P_{cp}$  - среднее арифметическое значение статического давления;

$n$  - число замеров.

Тогда, коэффициент вариации определяли по формуле:

$$K_B = G_p / P_{cp} \quad , \quad (3.9)$$

Далее задавались доверительным интервалом, исходя из условия, что все результаты измерений в одной точке ложились с вероятностью 0,95 ( $E = 0,05P_{cp}$ ) в интервал:

$$P_{cp} - EP_{cp} < P_i < P_{cp} + EP_{cp} \quad , \quad (3.10)$$

Из работы /97/ известно, что вероятность ( $\gamma$ ) случайной величины полученного давления попадает в доверительный интервал и определяется по формуле:

$$\gamma = 2S_{n-1} \left[ (E\sqrt{n}) / G_p \right] \quad , \quad (3.11)$$

где  $S_{n-1}(\beta_n)$  - распределение Стьюдента с  $n-1$  степенью свободы  $\beta_n = E\sqrt{n} / G_p$ .

Сопоставляя полученные данные с данными /97/, можно сделать вывод, что при пяти замерах в одной точке вероятность попадания в 5 % доверительный интервал обеспечивается условием  $0,95 < \gamma < 0,99$ , что удовлетворяет условие проведения экспериментов.

Погрешность измерений давления и скорости определяется в основном точностью измерения расхода объемным способом и точностью показаний используемых манометров. Средняя скорость истечения определялась по так называемому "одноточечному" способу /88/ непосредственно за срезом насадки координатника, вводимого в поток в момент измерения средней скорости. Используемый метод позволяет получить удовлетворительную точность и в том случае, если случайно допущено сколько –нибудь существенное отклонение в положении точки средней скорости от теоретического значения  $r = 3,223R$ , где  $R$  – радиус цилиндрического канала насадки. Если взять, например степенной закон распределения скорости при турбулентном течении в цилиндрической круглой трубе, аналитически представляемой в виде:

$$I/I_{ш} = (Y/R)^m \quad , \quad (3.12)$$

То тогда для относительного изменения скорости при малом изменении радиальной координаты может быть получена следующая формула:

$$dI/I = (Y/R)^m \quad , \quad (3.13)$$

Из формулы (3.13) непосредственно следует, что при сшибке в установке

измерительного прибора  $Z$  - трубки полного давления на  $P\%$  (т.е.  $dy/y = P/100$ ) ошибка в определении расхода составит

$$dI/I = m P/100, \quad (3.14)$$

Пусть в установке измерительного прибора была допущена ошибка, равная 10%. При  $m = 1/7$  (это соответствует распределению скорости по сечению насадки по закону "1/7" Прандтля), устанавливая трубку Пито на расстоянии  $Z = 0,245 R$ , вместе расстояния, равного теоретическому значению, получим:

$$dI/I = 1/7 (dy/y) = 1/7 (10/100) = 0,014, \quad (3.15)$$

т.е. ошибка в определении расхода получается равной примерно 1,5 %. На самом деле ошибка от установки измерительного прибора не в действительной точке средней скорости, а на некотором расстоянии от нее, получается значительно меньшей. Таким образом, обеспечивается необходимая точность определения средней скорости в выходном сечении насадки.

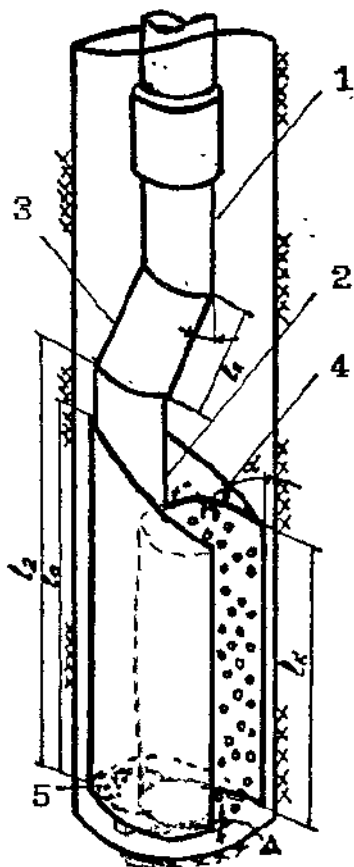
## ВЫВОДЫ

- 1 Установлены зависимости гидродинамических процессов протекающих в призабойной зоне скважины;
- 2 Получены результаты позволяющие уточнить геометрические размеры устройства для извлечения крупных предметов с забоя скважин.

#### 4 Программа промысловых испытаний устройства для извлечения посторонних предметов из скважины

Программа промысловых испытаний устройства для извлечения посторонних предметов из скважины запланирована при шароструйном бурении скважины. При шароструйном бурении шары подаются на забой партией и после завершения бурения или переходе на бурение другими видами долот необходимо извлечь шары из скважины.

Предложенная конструкция устройства для извлечения шаров из скважины (рис.4.1) получило условное название ШМУС-193 (шламометаллоуловитель скважинный с наружным диаметром 193 мм. Патент N1689586).



1 - труба; 2 - труба; 3 - переходник; 4 - обсадная труба; 5 - насадки

Рисунок 4.1 - Шламометаллоуловитель скважинный диаметром 193 мм

Он, относится к шламоуловителям гидравлического типа и состоит из следующих основных частей: подводящего канала 1 изогнутой формы, выполненного из бурильной грубы или насосно-компрессорных труб, в нижней части которого образуется усеченный проводящий канал 2 со сквозным проходом соплом 3 для промывочной жидкости. По периферии приварен кожух 4, выполненный из обсадной трубы диаметром 193,7 мм, образующий накопительную

полость 5, которая отделена от подъемной полости 6 ассиметричной перегородкой. Сквозной проход 3 соединяется с накопителем 4 посредством отверстий 5. К данной части 9 накопителя 4 приварены скребки 10 с целью отрыва от забоя заливших (затертых) металлических предметов.

ШМУС-193 работает следующим образом. После спуска на забой скважины осуществляется промывка через трубу 1 и усеченный проводящий канал 2 по сквозному проходу 3. Плотное прилегание к забою дна 9 позволяет частично перекрыть сквозной проход сопла 3 и промывку частично осуществить через отверстие 8 и накопитель 4, освободив его от шлама горной породы. В дальнейшем с постепенным подъемом и низкооборотным правым вращением устройства достигается отрыв скребками 10 и гидромонитором из сквозного прохода 3 металлических предметов, которые через подъемную полость 6, образованную ассиметричной перегородкой 7 и стенкой скважины, попадают и засасываются в накопитель 4. Подсасывание происходит благодаря эжекторному эффекту в усеченном проводящем канале 2 через отверстия 8.

Усеченный проводящий канал 2 со сквозным проходом-соплом 3 в нижней торцевой части устройства направляют струю под углом при вращении. Величина давления струи ( $P_c$ ) на преграду определяется по формуле из раздела 2:

$$P_c = \rho \cdot Q \cdot I_c \cdot (1 - \cos \alpha), \quad (4.1)$$

где  $\rho$  - плотность промывочной жидкости;  
 $Q$  - производительность буровых насосов;  
 $I_c$  - скорость истечения струи из сопла 3;  
 $\alpha$  - приведенный угол направления струи к забою.

Из формулы (4.1) видно, что, чем больше угол  $\alpha$ , тем выше давление на препятствие.

Площадь проходного сечения сопла 3 определяют из формулы:

$$\text{Lim } I_c = Q/S_c, \quad (4.2)$$

при соблюдении условия:

$$\lim_{Q \rightarrow \max} I_c \gg I_{II} = w \sqrt{(d_{III} - d_{III}) \Delta \rho / \rho}, \quad (4.3)$$

где  $I_{II}$  – скорость падения металлического предмета в жидкости;  
 $d_{III}, d_{III}$  - приведенные диаметры сечения подъемной полости 4 и извлекаемого металлического предмета;  
 $\Delta \rho = \rho_{III} - \rho$  - перепад плотностей металлического предмета и жидкости;  
 $w = 5,11 m^{1/2} / c$  - расчетный коэффициент для шарообразных тел.

Оседание в полость 5 металлических (или других) предметов происходит из-за



увеличения проходного сечения выше накопительной полости, скорость восходящего потока резко падает и предмет попадает в накопитель.

С целью установления работоспособности ШМУС-193, по представленным чертежам на БПО Мангышлакского УБР ПО "Мангышлакнефть" изготовлен опытный экземпляр (табл.4.1) и проведены его промышленные испытания в соответствии с утвержденной программой испытаний /80,81/. Были выделены две скважины N737 и N1797 площади Каражамбас Жетыбайского УБР.

На скважине N737 на забой, находящийся на глубине 400 м, подавались стальные шары с наружным диаметром 20 мм, количеством 300 шт. С забоя скважины двумя рейсами были подняты все 300 штук шаров. Второй рейс произведен из-за переполнения накопителя 4. Очистка производилась в течение 20 минут при производительности бурового насоса БРН-1 21  $\text{дм}^3/\text{с}$  с дискретным вращением и вертикальным периодическим перемещением у забоя.

На скважине №1797 при её глубине 700 м были повторены испытания при тех же режимных параметрах и том же количестве шаров. Также двумя рейсами были извлечены все шары из скважины.

Таблица 4.1 - Рекомендуемые геометрические размеры ШМУС для скважине 216 мм

| Диаметр скважины, мм | Обсадная труба корпуса, мм |                |                |      | Насосно-компрессорные трубы (бурильные), мм |                |                |                |                |                | Толщина дна, мм |
|----------------------|----------------------------|----------------|----------------|------|---------------------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|
|                      | D <sub>0</sub>             | b <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> | град | d <sub>1</sub>                              | b <sub>1</sub> | l <sub>1</sub> | d <sub>2</sub> | b <sub>2</sub> | l <sub>2</sub> |                 |
| 1                    | 2                          | 3              | 4              | 5    | 6                                           | 7              | 8              | 9              | 10             | 11             | 12              |
| 215,9                | 193,7                      | 6              | 1200           | 30   | 88,9                                        | 6,5            | 1400           | 101,6          | 6,5            | 975            | 20              |

Продолжение табл.4.1

| Длина ШМУС, L, мм | Параметры сопел |                |      | Размеры переводника |        | Гидравлические параметры                |                      |                      |
|-------------------|-----------------|----------------|------|---------------------|--------|-----------------------------------------|----------------------|----------------------|
|                   | d <sub>c</sub>  | n <sub>c</sub> | град | l <sub>пер</sub>    | в град | Q <sub>н</sub> , $\text{дм}^3/\text{с}$ | P <sub>н</sub> , МПа | I <sub>c</sub> , м/с |
| 13                | 14              | 15             | 16   | 17                  | 18     | 19                                      | 20                   | 21                   |
| 2000              | 10              | 10             | 60   | 215                 | 10     | 30                                      |                      |                      |

Разработанный шламометаллоуловитель обладает простотой конструкции и может быть изготовлен на базах производственного обслуживания буровых предприятий или в полевых условиях на скважине силами буровой бригады в соответствии с существующими стандартами на бурильные и обсадные трубы.

## **ВЫВОДЫ**

1. Конструкция ШМУС-193 проста в изготовлении и надежна в работе. Может изготавливаться на БПО силами УБР.
2. Обеспечивается надежная очистка забоя от металлических, неметаллических, мелких и крупных предметов.
3. ШМУС-193 может быть использован при бурении шароструйными снарядами.
4. ШМУС-193 может использоваться для очистки забоя от деталей и обломков долота, с которыми произошла авария (твердосплавных зубков, обломков шарошек, роликов, шариком опор долота и т.д.), а также других случайно попавших на забой предметов.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В работе изложены результаты теоретических и экспериментальных исследований технологических процессов очистки забоев скважин от посторонних крупных предметов с использованием современных методических средств и программного компьютерного сопровождения. На основании большого объема выполненных экспериментальных исследований разработаны технические средства и методика инженерного расчета процессов очистки забоя скважин, что является существенным вкладом в решение задачи повышения его эффективности.

Основные выводы, научные и практические результаты диссертационного исследования заключаются в следующем:

- при очистке забоя скважин наиболее надежным и эффективным является гидравлический способ;
- обоснована принципиально новая конструкция устройства для очистки забоев скважин от крупных и мелких предметов;
- на основе проведенных экспериментальных исследований гидродинамических процессов протекающих в призабойной зоне скважины сделаны рекомендации по геометрическим размерам устройства.
- разработана программа промысловых испытаний ШМУС новой конструкции.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Пустовойтенко И.П. Предупреждение и ликвидация аварий в бурении. - М.: Недра, 1988.
- 2 Технология подготовки ствола и забоя скважины перед спуском алмазного породоразрушающего инструмента: Тематич. науч.-техн. обзор / Э.А.Аканов и др. - М.: ВНИИОЭНГ, 1975.
- 3 Акопов Э.А. Очистка забоев глубоких скважин - М»: Недра, 1970.
- 4 А.с. 855188 СССР. Металлоуловитель/ ЦНИЛ ПО "Куйбышевнефть" /7 Бюл. № 30. - 1981.
- 5 Гидромеханический паук для подъема крупных кусков металла с забоя скважин. - М.: ВНИИОЭНГ, 1979 (Научн.-техн. сб. / ВНИИОЭНГ; Вып.7).
- 6 И.К. Бикбулатов, С.А.Заурбеков, М.М.Майлибаев Совершенствование технических средств для очистки забоев нефтяных скважин. Аналит.обзор. Алма-Ата,1991.
- 7 А.Х.Мирзаджанзаде, В.М.Ентов Гидродинамика в бурении.-М.: Недра, 1985.
- 8 Абрамович Г.Н. Турбулентное течение при вазимодействии объемных сил и автомодельность. -М.:Машиностроение,1975г.
- 9 Абразивное гидромониторное бурение // Экспресс-информ. Сер. Нефтяная и газодобывающая промышленность. -М:ВНИИТИ,1972.-№13.С.10-24.
- 10 Абенгауз Г.Г. Справочник по вероятностным расчетам.-М.: Воениздат,1970г.
- 11 Исатаев. М.И., Ползик В.В. //Влияние загромождения потока на аэродинамику сферы в трубе. Физика. –А-ата. 1969. –вып.4. - С.8-14.
- 12 Пенкхерст Р., Холдер Д. Техника эксперимента в аэродинамических трубах.-М.:ИЛ, 1955. -667с.
- 13 Шеин В.Ф., Карасев А.К., Журавлев Е.Н. Обтекание сферы в цилиндрическом канале Самолетостроение: Техника воздушного флота. - Харьков, 1979. -№46. -С.23-24.
- 14 Pittmans et ol. // "Jorn SPE". –V.13.-No45. -1973.
- 15 Ellis H.S. Ihe pipeline flow of capsules. Part 3. An expenmental investigation of the transport by water of sin-gle cylindrical and spherial capsules with densityequal to that of the water.//Tha Can J.Chem.Enq.-V.42.-No1.-P.1-8, 1974.
- 16 Gous S.W., Noyes B.S., Nwude J.K., Swarden M.C. Aerodynamic drag on vehicles in tunnesl.//Trans.ASME,J.Basic Enq.-V. 91.-No4.-P.694-706,1979.
- 17 Achenbach E. Ihe effects of surface roughness and tunnel blockage en the flow spheres. Journal of Fluid Mechanics. -V.65.-ptl.-P.113-125,1974.
- 18 Lotto B., Chow K.W. Transport of capsules in vertical pi-pelines. // Jornal of Pipelines.-No3.-P.109-122, 1982.
- 19 Чугаев Р.Р. Гидравлика.-Л.:Энергия,1975. 79. Темпов В.К. Основы теории жидкостных эжекторов//Челябинский политехнический институт.- Челябинск,1971.

- 20 Типовая методика проведения промышленных испытаний опытных и опытно- промышленных партий шарошечных долот новых конструкций. -М.: ВНИИБТ,1975.
- 21 Пенкхерст Р., Холдер Д. Техника эксперимента в аэродинамических трубах.-М.:ИЛ, 1955. -667с.
- 22 Подвидз Л.Г., Кириловский Ю.А. Расчет оптимального струйного насоса для работы на разнородных и однородных жидкостях // Тр. ВИГМ.-1963.- Вып.32.
- 23 Подвидз Л.Г., Дириловский Ю.А. Рабочий процесс и основы расчета струйных насосов/ /Тр.ВИГМ.-1960.-Вып.34.
- 24 Разрушение породы струями жидкости. //Экспресс-информ.,Сер.Техника и технология бурения. -ВИНИТИ. -№6. - С. 6-15.
- 25 Иогансен К.В. Спутник буровика. -М: Недра,1987.
- 26 Ильский А.Л., Лабзенков Г.П., Москаленко Ю.В. Оптимальная мощность насосов буровой установки //Тр.ВНИИБТ. -1978.-Вып.34.
- 27 Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. -М: Машиностроение,1975.
- 28 Каменев П.Н. Гидроэлеваторы. -М: Машгиз,1960.
- 29 Асатур К.Г. Механика рабочих струй гидромониторов для подземных работ: Автореферат Дис.д-ра техн. наук -37с.
- 30 Бай Ши. Теория струй. -М: Изд-вр физ-мат. литературы,1960.
- 31 Бабулин Н.А. Построение и чтение машиностроительных чертежей. -М: Высшая школа, 1987.

## РЕЦЕНЗИЯ

на магистерскую диссертацию Желеуова Дулата Бойрашұлы  
выполненную на тему: **«Исследования гидродинамических процессов протекающих в призабойной зоне скважины направленных на создание устройства по извлечению крупных предметов с забоя»**

Направление подготовки 7М07111 – Цифровая инженерия машин и оборудования

Магистерская диссертация «Исследования гидродинамических процессов протекающих в призабойной зоне скважины направленных на создание устройства по извлечению крупных предметов с забоя» относится к разделу аварийный инструмент используемый при бурении скважин, и направлена на решения технической задачи очистки забоя скважин от крупных и мелких металлических предметов.

**Актуальность.** Сокращение стоимости и срока проведения аварийных работ по очистке забоев скважин с применением надежных и простых в эксплуатации устройств является весьма актуальной задачей.

**Идея работы** состоит в научном обосновании рациональных параметров конструкции новой конструкции устройства для извлечения с забоя скважин крупных и мелких посторонних предметов.

**Предметом исследования** являются гидродинамические процессы протекающие в призабойной зоне скважин, определяющие эффективность её очистки от посторонних крупных и мелких предметов.

В работе, проведен обзор и анализ состояния технического уровня развития конструкций устройств для очистки забоев скважин от мелких и крупных посторонних предметов, подробно рассмотрены конструкции применяемых устройств, приведены их технические характеристики и достоинства и недостатки. Установлено, что отсутствуют устройства обладающие простотой конструкции, высокой надежностью в работе при многократном использовании, основанные на гидравлическом принципе работы.

Магистрантом предложено новая конструкции устройства для извлечения крупных и мелких предметов из скважин принцип работы которого, основан на гидравлическом принципе очистки забоя.

Проведены теоретические и отдельные экспериментальные исследования работы устройства, выработаны рекомендации по геометрическим параметрам в зависимости от диаметра скважины, отработаны режимы работы. При этом необходимо отметить, что устройство прошло промысловые испытания и показала хорошие результаты по очистке забоя.

**Практическая значимость работы** заключается в том, что на основании выполненных теоретических и экспериментальных исследований получена необходимая информация для разработки устройства для очистки забоя скважин и отработки технологии очистки.

Ф КазНТУ 704-24. Рецензия



Диссертационная работы магистранта Желеулова Д.Б. выполнена в соответствии с требованиями «Положения о программах магистратуры» действующего в КазНТУ имени К.И.Сатпаева П 029-02.02-08 и оформлена в соответствии с требованиями стандарта СТ КазНТУ – 09 – 2017.

Существенных замечаний к содержанию, объему и изложению материала магистерской диссертации, нет.

В целом магистерская диссертация Желеулова Д.Б. соответствует предъявляемым требованиям, содержит научную новизну, магистрант Желеулов Д.Б. показал, что владеет основами научных исследований, умеет правильно определять цель и задачи исследований, применять методику постановки экспериментов и знает современное программное обеспечение для обработки полученных данных.

Диссертация Желеулова Д.Б. может быть допущена к защите, а диссертант заслуживает присвоения академической степени **«магистр техники и технологий»**.

**Рецензент**

Ген.директор ТОО «Бурмаш»  
докт. техн. наук, профессор

Кудайкулова Г.А.

« 08 » июня 2021 г.



## ОТЗЫВ

научного руководителя  
на диссертацию Желеуова Дулата Бойрашұлы,  
магистранта Казахского национального исследовательского  
технического университета имени К.И.Сатпаева

Тема магистерской диссертации «Исследования гидродинамических процессов протекающих в призабойной зоне скважины направленных на создание устройства по извлечению крупных предметов с забоя».

**Актуальность.** Снижение стоимости и срока проведения аварийных работ по очистке забоев глубоких нефтяных и газовых скважин от посторонних предметов с применением простых и надежных в эксплуатации устройств является актуальной задачей, решению которой и посвящена настоящая магистерская диссертация.

**Идея работы** заключается в научном обосновании рациональных конструктивных параметров разрабатываемого устройства для извлечения с забоя скважин крупных и мелких посторонних предметов.

**Предметом исследования** являются гидравлические призабойные процессы, определяющие эффективность очистки.

**Научная новизна** состоит в разработке новой конструкции устройства для очистки забоев скважин и отработке технологических режимов его работы.

Диссертация выполнена в соответствии с требованиями нормативных документов П 029-02.02-08, «Положения о программах магистратуры» СТП 38944979-09-2014 «Работы учебные» действующего в КазНТУ имени К.И.Сатпаева, определяющего содержание и требования к оформлению документов данного типа.

В процессе работы над диссертацией магистрант Желеулов Д.Б зарекомендовал себя как исполнительный, умеющий решать поставленные перед ним задачи магистрант. Работа выполнялась согласно установленного графика, без срывов и существенных отклонений. Магистрант Желеулов Д.Б в процессе работы над диссертацией показала хороший уровень теоретических и практических знаний.

Считаю, что диссертация Желеулова Д.Б может быть допущена к защите, а диссертант заслуживает присвоения академической степени «магистр техники и технологий».

Руководитель  
канд.техн.наук,  
профессор  
18.06.2021 года



Заурбеков С.А.



Протокол анализа Отчета подобия

заведующего кафедрой / начальника структурного подразделения

Заведующий кафедрой / начальник структурного подразделения заявляет, что ознакомился(-ась) с Полным отчетом подобия, который был сгенерирован Системой выявления и предотвращения плагиата в отношении работы:

Автор: Желеуов Д.

Название: «Исследования гидродинамических процессов протекающих в призабойной зоне скважины направленных на создание устройства по извлечению крупных предметов с забоя»

Координатор: Сейтжан Заурбеков

Коэффициент подобия 1:2

Коэффициент подобия 2:1.4

Замена букв:38

Интервалы:0

Микропробелы:0

Белые знаки:0

После анализа отчета подобия заведующий кафедрой / начальник структурного подразделения констатирует следующее:

- ☒ обнаруженные в работе заимствования являются добросовестными и не обладают признаками плагиата. В связи с чем, работа признается самостоятельной и допускается к защите;
- ☐ обнаруженные в работе заимствования не обладают признаками плагиата, но их чрезмерное количество вызывает сомнения в отношении ценности работы по существу и отсутствием самостоятельности ее автора. В связи с чем, работа должна быть вновь отредактирована с целью ограничения заимствований;
- ☐ обнаруженные в работе заимствования являются недобросовестными и обладают признаками плагиата, или в ней содержатся преднамеренные искажения текста, указывающие на попытки сокрытия недобросовестных заимствований. В связи с чем, работа не допускается к защите.

Обоснование:

Работа была проверена с помощью системы «Антиплагиат» и не содержит признаков плагиата. Все заимствования являются добросовестными.

21.06.21

Дата

Подпись заведующего кафедрой /  
начальника структурного подразделения

Окончательное решение в отношении допуска к защите, включая обоснование:

Работа допускается к защите

21.06.2021

Дата

Подпись заведующего кафедрой /  
начальника структурного подразделения

## Протокол анализа Отчета подобия Научным руководителем

Заявляю, что я ознакомился(-ась) с Полным отчетом подобия, который был сгенерирован Системой выявления и предотвращения плагиата в отношении работы:

Автор: Желеуов Д.

Название: «Исследования гидродинамических процессов протекающих в призабойной зоне скважины направленных на создание устройства по извлечению крупных предметов с забоя»

Координатор: Сейтжан Заурбеков

Коэффициент подобия 1.2

Коэффициент подобия 2:1.4

Замена букв: 38

Интервалы: 0

Микропробелы: 0

Белые знаки: 0

После анализа Отчета подобия констатирую следующее:

- ☒ обнаруженные в работе заимствования являются добросовестными и не обладают признаками плагиата. В связи с чем, признаю работу самостоятельной и допускаю ее к защите;
- ☐ обнаруженные в работе заимствования не обладают признаками плагиата, но их чрезмерное количество вызывает сомнения в отношении ценности работы по существу и отсутствием самостоятельности ее автора. В связи с чем, работа должна быть вновь отредактирована с целью ограничения заимствований;
- ☐ обнаруженные в работе заимствования являются недобросовестными и обладают признаками плагиата, или в ней содержатся преднамеренные искажения текста, указывающие на попытки сокрытия недобросовестных заимствований. В связи с чем, не допускаю работу к защите

Обоснование:

*В работе не добросовестных заимствований не выявлено*

*21.06.2022.*

Дата



Подпись Научного руководителя