

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»



Институт природных ресурсов

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

Кафедра бурения скважин

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

Тема работы
«Исследование влияния содержания твердой фазы в дисперсионной среде бурового раствора на скорость износа эластомера винтового забойного двигателя»

УДК 678.074:622.24.063:544.774

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
2БМ5Д	Мурадов Эльхан Эйвазович		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Хорев В. С.	к.т.н.		

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Шарф И. В.	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Немцова О. А.	–		

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Бурения скважин	Ковалев А. В.	к.т.н.		

Томск – 2017 г.

## Аннотация

Целью настоящей работы поставлена задача определить влияние содержания твердой фазы в дисперсионной среде бурового раствора на скорость износа эластомера винтового забойного двигателя.

В качестве объекта исследования рассматривается: взаимодействие ротора с эластомером (резиновой обкладкой) статора ВЗД в присутствии различных типов буровых растворов при различной концентрации песка (твердой фазы). Предметом исследования выбрана резина ИРП-1226, из которой изготавливаются обкладки статора ВЗД.

Экспериментальный стенд разработан на базе вертикального сверлильного станка. Для этого изготовлен дополнительный модуль нагружения образцов резины, который представляет собой металлический стакан со съемной нижней крышкой, позволяющей размещать и жестко закреплять образцы резины в стакане. Данная установка частично имитирует рабочую пару «ротор-статор» винтового героторного механизма двигателя и позволяет проанализировать взаимодействие между резиной и металлом.

В качестве дисперсионной среды использовались четыре вида жидкости: вода, моторное масло ВГЗ, полимерный и полимер-глинистый буровые растворы. Твердой фазой является песок, который добавлялся в определенной концентрации в среду бурового раствора.

Суть исследования состояла в нагружении образцов в различных средах при различных концентрациях и фиксировании времени полного разрушения образцов. Также измерялась величина деформации образцов после эксперимента и остаточная деформация после 24 часов.

В результате исследований были получены данные, показывающие влияние концентрации твердой фазы и типа бурового раствора на скорость износа эластомера.

Название ВКР: «Исследование влияния содержания твердой фазы в дисперсионной среде бурового раствора на скорость износа эластомера винтового забойного двигателя»

Содержание:

Введение.....	4
1. История создания и развития винтовых забойных двигателей.....	8
1.1 Типовая конструкция ВЗД .....	16
1.2 Принцип действия ВЗД .....	17
1.3 Силовая секция ВЗД .....	18
1.4 Анализ причин отказов ВЗД.....	20
1.5 Классификация износа эластомера .....	23
1.6 Влияние твердой фазы бурового раствора на скорость износа эластомера винтового забойного двигателя .....	25
2 Экспериментальная часть.....	28
Заключение .....	29
Список использованных источников .....	30
Приложение 1 .....	33

## Введение

В нашей стране и по всему миру в целом в последнее время винтовой забойный двигатель получил широкое распространение, и с каждым годом его доля в общей проходке растет. Зарубежными специалистами признано, что это отечественное изобретение является прогрессивным и причислено ими к выдающимся изобретениям буровой индустрии XX века. Плюсы и преимущества этого забойного привода позволили совершить огромный скачок в технике и технологии бурения скважин, в особенности таких скважин, как наклонно-направленные и горизонтальные скважины, а при использовании винтового забойного двигателя в процессах капитального ремонта скважин он занял лидирующее место. Конструкция объемного двигателя была разработана и запатентована в 1966 году сотрудниками ВНИИБТ М.Т. Гусманом, С.С. Никомаровым, Н.Д. Деркачом, Ю.В. Захаровым и В.Н. Меньшениным. Сегодня разработано более 40 типов ВЗД.

Огромный научный и творческий вклад в разработку двигателей, отработку технологии их производства, создание и совершенствование технологии бурения скважин с применением ВЗД внесли Д.Ф. Балденко, П.И. Астафьев, Н.Г. Безлепкин, Ф.Д. Балденко, Т.Н. Бикчурин, Ю.А. Коротаев, М.Г. Бобров, О.В. Вадецкий, А.В. Власов, А.Н. Гносвых, Л.М. Кочнев, Н.Ф. Мутовкин, В.А. Каплун, Ю.М. Сарапулов, И.К. Князев, В.И. Крылов, А.В. Цепков, Г.А. Щелконогов и много других авторов.

На рисунке 1 показано соотношение объемов бурения различными способами бурения нефтяных и газовых скважин в России и СССР. Винтовые забойные двигатели стали чаще применяться для бурения скважин благодаря тому, что они, по сравнению с другими забойными двигателями, отвечают современным требованиям производимых на сегодняшний день породоразрушающих инструментов и техники бурения. Это связано с такими уникальными энергетическими и техническими характеристиками двигателя, как большой удельный момент ( $M/L$ ) и жесткая зависимость крутящего момента от скорости вращения ( $M-n$ ).

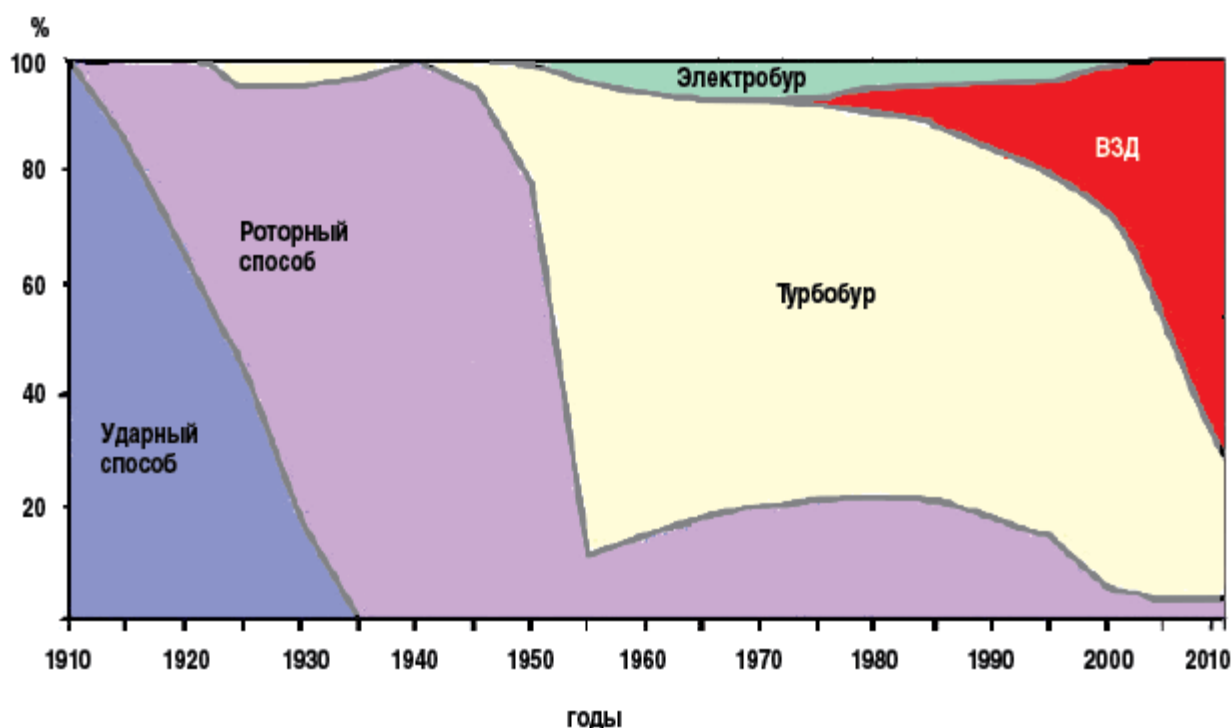


Рисунок 1 – Динамика изменения объемов бурения в России и СССР [1]

Винтовой забойный двигатель является гидравлической машиной объемного типа, которая преобразует давление жидкости в рабочей паре во вращательный момент, который передается на выходной вал двигателя.

Источником энергии винтовых забойных двигателей является поток бурового раствора. Все узлы трения смазываются и охлаждаются буровым раствором.

В основе работы винтовых забойных двигателей лежит обратный принцип «насоса Муано» [2]: циркулирующая под давлением жидкость поступает в расширяющуюся полость, образуемую между геликоидальным металлическим ротором и винтовой геликоидальной полостью в корпусе статора из эластомерного материала. Давление циркулирующей жидкости (бурового раствора), поступающей в зазор между статором и ротором, заставляет ротор двигателя вращаться внутри статора. Таким образом, гидравлическая энергия циркулирующей жидкости преобразуется в механическую энергию вращения, которая, в свою очередь, передаётся на долото и приводит его в действие. Изменение числа «лепестков» геликоидального ротора и геометрии винтового канала статора позволяют

создавать двигатели, обладающие различными гидравлическими и механическими характеристиками, применительно к конкретному типу буровых работ или скважинных условий [3].

Сотрудниками филиала «ВНИИБТ – Буровой инструмент» в Перми непрерывно ведутся исследования по совершенствованию ВЗД с целью повышения их характеристик, повышающих технико-экономические показатели бурения скважин. К эксплуатационным и энергетическим характеристикам ВЗД относят:

- момент силы на выходном валу двигателя;
- мощность и КПД двигателя.

Данные характеристики возможно измерить и рассчитать на любом режиме работы ВЗД (расходе рабочего агента) на испытательных стендах. Несмотря на большой объем проводимых работ в ВНИИБТ по совершенствованию рабочих органов ВЗД, энергетические характеристики, ресурс и надежность отечественных ВЗД не позволяют в полной мере отрабатывать современные долота режущего типа. Моторесурс современных долот, выпускаемых на территории России достаточно высок, и составляет порядка 600-900 часов в зависимости от горно-геологических характеристик разбуриваемого пласта, в то время как ресурс ВЗД по паспорту составляет порядка 200 часов при работе на чистой воде [4]. Эффективное использование современных конструкций долот режущего типа возможно лишь при наличии мощного гидравлического двигателя, который бы обеспечивал частоту вращения вала 100-400 об/мин и отвечал необходимым требованиям по надежности и долговечности.

На сегодняшний день количество прерванных рейсов бурения из-за внезапного отказа ВЗД еще достаточно велико. Это приводит к нежелательным затратам на операции по ликвидации аварии, повышается время бурения скважины и увеличивается себестоимость метра разбуриваемой скважины.

Для решения проблемы недолговечности ВЗД и его частей необходимо понимание и прогнозирование причин отказов. Анализ работы ВЗД показывает, что основными причинами отказа являются выход из строя одного или нескольких узлов, представленных в таблице 1 [5]:

Таблица 1 – Соотношение отказов в винтовом забойном двигателе.

Разрушение резины статора при наработке до 80 ч в том числе внезапные отказы (наработка до 40 ч)	45% 30%
Сломы гибких валов	25%
Износ осевых, радиальных опор	20%
Износ ротора/статора по диаметру	8/2%

Из данной таблицы видно, что отказы ВЗД в основном происходят из-за разрушения резины эластомера внутренней обкладки статора. На сегодняшний день эта проблема одна из важнейших в сфере производства и использования ВЗД в бурении. Нарушения целостности резиновой обкладки эластомера приводят к катастрофическому снижению эксплуатационных и энергетических характеристик двигателя, в отдельных случаях это приводит к его полному отказу.

Таким образом, резинометаллический статор является узлом, лимитирующим работоспособность ВЗД, а изучение процессов разрушения резины эластомера является весьма актуальным вопросом.

## **1. История создания и развития винтовых забойных двигателей**

Для реализации различных технологий проводки скважин, основанных на вращательном методе бурения, наибольшее распространение в отечественной практике получил способ бурения с использованием гидравлических забойных двигателей, в котором бурильная колонна не участвует в процессе передачи крутящего момента долоту, оставаясь либо неподвижной, либо совершая малоинтенсивное вращение с целью снятия сил трения при поступательном движении инструмента.

Начиная с 1950-х гг. соотношение объемов проходки различными способами бурения нефтяных и газовых скважин в СССР и России складывается в пользу забойных двигателей, причем если во второй половине XX века преимущественно использовался турбинный способ бурения, то после 2000 г. все более широкое распространение получают ВЗД (около 3/4 объема бурения в 2010 г.), что связано с развитием технологий наклонно направленного и горизонтального бурения, а также внедрением инновационных конструкций породоразрушающего инструмента.

Забойный привод породоразрушающего инструмента для бурения нефтяных и газовых скважин основывается на возможности эффективного решения следующих задач:

- снижения аварийности с бурильными трубами за счет облегчения условий их работы;
- проводки наклонно направленных, горизонтальных и многозабойных скважин, корректирования траектории ствола скважины;
- повышения показателей отработки долот за счет реализации рациональных параметров режима их нагружения (отношения крутящего момента к частоте вращения  $M/n$ ).



По принципу действия, конструкции рабочих органов и характеристикам гидравлические забойные двигатели подразделяются на два типа:

- *динамические* забойные двигатели (турбобуры), рабочим органом которых является многоступенчатая осевая турбина;
- *объемные* забойные двигатели (ВЗД), рабочие органы которых выполнены на базе многозаходного винтового героторного механизма.

Многолетний отечественный и зарубежный опыт бурения с использованием гидравлических забойных двигателей (турбобуров и ВЗД) predetermined основные технические требования к современному приводу породоразрушающего инструмента.

Характеристики двигателя должны обеспечивать:

- Высокий крутящий момент, позволяющий обеспечить эффективную работу породоразрушающего инструмента;
- частоту вращения выходного вала в диапазоне 200–300 об/мин для долот типа PDC, 300–800 об/мин для алмазных долот, 80–200 об/мин для шарошечных долот;
- для эффективной отработки насосов, двигатель должен обладать высоким КПД;
- пропорциональную зависимость между частотой вращения и расходом бурового раствора, а также между перепадом давления и крутящим моментом для эффективного управления режимом бурения.

Рабочая пара и остальные узлы двигателя должны быть износостойкими и коррозионностойкими, и должны обеспечивать:

- Возможность использования в случае технической необходимости рабочего агента (бурового раствора) любой вязкости и плотности, в

- том числе с содержанием тампонирующих материалов, предотвращающих потерю циркуляции, и агрессивных добавок;
- эксплуатацию двигателя при температуре до  $150\div 180^{\circ}\text{C}$  и давлении окружающей среды до 100 МПа;
  - стойкость двигателя, достаточную для стабильной работы и полной отработки современных долот;
  - установку на корпусе двигателя центраторов;
  - возможность управления углом искривления корпуса двигателя при наклонно направленном и горизонтальном бурении;
  - возможность использования в газожидкостных технологиях (на аэрированных буровых растворах, воздухе и пене).

Осевые и диаметральные размеры двигателя должны обеспечивать:

- Возможность проведения буровых работ породоразрушающими инструментами различного диаметра;
- Возможность эффективной проходки наклонно-направленных и горизонтальных скважин с различной интенсивностью искривления, при этом корпус и резьбовые соединения должны выдерживать изгибающие нагрузки, возникающие при прохождении через искривленные участки профиля;
- использование стандартных ловильных инструментов.

Анализ характеристик и конструкций винтовых забойных двигателей показал, что ни один из различных типов не отвечает в полной мере приведенным требованиям; в значительной степени перечисленным требованиям соответствуют ВЗД с многозаходным исполнением силовой пары.

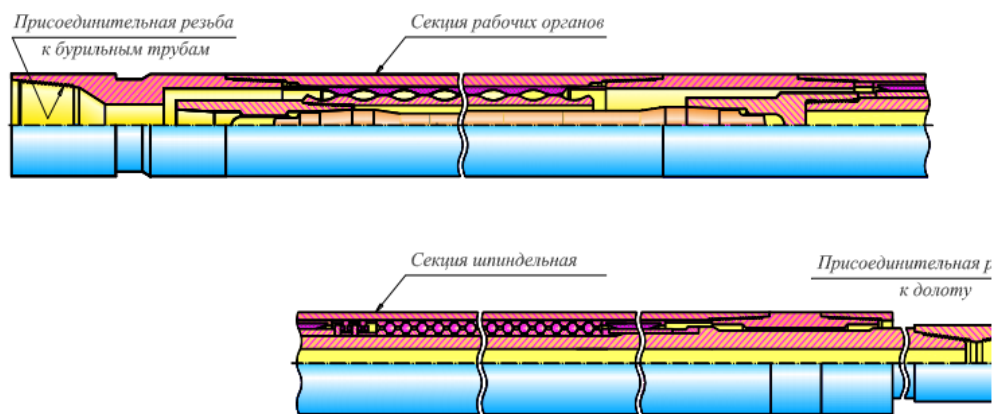
Эти гидравлические машины, разработанные в 1960-х годах почти одновременно в СССР и США, во многом способствовали существенному увеличению технико-экономических показателей бурения газовых и

нефтяных скважин и возникновению новых технологий строительства скважин.

Основная причина перехода к объемному гидроприводу долота в нашей стране была связана с серьезным отставанием в проходке на долото при бурении скважин с применением многоступенчатых турбобуров, энергетические и технические особенности которых не обеспечивают частоту вращения ниже 400 об/мин без существенного отклонения от необходимых значений уровня давления насосов и крутящих моментов на валу двигателя.

Разработки по созданию ВЗД в нашей стране начались во ВНИИБТ (Пермском филиале и московских подразделениях) и продолжают на сегодняшний день. Отличительной особенностью отечественных ВЗД является схема многозаходного винтового героторного механизма (ВГМ) (рис. 2), которая предопределила оптимальные технические характеристики гидромашины [2].

В последние годы произошли значительные изменения в отечественной и зарубежной технике и технологии строительства скважин: бурными темпами развивалось наклонно направленное бурение, появились принципиально новые способы бурения (горизонтальное бурение, бурение дополнительных стволов из эксплуатационной колонны ранее пробуренной скважины, ремонтные и буровые работы с использованием колтюбинга, бурение многозабойных скважин), совершенствовались породоразрушающий инструмент (распространение высокоэффективных моментоемких поликристаллических долот типа PDC), компоновки низа бурильной колонны, телеметрические системы контроля забойных параметров и др. В силу своих отличительных особенностей ВЗД стали неотъемлемой частью современных технологий. И если ранее ВЗД рассматривались только как конкурент турбобурам и их перспективы оценивались неоднозначно, то к концу 1990 гг. ВЗД прочно заняли свое место в буровой технике и их роль постоянно возрастает (в 2010 г. в России ВЗД выполнено  $\frac{3}{4}$  объема проходки в бурении и ремонте скважин).



Сечение рабочих органов

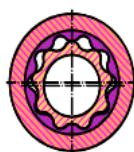


Рисунок 2 – ВЗД с многозаходными рабочими органами, гибким валом, расположенным в расточке ротора, и шпинделем с многорядным шаровым осевым подшипником

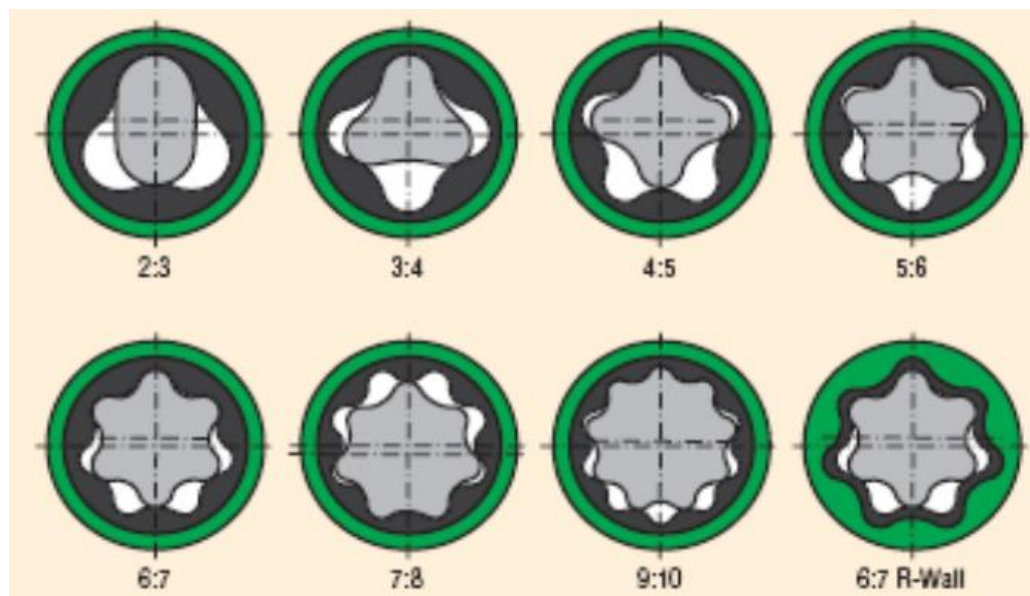


Рисунок 3 – Поперечные сечения рабочих органов в диаметральном габарите 172 мм производства фирмы «Радиус-Сервис»

Подводя итоги развития техники и технологии бурения, авторитетный международный журнал «Oil & Gas» причислил отечественные многозаходные винтовые двигатели к числу выдающихся достижений буровой индустрии второй половины XX века [2].

В России по состоянию на 1 января 2012 г. в серийном и опытном производстве находилось около 200 типоразмеров ВЗД. Их изготавливают четыре предприятия – ОАО «Кунгурский машиностроительный завод», ООО «ВНИИБТ–Буровой инструмент», ОАО «Пермнефтемаш-ремонт» и ООО «Радиус–Сервис» (табл.2).

Таблица 2 – Номенклатура отечественных ВЗД

№	Фирма-изготовитель	Шифр	Число типоразмеров	Наружный диаметр, мм	Кинематическое отношение рабочих органов	Длина рабочих органов, мм
1	ВНИИБТ-БИ	Д ДВ ДГ ДГР ДР	75	43-240	3:4-9:10	760-5100
2	Кунгурский машиностроительный завод	Д ДУ ДМШ	25	76-240	4:5-9:10	850-3000
3	Радиус - Сервис	Д-РС ДОТ-РС ДРУ-РС УД-РС	125	43-240	2:3-9:10	1500-6000
4	Пермнефтемаш-ремонт	Д ДРУ ДП	95	43-240	4:5-9:10	530-5000

Основные технические показатели, технологические требования и комплектность поставки ВЗД регламентируются ТУ 3664-044-0014074-2002, ТУ 3664-005-1430039-2005, ТУ 3664-001-12033648-2005, СТП ВНИИБТ 1018-99 и другими нормативными документами.

Поскольку исторически сложилось, что в первые десятилетия своего появления ВЗД изготавливались по конструкторской документации ВНИИБТ и его Пермского филиала, все российские машины имеют торговую марку (шифр) начинающийся с буквы Д, а далее другие буквы характеризуют

принадлежность двигателей к заводу-изготовителю или обозначают особенности конструкции или выходные параметры.

Например, двигатели серии ДР – созданы для бурения с использованием регулируемого искривленного переводника, двигатели ДГ – для горизонтального бурения, ДВ – для высокооборотного бурения и т.д.

Структура обозначения ВЗД, принятая в ООО «ВНИИБТ-БИ», имеет следующий вид:

$$Д...X D *.*/*.** - 01 ,$$

где Д – тип двигателя (Д, ДВ, ДГ, ДО, ДР...); X – порядковый номер модели (1, 2, 3 ...);

D – диаметр корпуса двигателя, мм;

\* – модернизированный двигатель (М);

\*/\* – кинематическое отношение рабочих органов ( $z_2/z_1$ );

\*\* – число шагов статора  $\times 10$ ;

01 – наличие центратора.

За рубежом ВЗД различных типоразмеров производят более двадцати машиностроительных фирм, среди которых известные фирмы Baker Hughes, Schlumberger, Halliburton, Weatherford, Lilin и другие.

Машиностроительные и сервисные предприятия продолжают работать над улучшением конструкций двигателей и поиском инновационных решений, развитием производственных процессов для их изготовления и технологий бурения с использованием ВЗД.

Несмотря на это, при всем многообразии типов и размеров зарубежных ВЗД их силовые секции за небольшим исключением изготавливаются несколькими специализированными предприятиями, среди которых наиболее известны PCM, Robbins & Myers, Roper Pumps, PV Fluid.

ВЗД относятся к объемным роторно-вращательным гидромашинам, которые отличаются многообразием типов и конструкций.

Сравнительно малая металлоемкость и простота конструкции этих гидромашин по сравнению с поршневыми явились важными факторами, способствующими их широкому использованию в современной технике.

Благодаря указанным особенностям ВЗД являются практически незаменимым типом объемных гидравлических машин, которые относительно долговечны при использовании рабочих жидкостей, содержащих твердую фазу и не обладающих специальными смазывающими свойствами. Это достигается за счет особенностей конструктивного исполнения и принципа действия и силовой секции двигателя.

ВЗД отличаются традиционным конструктивным исполнением РО: металлическим ротором с износостойкой рабочей поверхностью и статором, имеющим эластичную обкладку с внутренней винтовой поверхностью. Такое исполнение берет свое начало с первых насосов Муано [2] и объясняется технологическим фактором – рациональностью выполнения формующего стержня для изготовления эластичной обкладки в форме вала.

Выбор эластомера (обычно это резина) в качестве материала обкладки статора определяется:

- необходимостью получения достаточной износостойкости в абразивной среде (широкий опыт использования резинометаллических подшипников в различных тяжелых условиях подтверждает это положение);
- возможностью компенсации погрешностей изготовления ротора и статора (профиля, диаметров, шагов и прямолинейности осей винтовых поверхностей);
- возможностью обеспечения герметичности рабочих камер за счет создания натяга в РО увеличением диаметральных размеров ротора.

Для создания в винтовых гидравлических машинах камер (шлюзов), теоретически разобщенных от областей высокого и низкого давлений необходимо выполнение пяти условий:

- 1) числа заходов статора и ротора должны отличаться на единицу:  
 $z_1 = z_2 + 1$ ;
- 2) винтовые поверхности статора и ротора должны иметь одинаковое направление;
- 3) отношение шагов винтовых поверхностей ротора  $t$  и статора  $T$  должно быть пропорционально отношению числа их зубьев:  $t/T = z_2/z_1$ ;
- 4) длина РО  $L$  должна быть не менее одного шага статора:  $L \geq T$ ;
- 5) профили ротора и статора должны быть взаимооггибаемы и находиться в непрерывном контакте во время зацепления.

### **1.1 Типовая конструкция ВЗД**

Анализ развития техники и технологии для строительства нефтегазовых скважин показывает, что в настоящее время одним из основных приводов породоразрушающих инструментов являются винтовые забойные двигатели (ВЗД) [6]. Широкое применение ВЗД объясняется совершенствованием конструкций долот, имеющих повышенную моментоемкость, развитием технологии бурения, а также важными эксплуатационными преимуществами этих двигателей:

- оптимальные кинематические характеристики, которые позволяют эффективно отрабатывать современные долота;
- минимальные осевые и диаметральные размеры, которые обеспечивают возможность использовать ВЗД при бурении наклонно-направленных и горизонтальных скважин, а также при резке боковых стволов;
- простота конструкции и ремонта.

Общий вид винтового забойного двигателя показан на рисунке 4[7]:



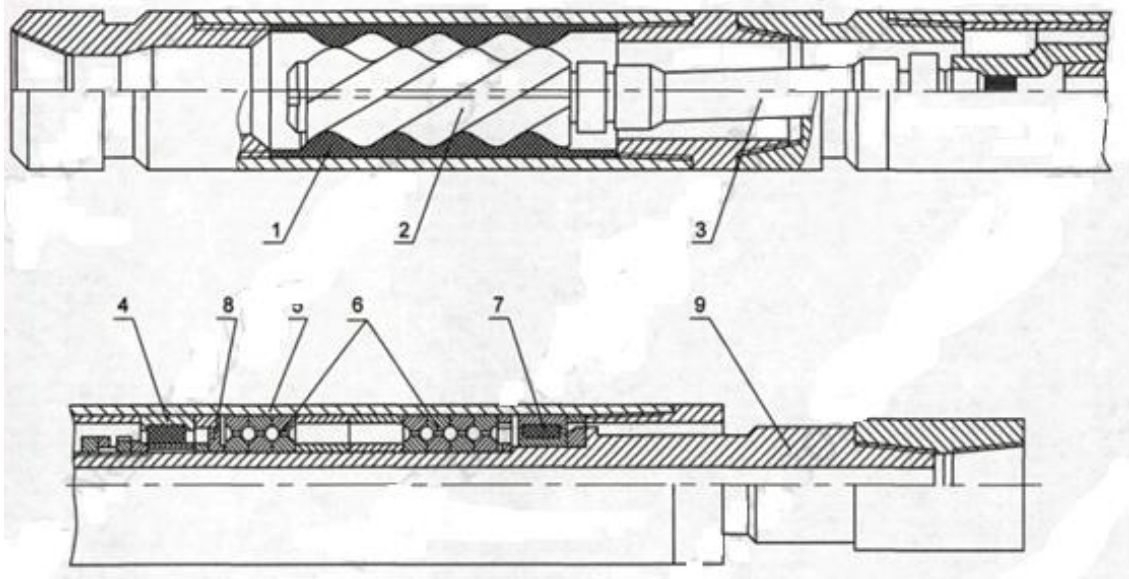


Рисунок 4 – Типовая конструкция винтового забойного двигателя.

1 – статор; 2 – ротор; 3 – шарнирное соединение; 4,7- радиальные опоры; 5 – корпус шпинделя; 6 – осевая опора; 8 – торцевое уплотнение; 9 – вал шпинделя.

Винтовые забойные двигатели позволяют осуществлять процесс бурения, при котором сохраняется высокие момент силы и частота вращения на выходном валу шпинделя, мало изменяющейся при увеличении осевой нагрузки, что позволяет эффективно применять долота различных типов[3].

## 1.2 Принцип действия ВЗД

По принципу действия ВЗД представляет собой планетарно-роторную гидравлическую машину объемного типа с внутренним косозубым зацеплением рабочих органов силовой секции. Основными узлами двигателя являются рабочие органы (ротор и статор), шарнирное соединение и шпиндельная секция.

Статор изготовлен в виде корпуса из стали с концевыми резьбами, к которому привулканизирована резиновая обкладка, которая имеет на своей внутренней поверхности зубья левого направления. Стальной ротор также имеет на своей поверхности зубья левого направления. Число зубьев ротора на единицу меньше, чем у статора. Ось ротора смещена относительно оси статора на величину эксцентриситета, который равен половине высоты зуба.

Винтовые поверхности рабочих органов делят объем двигательной секции ВЗД на геометрически связанные камеры низкого и высокого давления. Профиль впадин и выступов рабочих органов обеспечивает непрерывный контакт и образует единичные камеры, которые замыкаются по длине шага статора.

Планетарное движение ротора с помощью карданного вала, который передает крутящий момент и гидравлическую осевую нагрузку от ротора, преобразуется в соосное вращение вала шпинделя.

### 1.3 Силовая секция ВЗД

Так как тема диссертации связана с износом эластомера, который является составной частью силовой секции, рассмотрим ее особенности и конструкцию.

Специфической особенностью конструкции силовой секции (рис. 5) является его возможность работать с различными видами циркулирующего флюида, включая буровой раствор на водной и нефтяной основе, воду, сжатый воздух и пены, во всех случаях обеспечивая выходные характеристики, позволяющие обеспечить бесперебойную работу бурового оборудования. Статор и ротор турбины имеют геликоидальное сечение, при этом они имеют одинаковую форму в плане, однако стальной ротор имеет на один зубец меньше, чем количество каналов изготовленного из эластомера статора.



## Рисунок 5 – Силовая секция забойного двигателя [3].

Силовые секции забойных двигателей можно классифицировать в соответствии с количеством зубцов ротора и эффективных ступеней статора. Зубцы ротора и каналы статора имеют геликоидальное сечение, при этом одна ступень секции соответствует линейному расстоянию полного «витка» канала статора. Различие в количестве зубцов ротора и каналов статора приводит к образованию эксцентриситета между осью вращения ротора и осью статора.

Геликоидальные поверхности ротора и статора, а также углы наклона винтовых образующих подобраны таким образом, чтобы пара «ротор/статор» создавала герметичные участки на равных интервалах длины корпуса турбины. Таким образом, в винтовых каналах статора образуются изолированные аксиальные полости, заполненные жидкостью под давлением.

Давление жидкости внутри этих аксиальных полостей заставляет ротор вращаться и прецессировать внутри статора. Геометрия поверхности статора и ротора и величина планетарного перемещения ротора подобраны таким образом, чтобы обеспечить минимальные давление контакта, трение скольжения, абразивный износ поверхностей и вибрацию системы в целом, т. е. обеспечить пониженный износ статора и ротора.

Эластомерный статор изготавливается литьём под давлением, при этом особое внимание в процессе его изготовления уделяется однородности состава эластомера, надёжному связыванию компонентов и качеству профиля геликоидальных каналов статора. Отливка статора производится непосредственно в стальной корпус статора забойного двигателя.

Роторы изготавливаются из стальных заготовок на высокоточных металлорежущих станках, позволяющих получить минимальные аксиальные и радиальные допуски; кроме того, они могут быть плакированы специальными покрытиями для того, чтобы повысить их способность противостоять механическому износу и повысить их стойкость к коррозионному воздействию. В зависимости от типоразмера мотора, количество заходов ротора может изменяться от одного до девяти.

Силовые характеристики двигателя – его входная и выходная мощности зависят, прежде всего, от числа зубцов ротора и каналов статора, их геометрии, угла наклона винтовых образующих и количества ступеней.

#### **1.4 Анализ причин отказов ВЗД**

Главным фактором для использования ВЗД при бурении скважин и в капитальном ремонте является его способность сохранять стабильность и работоспособность, поддерживать технические характеристики на необходимом уровне в течение срока, достаточном для проведения технологической операции. Внезапный отказ или значительное снижение технических характеристик ведет к снижению скорости бурения и величине проходки, что в свою очередь влечет за собой повышение стоимости одного метра скважины, а в некоторых случаях приводит к повышению риска аварийности.

Многолетний опыт применения ВЗД для капитального ремонта скважин и бурения показал, что потеря работоспособности двигателя является следствием следующих причин: [2,8]:

- изнашивание силовой секции;
- Отказ шарнирного соединения;
- Выход из строя шпинделя;
- отказ по технологическим причинам (шламование РО, разъединение элементов силовой секции, отсоединение резьб на корпусе, выход из строя переливного клапана и т.д.);
- Аварийный отказ (вырыв эластомера, излом карданного и выходного валов и т.п.).

Статистический анализ причин отказов ВЗД показал, что около 49% случаев снижения работоспособности связано с износом рабочих органов двигателя.

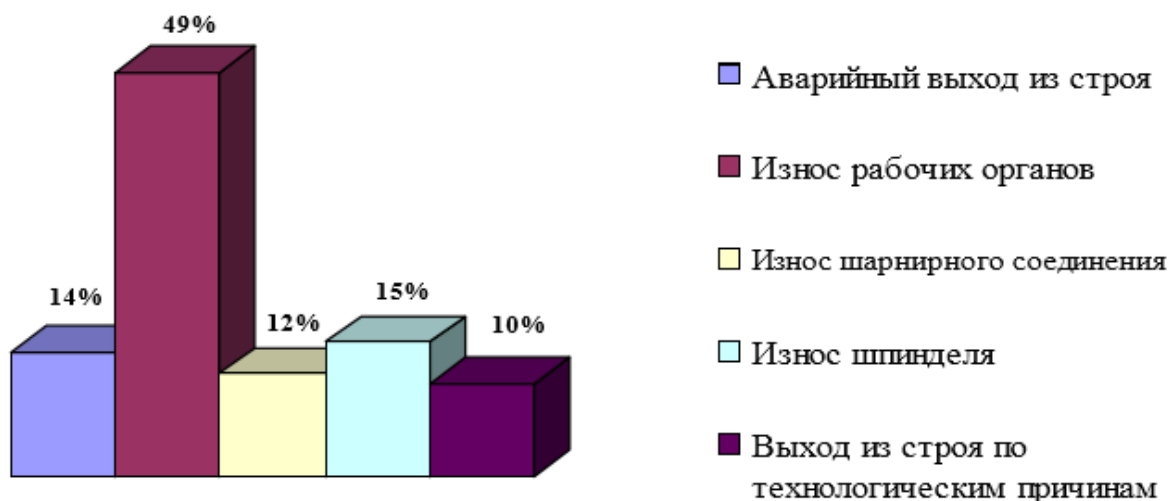


Рисунок 6 – Сравнительная диаграмма причин отказа ВЗД

Рабочие органы ВЗД в процессе его работы подвергаются различным видам изнашивания. Это такие виды износа, как фрикционный, усталостный, гидроабразивный, а также рабочие узла двигателя подвергаются эрозионному и коррозионно-механическому износу при воздействии давлений и температур, превышающих нормативные значения [9,10,11,12].

В таблице 3 представлены основные причины выхода из строя и ремонта ВЗД при наклонно-направленном бурении.

Анализ причин износа узлов ВЗД позволяет сделать вывод, что наибольшему износу подвержены рабочие органы двигателя, а в частности резиновая обкладка статора.

Таблица 3 – Основные причины ремонтных работ ВЗД [13]

Отказ	Причина
двигатель не приводится в действие, реактивный момент на роторе присутствует, во время расхаживания колонны наблюдаются «посадки» и «затяжки» инструмента, при этом двигатель работает, стремительно падает давление на манифольде и также резко возрастает до тормозного [14];	1) долото заклинило или калибратор в суженном участке ствола, в круто искривленной части ствола и т.д.; 2) на забое присутствуют посторонние металлические предметы [14];
двигатель в скважине и не приводится в действие, давление выше допустимого; реактивный момент на роторе отсутствует [14];	1) прорыв мембраны; 2) зашламован двигатель (не проводились промежуточные промывки при спуске колонны); 3) разрушена обкладка статора под действием высокой забойной температуры вследствие некачественного изготовления [14];
падение скорости механической проходки, частые остановки двигателя, а также наблюдается возрастание давления [14];	1) чрезмерный износ силовой секции двигателя; 2) мощность и производительность буровых насосов недостаточна;
снижение крутящего момента на выходном валу и уменьшение нагрузочной способности двигателя [15];	уменьшение радиального натяга вследствие износа поверхностей рабочих органов [15];
повышенная интенсивность износа ротора и статора [15];	запроектированная величина осевой нагрузки не соответствует уменьшенному вследствие снижения радиального натяга, текущему значению крутящего момента выводит режим эксплуатации двигателя за пределы оптимального [15];
снижение рабочего перепада давления, снижение величины крутящего момента, Уменьшение нагрузки двигателя [16].	1) износ рабочей секции; 2) использование в качестве рабочей жидкости для ВЗД плохо очищенного или утяжеленного бурового раствора [16].

## 1.5 Классификация износа эластомера

Повреждения резиновой обкладки статора приводят к катастрофическому снижению технических и энергетических характеристик ВЗД, в некоторых критических случаях вплоть до его полного выхода из строя.

Причинами износа эластомера являются:

- Перегрузка ВЗД крутящим моментом, следовательно, повышенный перепад давления бурового раствора в РО;
- Разрушение эластомера под воздействием высоких температур;
- Усталостное разрушение эластомера;
- Чрезмерный износ наружных поверхностей статора и ротора;
- Сильный натяг в рабочей паре;

Износ профиля зубьев резиновой обкладки статора в зависимости от условий конкретного взаимодействия в каждый момент цикла нагружения различен и определяется величиной касательных напряжений. На профиле изношенного зуба резиновой обкладки статора можно выделить следующие характерные точки [7]:

1. – точка перехода от режима трения качения к режиму трения скольжения;
2. – точка максимальной скорости скольжения;
3. – точка перехода к режиму качения.

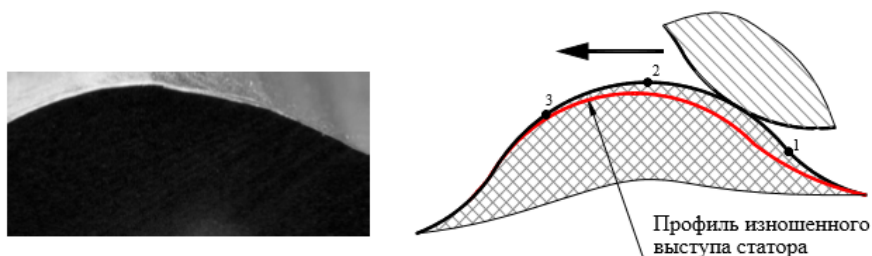


Рисунок 7 – Схема контактирования выступов ротора и резинометаллического статора

В зоне максимальных касательных напряжений наблюдается наибольший износ, изменяющий профиль зубьев и снижающий натяг в рабочих органах ВЗД.

Износ резиновой обкладки статора происходит под действием двух видов изнашивания: усталостного и абразивного (гидроабразивного).

Усталостный износ возникает в процессе многократного воздействия циклических нагрузений, которые приводят в условия контактного взаимодействия к неоднократному деформированию резинового элемента статора, которое вызывает в нем теплообразование, а также химические превращения в поверхностных слоях и дальнейшее его разрушение.

Абразивное изнашивание характеризуется содержанием в буровом растворе механических примесей, в частности песка. Изнашивание данного вида определяется царапанием наружного слоя рабочих органов острыми гранями абразива. Характерным признаком при этом является появление царапин. Необходимо отметить, при уменьшении эластичности резины и повышении ее твердости абразивный износ увеличивается [17].

Гидроабразивный износ определяется повышенной скоростью потока бурового раствора, который содержит механические примеси, в камерах и щелевых зазорах рабочих органов. Наиболее интенсивно этот процесс протекает при работе ВЗД на утяжеленном буровом растворе.



## **1.6 Влияние твердой фазы бурового раствора на скорость износа эластомера винтового забойного двигателя**

Главным условием сохранения эксплуатационных свойств ВЗД является необходимость сохранения натяга в паре ротор – статор. Негативное влияние процессов изнашивания, характеризующееся трением и обусловленное деформацией поверхностей рабочих органов, приводит к уменьшению величины первоначального натяга в рабочей паре, что в критических случаях ведет к потере работоспособности забойного двигателя. Максимально интенсивное изнашивание двигателя происходит в таких случаях, когда в качестве рабочего агента для ВЗД применяется плохо очищенный (с содержанием песка и других абразивов более 1% [18]) или утяжеленный буровой раствор, а также при перекачивании флюида с высоким содержанием абразива.

Фактором, обеспечивающим надежную эксплуатацию ВЗД, является использование в качестве бурового раствора жидкости с концентрацией абразивных частиц не более 1% от общего объема. Исследования, проведенные во ВНИИБТ, показали, что при увеличении концентрации абразива в буровом растворе на 50-70% от рекомендованных в паспорте значений сокращает долговечность двигательной секции ВЗД в 2-3 раза [19,20]. Системы очистки бурового раствора, используемые на отечественных буровых установках, не способны в большинстве случаев обеспечить такую степень очистки. Стандартные очистительные системы, используемые сегодня при бурении скважин, не способны очистить буровой раствор от абразивных твердых частиц до концентрации их менее 3%, а в пластах, сложенных мелкофракционным песчаником эта цифра достигает 8-10 %.

Существующие на сегодняшний день научные работы по совершенствованию конструкции ВЗД направлены на повышение износостойкости узлов рабочих органов и их деталей, нагрузочной способности и увеличением межремонтных сроков. На сегодня работы по повышению работоспособности силовой секции винтового забойного

двигателя направлены на разработки по совершенствованию резинометаллических статоров с эластомером равной толщины, а также на удлинение активной части пары трения ротор-статор [4].

Также ведется разработка и реализация способа автокомпенсации износа в рабочей паре ВЗД. Предлагаемый способ предполагает использование диффузионного взаимодействия эластичного материала статора, активированного трением, с рабочей жидкостью для восстановления натяга в силовой секции путем изменения толщины эластомера без поднятия из скважины забойного двигателя и без вмешательства в его работу. В этом направлении работает ОАО "СевКавНИПИгаз". Они запатентовали новый литьевой способ изготовления резинометаллического статора. Способ предусматривает изготовление эластомера статора из одного состава резины, который обеспечивает необходимый уровень технических и технологических свойств вулканизата. Для сохранения и восстановления натяга в рабочей паре авторы предлагают изготавливать эластомер статора из трех слоев, каждый из которых будет выполняет определенную функцию. Первый – контактный внутренний слой, который обеспечивает износостойкость, прочность, низкую степень набухания в буровых промывочных жидкостях. Вторым – средний слой, который будет обеспечивать не только упруго-гистерезисные и усталостно-прочностные свойства, но и управляемую и регулируемую степень набухания в процессе работы, которая может изменяться от 10 до 100%. Третий – наружный слой, обеспечивающий высокую прочность контакта резины и металла.

За счет уменьшения максимальной толщины резиновой обкладки статора снижается количество вырабатываемого тепла, что в свою очередь минимизирует усталость эластомера, обусловленную эффектом гиперстезиса. а натяг в соединении "ротор-статор" меньше зависит от температуры и разбухания эластомера. В этом направлении работает ОАО "Радиус-Сервис", разработавшие технологию по изготовлению монолитной конструкции профилированного остова статора с равномерной толщиной резинового

элемента статора, название которого R-Wall. Особенности конструкции двигательной секций R-Wall показаны на рисунке 8.

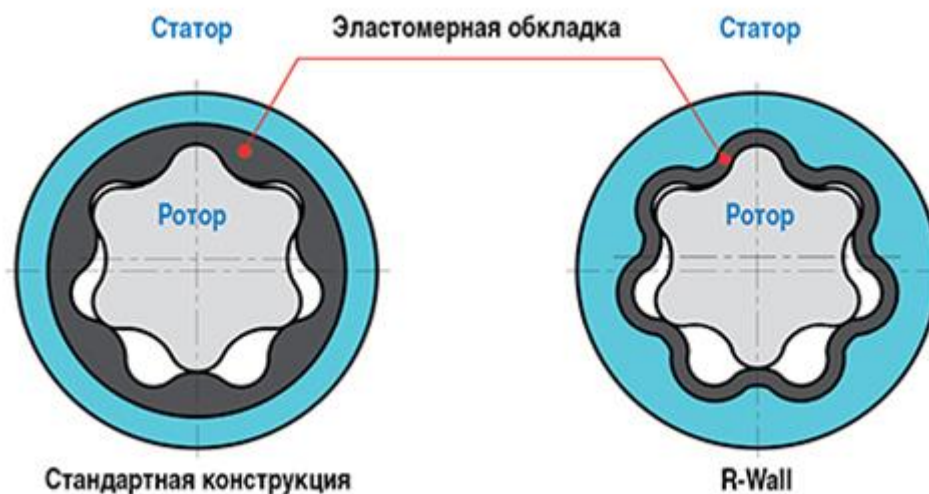


Рисунок 8 – Поперечное сечение двигательной секции и секции R-Wall [21]

Также ведется много работ по изучению воздействия буровых растворов различного состава и температуры на эластомеры и двигательную секцию в целом. Однако, в настоящее время очень мало внимания уделяется изучению вопросов влияния твердой фазы бурового раствора на эластомер ВЗД, а т.к. из-за повышенного содержания абразива в промывочном агенте долговечность РО ВЗД падает в 2-3 раза, то этот вопрос является достаточно актуальным.

## 2 Экспериментальная часть

Содержание данного раздела включает в себя:

- Описание лабораторной установки для проведения экспериментов;
- Подробную методику эксперимента;
- Таблицы, в которых регистрировались данные, полученные в ходе экспериментов;
- Графики, показывающие зависимости величины износа эластомера от различных изменяемых параметров;
- Выводы и обсуждение полученных экспериментальных данных.

Данный материал несет определенную ценность, как для данной работы, так и для дальнейших исследований, поэтому он не раскрывается в данном документе.

## **Заключение**

По результатам исследований были сделаны следующие выводы.

Разработан экспериментальный стенд и методика проведения исследований влияния содержания твердой фазы в дисперсионной среде бурового раствора на скорость износа эластомера ВЗД при механическом воздействии имитированной пары «статор-ротор».

По результатам проведенных испытаний было подтверждено, что под влиянием большого количества твердой фазы бурового раствора, высокой частоты вращения происходит критический износ резиновой обкладки статора ВЗД.

Наименьшая скорость износа эластомера ВЗД наблюдается при использовании в качестве бурового раствора масла ВМГЗ.

В результате проведенного анализа следует, что для предотвращения преждевременного разрушения эластомеров необходимо проводить тщательный анализ конкретных скважинных условий и применяемого типа бурового раствора и к этим условиям подбирать эластомеры с соответствующими составами резины.

### Список использованных источников

1. Балденко Д.Ф. Современное состояние и перспективы развития отечественных винтовых забойных двигателей/ Балденко Д.Ф., Коротаев Ю.А. //Бурение и нефть. 2012. - № 3. - С. 3-7.
2. Балденко Д.Ф., Балденко Ф.Д., Гноевых А.Н. Винтовые гидравлические машины. Том 2. Винтовые забойные двигатели. М.: ООО «ИРЦ Газпром», 2007. 470 с.
3. Кейн С. А. Современные технические средства управления траекторией наклонно направленных скважин [Текст]: учеб, пособие / С. А. Кейн. – Ухта : УГТУ, 2014. – 119 с.
4. Павлык, В.Н. Об эффективности применения винтовых забойных двигателей [Текст] /В.Н. Павлык, В.А. Шулепов //НТЖ Вестник ассоциации буровых подрядчиков. 2002. - №4. - С.24-25.
5. Яруллин А.В., Федоров Н.А., "Применение винтовых двигателей с многошаговыми рабочими органами при строительстве скважин "ТПП КОГАЛЫМНЕФТЕГАЗ" ООО "ЛУКОЙЛ ЗАПАДНАЯ СИБИРЬ"" Бурение и нефть 3/2003, с. 42-43.
6. Буровые комплексы. Современные технологии и оборудование / коллектив авторов: под общей редакцией А.М. Гусмана и К.П. Порожского: научное издание. – Екатеринбург: УГГГА, 2002. - 592 с.
7. Карапетов Р. В. Повышение эффективности бурения скважин с применением винтовых забойных двигателей за счет увеличения их моторесурса: диссертация ... кандидата технических наук: 05.02.13 - Краснодар 2009 - 154 с
8. Осипов Д. А. Гидромеханическое поведение и усталостная выносливость секции рабочих органов винтового забойного двигателя: диссертация ... кандидата технических наук : 01.02.04. - Пермь, 2004. - 172 с.
9. Антонов, А.А. Исследование изнашивания пары трения винтового забойного двигателя Текст. /А. А. Антонов, Д. Ф. Балденко, Е. А.

- Батарин [и др.] //Машины и нефтяное оборудование. – 1975 – № 4. – С. 5-7.
10. Антонов, А.А. Исследование изнашивания органов рабочей пары винтового забойного двигателя Текст. / А.А. Антонов, Д.Ф. Балденко, Е.А. Батарин [и др.] //Химическое и нефтяное машиностроение. – 1976. -№ 6. С. 8-10.
  11. Гинзбург, Э.С. Исследования изнашивания пары трения резина-металл при вращательном движении деталей «типа вал-втулка» в гидроабразивной среде Текст: диссертация ... кандидата технических наук: 05.02.04. защищена в МИНХиГП им. Губкина. - М., 1972.
  12. Батарин, Е.А. Исследование пары трения резина-металл при динамическом нагружении применительно к условиям эксплуатации одновинтовых гидромашин Текст.: диссертация ... кандидата технических наук: 05.02.04. защищена в МИНХиГП им. Губкина. - М., 1974.
  13. Байбулатов А.А. Анализ основных причин износа узлов гидравлических забойных двигателей при сооружении наклонно-направленных скважин на месторождениях западной Сибири./ В сборнике: ПРОБЛЕМЫ ГЕОЛОГИИ И ОСВОЕНИЯ НЕДР Труды XVI Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 110-летию со дня основания горно-геологического образования в Сибири. 2012. С. 293-296.
  14. Справочник специалиста ЗАО «ССК» [электронное пособие]/ ЗАО «Сибирская Сервисная компания». - 2005.
  15. Карапетов Р.В. Повышение эффективности бурения скважин за счет увеличения моторесурса винтовых забойных двигателей // НТЖ «Нефтепромысловое дело», 2007. - №10. - С. 45-48.
  16. Бекетов С. Б., Карапетов Р.В. Совершенствование конструкций винтовых забойных двигателей - одно из направлений повышения

- эффективности строительства и ремонта скважин // Горный информационно-аналитический бюллетень - 2007, №10. - С. 77-83.
17. Резниковский, М.М. Трение между резинами и твердыми материалами Текст. //НТЖ Каучук и резина. 1960. - № 5. - С. 34-37.
  18. Винтовые забойные двигатели. Руководство по эксплуатации // Издание 7-ое, редакция А, ноябрь 2015 г. АО «Пермнефтемашремонт», 2015 г.
  19. Бобров, МГ. Результаты внедрения новых винтовых забойных двигателей Пермского филиала ВНИИБТ / М.: Вестник ассоциации буровых подрядчиков. 2000. №1. С. 36-40.
  20. Анализ видов разрушения рабочих органов винтовых забойных двигателей по результатам их использования в ООО «Кубаньбургаз» / С.А. Акопов, Г.П. Шелудько, Р.В. Карапетов // Материалы XXXI науч.-техн. конференции по результатам работы за 2000 год: тез. докл. Ставрополь: СевКавГТУ. 2001. С. 85.
  21. Винтовые забойные двигатели фирмы «Радиус-Сервис» / Андоскин В.Н., Астафьев С.П., Выгузов А.М., Кобелев К.А. // Вестник Ассоциации буровых подрядчиков. 2012. Т. 1. № 2. С. 16-21.



## Приложение 1

### Bohrspülungen im HDD-Verfahren

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
2БМ5Д	Мурадов Эльхан Эйвазович		

Консультант кафедры БС:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ст. преподаватель	Епихин Антон Владимирович	–		

Консультант – лингвист кафедры ИЯПР:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ст. преподаватель	Когут Светлана Валерьевна	–		

# Bohrspülungen im HDD-Verfahren

## Einleitung

Als Bohrspülungen bezeichnet man Flüssigkeiten, Gase oder Mischungen beider, die kontrolliert in Bohrloch zirkulieren und in erster Linie für die Stabilität des Bohrloches verantwortlich sind. In der Flachbohrtechnik werden jedoch meist nur Flüssigkeiten in Kombination mit Feststoffadditiven eingesetzt, Bohrspülungen sind in ihrer Zusammensetzung und ihren Eigenschaften so konzipiert, dass sie ein sicheres, schnelles, störungsfreies und wirtschaftliches Erreichen der Endteufe gewährleisten. Für jede Formation müssen Bohrspülungen neu angepasst werden. Im Vergleich zur Vertikalbohrtechnik ist die Horizontalbohrtechnik wesentlich jünger, daher wurden die Erkenntnisse über die Spülungstechnologie aus der Tiefbohrtechnik übernommen und auf die speziellen Anforderungen des HDD-Verfahrens abgestimmt. Besonders hohe Anforderungen werden an die Tragfähigkeit, Gelstruktur und die Fließeigenschaften der Spülung gestellt. Wesentliche Unterschiede zum Vertikalbohren sind die vorwiegend horizontale Orientierung der Bohrachse, große Bohrlängen und -lochdurchmesser. Daraus ergeben sich eine ganze Reihe von Fragestellungen, die gelöst werden müssen. Dazu zählen 1) Bohrlöcher in oberflächennahen Formationen sind in der Regel instabiler als bei Vertikalbohrungen. 2) Durch die geringe Überdeckung und dementsprechend veränderte physikalische Eigenschaften können sich Probleme, z.B. Spülungsverluste, ergeben. 3) Sehr kurze Sedimentationswege und 4) hohe Bohrkleinbelastung können zum Festwerden des Bohrsträges führen, wenn es zur Sedimentation des Bohrkleins kommt. Außerdem können verschiedenste äußere Einflüsse die Spülungseigenschaften negativ beeinflussen. Die Eigenschaften müssen daher beim Anmischen und während der Zirkulation ständig überprüft werden, um sie bei Bedarf zu modifizieren.

## 1. Aufgaben der Bohrspülung

Die Bohrspülung hat folgende Aufgaben:

1. hydraulische Energie treibt Bohrmotor an;
2. Abtragen der Formation und Bohrlochreinigung;
3. Bohrstrang schmieren, Meißelrollen kühlen;
4. Erzeugung eines hydraulischen Gegendruckes gegen Eindringen von Medien;
5. Stabilisierung der Bohrlochwand, Bildung einer Schutzschicht (Filterkuchen).

Der Volumenstrom der Spülung erzeugt einen hydraulischen Druck, dieser wiederum leistet den Vorortantrieb für den MUD-Motor (Schraubenmotor nach dem Moineau-Prinzip). Dabei müssen an die Spülung spezifische Anforderungen für Viskosität, Feststoffgehalt und Gehalt abrasiver Bestandteile gestellt werden, letztere fördern den Verschleiß des Bohrmotors.

Die Art der Abtragung der Formation ist abhängig von der Beschaffenheit (Konsistenz, spez. Druckwiderstand) der Bodenarten, (a) In Lockergesteinen durch hydromechanisch.es Bohren, (b) in felsigen Formationen durch mechanische Zerstörung. Bei (a) geschieht der Spülungsaustritt an den Düsen der Spülbohranlagen unter hohen Drücken (10 - 350 bar), durch große kinetische Energie dringt die Suspension in feine Risse/Poren ein, umschließt einzelne Partikel und löst diese aus dem Gefüge. Das Gefüge von Festgesteinen kann durch reine hydromechanische Lösearbeit nicht gelockert werden, dazu kommen Düsenrollenmeißel (oder Diamantmeißel) zum Einsatz, die das Gestein rein mechanisch zerkleinern Die Spülungstätigkeit beschränkt sich hier eher auf den Austrag des Bohrkleins aus dem Bohrloch. Bei konsistenteren Lockergesteinen besteht die Möglichkeit der Kombination beider Verfahren. An die Bohrlanze wird zusätzlich eine Steuerplatte angebracht, die rotierend den Boden löst, dabei ist der Spülungsdruck viel geringer.

Der Bohrlochreinigung kommt im HDD eine große Bedeutung zu. Durch den kurzen Sedimentationsweg besteht ständig die Gefahr der Bildung eines

Cuttingbettes und des möglichen Festfahrens des Bohrstranges. Die Gravitationskraft führt zum Absinken, dieses ist abhängig von der Teilchenmasse, Spülungsviskosität und Strömungsgeschwindigkeit. Während des Bohrvorganges verhindert die Strömung das Absetzen, bei Pumpenstillstand sinken und setzen sich die cuttings ab, noch bevor die Gelbildung einsetzt. Durch turbulente Strömungen, ursächlich durch hohe Spülungsgeschwindigkeiten und oder erhöhte Strangrotation, können Feststoffe wieder in Suspension gebracht werden. Ablagerungen sollten generell vermieden werden, können aber durch mehrere Räumfahrten (hohe Spülrate) oder alternativ durch Einzirkulieren einer hochviskosen Pille... unter turbulenter Verpumpung aus dem Bohrloch ausgetragen werden.

Der Stopfenfluss (plug flow) einer hochviskosen Spülung ist eine ideale Lösung. Die Strömungsgeschwindigkeiten sind im Rohrquerschnitt nahezu gleich, das verringert das Sedimentationsbestreben und die Erosionsgefahr der Bohrlochwand.

Die in der Spülung enthaltenen Tonplättchen sind von Hydrathüllen umgeben und wirken als Schmiermittel. Durch elektrostatische Kräfte werden sie an der Oberfläche des Bohrstrangs abgelagert. Damit wird die Reibung des Bohrstranges an der Bohrlochwand reduziert. Die Kühlung der Meißelrollen und Reinigung des Bohrkopfes können weitere Funktionen sein.

Durch eine Druckdifferenz zwischen Grundwasser und hydrostatischer Spülungssäule im Bohrloch wird Spülung in die Bohrlochwand gedrückt. Diese verhindert das Eindringen von Fluiden in das Bohrloch. Der hydraulische Gegendruck wird allein durch die Zugabe von Beschwerungsstoffen zur Spülung erzeugt und so das spezifische Gewicht der Spülung teilweise bis auf  $2,5 \text{ kg/dm}^3$  erhöht.

Die Bohrlochwand ist bei lockeren, nicht bindigen Böden meist instabil, es kann zu Auskesselung und Nachfall kommen. Klüfte, diagonale Schichtverläufe und quellende Tone können die Formation zusätzlich schwächen. Der aus den in der Spülung enthaltenen Feststoffen und gegebenenfalls Filtratsenkern gebildete Filterkuchen soll die Bohrlochwand verstärken und verdichten. In der

Bohrlochwand findet ein Filtrationsprozess statt, es bildet sich eine dünne Schicht aus dicht übereinander abgelagerten Tonmineralen. Im Idealfall sollte der Filterkuchen eine für Fluide undurchlässige Schicht darstellen. Damit sollen Spülungsverluste vermindert und ein Grundwasserzufluss verhindert werden, dieser kann die Spülung in ungünstigen Fällen irreversibel schädigen. Eine breite Spanne an Kornfraktionen innerhalb der Feststoffpartikel garantiert die dichtesten Filterkuchen.

Beim Bohren im HDD-Prozess ist es von besonderer Bedeutung, Spülungseigenschaften auf jede neue Bohrlochsituation anzupassen, bei sich verändernden Bedingungen schnell und richtig zu reagieren, um die Spülungszusammensetzung dem entsprechend zu modifizieren. Dazu sind Kenntnisse über die grundlegende Zusammensetzung der Spülung und der Wirkungsweise von Spülungsadditiven unbedingt notwendig.

## **2. Zusammensetzung von Bohrspülungen und Spülungsadditive**

Für jedes neue Bohrprojekt können verschiedenste Spülungstypen mit variabler Zusammensetzung zum Einsatz kommen. Ein solches Spülungssystem ist so entwickelt, dass es genau auf die Vor-Ort-Bedingungen angepasst ist, um die Spülaufgaben optimal zu erfüllen. Es kann zu Problemen wie Spülungsverlusten oder Bohrlocheinstürzen führen, wenn die Abstimmung zwischen Spülungsparametern, eingesetzter HDD-Technik und Bodeneigenschaften nicht stimmt. Wesentliche Bestandteile der Bohrspülungen sind: Spülungsbasis (Wasser, Salzlaugen); Strukturbildner (Spülungstone, Polymere); Filtratsenker (Polymere); Schmiermittel; Verflüssiger; Bakterizide und andere (Arnold 1993). Tabelle 1. zeigt eine vereinfachte Darstellung der gebräuchlichsten Spülungen, deren Zusammensetzung und die jeweiligen Verwendungsbereiche.

Tab. 1. Spülungen und ihre Verwendung [1]



### 3. Spülbasis - Flüssige Phase

Als billige und umweltverträgliche Spülbasis wird in der Regel Wasser verwendet. Doch können Wasserinhaltsstoffe die Spülebeneigenschaften stören und müssen beachtet werden, bei Bedarf können sie entfernt oder unwirksam gemacht werden. Dazu zählen unter anderen Wasserhärte (Ca/Mg-Gehalt), pH-Wert, Salze, Mikroorganismen und kolloidal gelöste Stoffe. Allgemeine Anforderungen sind niedrige Wasserhärte, alkalischer pH-Wert und geringe Gehalte an organischen Bestandteilen (Bakterien). Zum Beispiel beeinflusst ein hoher pH-Wert das Wasserbindevermögen positiv. Der Ca/Mg-Gehalt (Wasserhärte) bewirkt ein verdünnen oder vergellen und hat somit Einfluss auf die Ergiebigkeit der Spülung. Kalzium lässt sich mit Soda oder Pottasche ausfällen [2].

Es ist zwischen Süß- und Salzwasserspülungen (Salzlaugen) zu unterscheiden. Wegen der Häufigkeit der HDD-Bohrungen im Binnenland, wird in der Regel mit Süßwasserspülungen gearbeitet. Manche Formationen machen es auch notwendig, im Binnenland mit Salzlaugen zu arbeiten (z.B. Tonige Formationen). Durch kontrolliertes Aufsalzen können Salzwasserspülungen hergestellt werden. Spülungsfremde Salze sind strukturgefährdend für die Bohrspülung, deswegen werden durch die Zugabe von Polymeren negative Effekte reduziert oder ausgeschaltet.

#### 4. Tonspülungen

Wichtigster Feststoffbestandteil sind Dreischicht-Tone. Diese bestehen aus  $\text{SiO}_2$ -Tetraedern und  $\text{AlO}_6$ -Oktaedern und weisen eine 3-Schichten-Struktur auf. Bentonite sind Tonminerale, bestehen hauptsächlich aus Montmorillonit und haben eine plättchenförmige Struktur (Dicke 0,0009  $\mu\text{m}$ ). Wenn Tone quellen, dispergieren sie nicht in viele einzelne negativ geladene Tonplättchen umgeben von Hydrathüllen, sondern sie bilden 1 bis 2 um dicke Pakete von übereinander geschichteten Plättchen, die bei Wasseraufnahme weiterquellen können.

Steigender Salzgehalt verringert das Wasseraufnahmevermögen und das Quellen; stark elektrolythaltige Wässer können Tonspülung sogar zerstören, indem in der dispergierten Spülung Tonflocken ausfallen. Zwischen mehreren Tonplättchen bestehen elektrostatische Anziehungskräfte, die die Tonplättchen in der Spülung in einer kartenhausähnlichen Struktur anordnen, wenn die Tone weiter quellen versteift sich diese Struktur und ein gelartiger Körper (Gelgerüst) entsteht. Die Festigkeit dieses Gerüsts wird als Gelstärke bezeichnet und in [Pa] angegeben.

Dieser Hydratationsvorgang ist von der Ionendichte auf der Oberfläche der Plättchen, deren Ionengröße und der Gesamtladung der Plättchenoberfläche abhängig. Die Flächen werden in der Regel mit  $\text{Na}^+$  oder  $\text{Ca}^{2+}$  Ionen besetzt, da aber  $\text{Ca}^{2+}$ -Tone in der Natur häufiger vorkommen als  $\text{Na}^+$ -Tone und  $\text{Na}^+$ -Bentonite ein besseres Quellverhalten aufweisen, werden die  $\text{Ca}^{2+}$ -Tone durch Zugabe von Natriumcarbonat in  $\text{Na}^+$ -Tone umgewandelt und Kalk wird ausgefällt [3].



Ein bedeutender Effekt, der sich aus dem Wechsel zwischen Ruhe und Bewegung der Spülung ergibt, heißt Thixotropie. Eine wechselnde und reversible Vergelung (Ruhe Festkörper) und Verflüssigung (Bewegung Solkörper) der Spülung. Das Verhältnis zwischen Spülungsrohstoff (z.B. Bentonit) und Wasser, um eine tragfähige Spülung anzumischen, wird als Ergiebigkeit bezeichnet. Auf 1 m<sup>3</sup> Wasser werden meist 50 bis 60 kg Bentonit angemischt. Danach müssen Tonspülungen bis zu 24 h quellen, um ihre thixotropen Eigenschaften auszubilden.

## **5. Polymeraktivierte Tonspülungen**

Die Eigenschaften Polymeraktivierter Spülungen sind im Vergleich zu nicht aktivierten Tonspülungen optimiert. Durch eine kurze Zerfallszeit der Tone erfolgt eine schnellere Vergelung, damit werden Filterkuchenbildung, Ergiebigkeit und Austrag verbessert und Erosionsprobleme vermindert. Eine höhere Gelstärke erhöht die Tragfähigkeit der Spülung, es können größere Cuttings über längere Strecken nach Übertrage transportiert werden; der Austrag wird erhöht. Damit verringert sich die Sedimentationsrate im Bohrloch. Vorteile polymeraktivierter Tonspülungen sind trotz hoher Gelstärke die ausgezeichnete Pumpbarkeit (ohne erhöhte Pumpleistung) und die gesteigerte Bohrleistung. Zwar liegt das Preisniveau höher als bei Tonspülungen, aber die verbesserten Eigenschaften rechtfertigen deren Einsatz.

## **6. Polymere**

Polymere sind meist ringförmige Verbindungen aus Riesenmolekülen und wesentlicher Bestandteil von Spülungen. Eine Vielzahl von Einzelmolekülen (Monomer) verbinden sich zu langen Ketten und bilden Makro- / Riesenmoleküle. Das am häufigsten eingesetzte Polymer ist CMC - Carboxymethylcellulose. Anhand ihres Polymerisationsgrades lassen sich Polymere unterscheiden, je größer und länger die Kettenmoleküle einer Verbindung sind, desto höher ist der Polymerisationsgrad. Im gleichen Sinn nimmt auch deren Wasserbindevermögen und Viskosität zu. Polymere können nach ihrer Viskosität in 3 Stufen eingeteilt



werden, hier am Beispiel von CMC: niedrigviskos - LV CMC; mittel viskos - MV CMC; hoch-viskos - HV CMC.

Polymere besitzen eine charakteristische Anzahl an geladenen funktionellen Gruppen, damit ist es ihnen möglich, schnell Verbindung mit freiem umgebenden Wasser in der Spülung einzugehen. Bei der Reaktion sind die Polymere mit Hydrathüllen umgeben. Ziel ist es, die Viskosität der Spülung zu erhöhen. Die angesprochenen Valenzelektronen gehen chemische Bindungen mit Außenelektronen der Tonplättchen ein.

Polymere wirken außerdem als Schutzkolloid vor schädlichen Einflüssen (z.B. Ausflocken von Spülungstonen durch Elektrolyte, das verringert Tragfähigkeit und Feststofftransport). Polymere können weiterhin nach ihrer Herkunft und Zusammensetzung unterschieden werden:

1. native Polymere;
2. halbsynthetische Polymere;
3. vollsynthetische Polymere.

Polymeraktivierte Tonspülungen und Polymerspülungen werden in einem Mischungsverhältnis von 10 bis 30 kg Spülrohstoff auf 1 m<sup>3</sup> Wasser angesetzt. Minimale Quellzeiten machen einen sofortigen Einsatz möglich. Native Polymere sind nicht toxisch und biologisch abbaubar. Halbsynthetische Polymere können sowohl als reine Polymerspülungen, als auch in Verbindung mit Tonspülungen verwendet werden. Hauptaufgabe ist die Steigerung der Viskosität und in Tonspülungen die Funktion als Schutzkolloid.

Synthetische Polymere besitzen ein sehr gutes Shear-Thinning-Verhalten. Sie werden immer dünnflüssiger, wenn die Tragfähigkeit und damit das Schergefälle erhöht werden. Ihr Verhalten ist nicht mit dem von Newton'schen Flüssigkeiten (z.B. Wasser) vergleichbar, das macht sie für die Bohrindustrie sehr interessant, häufig wird Polyacrylamid verwendet.

Tab. 2. Polymere und ihre wesentlichen Funktionen [1]

<b>Polymerhauptgruppe</b>	<b>Polymertyp</b>	<b>Funktion</b>
native Polymere	XC Polymer	Viskositätsregulierung; Thixotropie
	Guar Gum	Viskositätsregulierung
	Stärke	Filtratreduzierung
halbsynthetische Polymere	modifizierte Stärke	Filtratreduzierung
	NA-CMC	Viskositätsregulierung; Filtratreduzierung, Schutzkolloid
	CM HEC	Viskositätsregulierung; Filtratreduzierung, Schutzkolloid
	HEC	Viskositätsregulierung; Filtratreduzierung, Schutzkolloid
vollsynthetische Polymere	Polyacrylat	Viskositätsregulierung; Filtratreduzierung, Dispergiermittel; Flockungsmittel
	Polyacrylamid	Viskositätsregulierung; Filtratreduzierung, Flockungsmittel; Toninhibierung
	Polyacrylnitril	Viskositätsregulierung; Filtratreduzierung, Dispergiermittel
	Polyvinylsulfate	Viskositätsregulierung; Filtratreduzierung
	Copolymere	Dispergiermittel

## 7. CMC-Polymere und Polyacrylamide

CMC ist ein wasserlösliches Cellulose-Derivat. Es kann in gereinigter, salzfreier Form oder auch mit Restsalzgehalten bis 22% NaCl vorkommen. Im Vergleich zu Bentoniten sind Austragefähigkeit und Wasserbindefähigkeit nochmals verbessert. Zum Beispiel wird dadurch die Abgabe von freiem Wasser an quellende Tone verhindert. Polymere besitzen ein verstärktes Bestreben zur Bildung eines festen, undurchlässigen, aber dünnen Filterkuchens. Bei Brunnenbohrungen würden Bentonite Poren und Klüfte dauerhaft verschließen, deshalb wird als Ersatz

CMC verwendet, jedoch müssen Bakterizide zugegeben werden, da CMC als Nährboden für Bakterien wirken kann.

Polyacrylamide sind frei von organischen Salzen, belasten nicht das Grundwasser und sind schlechte Nährböden für Bakterien. Sie werden in tonigen Formationen als Schutzkolloid eingesetzt und inhibieren das Quellen von Tonen.

### **8. Inerte Feststoffe**

Das sind chemisch reaktionsträge, nicht aktive Stoffe, die sich kaum an Reaktionen in der Spülung beteiligen. Sie werden unterschieden nach der Art ihrer Nutzung und Herkunft. Ganz wesentlich ist ihre Funktion zur Erhöhung der Spüldichte. Sie können zusammen mit Polymeren zum Einsatz kommen. Einzeln oder in Kombination beeinflussen sie die primären Eigenschaften der Spülung nicht negativ.

Folgende Kriterien sind für die Auswahl von Beschwerungsstoffen entscheidend: Dichte, Korngrößenverteilung und eventuelle Verunreinigungen. Den API- Richtlinien entsprechend liegt die optimale Korngrößenverteilung zwischen 5 µm und 70 µm. Beschwerungsstoffe können für höheren Verschleiß an der Düsengeometrie verantwortlich sein oder selber an den Meißeldüsen zerkleinert werden, dadurch wird das Korngrößenmaximum herabgesetzt und die Viskosität erhöht. Typische Beschwerungsstoffe sind Schwerspat, Eisenkarbonat und Hämatit, damit kann das spezifische Gewicht der Spülung auf bis 2,5 kg/dm<sup>3</sup> erhöht werden.

Diese chemisch aktiven Zuschlagstoffe sollen folgende Aufgaben erfüllen:

1. Regulierung der Viskosität;
2. Oberflächenspannung verringern;
3. Verstopfung von Rissen und Klüften;
4. PH-Wert-Regulierung.

Durch äußere Einflüsse (z.B. Laugenzuflüsse aus dem Grundwasser) dickt die Spülung ein, der gegenteilige Effekt, eine Verringerung der Viskosität, soll erreicht werden. Das kann einerseits durch Wasserzugabe oder andererseits durch Zugabe von Verflüssigern geschehen. Verflüssiger bewirken eine Koagulation (Ausflockung) der Spülungstone, durch die Verringerung der Gesamtoberfläche

der Teilchen wird Wasser freigesetzt. Gefahr besteht, wenn sich zu große Flocken bilden die die Fließeigenschaften negativ beeinflussen. Das macht regelmäßige Spülungskontrollen notwendig. Typische Verflüssiger sind Elektrolyte wie z.B. Tannate, Phosphate, Huminate und Lingosulfate. Um ihre Aufgabe bestmöglich zu erfüllen, müssen sie frühzeitig eingesetzt werden.

Tenside kommen zum Einsatz. Das sind sogenannte „Oberflächenaktive Stoffe“, bedingt durch ihren molekularen Aufbau aus hydrophilen und hydrophoben Molekülteil ermöglichen sie die Bildung von Dispersionen eigentlich nicht mischbarer Flüssigkeiten (Öl und Wasser). Diese können nun fein vermischt werden. Tenside bewirken Verbesserungen bei a) der Benetzung der Tonteilchen und Optimierung der Hydrathüllen, b) der räumlichen Verteilung der Teilchen in der Spülung und c) dem Zerfall der Spülungstone bei Wasserkontakt [4].

Verstopfungsmittel können Wegsamkeiten im Gestein (Klüfte, Risse) verschließen, beim HDD-Verfahren können nur grobporige Formationen und kleine Risse verschlossen werden. Dabei stehen zwei Kriterien im Vordergrund: die Korngrößenverteilung und der Durchmesser des Verstopfungsmittels. Weiter Anforderungen an das Material sind, dass sein Durchmesser mindestens  $\sqrt{3}$  der Klufbreite entspricht und das Verhältnis von Düsendurchmesser zu Material durchmesser nicht  $<3$  ist (ansonsten Verstopfungsgefahr). Angaben zur Korngrößenverteilung machen die Hersteller. Als Verstopfungsmittel werden unter anderem Hobelspäne, Holzfasern, Zellstoffschnitzel oder Glimmer eingesetzt.

Das Wasserbindevermögen ist eine wichtige Eigenschaft, die von pH-Wert beeinflusst wird. Beim verwendeten Anmachwasser sollte der pH-Wert möglichst  $>7$  (alkalisch) sein. Ein kleiner pH-Wert und ein großer Anteil an gelösten Salzen kann Austragsverhalten und Pumpbarkeit wesentlich verschlechtern. Vorbeugend kommen Chemikalien zum Einsatz, die nicht toxisch sein dürfen, da im Grundwasserbereich gearbeitet wird. Zur Reduzierung des pH-Wertes kommen Kalziumhydroxid ( $\text{Ca(OH)}_2$  = Löschkalk) oder Natriumkarbonat ( $\text{NaCO}_3$  = Soda) zum Einsatz.

## **9. Wahl der Bohrspülung in Abhängigkeit von der Geologie**

Gerade beim HDD stellen, in sehr kleinräumigen Maßstäben, wechselnde Bodenverhältnisse hohe Ansprüche an das Bohrgerät und die Spülung. Der Stabilisierung der Bohrlochwand kommt in dieser Situation eine Schlüsselrolle zu. Böden können von weich über steif zu fest bis felsig sein, das heißt ihre Eigenschaften variieren sehr stark und dementsprechend müssen Bohrspülungen angepasst werden. Durch Handbeprobung lassen sich schon erste vereinfachte Erkenntnisse über Kornrauhigkeit, Porosität, Sortierung, Quellfähigkeit, organische Bestandteile und die Unterscheidung von Lehm und Mergel treffen. Dennoch müssen vor der Bohrung weitere Erkundungen (Bodensondierungen) des zu durchörternden Untergrundes durchgeführt werden, um ein detaillierteres Bild über die Situation im Untergrund zu erhalten, das ist gerade bei Mischböden (oft wechselnde Bodenschichten) sehr wichtig um eine erfolgreiche Baumaßnahme zu gewährleisten. Von den Daten der Voruntersuchung hängt die Durchführung der HDD-Bohrung und besonders die Wahl der Bohrspülung ab, deren Zustand in besonderen Fällen ständig kontrolliert werden muss.

Anschließend erfolgt, aufbauend auf den Daten der Untersuchung, eine Klassifizierung der Böden anhand der DIN 18196, DIN 4022 und DIN 18319 (DIN 18300) (Bayer 2003). Genaue Beschreibungen der Klassen sind der entsprechenden Fachliteratur und den DIN-Verordnungen zu entnehmen.

Zu einer umfassenden Baugrunderkundung gehören neben geophysikalischen Messungen auch Analysen des Schichten- und Kornaufbau des Bodens, des Durchlässigkeitsbeiwertes, der Grundwassersituation, Lagerungsdichten und Konsistenz des anstehenden Gefüges. Diese Faktoren beeinflussen Bohrvortriebsgeschwindigkeit, Stabilität der Bohrlochwand, Art des Bohrkopfsatzes und die maximale Stützweite des Bohrkanals. Die Entscheidung über Verfahren, die zur Anwendung kommen, trifft ein Fachingenieur oder Baugrundsachverständiger. In seinem Gutachten gibt er Auskunft über die Ergebnisse der Untersuchungen. Von deren richtiger Auswertung sind optimale Leitungseinbettung, niedrige

Spannungsverhältnisse und eine hohe Lebensdauer der Leitungen abhängig. Nachfolgend sind die wichtigsten Elemente einer Bodenanalyse zusammengetragen.

### **9.1 Archivmaterial und bereits vorhandene Pläne**

Das Heranziehen früherer Aufschluss- und Bohrergebnisse liefert schnelle und einfache Informationen über das Bodengefüge und kann den Umfang neuer Bodenanalysen verringern. Weiterhin werden Karten (geologische Karten, Schnitte, Bohrprofile) und Archivmaterial (Karten, alte Grundrisse, Luftbilder alter Industriegebiete, Siedlungen o.ä.) benutzt, aber auch vor Ort Recherchen angestellt. Als ideal erweisen sich geologische Karten im Maßstab 1:25000, diese sind in den Geologischen Landesämtern erhältlich

### **9.2 Bodenaufschlussbohrungen**

Dazu werden entlang der Bohrtrasse wechselseitig angeordnete Kernbohrungen im Abstand von 5 bis 10 m zur Trassenachse gesetzt (nicht genau auf Trassenachse, Gefahr oberflächlicher Spülsausruch), die Endteufen von 2 bis 5 m unter dem geplanten Bohrlochverlauf erreichen. Die so gewonnenen Bodenproben lassen detaillierte Rückschlüsse auf die durchhörte Formation zu. Bodenaufschlüsse über 50 m Tiefe sind im HDD unüblich. Nach Abteufen der Bohrung werden die Bohrlöcher mit einem verschließenden oder quellfähigen Material verfüllt.

In unmittelbarer Nähe zu den Kernbohrungen werden Sondierungen niedergebracht, die die bei der Bodengrunduntersuchung gewonnenen Böden eindeutig zuordnen sollen. Dabei werden mittels Drucksondierung Gesamt widerstand, Mantelreibung und Spitzenwiderstand gemessen. Bei Rammsondierungen wird durch die Anzahl der Schläge pro Vortriebslänge die Festigkeit des Bodens ermittelt. Für nähere Informationen zu Sondierungen der Verweis auf einschlägige Fachliteratur.

### **9.3 Geophysikalische Untersuchungen**

Mithilfe elektrischer Impulse und Schallwellen liefern Verfahren wie Geoelektrik, Seismik oder elektromagnetische Reflexion Informationen über den Schichtaufbau des Untergrundes und ermöglichen detailliert die Bestimmung von Schichtdicken.

### **9.4 Grundwasserverhältnisse**

Müssen vor Bohrmaßnahmen geprüft werden. Der Kontakt der Spülung mit Grundwasserleitern, Vorflutern oder Ausbrüche in Oberflächengewässer sind unbedingt zu vermeiden. Ist ein Kontakt unvermeidbar, müssen vor Bohrbeginn Genehmigungen bei den entsprechenden Behörden eingeholt werden. Allgemein sind die Spülungsverluste so gering wie möglich zu halten.

## **10. Klassifizierung von Böden**

Es gibt verschiedene Normen zur Einteilung. Nachfolgend werden die wichtigsten genannt.

Die DIN 18196 klassifiziert mineralische Böden z.B. toniger oder schluffiger Kies. Eine Einteilung nach der Korngröße nimmt die DIN 4022 vor. In der DIN 18300 werden 7 verschiedene Bodenklassen unterschieden, jedoch eignet sich die DIN 18319 besser, denn sie stuft die Böden speziell für den Rohrvortrieb ein (Bayer 2003) und unterscheidet neben Locker- und Felsgestein 60 verschiedenen Bodenarten.

### **10.1 Bindige Böden**

Besitzen einen Feinkomanteil (Ton, Schluff, Sand) von  $> 40\%$ . Größte Gefahr für die Spülung in bindigen Böden geht vom Quellvermögen trockener Tonschichten aus, die das freie Wasser aus der Spülung saugen. In dem Fall muss die Spülung durch Zusätze so vorbehandelt werden, dass die Tone ausflocken und schließlich über Tage separiert werden können (Bayer 2003). In Moorböden sind besonders hohe Säuregehalte für die Spülung gefährlich. Ein pH-Wert  $< 7$  würde die Bentonitspülung zerstören.

## **10.2 Nichtbindiger Grund**

Besteht vorwiegend aus Sand, Kies und Geröll mit einem Feinkornanteil  $< 5\%$  ( $d < 0,06\text{ mm}$ ). Nicht kohäsive, sandige oder kiesige Böden besitzen einen schlechten Eigengehalt, daher kommt gerade der Spülung eine stützende Wirkung zu. Das erfordert hochviskose Spülungen, die einen starken und dichten Filterkuchen aufbauen können. So lassen sich selbst Fließsande gut festigen (Bayer 2003). In Schwarzschieferregionen sind metallische Leitungsstränge besonders gefährdet, weshalb mit Waschsand gemischte Bentonitsuspensionen (basisch) als Einbettung verwendet werden oder alternativ nicht bis leicht quellfähige Tone. In kiesigen Böden muss die Spülung die Bohrlochwand stützen und Spülwasserverluste verhindern. Das erfordert hochviskose und dennoch gut pumpbare Spülungen, die speziell auf diese Bedingungen angepasst sind. In Abhängigkeit von der Lagerungssituation und dem jeweiligen Gefügeverband können unterschiedlich große Gesteine transportiert werden, jedoch maximal faustgroße Durchmesser (Bayer 2003). Partielle Strecken mit hohem Kiesanteil können mit einer Zement Bentonit-Suspension verfestigt werden. Nachteile dieser Methode sind der hohe Reinigungsaufwand, außerdem muss die Spülung komplett neu angemischt werden. Abhilfe schafft ein separater zweiter Spülungskreislauf (Bypass-Lösung).

## **10.3 Fels und Gestein**

In sehr klüftigem Fels besteht vor allem die Gefahr der Spülungsflüssigkeitsverluste (z.B. Karstregionen).



## Literatur

1. Fengler E.-G. Grundlagen der Horizontalbohrtechnik (Herausgeg.: LENZ, J.), Iro-Schriftreihe Nr. 13, 229 S., Essen: Vulkan-Verlag, 1998
2. Elbe, L.: Bohrspülungen im HDD (Herausgeg.: V. Ameln, D., Bayer, H.-J., Lenz, J., Wegener. T.), Iro-Schriftenreihe Nr. 26, 146 S., Essen: Vulkan-Verlag, 2003
3. Behrendt, F. Das Horizontal Directional Drilling - Einwirkungen auf das Erdreich und die Statik von PE-HD-Rohren. 3R int. 37. Nr. 10-11. S. 686-690. 1998
4. Strauß H. Auswahl von Bohrflüssigkeiten für HDD-Anwendungen, Essen, Vortrag, Institut für Bohrtechnik und Fluidbergbau. TU Freiberg, 2009