

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
УХТИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**На правах рукописи**

**УДК 622.24.001.57**

**РГБ ОД**

**ВОЛКОВА ИРИНА ИВАНОВНА**

**РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ БУРОВЫХ  
ПРОЦЕССОВ НА ОСНОВЕ ОБРАБОТКИ ПРОМЫСЛОВОЙ  
ИНФОРМАЦИИ (НА ПРИМЕРЕ ТИМАНО-ПЕЧОРСКОЙ  
ПРОВИНЦИИ)**

**05.15.10 «Бурение нефтяных и газовых скважин»**

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание ученой степени**

**кандидата технических наук**

**Ухта 2000**

Работа выполнена в Ухтинском государственном техническом университете

Научные руководители: кандидат технических наук, доцент

Виктор Акимович Кузнецов

кандидат технических наук, доцент

Петр Федотович Осипов

Научный консультант:

доктор технических наук, профессор

Виктор Федорович Буслаев

Официальные оппоненты:

доктор технических наук

Леонид Александрович Димов

кандидат технических наук

Михаил Александрович Михеев

Ведущая организация:

Печорский научно-исследовательский и

проектный институт нефтяной промышленности

(«Печорнигазнефть»)

Защита состоится «29» июня 2000 г. в 9 часов на заседании  
Специализированного Совета К.064.83.02 при Ухтинском государственном  
техническом университете по адресу 169300, г. Ухта, ул. Первомайская, 13  
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке УГТУ

Автореферат разослан «27» мая 2000 г.

Ученый секретарь диссертационного Совета

кандидат технических наук, доцент



Н.М. Уляшева

И131-1,7,0

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### *Актуальность темы.*

Бурение скважин – наиболее сложный и дорогостоящий процесс в общем цикле работ, связанных с разведкой и разработкой залежей углеводородов.

Совершенствование технологических процессов, сопровождающих углубление скважин, оказывает решающее влияние на технико-экономические показатели строительства скважин. Решение проблемы оптимизации усложняется неоднородностью разбуриваемых пород, присущей практически всем площадям и месторождениям, ограниченностью информации о процессах, происходящих на забое скважины; наличием большого количества влияющих факторов; сложностью надежного получения достоверной информации.

В нашей стране и за рубежом проведен значительный объем исследований направленных на получение математических моделей процесса бурения скважин. Несмотря на высокий уровень их развития, достоверность теоретических исследований необходимо подтверждать результатами промысловых, лабораторных, стендовых испытаний и показателях опытно-промышленных работ в опытно-технологических скважинах, обобщения передового опыта и технологий. В большинстве случаев обработка статистического материала ограничена расчетом средних показателей бурения и получением простейших моделей, не учитывающих всего многообразия факторов и операций буровых процессов. В частности, ограничено использование методов математической статистики при исследовании экологических и других проблем, связанных с буровыми процессами, что обусловлено недостаточным развитием методического обеспечения. Кроме того, повышается уровень автоматизации процессов бурения, совершенствуются технические средства и способы определения технологических параметров при бурении скважин, расширяется база для получения более достоверной и точной информации. Поэтому вопросы повышения роли и качества обработки промышленной информации, и развития для этого широкого спектра статистических методов являются актуальными для исследования буровых процессов, разработки новых технологий и проектирования.

### *Цель работы.*

Развитие методов исследования буровых процессов на основе комплексной статистической обработки промышленной информации по бурению скважин на примере

Тимано-Печорской провинции, результатов экспериментальных исследований и мнений специалистов – экспертов.

### *Основные задачи работы.*

1. Создание методики экспертного анализа и разработка комплекса программ на ЭВМ. Апробация методики на примере создания системы экологически безопасного бурения.
2. Развитие факторных моделей, описывающих основные показатели углубления скважин с оценкой их достоверности на примере месторождений Тимано-Печорской провинции.
3. Исследование зависимостей показателей бурения от технологических и природных факторов на основе обработки промышленной информации методами множественной регрессии с целью повышения качества проектирования режимов бурения.
4. Исследование эмпирических зависимостей ресурса опор шарошечных долот от удельной нагрузки и частоты вращения для обоснования выбора способа и режима бурения.
5. Развитие методики интерпретации исследований физико-механических свойств горных пород в атмосферных и пластовых условиях с целью выбора типомодели долот.

### *Научная новизна.*

1. Расширена методика экспертного анализа, предложен способ формирования групп экспертов и разработан комплекс программ на ЭВМ, реализующих предложенную методику.
2. Методом экспертных оценок установлено, что современная система экологически безопасного бурения скважин должна включать следующие основные признаки: замкнутое водопотребление, обратное водоснабжение, безамбарное накопление буровых сточных вод (БСВ) и буровых отходов (БО), герметичная система сбора накопления и обогрева, разделение БО на жидкую и твердую фазы, очистка БСВ для повторного использования, блочно-модульное исполнение, утилизация твердой фазы БО, регенерация жидкой фазы отработанных буровых растворов (БР), возврат воды в природный кругооборот, качество очистки БСВ.
3. Методом факторного анализа получены факторные модели, описывающие основные показатели процесса бурения скважин на месторождениях Тимано-Печорской пр

винции.

4. Для Тимано-Печорской провинции методами множественной корреляции получены модели, выражающие зависимости параметров бурения: проходки на долото, механической и рейсовой скоростей от совокупности технологических и природных факторов и показана возможность их использования для выбора рациональных режимов бурения.
5. Определена зависимость ресурсов опор шарошечных долот от удельной нагрузки и частоты вращения для шадящего и форсированного режимов бурения.
6. Получена зависимость твердости некоторых горных пород при всестороннем сжатии от величины гидростатического давления и их твердости в атмосферных условиях.
7. Предложена методика интерпретации исследований физико-механических свойств горных пород по результатам стендовых испытаний с моделированием пластовых условий.

*Защищаемые положения. На защиту выносятся:*

1. Методика экспертного анализа и результаты его применения для выявления факторов, влияющих на процесс бурения и основные техногенные принципы современной системы экологически безопасного бурения скважин.
2. Методика исследований общих факторов для процессов углубления скважин, выделенных методами факторного анализа промысловой информации.
3. Методика выявления зависимостей показателей бурения от технологических и природных факторов, полученных обработкой промысловой информации методами многомерной регрессии.
4. Исследования по оценке ресурса опор шарошечных долот и свойств горных пород, рассчитанных по результатам промысловых и стендовых испытаний.

*Апробация работы.*

Результаты работы докладывались на Коми республиканской конференции (Ухта, 1973); на II Всесоюзной конференции "Применение вероятностно - статистических методов в бурении и нефтедобыче" (Баку, 1976), научно-практической конференции, посвященной 50-летию НИГП Коми АССР ( Ухта, 1979); на II и III научно-технических конференциях памяти А.Я.Кремса (Ухта, 1980, 1982); на Всесоюзной конференции молодых ученых и специалистов, посвященной XXVI съезду КПСС (Москва, 1981); на

научной конференции, посвященной 115 годовщине со дня рождения В.И. Лени (Сыктывкар, 1985); на научно –практической конференции «Строительство скважин охрана окружающей среды на Севере» (Ухта, 1997); на научно-технической конференции Ухтинского государственного технического университета (Ухта, 2000) и научных семинарах кафедры бурения УГТУ.

Практическая значимость. Результаты исследования использовались:

- при выполнении шести хозяйственных тем Ухтинским индустриальным институтом для Коми филиала ВНИИГаза и для института «Печорнипинефть» и финансируемой, по единому заказ - наряду, госбюджетной темы кафедры бурения (1991-1996 гг.).
- институтами «Печорнипинефть» и «Коминфтегеофизика» при составлении технологических регламентов и проектов для ОАО «Коминфть» и ООО «Севергапром».
- в учебном процессе при чтении лекций по курсу «Математическая статистика «Бурение нефтяных и газовых скважин» для студентов нефтегазового факультета, по дисциплине «Надежность нефтепромыслового оборудования» и для обучения магистров по специальности «Бурение скважин».

Публикации. Результаты исследований опубликованы в 8 статьях, 6 тезисах докладов на Всесоюзных, региональных конференциях.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, выводов и 5 приложений. Основной материал изложен на 152 стр. текста, 36 таблицах, 23 рисунках. Библиография насчитывает 223 наименования. В приложениях приведены документы об использовании НИР соискателя, примеры обработки и вывода информации по основным использованным компьютерным программам.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

ВО ВВЕДЕНИИ показана актуальность темы диссертации и в виде краткой аннотации изложены основные положения выполненной работы.

В ПЕРВОЙ ГЛАВЕ выполнен обзор и анализ работ отечественных и зарубежных исследователей, посвященных разработке математических моделей и использованию промысловой информации для изучения буровых процессов.

Значительный вклад в разработку математических моделей бурового процесса и развитие статистических методов его анализа внесли Абрамсон М.Г., Алексеев Ю.С.

Алексеев Л.А., Бадалов Р.А., Байджок Б.Д., Беликов В.Г., Бикчурин Т.Н., Бингхэм М., Бревдо Г.Д., Вудс Х., Галле Е., Гельфгат Я.А., Гераськин В.Г., Гусейнзаде М.А., Дмитриев В.И., Железняков Ф.И., Жидовцев Н.Н., Каннингхэм Р., Колесников В.Г., Мавлютов М.Р., Максудов Н.Х., Мальковский Н.А., Маурер В., Мирзанджанзаде А.Х., Молдавский О.П., Орлов А.В., Погарский А.А., Попов А.Н., Потапов Ю.Ф., Протасов Ю.И., Романова Л.А., Санников Р.Х., Саркисов В.А., Симонянц Л.Е., Спасибов В.М., Спивак А.И., Стрекалова Р.В., Федоров В.С., Фингерит М.А., Чефранов К.А., Ширинзаде С.А., Эдвардс Д., Эйгелес Р.М., Эскин М.Г. и другие.

Существенное влияние на развитие научных исследований и технологии бурения на Севере Европейской части России оказали Ахмадеев Р.Г., Буслаев В.Ф., Быков И.Ю., Вышенский С.М., Гержберг Ю.М., Долгий И.Е., Жеребкин А.И., Зюзев В.А., Каменских С.В., Ковалева Г.А., Осипов П.Ф., Рыбаков Ю.Ф., Скрябин Г.Ф., Уляшева Н.М., Юдин В.М. и другие.

В главе сравниваются основные математические модели процесса бурения, описывающие зависимости для проходки на долото, механической и рейсовой скорости бурения, стойкости опор вращения и вооружения долот, учитывающие физико-механические свойства пород, конструкцию долота, степень очистки забоя и другие. Отмечается сложность существующих теоретических моделей буровых процессов. Показано, что применение этих моделей для выбора параметров режима бурения невозможно без промышленного эксперимента или стендовых испытаний, так как многие константы в этих моделях основаны на использовании промышленных данных о работе и износе долот в процессе долбления, с выдачей рекомендаций для каждого последующего рейса, с введением опытных коэффициентов, учитывающих механические и абразивные свойства пород, конструкцию долота и другие

Показано, что существуют все необходимые предпосылки для использования статистических методов:

1. Наличие большой статистической информации о бурении скважин – суточные рапорта буровых мастеров, диаграммы бурения, результаты исследований в опорно-технологических, технологических, показательных и других скважинах, журналы наблюдений и другая информация.
2. Заведомо стохастический характер бурового процесса, на него оказывают воздействие большое количество факторов, степень влияния которых на параметры бурения

различна даже в процессе одного долбления.

3. Статистические модели по сравнению с детерминированными – регрессионные факторные – являются более простыми для дальнейшего анализа, даже если они содержат большое количество переменных.
4. Отсутствуют дополнительные затраты на проведение дорогих стендовых испытаний или промысловых экспериментов.

Показано, что вопросы комплексного применения методов математической статистики требуют дальнейшего развития.

ВО ВТОРОЙ ГЛАВЕ проводится анализ мнений специалистов относительно наиболее важных факторов, влияющих на показатели процесса бурения методом экспертных оценок. Экспертные оценки отражают опыт, интуицию и знания специалистов относительно исследуемого процесса и, несмотря на их субъективность, содержат полезную объективную информацию.

Разработанная методика статистического анализа экспертных оценок состоит из девяти основных этапов.

Этап 1. Ранжировки экспертов приводятся к нормальному виду. Проверяется гипотеза  $H_0^1$ : первоначальная матрица рангов не адекватна матрице перестроенных рангов. Проверка гипотезы осуществляется по коэффициенту ранговой корреляции Спирмена. Если  $H_0^1$  не отвергается, то необходимо провести анкетирование снова. Если  $H_0^1$  отвергается, то возможно дальнейшее исследование.

Этап 2. Из всех экспертов выделяется один (или подгруппа) экспертов, мнение которого резко отличается от мнений остальных экспертов. Проверяется гипотеза  $H_0$  о равенстве дисперсий, по критерию Кохрана. В этом случае из анализа исключается эксперт, для которого получена максимальная дисперсия, и процедуру проверки можно провести сначала. На этом этапе эксперты располагаются в порядке возрастания дисперсий.

Этап 3. Исследуется степень согласованности мнений экспертов по коэффициенту конкордации. Проверяется статистическая гипотеза  $H_0^3$ :  $W = 0$ , нет согласованности во мнениях специалистов. Если гипотеза  $H_0^3$  отвергается, то коэффициент конкордации статистически значимый, можно утверждать, что имеется неслучайная согласованность во мнениях специалистов. Если нельзя отвергнуть гипотезу  $H_0^3$ , то необходимо провести новое анкетирование и начать анализ сначала (этап 1).



Этап 4. Проверяется гипотеза  $H_0^4$ : различие в оценках опрошенных специалистов по вопросу о степени влияния факторов на изучаемый процесс не существенно.

Этап 5. Проверяется гипотеза  $H_0^5$ : различие во влиянии исследуемых факторов на изучаемый процесс не существенно (по мнению опрошенных специалистов).

Эти две гипотезы проверяются одновременно с помощью дисперсионного анализа. Если нет оснований отвергнуть гипотезы  $H_0^4$  и  $H_0^5$ , то необходимо анкетирование повторить.

Этап 6. После проверки гипотез  $H_0^4$  и  $H_0^5$  группу экспертов можно считать статистически полностью сформированной. Вычисляется для каждого фактора его среднее значение, среднее квадратическое отклонение и медиана. Это дает усредненное «коллективное» мнение экспертов о степени влияния факторов на исследуемую величину; чем меньше среднее значение ранга, тем большее влияние оказывает данный фактор.

Этап 7. Проверяется гипотеза  $H_0^6$ : нет определенной структуры влияний факторов. Под структурой понимается наличие таких влияний факторов, из которых:

а) хотя бы одно не равно нулю; б) хотя бы одно влияние отличается от других. Проверка гипотезы  $H_0^6$  осуществляется по  $t$ -критерию Стьюдента. Парно сравниваются средние значения рангов факторов. Если установлено наличие структуры влияний факторов ( $H_0^6$  отвергается), то для ее изучения следует дополнительно провести анализ гистограммы. Для этого можно сгруппировать факторы и провести отсев несущественных.

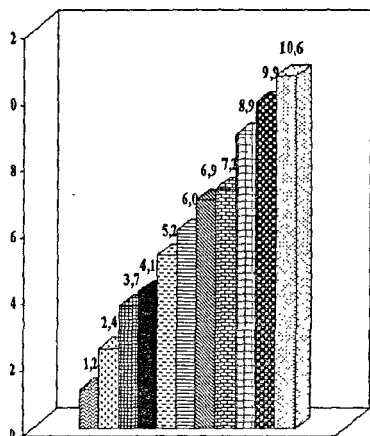
Этап 8. Проверяется гипотеза  $H_0^7$ : влияние всех или части факторов подчиняется равномерному распределению. Выполняется стандартная процедура проверки гипотезы о законе распределения по критерию  $\chi^2$ - Пирсона. Если гипотеза принимается, то по этим факторам необходимы дальнейшие исследования. Если гипотеза  $H_0^7$  отвергается, то анализ априорной информации считается законченным.

Этап 9. На этом этапе формируются группы с минимальными расхождениями во мнениях экспертов, для чего используется коэффициент корреляции рангов Спирмена. Проверяется гипотеза  $H_0^8$ :  $\rho_{r,g} = 0$ , где  $\rho_{r,g}$  – коэффициент корреляции между ранжировками экспертов с номерами  $r$  и  $g$  ( $r, g = \overline{1, m}, r \neq g$ ). Все эксперты, для которых гипотеза  $H_0^8$  отвергается, объединяются в одну группу. Если по данному критерию удастся выделить группу, содержащую достаточно много экспертов, то для нее проводится пол-

ный анализ анкетной информации.

По изложенной выше методике проведен анализ мнений специалистов о факторах, влияющих на проходку на долото и среднюю механическую скорость бурения. В качестве экспертов участвовали представители различных предприятий г. Ухты, связанных с бурением скважин (Ухтинское территориально-геологическое управление Коми филиал ВНИИГаза, «Печорнефтегазразведка»), преподаватели кафедры бурения Ухтинского индустриального института, буровые мастера, непосредственно работающие на буровых, и бурильщики, имеющие стаж работы не менее трех лет. Всего 100 экспертов. В результате статистического анализа группа разделилась на две подгруппы, которые по-разному оценивали степень влияния факторов на проходку на долото и механическую скорость. Одна подгруппа состояла из работников НИИ и преподавателей института, другая из буровых мастеров и работников УБР. Наибольшая согласованность в подгруппе была у экспертов, непосредственно связанных с проведением работ по бурению скважин, коэффициент конкордации равен 0.75. Все факторы, выделенные в результате экспертного анализа, были подвергнуты дальнейшей статистической обработке.

В работе проведен, также методом экспертных оценок, анализ информации по основным техногенным принципам современной системы экологически безопасного бурения скважин. Решалась задача создания экологически безопасного процесса бурения скважин, расположенных в районах крайнего Севера и вечной мерзлоты. Существующая неопределенность у специалистов относительно основных технологических принципов, которые должны быть реализованы в системе обезвреживания буровых отходов. Соискателем в сотрудничестве с д.т.н. Быковым И.Ю., была разработана анкета с целью систематизации мнений специалистов-экспертов по данному вопросу. В качестве экспертов выступали сотрудники НИИ, преподаватели вузов Российской Федерации, специалисты - экологи и производственники, непосредственно работающие на буровых. Всего было получено 90 ранжировок. В результате статистического анализа было установлено, что современная система экологически безопасного бурения должна включать 11 основных технологических признаков, связанных с работой этой системы. На рис. 1 приведена гистограмма средних факторов для такой системы. Справа указаны названия основных признаков.



- ▣ Замкнутое водопотребление
- ▣ Обратное водоснабжение
- ▣ Безамбарное накопление БСВ и БО
- ▣ Герметичная система сбора, накопления и обогрева
- ▣ Разделение БО на жидкую и твердую фазы
- ▣ Очистка БСВ для повторного использования
- ▣ Блочно-модульное исполнение
- ▣ Утилизация твердой фазы БО
- ▣ Регенерация жидкой фазы отработанных БР
- ▣ Возврат воды в природный кругооборот
- ▣ Качество очистки БСВ

Рис. 1. Гистограмма технологических признаков экологически безопасного бурения

Из гистограммы видно, что возрастание рангов признаков почти линейное, поэтому все признаки должны учитываться; степень согласованности экспертов высокая, так как коэффициент конкордации равен 0.84. При определении экспертов, имеющих близкие мнения, выделились следующие группы: 1-я группа из 58 экспертов; 2-я группа из 10 экспертов; 3-я группа из 5 экспертов. Коэффициент согласия внутри первой очень высок – 0.991. По результатам экспертного анализа статистически обосновано положение о том, что все технологические принципы, указанные в анкете, оправданы и должны быть реализованы в системе экологически безопасного бурения. Эти результаты были использованы при разработке проекта на строительство нефтегазовых и разведочных скважин, реализованного на буровых Василково № 19, 21, и 22 ООО «Севергазпром». В настоящее время ведется проектирование скважины № 1 Южно-Болотная для объединения ГФУП «Ухтанефтегазгеология». Все технологии по указанным признакам разработаны и уже используются.

В ТРЕТЬЕЙ ГЛАВЕ рассмотрено решение некоторых задач анализа информации о буровых процессах с использованием аппарата проверки статистических гипотез.

Иногда для выявления более рациональных типов долот достаточно сравнить средние показатели проходки на долото ( $h$ ), средней механической скорости бурения ( $V_m$ ), времени работы долота на забое ( $t$ ) и комплексного показателя ( $h \cdot V_m$ ) по критерию Стьюдента. Для примера был выполнен анализ показателей отработки долот 269СГ,

190Т и 190К при роторном и турбинном способах бурения на Вуктыльском месторождении.

Показано, что:

- при бурении кунгурских отложений долота типа 269СГ более эффективны при роторном бурении, чем при турбинном;
- при бурении роторным способом сакмарских отложений долота 190К оказались более эффективными по сравнению с долотами 190Т;
- для долот 190К и 190Т при турбинном и роторном бурении показатели существенно не отличаются.

При малых выборках следует использовать критерий независимости. Для иллюстрации исследовано наличие связи между механическими свойствами горных пород и показателями отработки долот. Мерой связи служит статистика  $\varphi^2$  - показатель сопряженности. Получены коэффициенты взаимной сопряженности Чупрова между показателями отработки долот и физико-механическими свойствами горных пород: пределы упругости ( $P_0$ ), удельной работы разрушения ( $A_v$ ), твердости породы ( $P_m$ ), коэффициентом пластичности ( $K$ ), абразивностью ( $A_{бр}$ ) и модулем упругости ( $E$ ).

Показано, что:

- Наибольшее влияние на показатели отработки долот оказывает удельная работа разрушения, что дает основание приоритетного использования этого фактора для прогноза показателей бурения.
- Даже при наличии однотипных долот и сходных геологических условий бурения с этих характеристик горных пород недостаточно для описания режимных параметров бурения, следует учитывать и технологические показатели.
- Одной из причин наличия слабой связи, может служить несовершенная методика определения параметров горных пород в стендовых условиях.

Для определения такой характеристики горных пород, как предел упругости, результатам стендовых испытаний предложена методика, основанная на анализе графика деформации ( $\epsilon$ ) образца при статическом нагружении ( $P$ ). Основным признаком перехода материала из упругого в пластическое состояние считается выход зависимости  $P(\epsilon)$  из линейности. При этом, если  $n+1$  нагрузка выводит значение ( $P_{n+1}$ ,  $\epsilon_{n+1}$ ) доверительной зоны, то считается, что материал выведен из упругого состояния. Д

предела доверительной зоны использована W – статистика, сделано программное обеспечение.

По данной методике определены механические свойства кунгурских ангидритов, левролитов и сакмарских известняков Вуктыльского газоконденсатного месторождения (ГКМ). Для изучения физико-механических свойств горных пород в условиях, приближенных к забойным, на кафедре бурения Ухтинского индустриального института были проведены стендовые испытания с имитацией основного забойного условия – сестороннего гидростатического сжатия.

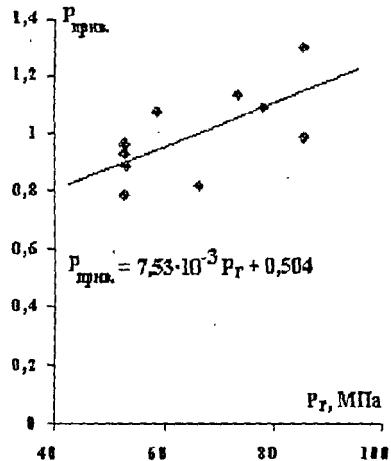
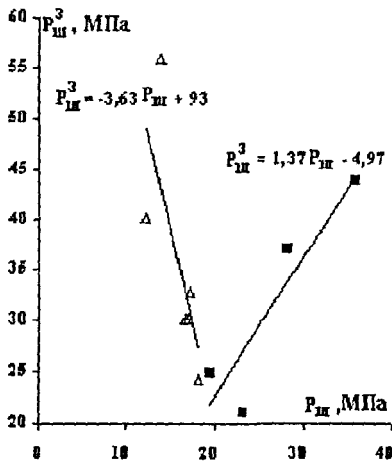
В работе на примере карбонатных пород Вуктыльского ГКМ изучена зависимость твердости горных пород ( $P_{ш}^3$ ) в условиях всестороннего сжатия от твердости породы по штампу в атмосферных условиях ( $P_{ш}$ ) и гидростатического давления ( $P_r$ ).

Для определения уравнения множественной регрессии применен метод Брандона. Найдена зависимость  $P_{ш}^3$  от  $P_{ш}$  (рис. 2). Эта зависимость имеет вид:

$$P_{ш}^3 \text{ расч.} = (93 - 3.631 \cdot P_{ш}), \quad \text{если } 12 < P_{ш} < 19$$

$$P_{ш}^3 \text{ расч.} = (-4.97 + 1.373 \cdot P_{ш}), \quad \text{если } 19 < P_{ш} < 36$$

Вычислена приведенная твердость породы  $P_{прив.} = P_{ш}^3 / P_{ш}^3 \text{ расч.}$ , и выявлена ее зависимость от гидравлического давления (рис. 3):  $P_{прив.} = (0.504 + 0.0075 \cdot P_r)$



ис. 2. Зависимость твердости породы в условиях всестороннего сжатия от ее твердости при атмосферном давлении.

Рис. 3 Зависимость приведенной твердости от гидростатического давления

В результате искомая зависимость имеет вид:

$$P_{ш}^3 = 0.9988 \cdot (93 - 3.631 \cdot P_{ш}) \cdot (0.504 + 0.0075 \cdot P_r), \quad \text{если } 12 < P_{ш} < 19$$

$$P_{ш}^3 = 0.9988 \cdot (-4.97 + 1.373 \cdot P_{ш}) \cdot (0.504 + 0.0075 \cdot P_r), \quad \text{если } 19 < P_{ш} < 36$$

Коэффициент корреляции между исходными и прогнозируемыми значениями оказался равным 0.906, что говорит о достаточной адекватности модели.

Полученные уравнения можно использовать для оценки твердости карбонат горных пород в забойных условиях. Это позволит получать более объективную информацию для проектирования режимов бурения.

Проведен анализ и прогнозирование ресурса опор вращения шарошечных долот. Под ресурсом опоры понимается произведение  $M_{оп} = g \cdot n_d \cdot t$ , где  $g$  – удельная нагрузка на долото;  $n_d$  – частота вращения;  $t$  – время работы долота.

Исследовано влияние удельной нагрузки и частоты вращения на ресурс опор. В анализе были использованы данные отработки долот с полностью изношенной опорой, полученные на 16 разведочных площадях (50 скважин). Бурение осуществлял АО «Усинскгеонефть». В анализе использовали данные по отработке долот с опорами типов В, Н, НУ-1 (диаметр 295.3 мм, Куйбышевбурмаш), НУ-2 (диаметр 210 мм, Куйбышевбурмаш), АУ.

Все данные, исходя из технологических режимов отработки, были разбиты на группы. Первая группа долот работала при малых нагрузках и небольших частотах вращения – щадящий режим, вторая – при повышенных нагрузках и частотах – форсированный режим.

Проведен анализ ресурса опор при различных удельных нагрузках и частотах вращения долота. Выявлено, что при увеличении  $g$  от 0.24 до 0.51-0.56 кН/мм среднее значение ресурса уменьшается, а при  $g > 0.6$  стабилизируется. Для различных значений частоты вращения динамика изменения ресурса не прослеживается.

Для уточнения параметров  $g$  и  $n_d$ , которые отделяют щадящий режим от форсированного, была проведена процедура сравнения прямых линий регрессии. Для этого использовали критерий параллельности и критерий совпадения. Проверены гипотезы параллельности, а затем и совпадения пар линий регрессий по каждой опоре вращения и для опоры В и для некоторых вариантов разбивки по частоте вращения. Разбивка данных по удельной нагрузке ( $g_{кр} = 0.51$ ) приводит к значимому различию линий регрессии для различных режимов бурения (рис. 4).

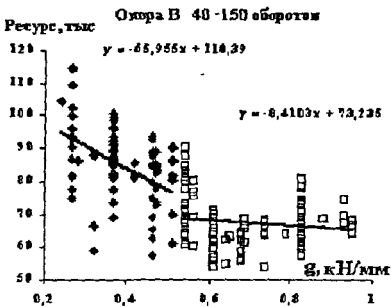
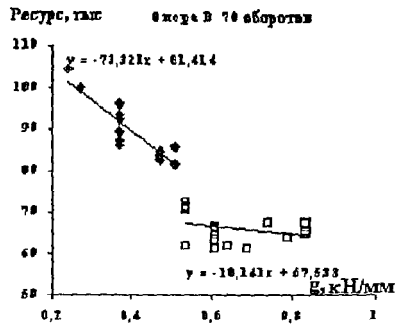
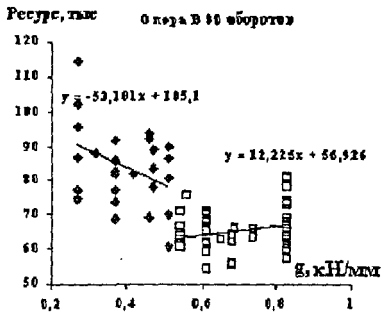


Рис. 4. Зависимость ресурсов опор ( $M_{оп}$ ) от удельной нагрузки ( $G$ )

Таким образом, полученные зависимости могут быть использованы для прогнозирования стойкости опор шарошечных долот.

Для прогнозирования работы долот при турбинном бурении важно знать ресурс урбобуров. Анализ времени безотказной работы турбобуров проведен на примере данных о работе 83 турбобуров Нижне-Одесского УБР. По ним сделан статистический анализ и показано, что распределение времени безотказной работы (ресурс) описывается законом Вейбулла. Найдены параметры этого распределения, рассчитаны показатели эксплуатационной надежности турбобуров.

В ГЛАВЕ 4 исследование буровых процессов проводится с использованием многомерного регрессионного анализа.

Основные теоретические положения были реализованы при составлении программы множественной регрессии. Программа прошла проверку при выполнении хозяйственных тем между Коми филиалом ВНИИГаза и Ухтинским индустриальным институтом. Программа принята в эксплуатацию в Коми филиале ВНИИГаза в январе 1980 г. В дополнение к основной программе были разработаны дружественный интер-

фейс ввода и анализа данных и управляющих параметров, программы расчета квантей распределения Стьюдента и Фишера. Количество и названия переменных, введенных в модель, задаются исследователем.

Проведен анализ количественных зависимостей между показателями работы лот и комплексом факторов, совместно влияющих на процесс углубления на прим данных по опорно-технологической скважине № 140 Вуктыльского месторождения также статистически обработаны данные о разбуривании глубоких горизонтов скваж № 40, 41, 42, 50, 53 на этом месторождении. Исследованы закономерности бурения больших (более 3000 м) глубинах для различных типов долот.

В качестве зависимых переменных были выбраны – проходка на долото, в бурения и средняя механическая скорость бурения. В качестве независимых переменных были выбраны следующие: интервал (глубина) бурения, частота вращения долот, осевая нагрузка на долото, давление на выкиде насоса, параметры промывочной жкости – плотность, условная вязкость, водоотдача раствора, - гидростатическое давление на забое скважины, твердость пород на забое скважины, абразивность. Следует отметить, что твердость пород на забое скважины рассчитывалась нами на основе формул, полученных ранее. Для наиболее представительных типов долот получены свыше 300 уравнений линейной регрессии, из которых выбраны статистически значимые.

Важной целью при изучении буровых процессов является определение влияющих факторов, таких как режим бурения и время работы долота, при которых достигается наибольшая рейсовая скорость. Эта задача реализована для долот двух типов – 295,3 МГ при турбинном бурении и 215.9 СЗГ – при роторном бурении. Долота отработывались в карбонатных породах нижнепермских, каменноугольных и верхнедевонских отложений Усинского месторождения. При анализе были использованы данные по отработке около 200 долот обоих типов. Оптимальные значения исследуемой переменной определялись при постоянных значениях других переменных.

Для решения задачи на экстремум исследовалась величина, обратная рейсовой скорости:

$$\frac{1}{V_p} = \frac{t_{спл} + t}{h} = \frac{t_{спл}}{h} + \frac{1}{V_{сек}}$$



Было установлено, что для достижения наибольших рейсовых скоростей при бурении долотом 295МГ оптимальная частота вращения составляет 120-140 мин<sup>-1</sup>, нагрузка на долото 140-160 кН, время работы долота - 11 часов. Для долот 215.9 СЗГ – рациональная частота вращения – 250-300 мин<sup>-1</sup>, нагрузка на долото – 110-130 кН, время работы долота (без учета фактического износа) – 6 час.

Следует отметить, что для повышения эффективности такого анализа необходимо усилить требования к достоверности статистического материала. Обратить особое внимание на регистрацию, автоматизацию процессов получения, хранения и преобразования информации, точность приборов и приближение датчиков измерения непосредственно к процессу бурения, следует контролировать объективность записей в сумочных рапортах и буровых журналах. Только при максимально достоверном статистическом материале можно получить значимые математические модели процесса бурения и полезные рекомендации.

В своих исследованиях соискателем использована программа пошаговой линейной регрессии. В этой программе порядок включения переменных в модель осуществляется по принципу максимального влияния на зависимую величину, т.е. в порядке убывания парных коэффициентов корреляции независимых переменных с исследуемой величиной. Для некоторых типов долот получены линейные регрессионные модели по программе пошагового анализа. Все модели статистически значимы. Сама программа выполняет роль эксперта, определяя порядок включения переменных по убыванию степени их влияния на исследуемую величину. Показано, что результаты пошагового регрессионного анализа требуют правильной инженерной интерпретации. Если среди переменных найдутся коррелированные величины, то порядок их включения в модель может приводить к противоречию с технологией бурового процесса. Поэтому рекомендовано исключать из регрессионной модели взаимно-коррелированные переменные.

В работе рассмотрены некоторые нелинейные регрессионные модели для средней механической скорости бурения, определены эмпирические параметры для некоторых типов долот.

В ГЛАВЕ 5 исследование буровых процессов выполнено с использованием факторного анализа. Методами факторного анализа решаются следующие основные задачи:

Выявление скрытых, но объективно существующих закономерностей, которые определяются воздействием внешних и внутренних причин на изучаемый процесс.

- Сжатие информации путем описания процессов при помощи общих факторов, число которых значительно меньше первоначально взятых признаков.
- Выявление и исследование статистической связи признаков с общими факторами. На основе выявленных признаков, наиболее тесно связанных с данным фактором, можно вырабатывать научно-обоснованные управляющие решения, способные повысить эффективность исследуемого процесса.
- Прогнозирование развития процесса на основе уравнения регрессии. Уравнения регрессии, построенные при использовании результатов факторного анализа, обладают преимуществами перед обычными регрессионными.

Несколько независимых переменных могут быть связаны посредством общего фактора. Интерпретация этого фактора является инженерной задачей. Например, если обнаруживается, что один из общих факторов нагружен переменными - частота вращения бурения и нагрузка на долото, - он может быть интерпретирован как ресурс бурения.

Соискателем была расширена и усовершенствована программа факторного анализа. Проведены расчеты по промышленным данным о бурении нефтяных и газовых скважин на Усинском и Вуктыльском газоконденсатном месторождениях. По свойствам все данные были разбиты на ряд пачек однородности. Количество данных в каждой пачке достаточно велико, например, по роторному бурению от 34 до 184. Объединив данные «Печорагеофизика» в соответствии с договором о творческом сотрудничестве представило данные о бурении скважин по всей Тимано-Печорской провинции по различным типам долот, объемы выборок составили от 100 до 400 значений. Проанализировано около 4000 данных об отработке долот Тимано-Печорской провинции.

Выявлено, что процесс углубления скважин можно описать 3-4 общими факторами. Один из них определяется глубиной бурения, второй - нагрузкой переменными, связанными с технологией бурения (нагрузка, частота вращения бурения). Третий определяется параметрами промысловой жидкости. Трудности интерпретации этих факторов на сегодняшний день являются основным ограничением для широкого использования факторных регрессионных моделей, это предмет отдельного исследования.

Найдено, что косоугольное решение лучше соответствует принципу простоты структуры общего фактора, чем ортогональное.

На основе выделенных общих факторов получены регрессионные модели для показателя проходки на долото. Было проведено исследование, как влияет объем выборки на качество регрессионной модели, полученной по исходным данным и по стандартизованным общим факторам. Показано, что регрессионные модели, построенные на основе выделенных общих факторов являются более значимыми, они лучше описывают изучаемую зависимую переменную.

#### Основные выводы и рекомендации:

Для статистического анализа промышленной информации о бурении скважин предложен комплекс методик, включающий в себя проверку статистических гипотез, метод экспертных оценок, многомерную линейную и нелинейную регрессию, факторный анализ. Впервые предложено при экспертном анализе выделять группы экспертов, имеющих близкие мнения и анализировать состав такой группы.

Разработано программное обеспечение всего комплекса статистической обработки промысловых и лабораторных данных.

Методом экспертных оценок установлено, что современная система экологически безопасного бурения скважин должна включать следующие основные признаки: замкнутое водопотребление, обратное водоснабжение, безамбарное накопление буровых сточных вод (БСВ) и буровых отходов (БО), герметичная система сбора, накопления и обогрева, разделение БО на жидкую и твердую фазы, очистка БСВ для повторного использования, блочно-модульное исполнение, утилизация твердой фазы БО, регенерация жидкой фазы отработанных буровых растворов (БР), возврат воды в природный кругооборот, качество очистки БСВ.

Методом факторного анализа получены факторные модели, описывающие основные показатели процесса бурения скважин Тимано-Печорской провинции.

Найдена зависимость между твердостью известняков при всестороннем гидростатическом сжатии от гидростатического давления и твердости при атмосферном давлении.

По промысловым данным установлены нормативные значения ресурсов опор для различных типоразмеров долот и заводов изготовителей. Показано, что для падающего и форсированного режимов работы уравнения зависимости ресурса опор от удельной нагрузки различны. Определено граничное значение удельной нагрузки для этих режимов и установлены уравнения, описывающие величину ресурса опор

от удельной нагрузки.

7. Получены регрессионные модели, описывающие зависимости между отработками различных типов и комплексом технологических показателей и характеристиками горных пород для различных месторождений Тимано-Печорской провинции. Показано, что эти модели можно использовать для получения оптимальных режимов обработки долот.
8. Выявлено, что процесс бурения может быть описан с достаточной точностью общими факторами. Получены значения проходки на долото по нормированным значениям общих факторов.
9. Рекомендовано комплекс статистических методик, программ на ЭВМ и результаты работы использовать при обучении студентов специальности 090800 «Бурение скважин» по дисциплине «Математическая статистика», а также для обучения геологов и аспирантов.

***ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО В РАБОТАХ***

1. Разманова И.И. О вероятностно-статистической оценке надежности восстанавливаемых изделий //Тез. докл. Коми республиканской конференции. Ухта. 1977. С.92.
2. Разманова И.И. Исследование надежности некоторых видов турбобуров (на примере объединения "Коминнефть") //Тез. докл. II Всесоюзной конференции "Применение вероятностно - статистических методов в бурении и нефтедобыче" Баку, 1977. С.23.
3. Кузнецов В.А., Долгий И.Е., Разманова И.И. Сравнение эффективности турбин и роторного бурения на Вуктыльском газоконденсатном месторождении //Технология бурения нефтяных и газовых скважин. Межвуз. н-тем. сб. № 5, 1978. –С.109-114.
4. Долгий И.Е., Герцберг Ю.М., Волкова И.И. Использование методов математической статистики при обработке промысловых материалов и экспериментальных данных с целью увеличения скоростей бурения. // Тез. докл. н-практ. конференции посвящ. 50-летию НИГП Коми АССР, Ухта, 1979. –С.38-39.
5. Кузнецов В.А., Волкова И.И., Жарикова Н.Н., Фомин А.С. Исследование твердых горных пород в условиях всестороннего сжатия. // Тез. докл. н-практ. конференции, посвящ. 50-летию НИГП Коми АССР, Ухта, 1979. –С. 39-40.

Кузнецов В.А., Долгий И.Е., Волкова И.И. Исследование зависимости твердости горных пород от всестороннего гидростатического сжатия. // Технология бурения нефтяных и газовых скважин. Межвуз. н-тем. сб. № 7, Уфа, 1980. –С.9-16.

Волкова И.И. Использование факторного анализа и метода экспертных оценок в системе АСУ - бурение. //Тез. докл. II н-техн. конференции памяти Кремса, Ухта, 1980. – С. 121.

Волкова И.И. Использование статистической информации о работе долот с целью получения оптимизационных моделей процесса бурения (на примере Коми АССР). // Тез. докл. Всесоюз. конференции молодых ученых и спец., посв. XXVI съезду КПСС, Москва, 1981. –С.92.

Волкова И.И., Гержберг Ю.М., Долгий И.Е. Исследование влияния различных факторов на работу долот методом регрессионного и дисперсионного анализа. //Технология бурения нефтяных и газовых скважин. Межвуз. н-тем. сб. № 9, Уфа, 1982. –С.94-97.

0. Кузнецов В.А., Волкова И.И. К методике определения предела упругости горных пород. //Народное хозяйство республики Коми, Сыктывкар. №3, 1993. –С.7-10.
1. Волкова И.И. Методика статистического анализа экспертных оценок системы замкнутого оборотного водоснабжения буровой. // Проблемы освоения ресурсов Европейского Севера. Сб. науч. трудов. №2, Ухта, 1996. –С. 297-301.
2. Каменских С. В., Осипов П.Ф., Волкова И.И. Моторесурс опоры шарошечных долот. // Журнал «Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море».- М.: ВНИИОЭНГ, 1996, № 4.- С. 7-9.
3. Кузнецов В.А., Волкова И.И. Определение на ЭВМ предела пластичности горных пород. // Проблемы освоения природных ресурсов Европейского Севера. Сб. науч. трудов, Ухта, 1997, №3. -С.55-58.
4. Налбандов В.Л., Волкова И.И. Надежность бурового и нефтепромыслового оборудования (основы теории и статистические методы расчета показателей): Учебное пособие. -Ухта. УИИ. 1997. –52с.
5. Кузнецов В.А., Волкова И.И. К методике определения предела пластичности горных пород. //Нефть и газ. Известия Вузов, №4,1997. –С.37-39.

Соискатель



Волкова И.И.