

БОРИСОВ Константин Иванович

**НАУЧНЫЙ МЕТОД ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ  
ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД  
ПРИ БУРЕНИИ СКВАЖИН СОВРЕМЕННЫМИ ИНСТРУМЕНТАМИ  
РЕЖУЩЕ-СКАЛЫВАЮЩЕГО ДЕЙСТВИЯ**

Специальность: 25.00.14. - Технология и техника геологоразведочных работ

**А в т о р е ф е р а т**  
**диссертации на соискание ученой степени**  
**доктора технических наук**

**ТОМСК-2012**

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

**Научный консультант:**

Доктор технических наук, профессор С.Я. Рябчиков

**Официальные оппоненты:**

Доктор технических наук, профессор В.И. Власюк

Доктор технических наук, профессор В.В. Кривошеев

Доктор технических наук, профессор В.В. Нескоромных

**Ведущая организация:** ФГБОУ ВПО «Иркутский государственный технический университет», г. Иркутск

Защита диссертации состоится 29 марта 2012 г. в 15-00 часов на заседании Совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д212.269.07 при Национальном исследовательском Томском политехническом университете по адресу: 634004 г. Томск, пр. Ленина, 2а, строение 5, корпус 20, ауд. 504.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке национального исследовательского Томского политехнического университета

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2012 г

**УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ**

Совета по защите докторских и кандидатских диссертаций,

Доктор геол.минер. наук, профессор С.И. АРБУЗОВ

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ:**

Бурение разведочных скважин на все виды полезных ископаемых, включая нефть и газ, как специфический вид капитального строительства сложных технических объектов, сооружаемых в уникальных горно-геологических и географо-климатических условиях, характеризуется достаточно большими материальными затратами по всему циклу их сооружения.

Вместе с тем оно является одним из самых востребованных способов геологического исследования недр Земли, поисков и разведки залежей фактически всех полезных ископаемых. Объемы буровых работ, как в мире, так и в России постоянно растут и требуют новых технико-технологических и инструментальных решений для снижения затрат на их проведение.

## **АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ:**

Современное состояние научно-технического развития в отечественной буровой отрасли делает весьма актуальным разработку новых научных подходов для объективной оценки эффективности разрушения горных пород инструментами режущо-скалывающего действия. Это обусловлено, прежде всего, следующими важными факторами:

- расширение объемов использования инструментов режущо-скалывающего действия на основе современных материалов типа Stratapax<sup>TM</sup>, как при бурении скважин на нефть и газ, так и при бурении на твердые полезные ископаемые, сдерживается из-за отсутствия точных и объективных методов оценки эффективности разрушения горных пород инструментами режущо-скалывающего действия типа Polycrystalline Diamond Compact (PDC);

- отсутствие научно обоснованного физического механизма динамического внедрения в процессе резания-скалывания горных пород резцами при работе породоразрушающего инструмента режущо-скалывающего действия;

- отсутствие прочностного показателя для всех типов горных пород, позволяющего оценить эффективность их разрушения при работе инструментов режущо-скалывающего действия в процессе резания-скалывания;

- отсутствие критерия эффективности динамического процесса резания-скалывания горных пород при работе инструментов режущо-скалывающего действия класса PDC.

Указанные факторы явились важным основанием постановки комплекса теоретических и экспериментальных исследований динамики и

кинематики резания-скалывания горных пород современными инструментами режуще-скалывающего действия.

Проблемой повышения эффективности работы инструментов режуще-скалывающего действия при бурении скважин занимались в разное время многие исследователи. Решением отдельных ее аспектов посвящены работы Алимова О.Д., Байдюка Б.В., Барона Л.И., Башкатова Д.Н, Будюкова Ю.Е., Васильева Л.М., Владиславлева В.С., Власюка В.И., Ворожцова М.И., Гетопанова В.Н., Горшкова Л.К, Гусмана А.М, Зварыгина В.И, Зиненко В.П., Колесникова А.Е., Кошелева Ю.Ф., Мавлютова М.Р., Мамбетова Ш.А., Нескоромных В.В., Остроушко И.А., Ошкордина О.В, Перетолчина В.А., Попова А.Н., Протодьяконова М.М., Рожкова В.П., Синева С.В., Спивака А.И, Сулакшина С.С., Федорова А.С., Шрейнера Л.А, Эйгелеса Р.М., Эпштейна Е.Ф. и другие.

В своих исследованиях они создали богатую научную базу по проблемам разрушения горных пород при бурении скважин.

Вместе с тем, одним из главных аспектов целесообразности дальнейших работ по исследованию разрушения горных пород инструментами режуще-скалывающего действия при бурении скважин является то, что значительная часть реальной физической картины процессов разрушения при резании-скалывании горных пород, до настоящего времени комплексно не изучена и детально не описана.

Поэтому весьма актуальными являются более глубокие аналитические и экспериментальные исследования проблемы, восполняющие пробелы в данной области.

### **ЦЕЛЬ РАБОТЫ:**

- разработка нового научно обоснованного способа комплексной оценки эффективности динамических процессов разрушения при работе современных инструментов режуще-скалывающего действия.

Основная цель работы для детализации научных исследований может быть разделена на группы взаимоувязанных локальных целей:

- формирование методологической базы и научных требований к новому способу оценки процессов разрушения горных пород инструментами режуще-скалывающего действия;

- разработка нового способа оценки процессов разрушения горных пород инструментами режуще-скалывающего действия;

- разработка технических, аппаратных средств и технологии нового способа оценки процессов разрушения горных пород инструментами режуще-скалывающего действия;

- разработка прикладных аспектов нового способа оценки эффективности процессов разрушения горных пород инструментами режуще-скалывающего действия.

### **ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ:**

Для достижения поставленных целей необходимо решить следующий комплекс научных задач:

- теоретически и экспериментально исследовать на новом уровне детализации физический механизм динамических процессов «внедрения и резания» горных пород породоразрушающими элементами (резцами) инструментов режуще-скалывающего действия;

- разработать и предложить:

а) показатель «динамической твердости» горных пород для объективной оценки их поведения при работе инструментов режуще-скалывающего действия;

б) критерий оценки динамических процессов разрушения при резании-скалывании горных пород для обеспечения растущей необходимости анализа эффективности разрушения горных пород инструментами режуще-скалывающего действия;

- разработать прикладные аспекты использования новых показателей и критериев для:

а) процессов проектирования и управления важными сегментами технологии бурения скважин с инструментами режуще-скалывающего действия;

б) проектирования оптимальных характеристик размещения и типоразмеров вооружения в инструментах режуще-скалывающего действия для бурения геологоразведочных скважин.

### **ИДЕЯ РАБОТЫ:**

Идея работы заключается в создании нового научного метода оценки поведения горных пород и эффективности динамических процессов их

разрушения инструментами режуще-скалывающего действия на базе объективных критериев, характеризующих динамические процессы резания-скалывания горных пород и позволяющие определить новые подходы к совершенствованию технологии бурения скважин и буровых инструментов режуще-скалывающего действия.

### **МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ:**

С целью решения поставленных задач принят комплексный метод, сочетающий в себе аналитические и экспериментальные исследования, с применением современных способов планирования исследований, обработки экспериментальных данных на базе компьютерных технологий. Для достижения указанных целей, в соответствии с принятой методикой, была проведена следующая работа.

1. Анализ современных представлений и теоретическое исследование проблем разрушения горных пород инструментами режуще-скалывающего действия. Для изучения работ, посвященных разрушению горных пород современными инструментами режуще-скалывающего действия, использован системно-целевой подход.

2. Аналитические и экспериментальные исследования переходного и установившегося режимов работы, как единичного резца, так и бурового инструмента в целом, на научной базе математического и физического моделирования процессов и положений теоретической механики, сопротивления материалов, кинетической теории прочности.

3. Сравнительное экспериментальное изучение процессов и механизмов статического внедрения и динамического внедрения при резании горной породы единичным разрушающим элементом на базе использования разработанной экспериментальной установки УМР, имеющей оригинальные технико-технологические решения и необходимую поверенную точность результатов измерений цифровой силоизмерительной системы Kistler<sup>TM</sup>.

4. Исследования выполнялись с использованием:

а) современных вероятностных методов планирования исследований и статистическими технологиями обработки результатов экспериментов;

б) компьютерных технологий и пакетов прикладных программ для работы с экспериментальным материалом и организации расчетов:

- программное обеспечение DynoWare для получения, обработки и преобразования цифровых данных динамометрической установки Kistler<sup>TM</sup>;

- программное обеспечение StatGraf для компьютерной обработки экспериментальных данных.

## НАУЧНАЯ НОВИЗНА РАБОТЫ:

Научная новизна состоит в формировании нового научного направления оценки поведения горных пород и эффективности их разрушения при бурении скважин инструментами режуще-скалывающего действия. В частности:

1. Разработана научная методика математического моделирования переходного и установившегося процессов внедрения единичных режущих элементов в горную породу при ее резании-скалывании.

2. Выполненный полный комплекс научных исследований на разработанной установке УМР по резанию-скалыванию горных пород единичными резами позволил оценить динамическую твердость горных пород и эффективность их разрушения с использованием породоразрушающих элементов инструментов режуще-скалывающего действия.

3. Комплексно изучены и научно обоснованы объективные количественные параметры взаимодействия сил резания в динамическом процессе резания-скалывания, характеризующее различные фазы разрушения горной породы при резании породоразрушающими элементами инструментов режуще-скалывающего действия: переходный, истирающе-усталостный процесс разрушения, и стационарное объемное разрушение исследуемой горной породы.

4. Научно доказана фундаментальная значимость величины коэффициента сопротивления резанию породы  $K_p$  для оценки эффективности разрушения пород инструментами режуще-скалывающего действия при изменении параметров режима резания. На большом теоретическом и экспериментальном материале доказано, что уровень оптимальности динамического процесса разрушения горной породы резанием в конкретной системе «резец-порода» может достаточно точно оцениваться значением  $K_p$ .

5. Предложен новый количественный критерий оценки сопротивляемости внедрению в горные породы в процессе их резания инструментом режуще-скалывающего действия  $H_{\text{ед}}$  - показатель «динамической твердости горных пород» для условий процесса резания. Данный критерий не только содержит преимущество признаваемого в настоящее время метода Л.А. Шрейнера, но и объективно отражает

фундаментальные процессы разрушения горных пород при их резании-скалывании.

7. В полном объеме научно обоснована и детализирована технология экспериментального измерительного процесса показателя «динамической твердости горной породы»  $H_{60}$  с использованием установки моделирования разрушения горных пород резанием. Получена количественная оценка показателя динамической твердости  $H_{60}$  выборки горных пород, типичных для геологических разрезов ряда нефтегазовых и рудных месторождений Западной Сибири.

8. Установлено, что в процессе работы долота режуще-скалывающего действия вследствие радиальной дифференциации «скоростного упрочнения» горной породы, динамическая твердость периферийных участков горной породы экспоненциально возрастает по сравнению с той же характеристикой внутренних участков забоя. Предложено для приведения текущих контактных давлений для резцов различных сегментов корпуса долота к одинаковым значениям использовать критерий применения резцов с размерами обратно пропорциональными величине действующих реактивных нагрузок.

9. Установлено, что для поддержания одинаковых условий работы различных групп резцов по отношению к динамической плоскости резания горной породы необходимо системно изменять геометрию их размещения в корпусе долота по мере уменьшения радиуса вращения каждой группы резцов. Критерием оптимальности углов установки резцов в корпусе долота РДС на периферийных и внутренних венцах впервые предложено считать характеристику «неизменности значений угла резания ( $\alpha_i = \text{const}$ ) для всех групп резцов долота относительно собственной динамической плоскости резания».

### **НАУЧНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ:**

1. Формирование и совершенствование научного способа оценки эффективности сложных динамических процессов разрушения горных пород при работе породоразрушающих элементов инструментов режуще-скалывающего действия необходимо выполнять на основе разработанной аналитической модели, воспроизводящей основные фундаментальные элементы реальных процессов резания-скалывания при бурении скважин.

2. Исследование и научный анализ процессов резания-скалывания горных пород выполнены на базе доказательства логической последовательности и математического описания переходных и

установившихся периодов динамического процесса работы инструментов режуще-скалывающего действия.

3. Построение математической модели динамического процесса резания-скалывания горной породы проведено на основе показателя «реактивной» силы  $R_x$  с учетом экспериментально доказанной его количественной значимости и закономерностей изменения при различных режимах резания.

4. Оценка сопротивления горных пород разрушению при работе инструментов режуще-скалывающего действия произведена на основе предложенного показателя их динамической твердости  $H_{ed}$ , научное обоснование которого, разработка требований к его количественному определению и техническим средствам для измерительного процесса представлено в настоящей работе.

5. Оптимизацию проектирования режимов бурения и совершенствование конструкций инструментов режуще-скалывающего действия необходимо вести на основе:

а) анализа силового динамического взаимодействия по предложенному показателю  $K_p$ , характеризующему комплексное сопротивление горных пород резанию-скалыванию;

б) выявленных закономерностей кинематики и динамики работы различных групп породоразрушающих элементов в корпусе долота с учетом различного скоростного упрочнения горных пород на периферии и вблизи оси вращения инструмента, а также формирования у групп резцов собственных динамических плоскостей резания.

### **ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ И РЕАЛИЗАЦИЯ РАБОТЫ:**

1. Разработана и предложена для практического применения при проектировании техники и технологии бурения скважин методика и технология экспериментального измерительного процесса нового показателя «динамической твердости»  $H_{ed}$  с использованием установки моделирования разрушения горных пород резанием.

2. Получены практические результаты количественной оценки динамической твердости  $H_{ed}$  выборки горных пород, представляющих вмещающий разрез ряда нефтегазовых и рудных месторождений Западной Сибири. Данные результаты являются начальным этапом статистического

накопления показателей динамической твердости горных пород для практического применения при проектировании технологии бурения скважин, разработке нового бурового инструмента, а также для дальнейшего теоретического изучения динамических процессов разрушения горных пород при резании.

3. Предложен и обоснован для практического использования критерий оптимальности углов установки резцов в корпусе долота PDC на периферийных и внутренних венцах в формате «неизменности значений угла резания ( $\alpha_i = \text{const}$ ) для всех групп резцов долота относительно собственной динамической плоскости резания». Критерий является важной характеристикой для проектирования системы размещения режущих элементов в долотах режуще-скалывающего действия. Методика получила практическое внедрение в научно-производственной деятельности ведущего отраслевого предприятия ОАО Тульское НИГП.

4. Разработан критерий «пропорционального согласования величин контактных давлений и размерного ряда групп резцов» в зависимости от размещения в корпусе долот режуще-скалывающего действия, который предложен для использования при проектировании типоразмеров резцов различных сегментов корпуса долота.

5. Предложено использовать коэффициент сопротивления разрушению  $K_p$  в качестве критерия достижения оптимальности динамического процесса разрушения горной породы в конкретной системе «резец долота - порода», что позволит формировать оперативную систему управления технологией бурения скважин для инструментов режуще-скалывающего действия.

6. Предложено показатель  $K_p$  использовать в отраслевой методике по проектированию забойных двигателей для случая использования современных инструментов режуще-скалывающего действия типа PDC на оптимальных режимах разрушения горных пород.

7. Результаты работы использованы для:

- разработки новой методики определения динамической твердости горных пород для условий работы инструментов режуще-скалывающего действия класса PDC;
- модернизации технологии проектирования характеристик забойных машин для условий Западной Сибири.

**ОБОСНОВАННОСТЬ И ДОСТОВЕРНОСТЬ НАУЧНЫХ ПОЛОЖЕНИЙ** подтверждается:

- применением современных высокоточных технических средств и цифровых систем измерений при экспериментальном изучении динамических процессов резания исследуемых горных пород;

- использованием натуральных керновых образцов различных горных пород с нефтяных и угольных месторождений Сибири;

- представительным объемом исследований, достоверность которых подтверждена общепринятыми методами планирования экспериментов, статистической обработки материалов, а также компьютерными технологиями и пакетами прикладных программ для работы с экспериментальным материалом и организации расчетов;

- экспериментальным подтверждением научных выводов работы на разработанной установке УМР для натурального исследования процессов резания-скалывания горных пород, имеющей необходимые технико-технологические решения и поверенную точность результатов измерений.

### **АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ:**

Основные положения диссертационной работы докладывались, обсуждались и получили одобрение:

- на заседании научного семинара кафедры бурения скважин национального исследовательского Томского политехнического университета (г. Томск – 2002, 2004, 2008, 2011 гг.);

- на заседании научного семинара кафедры техники разведки МПИ Московского геологоразведочного института (г. Москва - 1981, 1982 гг.);

- на заседании Ученого Совета Московского геологоразведочного института по защите кандидатской диссертации (г. Москва – ноябрь 1982 г.);

- на международных научно-технических конференциях «Разрушение горных пород при бурении скважин» (г. Уфа - 1982, 1985, 1989 гг.);

- на научно-технических конференциях «Механика горных пород при бурении» (г. Грозный – п. Агой – 1986 г.);

- на научно-практических конференциях по проблемам бурения скважин, развития минерально-сырьевой базы Сибири и нефтегазового образования Сибири (г. Томск – 2002, 2004, 2009 гг.);

- на научно-техническом Совете Тульского филиала ВИТР (г. Тула – сентябрь 2011 г.).

**ЛИЧНЫЙ ВКЛАД АВТОРА** заключается в постановке научной проблемы, разработке программ и методик экспериментальных и

аналитических исследований и непосредственном участии в проведении всех исследований, результаты которых приведены в диссертации.

### **ПУБЛИКАЦИИ:**

Основные результаты работы изложены в 24 печатных работах, в том числе:

- в изданиях перечня ВАК Минобразования России для публикации материалов докторских диссертаций – 9 публикаций;
- в изданиях, не включенных в перечень ВАК – 15 публикаций.

### **СТРУКТУРА И ОБЪЕМ РАБОТЫ:**

Диссертация состоит из введения, 7 глав, основных выводов, и библиографического списка. Работа изложена на 181 странице машинописного текста, содержит 28 рисунков, 6 таблиц, библиографический список из 150 наименований и 1 Приложение.

Во введении показана актуальность работы, цели и задачи исследований, их научная новизна и практическая ценность.

В главе 1 выполнен детальный обзор современного состояния теории динамических процессов разрушения горных пород инструментами режуще-скалывающего действия при бурении скважин; выявлены актуальные проблемы достоверной характеристики процессов взаимодействия резцов долот режуще-скалывающего действия с горными породами; поставлены актуальные задачи исследований.

В главе 2 представлены все аспекты использования в работе методических средств и способов для аналитических и экспериментальных исследований; материалы предназначены для понимания научно-технического уровня выполненных исследований, а также для оценки достоверности полученных результатов.

В главе 3 представлены материалы аналитических исследований динамического процесса резания-скалывания горных пород, предназначенные для математического описания переходных и установившихся периодов работы единичных режущих элементов инструментов режуще-скалывающего действия; разработаны научные требования к новой методике оценки динамической твердости горных пород для условий работы инструментов режуще-скалывающего действия.

В главе 4 рассмотрены результаты экспериментальных исследований процессов резания горных пород разрушающими элементами инструментов режущо-скалывающего действия, показавшие достоверность разработанных математических моделей работы единичных резцов в переходном и стационарном режимах резания; установлены важнейшие закономерности количественного взаимодействия сил резания при различных режимах разрушения пород резанием-скалыванием.

В главе 5 выполнен комплекс исследовательских работ по разработке и экспериментальной реализации нового способа количественной оценки динамической твердости горных пород для условий работы инструментов режущо-скалывающего действия, предназначенного для массового определения показателя. Методика отвечает научным требованиям к способам определения механических свойств горных пород, характеризующих их поведение при работе инструментов режущо-скалывающего действия.

В главе 6 выполнены исследования закономерностей поведения единичных режущих элементов, работающих в едином инструментальном комплексе долота режущо-скалывающего действия, построенных на научных результатах изучения процессов резания горных пород; сформулированы необходимые рекомендации и требования к совершенствованию современных инструментов режущо-скалывающего действия.

В главе 7 представлены материалы практического использования результатов аналитического и экспериментального исследования динамических процессов работы инструментов режущо-скалывающего действия класса PDC для целей развития методик проектирования характеристик современных гидравлических забойных машин в условиях Западной Сибири, а также направления дальнейших исследований.

В разделе 8 сформулированы основные выводы представленной диссертационной работы по сформированному научному направлению.

### **АВТОРСКАЯ БЛАГОДАРНОСТЬ И ПРИЗНАТЕЛЬНОСТЬ:**

Экспериментальные и аналитические исследования проводились на кафедре бурения скважин национального исследовательского Томского политехнического университета.

Значительная часть работы выполнена при участии и научных консультациях профессоров кафедры С.С.Сулакшина и С.Я. Рябчикова.

Автор выражает благодарность сотрудникам кафедры: доцентам В.Г. Храменкову, [И.А.Нейштетеру], В.И.Рязанову, [В.А.Дельва], Брылину В.И., Самохвалову М.А., профессорам Ю.Л.Боярко, В.Д.Евсееву, Н.Г. Квеско за помощь и исключительно ценные рекомендации при выполнении настоящей работы. Автор благодарен профессору Рожкову В.П. за ценные советы и рекомендации.

### **ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И ИХ ОБОСНОВАНИЕ:**

*1 защищаемое научное положение. Методология решения технико-технологических задач при бурении скважин инструментами режуще-скалывающего действия должна адекватно отражать сложные реальные динамические процессы разрушения горных пород, включающие переходные и установившиеся режимы резания-скалывания.*

В работах Байдюка Б.В., Зварыгина В.И, Остроушко, И.А., Попова А.Н., Мавлютова М.Р., Рожкова В.П., Сливака А.И, Сулакшина С.С., Федорова А.С., Шрейнера Л.А, Эйгелеса Р.М., Эпштейна Е.Ф. и других приводится достаточно полная качественная и количественная оценка процессов разрушения горных пород при бурении скважин, раскрывается их физический механизм.

Однако подавляющее большинство этих и других научных работ, выполненных по тематике исследования разрушения горных пород, полно раскрывают качественную картину, физический механизм, и количественные результаты в основном вдавливания породоразрушающего элемента в горную породу – важного, но не единственного процесса при их разрушении резанием-скалыванием.

Специалистами широко используется методики оценки прочностных свойств горных пород, основанные на реализации статического внедрения индентора (штампа) в исследуемую горную породу. Однако, на наш взгляд, динамический процесс разрушения горных пород при использовании инструментов режуще-скалывающего действия не может моделироваться только «статическим вдавливанием». Реальная физическая картина «резания-скалывания горных пород» долотами режуще-скалывающего действия, включающая переходные и установившиеся процессы, процессы истирания породы, одновременного внедрения и перемещения резца со снятием «стружки», значительно сложнее.

В конечном счете, поведение целого класса горных пород при их деформации и разрушении, достаточно широко представленного при бурении скважин на все виды полезных ископаемых – высоко пластичных и пластичных мягких горных пород, – не описывается действующими методиками.

Таким образом, принципиальная научная важность комплекса работ по аналитическому изучению и описанию динамики и кинематики резания горных пород определяется отсутствием научной модели, с помощью которой можно было бы оценить результаты разрушения горных пород современными инструментами режущо-скалывающего действия.

В настоящей работе на новой научной методологической базе анализа динамического процесса резания горных пород единичными резцами сформированы объективно связанные математические модели динамической системы «резец - горная порода»:

- в переходном процессе от «статического вдавливания» к «динамическому процессу резания» единичными породоразрушающими элементами инструментов режущо-скалывающего действия;
- в установившемся (стационарном) процессе резания-скалывания горной породы единичным элементом долота, формирующимся после окончания переходных процессов взаимодействия пары «резец-горная порода» при резании.

Доказано [1, 4, 6], что размер «установившейся» стружки (слоя) горной породы, срезаемого отдельными режущими элементами долота режущо-скалывающего действия за оборот его вращения, хорошо прогнозируется предложенной математической моделью. Другие распространенные математические модели, основанные на изучении только статического внедрения резцов в горную породу, не позволяют получить объективную картину сложных динамических процессов резания-скалывания горных пород инструментами режущо-скалывающего действия.

Экспериментально с необходимой степенью достоверности нами показано, что разработанные аналитические модели объективно существующих режимов резания-скалывания горных пород целесообразны для практического использования, как при проектировании современных инструментов режущо-скалывающего действия, в том числе и класса PDC, так и при разработке технологических режимов их эксплуатации [5, 10, 11].

***II защищаемое научное положение. Формирование новых математических моделей динамических процессов резания-скалывания горных пород для описания эффективности реальных процессов работы современных инструментов режущо-скалывающего действия необходимо проводить с учетом действия на режущие элементы «реактивной» силы  $R_x$ .***

В настоящей диссертационной работе детально изучена и показана качественная и количественная значимость характеристики  $R_x$  при анализе силовой картины динамического процесса резания-скалывания горных пород.

В частности, установлено, что  $dR_x$  – элементарная реакция породы, возникает при деформации ее под элементом торца  $dx$  за счет действия передней грани на слой горной породы при резании (рис.1).

Детальный аналитический анализ показал, что указанная силовая характеристика динамического процесса резания-скалывания горных пород единичным резцом является важной составляющей математической модели переходного процесса:

$$h_y = \frac{(G_0 - R_x - C \cdot e^{k \cdot x})}{b \cdot H_{\text{вд}} \cdot \mu}, \quad (1)$$

где  $h_y$  - переменная величина внедрения резца в горную породу в переходном периоде резания (вдоль оси Y), м;  $G_0$  – осевая нагрузка, Н;  $H_{\text{вд}}$  – динамическая твердость горной породы, Н/м<sup>2</sup>;  $b$  – ширина резца, м;  $k$  – коэффициент пропорциональности;  $R_x$  – сила реакции породы на торец резца, возникающая за счёт воздействия его передней грани на разрушаемую горную породу при перемещении вдоль оси  $x$ , Н;  $\mu$  - коэффициент трения;  $C$  – постоянная интегрирования.

При условии математически значимого перемещения резца вдоль плоскости резания, т.е. при  $x \rightarrow \infty$ , процесс работы резца выходит на стационарную стадию динамического процесса резания, а выражение (1) преобразуется в следующую формулу:

$$h_y = \frac{(G_0 - R_x)}{b \cdot H_{\text{вд}} \cdot \mu}. \quad (2)$$

Важным аналитическим выводом, полученным автором, является то, что завершение переходного периода внедрения единичного породоразрушающего элемента инструмента режуще-скалывающего действия, не только указывает на то, что динамический процесс резания-скалывания горных пород вышел на новую стационарную стадию, но и определяет величину установившейся стружки, снимаемой каждым резцом породоразрушающего инструмента с разрушаемой горной породы.

Именно размер данной стружки (слоя) горной породы согласно выражения (2), формируемой резцом под действием на него постоянной осевой силы  $G_0$ , определяет фактическую траекторию внедрения инструмента в целом при его вращении.

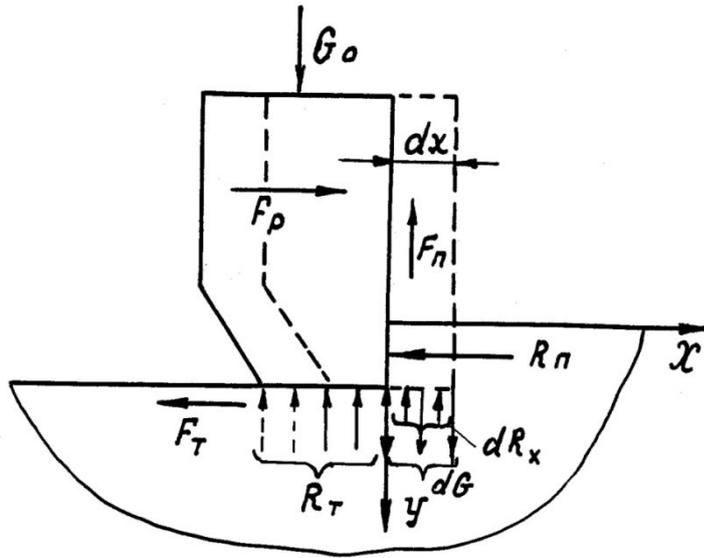


Рис.1. Схема нарушения силового равновесия при нагружении резца силами резания при его перемещении вдоль плоскости резания на элементарную величину  $dx$ .

Количественно величину  $R_x$  в формуле (2) автор предложил определить на основе известного аналитического решения Фламана-Буссинеска:

$$\sigma_h = \frac{3F \cos \varphi \sin \varphi}{2\pi r^2}, \quad (3)$$

где  $\sigma_h$  - напряжения, возникающие от силового воздействия передней грани резца на уступ твердого тела, и действующие на торец этого резца (рис.2).  $F = hb\sigma$  - сила, с которой резец воздействует на твердое тело передней гранью.  $\varphi$  - угол, характеризующий положение точки, для которой определяются напряжения  $\sigma_h$ ;  $r$  - величина, характеризующая положение точки приложения силы  $F$ .

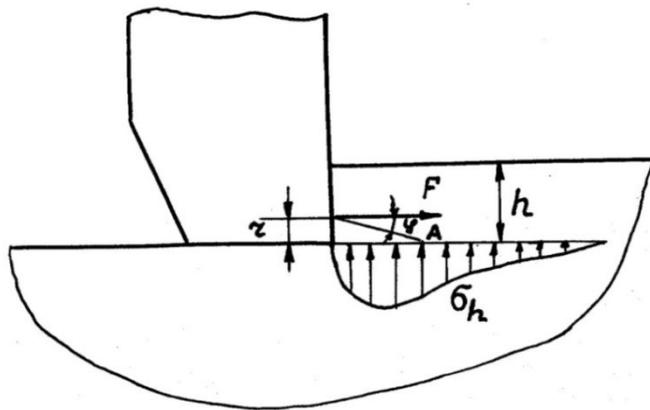


Рис. 2. Схема силового взаимодействия резца с горной породой к решению Фламана-Буссинеска

На основе известных положений кинетической теории разрушения твердых тел экспериментально установлена жесткая количественная взаимосвязь в динамической системе: «величина внешней разрушающей нагрузки – скорость распространения процесса разрушения конкретной горной породы – скорость перемещения реза вдоль плоскости резания» в процессе резания горных пород инструментами режуще-скалывающего действия при неизменной температуре процесса.

Доказано, что сила реакции горной породы  $R_{xi}$  на режущий элемент при резании стружки установленного размера  $h = const$  нелинейно возрастает с увеличением скорости перемещения резцов по буримой горной породе:  $R_{xi} = R_{x0} e^{kV_L}$  (рис.3).

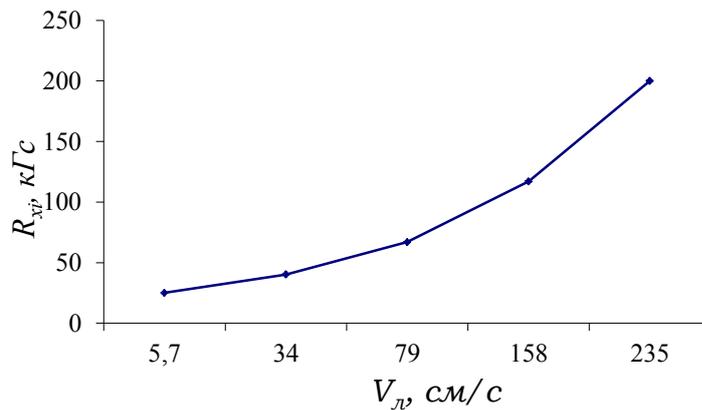


Рис. 3. Влияние линейной скорости перемещения реза  $V_L$  на осевую реакцию горной породы на торец реза при резании  $R_{xi}$ .

Окончательно математическая модель для установившегося режима процесса резания-скалывания с учетом использования решения (3) сформирована в виде:

$$h = \frac{G_0}{bH_{вд} e^{kV_L} (\mu + 0,1K_1 S_k)}, \quad (4)$$

где  $G_0$  – осевая нагрузка, Н;  $H_{вд}$  – динамическая твердость горной породы, Н/м<sup>2</sup>;  $b$  – ширина реза, м;  $K_1$  – коэффициент, характеризующий положение точки приложения горизонтальной силы резания, 1/кв.м.;  $K_1 = 1/r^2$ ;  $S_k$  – площадь торцевого контакта ПРЭ (реза) с горной породой;  $V_L$  – линейная скорость перемещения реза вдоль плоскости резания;  $K$  – эмпирический коэффициент.

В более ранних работах ряда других авторов значимость и даже существование важнейшего силового параметра  $R_x$  для физического

понимания динамических процессов в системе «резец–горная порода» отрицалась. Предполагалось, что после завершения переходных процессов в работе режущих элементов инструментов режуще-скалывающего действия параметр  $R_x$  становится ничтожно мал. Автором показан физический смысл, количественная значимость и закономерности изменения, а также технология расчета данного силового параметра динамического процесса резания-скалывания горных пород.

*III защищаемое научное положение. Аналитический вывод о стабилизации значения комплексного коэффициента сопротивления резанию  $K_p$  при наступлении объемного режима динамического процесса резания-скалывания горных пород, экспериментально подтвержденный в работе, необходимо использовать:*

*- в качестве количественного критерия достижения оптимальных режимов резания горных пород инструментами режуще-скалывающего действия;*

*- в качестве количественного показателя для проектирования характеристик высокомоментных забойных машин для механического вращательного бурения скважин с инструментом режуще-скалывающего действия;*

*- в качестве объективной базы для формирования нового метода оценки динамической твердости горных пород при резании инструментами режуще-скалывающего действия.*

Методологический подход, использованный автором в процессе изучения взаимодействия силовых характеристик динамической системы «резец-порода», заключался в следующем: контактные давления при резании-скалывании горных пород, меньшие, чем необходимые для отделения объемных частиц породы от разрушаемого массива, – так называемого «объемного разрушения» – вызывают только абразивное (контактное) истирание пород.

При этом взаимосвязь силы резания  $F_p$  и осевой нагрузки  $G_o$  определяется в общем случае значением коэффициента трения физической пары «резец – порода» в конкретной среде  $\mu$ .

Более высокие контактные нагрузки и давления, вызывающие процессы реальных объемных нарушений в горной породе и отделение ее частиц от массива при движении единичного породоразрушающего элемента, фундаментально изменяют силовую картину процесса резания: количественное взаимоотношение между силой резания и осевой нагрузкой переходит на другой уровень.

Их взаимосвязь становится существенно сложнее, и определяется не только процессами трения, через соответствующие коэффициенты трения, но

и нарастающими процессами нарушений и разрушения элементов горной породы через, условно названный нами, «коэффициент сопротивления разрушению»  $\mu_{pi}$ :

$$\frac{F_p}{G_o} = \mu + \mu_{pi}, \quad (5)$$

В физике горных пород для характеристики этой переходной стадии разрушения и формы дезинтеграции твердого тела (горных пород) используется условный термин «усталостное» разрушение.

Предложенный нами коэффициент  $\mu_{pi}$  устанавливает новую тенденцию количественного взаимоотношения между действующими силами процесса резания-скалывания горных пород в качественно новой стадии их разрушения – усталостном разрушении:

$$\mu_{pi} = \frac{\sigma_i b h_i}{G_{oi}} \quad (6)$$

где  $\sigma_i$  – текущее сопротивление горной породы разрушению при снятии стружки глубиной  $h_i$  резцом, имеющим ширину  $b$ .

Предложено суммарную величину двух выше указанных характеристик рассматривать как коэффициент, названный нами «комплексным коэффициентом сопротивления резанию  $\langle K_{pi} \rangle$ »:

$$K_{pi} = \mu + \mu_{pi} \quad (7)$$

Приложение к резцу на очередном этапе процесса резания-скалывания более высоких осевых разрушающих нагрузок на горную породу будет приводить к закономерному росту абсолютных значений силы резания, коэффициента  $\mu_{pi}$ , а следовательно, и комплексного коэффициента  $K_{pi}$ .

Однако важно подчеркнуть, что такой процесс объективно происходит до определенных пределов. При дальнейшем росте абсолютных значений прикладываемых сил резания и, как следствие, объемов разрушения от движущегося резца, в конкретной системе «резец–порода» наступает момент достижения предела твердости породы  $\sigma_i = H_{вд}$ . Такое состояние процесса резания-скалывания влечет стабилизацию коэффициентов  $\mu_{pc}$  и  $K_{pc}$ , а следовательно и количественной пропорции между силами резания – осевой нагрузкой  $G_o$  и горизонтальной силой резания  $F_p$  (крутящим моментом для долота), и объективно свидетельствует о завершении «истирающе-усталостного» режима динамического процесса резания-скалывания породы.

Процесс резания-скалывания переходит в качественно новую, объемную стадию:

$$K_{pc} = \frac{F_p}{G_o} = const, \quad (8)$$

где  $F_p = hb \cdot H_{\text{вд}}$  – сила резания, действующая в момент завершения начального «истирающе-усталостного» режима процесса резания-скалывания породы и перехода его в установившуюся объемную стадию.

Дальнейший рост механических нагрузок на режущий элемент не может изменить количественного взаимоотношения между осевой и горизонтальной силами резания, определяемого коэффициентом  $K_{pc}$  в связи с отсутствием объективных предпосылок для изменения и роста его составляющих – коэффициентов трения и сопротивления объемному разрушению.

Данный вывод о стабилизации значения комплексного коэффициента сопротивления резанию  $K_{pc}$  при наступлении объемного режима процесса резания-скалывания горных пород получил экспериментальное подтверждение при резании образцов горных пород на лабораторном стенде УМР (рис.6).

На рис. 4 представлены экспериментальные данные взаимосвязи нагрузки внедрения резца и величины  $K_p$ . Они свидетельствуют о том, что при определенных осевых нагрузках на резец при резании-скалывании горной породы взаимосвязь между осевой и горизонтальной силами резания стремится к стабилизации.

На основании анализа полученных результатов предложено использовать стабилизацию параметра  $K_p = K_{pc}$  в качестве объективного количественного критерия достижения оптимальных режимов резания горных пород инструментами режуще-скалывающего действия.

Более того, в качестве базовой характеристики для расчета нового показателя – динамической твердости горных пород при резании инструментами типа режуще-скалывающего действия, – предложено использовать значение осевой силы в момент стабилизации коэффициента  $K_{pc}$ , или выхода на объемное разрушение при резании. При обосновании новой методики определения динамической твердости горных пород это оказалось важным и рациональным решением.

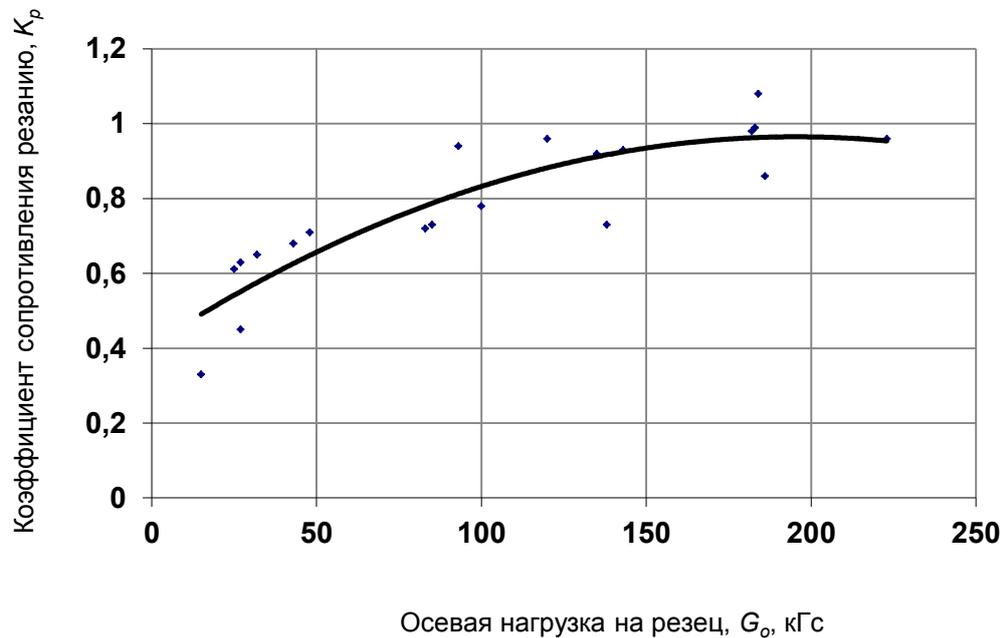


Рис. 4. Зависимость коэффициента сопротивления резанию от осевой нагрузки на единственный резец

Практическим применением научного факта стабилизации показателя  $K_{pc}$  при резании-скалывании горных пород стало использование его в качестве количественного показателя для проектирования характеристик высокомоментных забойных машин для механического вращательного бурения скважин с инструментами режуще-скалывающего действия.

Если для горных пород данного геологического разреза экспериментально в соответствии предложенной методикой получена характеристика горных пород  $K_p$ , то определение удельного момента  $m$  [9] можно произвести на базе этого нового показателя. Нетрудно установить, что  $K_p$  имеет с показателем  $m$  взаимосвязь вида:

$$m = K_p R_d, \quad (9)$$

где  $R_d$  – радиус долота.

Усредненные значения удельных моментов  $m$  для нефтегазовых месторождений Западной Сибири, рассчитанные по формуле 9 для объемного режима разрушения горных пород и по результатам испытаний гидравлических забойных двигателей (ГЗД) и электробуров, приведены в таблице 1.

Из таблицы 1 видно, что расчетные данные формулы 8 превышают результаты испытаний более чем в 2 раза.

Таблица 1.

Регион	Тип долота	Удельный момент, $m$	
		по формуле 8 (объемное разрушение)	при испытании ГЗД
Западная Сибирь, нефтегазовые месторождения Тюменской и Томской областей	PDC – диаметром 190,5–295,3 мм)	0,09 – 0,15	0,040 – 0,050

Данное сравнение свидетельствует о том, что массовые испытания ГЗД для получения статистической величины  $m$  производились на режимах разрушения горных пород, значительно отличающихся от оптимальных, т.е. объемных режимов резания-скалывания.

Для случая реализации истирающего, или усталостно-истирающего режима работы инструментов с алмазно-твердосплавными пластинами фактические и расчетные данные различаются менее значительно (табл.2).

Использование предложенных расчетных значений показателя  $m$  при обосновании энергетических характеристик гидравлических забойных двигателей предпочтительно вследствие большей точности определения базовых значений  $K_p$  для конкретной горной породы.

Таблица 2.

Регион	Тип долота	Удельный момент, $m$	
		по формуле 8 (усталостно- истирающее разрушение)	при испытании ГЗД
Западная Сибирь нефтегазовые месторождения Тюменской и Томской областей	PDC – диаметром 190,5–295,3 мм)	0,06 – 0,08	0,04 – 0,05

Таким образом установлено, что предложенный автором показатель  $K_p$  может использоваться в ведомственной методике по проектированию

забойных двигателей при использовании современных инструментов типа PDC на оптимальных режимах разрушения горных пород.

*IV защищаемое научное положение. Оценку сопротивления горных пород разрушению при работе инструментов режуще-скалывающего действия необходимо производить на основе нового показателя динамической твердости  $H_{вд}$ , научное обоснование которого, разработка требований к его количественному определению и техническим средствам для измерительного процесса представлено в настоящей диссертационной работе.*

Физическая обоснованность общеизвестного в настоящее время способа оценки твердости горных пород Л.А. Шрейнера, основанного на процессе статического внедрения индентора в горную породу, не вызывает сомнений применительно к работе инструментов дробяще-скалывающего действия, т.к. полно моделирует основной процесс взаимодействия вооружения шарошечного породоразрушающего инструмента с горной породой. В свое время метод применялся в соответствии с ГОСТ 12288–66 «Горные породы. Метод определения механических свойств вдавливанием пуансона».

Однако очевидно, что процесс разрушения горных пород при использовании инструментов режуще-скалывающего действия не может моделироваться только статическим вдавливанием. Физическая картина динамического по природе процесса резания-скалывания горных пород значительно сложнее.

Известны также и другие технологические ограничения метода Л.А. Шрейнера, связанные с обязательным условием регистрации упруго-пластичного или хрупкого разрушения горной породы – «выкола». В пластичных породах подобного явления не наблюдается.

В связи с изложенным, была поставлена научная задача: изучить и разработать новый критерий оценки твердости горных пород для условий динамического процесса их разрушения инструментами режуще-скалывающего действия.

При исследовании вопроса и разработке нового показателя динамической твердости горных пород для условий резания исходили из соблюдения ряда важных методологических требований:

1. Формализация критерия оценки динамической твердости горных пород при резании должна содержать по возможности максимальную преемственность к существующим общепринятым показателям, чтобы облегчить его физическое понимание и технологию определения.

2. Количественная оценка показателя должна определяться с использованием технических и методических средств, полно и точно моделирующих реальную работу породоразрушающих элементов инструментов режуще-скалывающего действия, в том числе и PDC.

3. Наличие проектируемого показателя должно обеспечить методическую возможность оценки «динамической твердости» большинства категорий и разновидностей горных пород, в том числе и большого класса мягких пластичных горных пород, чего не позволяют другие методики.

4. Расчетные значения нового показателя динамической твердости горных пород должны быть применимы для использования в различных формализованных моделях для получения показателей работы конкретных типоразмеров инструментов режуще-скалывающего действия, для чего другие показатели твердости не применимы в полной мере, вследствие другой физической природы метода их определения.

В связи с изложенным автором для целей количественной оценки прочностных свойств горных пород при резании-скалывании предложен показатель динамической «твердости»  $H_{60}$ , математическая модель которого использует наработки наиболее применимых до настоящего времени методик.

В частности, представленное ниже выражение автора несет, в известной степени, элементы формализованной преемственности расчета критерия оценки статической твердости горных по Л.А. Шрейнеру –  $H_6$ :

$$H_{60} = R_6 / S_k, \text{ Н}\cdot\text{м}^2, \quad (10)$$

где  $R_6$  – выталкивающая резец (индентор) сила (рис. 5), Н, возникающая в процессе резания-скалывания образца горной породы при установившемся значении коэффициента сопротивления резанию  $K_{pc}$ ;  $S_k$  – торцевая площадь контакта режущего элемента установленной для методики формы и размеров с исследуемой горной породой,  $\text{м}^2$ .

Однако, несмотря на формализованную идентичность методов, предложенная величина  $H_{60}$  несет в себе количественную характеристику более сложного динамического процесса разрушения горной породы резанием-скалыванием.

Для получения количественных значений нового показателя предложена схема проведения измерений по методу «жестко фиксированного резца» (рис.5). Сущность процесса единичного измерения заключается в следующем:

1. Породоразрушающий элемент (резец), установленной для данной методики формы и размеров, закрепляется в силоизмерительном устройстве, жестко зафиксированном на массивном основании.

2. В целях достижения технологичности и точности измерений производится «строгание» исследуемого образца горной породы в процессе его перемещения (протягивания) относительно неподвижного резца, имеющего нулевой передний угол резания.

3. Процесс строгания (резания) в целях достижения точного моделирования работы режущих элементов буровых долот производится при переменной толщине снимаемого слоя (уступа)  $h_i$ , от нулевого значения, до момента достижения установившегося (максимального) значения коэффициента  $K_{pc}$  – т.е. в режиме объемного разрушения.

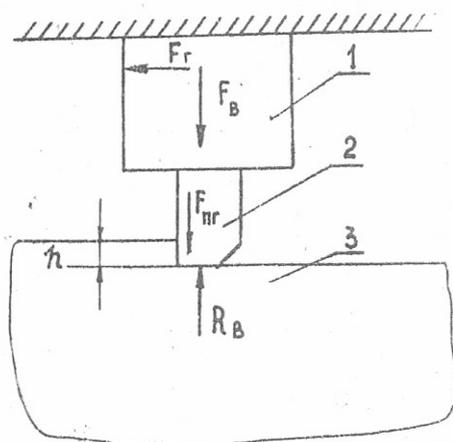


Рис. 5. Схема процесса резания-скалывания образца породы с жестко фиксированным резцом в силоизмерительном устройстве

Таким образом, схема и методика получения исходных данных для расчета показателя наглядно и сравнительно точно моделирует работу резцового инструмента во всех режимах разрушения горных при их резании-скалывании, что отвечает установленным требованиям.

Необходимо обратить внимание на еще один аспект технологии и технической реализации измерительного процесса нового показателя: использование экспериментальной установки УМР (рис. 6) позволяет проводить оценку динамической твердости практически для всего спектра не сыпучих горных пород, включая самые мягкие, пластичные породы осадочного комплекса нефтегазовых и угольных месторождений.

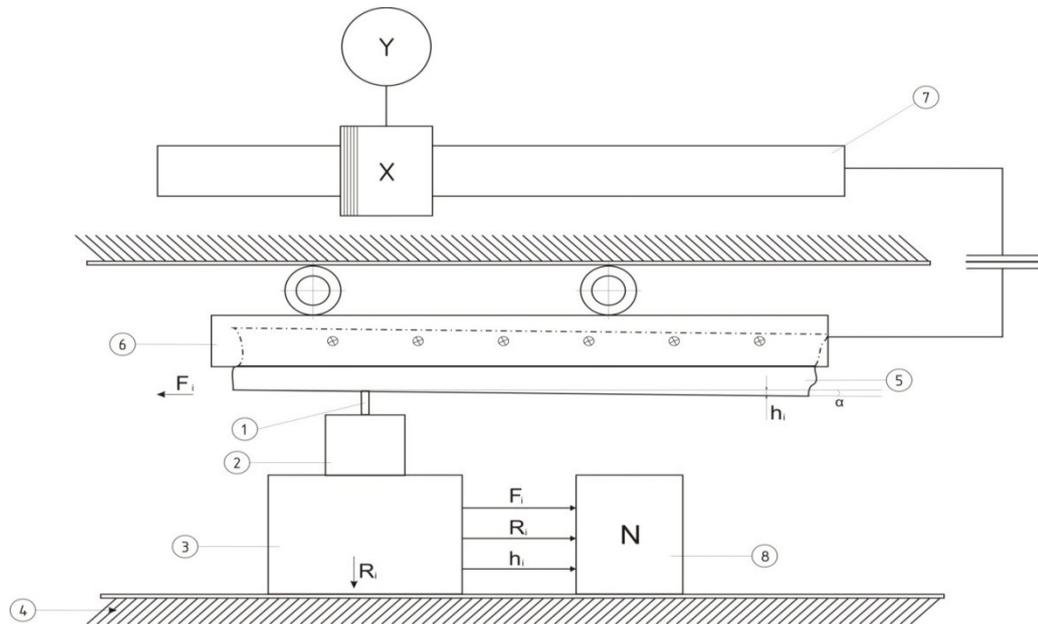


Рис.6. Лабораторный комплекс УМР для определения динамической твердости горных пород

Решение указанных задач и требований в установке реализовано за счет того, что регистрирующее силовое устройство 3 с режущим элементом 1 в держателе 2 размещено неподвижно на массивной платформе 4, а закрепленный в зажимном устройстве 5 образец горной породы 6, перемещается специальным механизмом 7 относительно этого режущего элемента (рис. 6).

В качестве исследуемых образцов горных пород использовался скважинный керн различных диаметров (от 40 до 100 мм) и длиной не менее 15 см. Образец керна фиксировался на подающей раме под определенным, зафиксированным углом  $\alpha$  к плоскости движения механизма. Такое техническое решение позволило после полного прохода керна вдоль закрепленного резца получать в горной породе нарастающий по глубине «след» от срезанной горной породы  $h_i$ .

При этом необходимо подчеркнуть, что за один эксперимент фактически удается провести моделирование силовой картины резания керна образца во всех известных режимах разрушения горных пород – от истирания, до объемного разрушения. Последнее важно при получении необходимых силовых характеристик для расчета показателя динамической твердости.

Силовые параметры на режущем элементе – осевая реактивная сила  $R_i$  и сила резания  $F_i$ , – регистрируются цифровым динамометром, усиливаются и записываются после преобразования на прикладном обеспечении типа NetForce на компьютер 8.

В диссертационной работе решен полный комплекс задач для целей практической реализации нового способа оценки показателя динамической твердости горных пород при их резании-скалывании, в частности:

а) на базе сформулированных научных требований разработана установка для экспериментальной реализации нового способа оценки динамической твердости горных пород при резании, моделирующая динамический процесс резания-скалывания пород на всех известных режимах разрушения – от истирания, до объемного резания;

б) разработана технологичная схема экспериментального измерительного процесса массовой подготовки исходных данных для расчета нового показателя динамической твердости горных пород при работе инструментов режуще-скалывающего действия в режиме их объемного разрушения;

в) проведены экспериментальные исследовательские работы, направленные на наработку статистического материала и выполнение сравнительного анализа результатов, полученных с использованием разработанных технических средств и технологических схем нового метода оценки твердости для условий процесса резания-скалывания горных пород.

*У защищаемое научное положение. При совершенствовании технико-технологических и эксплуатационных характеристик современных инструментов режуще-скалывающего действия класса PDC необходимо комплексно рассматривать кинематические и динамические закономерности совместной работы различных групп разрушающих элементов в корпусе долота с учетом:*

*а) разной степени динамического упрочнения участков горной породы на периферии и вблизи оси инструмента;*

*б) различий в геометрии расположения периферийных и внутренних групп резцов относительно собственных динамических плоскостей резания.*

Важным направлением развития сформированной научной базы оценки процессов разрушения горных пород инструментами режуще-скалывающего действия, является исследование условий работы породоразрушающих элементов – резцов, совместно функционирующих в составе долота.

Это связано, главным образом с тем, что представленные закономерности поведения разрушаемых горных пород под действием единичных режущих элементов, должны быть обоснованно и дифференцированно перенесены на случай рассмотрения функционирования единого конструктивного комплекса, каким является реальное долото (породоразрушающий инструмент).

При сравнительном рассмотрении процессов резания горных пород единичными резцами и разрушения пород при бурении скважин

породоразрушающими инструментами режуще-скалывающего действия необходимо учитывать:

а) размещение в долоте на одной траектории резания вдоль одной плоскости перемещения одновременно нескольких режущих элементов приводит к усложнению качественной картины только начального переходного периода работы породоразрушающего инструмента в целом.

б) установка на одном радиальном сегменте (лопасти) долота одновременно нескольких режущих элементов-резцов:

- перемещающихся вокруг оси инструмента по окружностям с собственными пространственными спиралями движения, и различными геометрическими параметрами взаимодействия с динамической плоскостью резания;

- имеющим различные пути резания и пропорционально им различные скорости динамического процесса резания-скалывания

приводит к возникновению различных условий их работы при резании-скалывании горных пород.

В стационарной стадии резания-скалывания горных пород долотами типа PDC, нагруженными постоянной силой  $G$  и вращающим моментом  $M_v$ , каждый резец перемещается по собственной траектории в форме пространственной спирали с углом  $\alpha_i$ . При этом шаг спирали в соответствии с аналитической моделью (2) является одинаковым для всех резцов, и равным углубке долота за один оборот –  $\delta$  (рис.7).

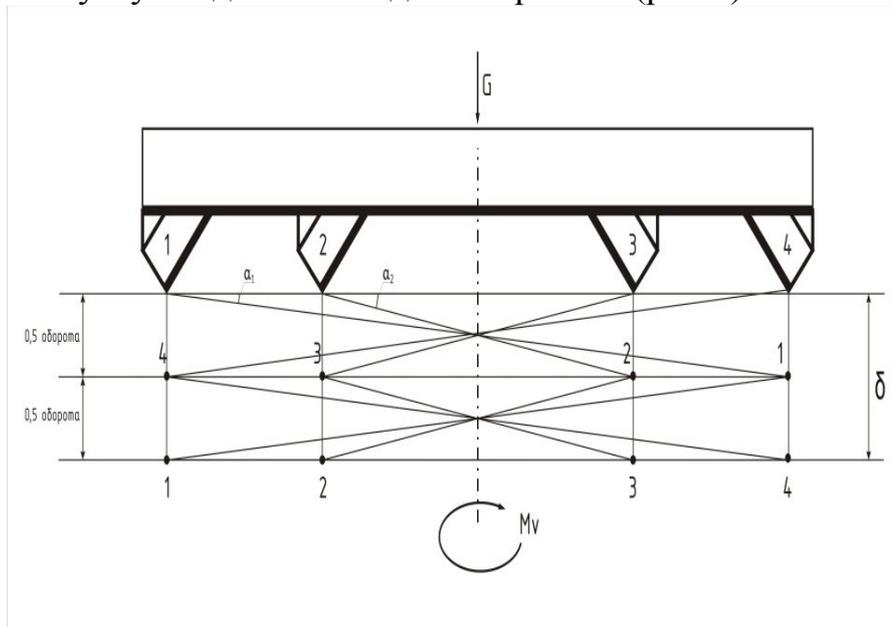


Рис.7. Схема перемещения резцов долота PDC: 1–4 – резцы типа Stratapax™, закрепленные в корпусе долота;  $G$  – осевая нагрузка на долото;  $M_v$  – крутящий момент на долоте;  $\delta$  – углубка инструмента за оборот;  $\alpha_i$  – углы наклона траектории внедрения резцов.

В связи с тем, что время одного оборота для всех резцов при неизменной частоте вращения долота одинаково, линейная скорость перемещения резцов в процессе бурения долотами PDC вдоль динамической плоскости резания горной породы, располагающихся на внешнем сегменте корпуса долота, на порядки превышает скорость движения «внутренних» резцов.

На основе установленной в работе количественной взаимосвязи в динамической системе: «осевая нагрузка – скорость перемещения резца вдоль плоскости резания – глубина срезаемого слоя» (рис.3) в процессе резания-скалывания горных пород инструментами режуще-скалывающего действия экспериментально подтверждено более значимое «скоростное упрочнение» горной породы для резцов долота, размещенных на его периферии.

Таким образом, в процессе работы долота режуще-скалывающего действия периферийные и внутренние породоразрушающие элементы фактически разрушают горную породу, проявляющую различные прочностные механические характеристики в зависимости от радиуса их размещения в корпусе долота. Динамическая твердость горной породы экспоненциально возрастает от внутренних участков забоя к периферийным участкам буримой горной породы.

На основе вышеуказанного контактные давления периферийных и внутренних резцов, жестко закрепленных в корпусе долота, значительно отличаются друг от друга.

Для приведения текущих контактных давлений для резцов различных сегментов корпуса долота к одинаковым значениям предлагается *использовать резцы размерного ряда обратно пропорционального величине действующих реактивных нагрузок.*

Кроме того, установлено, что для поддержания одинаковых условий работы различных групп резцов по отношению к текущей динамической плоскости резания горной породы необходимо системно изменять геометрию их размещения в корпусе долота по мере уменьшения радиуса вращения каждого резца.

Критерием оптимальности углов установки резцов в корпусе долота PDC на периферийных и внутренних венцах предложено считать характеристику *«неизменности проектных значений угла резания  $\alpha_i$  для всех групп резцов долота относительно собственной динамической плоскости резания каждой группы».*

Предложенные критерии целесообразно использовать при проектировании конструкций современных долот режуще-скалывающего действия для повышения эффективности их работы при бурении скважин.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследований представляют собой законченную научно-квалификационную работу, в которой решена крупная научная проблема – разработан новый научный метод оценки эффективности динамических процессов разрушения горных пород инструментами режущо-скалывающего действия, что имеет важное научно-практическое значение в области геологоразведочного, а также промышленного бурения нефтяных и газовых скважин.

### *Основные научные и практические результаты исследований:*

Представленные научные результаты в необходимом для практического использования объеме детализируют выполненный автором комплекс аналитического и экспериментального изучения динамического процесса разрушения горных пород инструментом режущо-скалывающего действия с резцами типа Stratapax<sup>TM</sup> в рамках нового научного направления по методике оценки прочностных свойств и эффективности разрушения горных пород резанием-скалыванием при бурении скважин.

В частности:

1. Сформирована математическая модель динамической системы «резец – горная порода» в переходном процессе от «статического вдавливания» к «динамическому резанию» единичными породоразрушающими элементами инструментов режущо-скалывающего действия. Установлено, что траектория движения резца в переходной стадии процесса носит экспоненциальный характер, конкретные показатели которой зависят от уровня действующих сил резания, прочностных свойств породы и собственных параметров породоразрушающих элементов.

2. Разработана новая математическая модель установившегося (стационарного) процесса резания горной породы единичным элементом инструмента режущо-скалывающего действия, формирующегося после окончания переходных процессов взаимодействия пары «резец-горная порода» при резании-скалывании. Установлено, что размер «установившейся» стружки (слоя) горной породы, оцениваемый сформированной математической моделью, определяет, как траекторию внедрения отдельных режущих элементов, так и величину углубления долота режущо-скалывающего действия за оборот его вращения.

3. Показана логическая взаимосвязь полученных моделей переходного и установившегося динамического процесса резания горных пород единичными разрушающими элементами инструментов режущо-скалывающего действия. Доказано, что другие распространенные

математические модели, основанные на изучении только статических процессов, или только процессов внедрения резцов в горную породу, не позволяют получить объективную картину сложных динамических процессов резания горных пород инструментами режуще-скалывающего действия. Разработанные аналитические модели объективно существующих динамических режимов резания–скалывания горных пород получили необходимое экспериментальное подтверждение в настоящей работе, что позволяет их рекомендовать для практического использования при разработке технологии и проектировании современных инструментов режуще-скалывающего действия, в том числе и класса PDC.

4. Аналитически доказан процесс стабилизации количественного взаимодействия осевой и горизонтальной сил резания при выходе на объемный режим разрушения буримых горных пород на основе комплексного коэффициента сопротивления резанию  $K_p$ . Указанный процесс получил экспериментальное подтверждение, что позволило впервые предложить показатель  $K_p$  для использования в важнейших практических приложениях, в частности:

- в качестве объективного количественного критерия достижения оптимальных динамических режимов резания горных пород инструментами режуще-скалывающего действия;

- в качестве количественного показателя для проектирования характеристик высокомоментных забойных машин для механического вращательного бурения скважин с инструментами режуще-скалывающего действия;

- в качестве объективной базы для формирования нового метода оценки динамической твердости горных пород при резании инструментами режуще-скалывающего действия.

5. Исследована практическая и научная целесообразность разработки показателя «динамической твердости» горных пород для объективной оценки их поведения при работе инструментов режуще-скалывающего действия. Доказано, что разработка и использование нового показателя «динамической твердости горных пород»  $H_{ed}$  и методики его экспериментального определения является актуальным методологическим шагом в развитии технологии оценки прочностных свойств горных пород при работе инструментов режуще-скалывающего действия для практических потребностей буровой геологоразведочной индустрии.

В частности:

5.1. Новая научная методика определения показателя динамической твердости позволяет дать относительные количественные характеристики

прочностных свойств всего спектра горных пород – от пластичных мягких пород, до упруго-пластичных и упруго-хрупких, относящихся к мягким, средним и твердым категориям.

5.2. Показатель динамической твердости имеет целый ряд важных положительных характеристик, показывающих целесообразность его статистического накопления и широкого использования для оценки сопротивляемости внедрению практически всех классов горных пород при работе инструментов режуще-скалывающего действия:

- количественная величина показателя определяется по методике, которая физически полно и точно моделирует работу современных инструментов режуще-скалывающего действия;
- с помощью данного показателя возможна объективная оценка «динамической твердости» практически всех категорий и разновидностей пород, в том числе и большого класса мягких пластичных горных пород, чего другие методики не позволяют в принципе;
- предлагаемая характеристика оценки сопротивления разрушению горных пород при резании  $H_{60}$  позволяет более полно и точно воспроизвести реальное силовое взаимодействие горных пород и разрушающих их режущих элементов.
- конкретные значения показателя  $H_{60}$  целесообразно использовать в различных формализованных моделях для расчетов параметров работы конкретных типоразмеров инструментов режуще-скалывающего действия, чего другие показатели не позволяют, вследствие другой физической природы метода их определения.

5.3. Разработаны научные требования к методике и экспериментальной установке моделирования и количественной оценке механических свойств горных пород типа УМР для условий их разрушения инструментами режуще-скалывающего действия, которая рекомендуется к использованию в процедуре стандартизации методики.

5.4. В полном объеме детализирована технология экспериментального измерительного процесса показателя «динамической твердости»  $H_{60}$  с использованием универсальной установки моделирования разрушения (УМР) горных пород резанием. Получена типовая картина силового взаимодействия в процессе резания-скалывания, характеризующая различные фазы разрушения горной породы: переходный, истирающе-усталостный процесс

разрушения, и стационарное объемное разрушение исследуемой горной породы.

5.5. Получены результаты начального этапа экспериментальных процедур по количественной оценке динамической твердости  $H_{вд}$  ограниченной выборки горных пород, представляющих вмещающий разрез ряда нефтегазовых и угольных месторождений Западной Сибири. Материалы могут быть использованы при практическом выделении пачек горных пород по буримости.

6. Получены важные кинематические и динамические закономерности совместной работы различных групп разрушающих элементов в корпусе долота с учетом различной степени динамического упрочнения горных пород, размерных характеристик и геометрии расположения групп резцов относительно собственных динамических плоскостей резания.

В частности:

6.1. Установлено, что в процессе работы долота режуще-скалывающего действия периферийные и внутренние породоразрушающие элементы фактически встречают сопротивление различных по механическим прочностным характеристикам участков буримой горной породы. Твердость горной породы экспоненциально возрастает от внутренних участков забоя к периферийным. Этот факт является прямым следствием более значимого «скоростного упрочнения» горной породы для резцов долота, размещенных на его периферии.

6.2. Доказано, что контактные нагрузки периферийных и внутренних резцов, жестко закрепленных в корпусе долота, значительно отличаются друг от друга. Для приведения текущих контактных давлений для резцов различных сегментов корпуса долота к одинаковым значениям предлагается использовать резцы с размерами обратно пропорциональными действующим нагрузкам.

6.3. Установлено, что для поддержания одинаковых условий работы различных групп резцов по отношению к динамической плоскости резания горной породы необходимо системно изменять геометрию их размещения в корпусе долота по мере уменьшения радиуса вращения каждого резца. Критерием оптимальности углов установки резцов в корпусе долота на периферийных и внутренних венцах предложено считать характеристику «неизменности значений угла резания  $\alpha_i$  для всех групп резцов долота относительно динамической плоскости резания каждой группы».

## Список основных публикаций по теме диссертации:

### Издания ВАК:

1. Борисов К.И. Методика оценки эффективности процесса динамического резания горных пород инструментами режущее-скалывающего действия. – Нефтяное хозяйство. – № 8. – 2008. – С.112–113.
2. Борисов К.И. Методика оценки динамических прочностных свойств горных пород и эффективности процесса разрушения горных пород инструментами режущее-скалывающего действия. – Бурение и нефть. – 2008. – № 1. – С.24-27.
3. Борисов К.И. Экспериментальная количественная оценка силовых характеристик резания горных пород // Известия ВУЗов ТПУ. – Т 305. – Вып. 8. – 2002. – С. 216–219.
4. Борисов К.И. Прикладные аспекты нового научного метода оценки свойств и эффективности процесса разрушения горных пород. – Бурение и нефть. – 2010. – № 3. С.24–27.
5. Борисов К.И. Динамика работы резцов в процессе разрушения горных пород инструментами режущее-скалывающего действия типа PDC // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т.317. – №1. – С. 161-164.
6. Борисов К.И. Актуальные научные и прикладные вопросы развития нового научного метода оценки свойств и эффективности динамического разрушения горных пород инструментами режущее-скалывающего действия типа «PDC» // Вестник Ассоциации Буровых подрядчиков. – 2010. - №3. – С. 8–16.
7. Борисов К.И. Разработка научного метода объективной оценки процессов динамического разрушения горных пород инструментами режущее-скалывающего действия класса PDC (часть I) // Инженер-нефтяник. – 2010. – №4. – С. 23–26.
8. Борисов К.И. Разработка научного метода объективной оценки динамического разрушения горных пород инструментами режущее-скалывающего действия класса PDC (часть II) // Инженер-нефтяник. – 2011. – № 1. – С.31-35.
9. Борисов К.И. Научная база нового метода оценки эффективности процессов разрушения горных пород современными инструментами режущее-скалывающего действия // Вестник ЦКР Роснедра. – 2011. – № 4. – С.51-58.

### Издания, не включенные в перечень ВАК:

10. Борисов К.И. Исследование сил резания горных пород твердосплавными резцами. – В сб. Технология и техника геологоразведочных работ // М.: изд. МГРИ. – вып. 5. – 1982. – С. 117–126.
11. Борисов К.И. Основные положения научной методики оценки процесса динамического резания горных пород при бурении скважин // В сб.: «Минерально-сырьевая база Сибири: история становления и перспективы» Изд. ТПУ. – 2009 - Том 1. – С.38–40.
12. Борисов К.И., Сулакшин С.С. Исследование закономерностей разрушения горных пород резцами в динамическом режиме резания // В сб. Разрушение горных пород при бурении скважин. Т.1. – Вып. 3. – Уфа. – 1982. – С. 137–141.
13. Борисов К.И. Определение сопротивляемости породы разрушению при резании. – В сб. Технология и техника геологоразведочных работ // М.: изд. МГРИ. – вып. 10. – 1987. – С.28-30.

14. Сулакшин С.С., Борисов К.И. Результаты аналитического и экспериментального определения глубины внедрения единичного резца в горную породу // В сб. «Технология и техника геологоразведочных работ. – №8. – изд. МГРИ. – 1985. – С. 61–66.
15. Борисов К.И. Экспериментальная количественная оценка силовых характеристик резания горных пород // В сб.: «Нефтегазовому образованию в Сибири – 50 лет». – Изд. ТПУ. – 2002. – С.255–257.
16. Борисов К.И. Влияние скорости резания на коэффициент сопротивления резанию горных пород // В сб.: «Нефтегазовому образованию в Сибири – 50 лет». – Изд. ТПУ. – 2002. – С.254–255.
17. Борисов К.И. Количественная оценка важнейших силовых характеристиках разрушения горных пород при резании // В сб.: «Проблемы научно-технического прогресса в бурении скважин. – Изд. ТПУ. – 2004. – С.38–42.
18. Борисов К.И. Влияние скорости движения породоразрушающих элементов на величину сил резания // Механика горных пород при бурении: Труды научно-практ. конф. п. Агой – 1986. – Грозный. – 1986. – С.47–49.
19. Сулакшин С.С., Рябчиков С.Я., Чубик П.С., Борисов К.И. Совершенствование технологии бурения скважин в Горловском угольном бассейне // Отчет о НИР, Томск, ТПУ, № ГР 0188.0041444-9-78-15/7.(М.: ВНИЦентр, законч. работа) – 1978. – 144 с.
20. Сулакшин С.С., Рябчиков С.Я., Борисов К.И. Совершенствование технологии бурения скважин в Горловском угольном бассейне // Отчет о НИР, Томск, ТПУ, № ГР 0280.02152.(М.: ВНИЦентр, законч. работа) – 1986. – 155 с.
21. Сулакшин С.С., Рябчиков С.Я., Борисов К.И. Исследование, разработка и внедрение прогрессивной технологии и техники бурения геологоразведочных скважин // Отчет о НИР, Томск, ТПУ, № ГР 0287.0023938.(М.: ВНИЦентр, законч. работа) – 1980. – 85 с.
22. Рябчиков С.Я., Борисов К.И., Письмеров А.С. Исследование и реализация путей снижения абразивного износа породоразрушающего инструмента // Сб.матер.3-ей Всесоюзной научно-технич. Конф. «Разрушение горных пород при бурении скважин». – Уфа, 1989. – С. 17–19.
23. Борисов К.И., Паласухин А.Н. Изучение параметров износа долотных материалов // В сб.: «Проблемы научно-технического прогресса в бурении скважин. – Изд. ТПУ. – 1991. – С.102–106.
24. Борисов К.И. Исследование работы коронок режуще-скалывающего действия с целью повышения эффективности их применения при бурении геологоразведочных скважин: дис. ...канд.техн.наук. – Томск, 1981. – С.218.