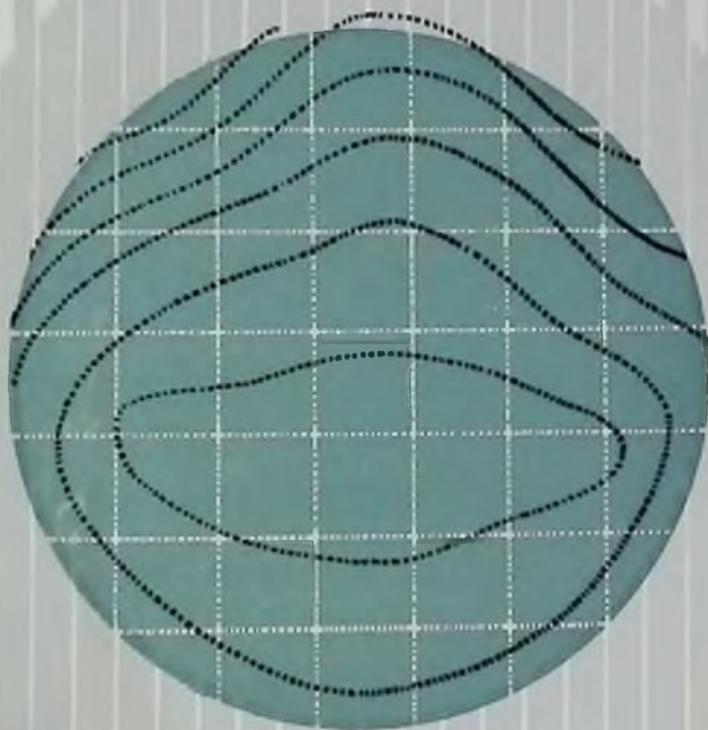


622.23

с 72

# АБРАЗИВНОСТЬ ГОРНЫХ ПОРОД

А.И. СПИВАК



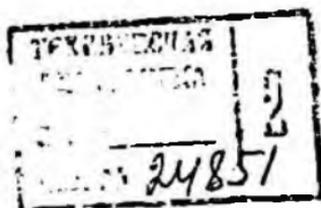
77 2004

А. И. СПИВАК

622.23

С 72

# АБРАЗИВНОСТЬ ГОРНЫХ ПОРОД



ИЗДАТЕЛЬСТВО „НЕДРА“  
Москва • 1972

А. И. Спивак. Абразивность горных пород. М., «Недра», 1972, стр. 240

В книге излагаются результаты исследования абразивности осадочных горных пород применительно к условиям их разрушения при бурении скважин. Приводится анализ исследований, посвященных изучению абразивности горных пород. Описываются методики и экспериментальные установки для изучения абразивности горных пород. Рассматривается влияние различных факторов на абразивную способность горных пород. Определяется напряженность работы элементов вооружения шарошечных долот, описываются примеры количественной оценки скорости абразивного изнашивания закаленной стали с помощью уравнений регрессии и номограмм. Рассматриваются основные направления по применению результатов изучения абразивности горных пород для анализа и расчета абразивного изнашивания вооружения шарошечных долот. Даются основные принципы классификации горных пород по абразивности.

Книга предназначена для инженерно-технических и научных работников нефтяной промышленности и геологической службы, занятых бурением скважин, изучением долговечности буровых долот, а также для конструкторов долотных заводов.

Таблиц 39, иллюстраций 77, список литературы — 213 названий.

7-8-2  
227-72

## АЛЕКСАНДР ИВАНОВИЧ СПИВАК АБРАЗИВНОСТЬ ГОРНЫХ ПОРОД

Редактор издательства Т. А. Чопорова  
Технические редакторы Е. А. Ермакова, Л. Г. Лаврентьева  
Корректор В. И. Капульская

Сдано в набор 24/V 1972 г. Подписано в печать 25/IX 1972 г. Т-16023.  
Формат 84 × 108<sup>1</sup>/<sub>32</sub>. Бумага № 2. Печ. л. 7,5. Усл. печ. л. 12,6.  
Уч.-изд. л. 12,6. Тираж 1600 экз. Заказ 1761/3905-5. Цена 1 р. 27 к.

Издательство «Недра», 103033, Москва, К-12, Третьяковский проезд, 1/19.  
Ленинградская типография № 8 Главполиграфпрома Комитета по печати при Совете Министров СССР, Московский проспект, 91

*Памяти профессора  
Леонида Александровича  
Шрейнера посвящаю*

## ПРЕДИСЛОВИЕ

В книге изложены основные результаты исследования абразивности горных пород применительно к условиям их разрушения при бурении скважин. Начало этих исследований было положено в 1954 г. в лаборатории механики горных пород Московского нефтяного института им. акад. И. М. Губкина под руководством профессора Л. А. Шрейнера. Позже под руководством автора исследования были продолжены в отраслевой лаборатории кафедры бурения нефтяных и газовых скважин Уфимского нефтяного института. В разработке отдельных вопросов абразивности горных пород в разное время непосредственное участие принимали канд. техн. наук П. С. Баландин, А. Н. Попов, Г. В. Конесев, инж. Б. Н. Трушкин и др.

Большую помощь автору при выполнении экспериментальных работ оказали сотрудники отраслевой лаборатории бурения, руководимой доц. М. Р. Мавлютовым. Всем этим товарищам автор выражает глубокую благодарность.

В связи с тем, что книга по данной тематике пишется впервые, в ней возможны недоработки. Автор будет благодарен читателям за критические замечания.

Все отзывы и замечания просьба направлять в издательство «Недра» по адресу: Москва, К-12, Третьяковский проезд, дом 1/19 или на кафедру «Механика горных пород, грунтов, оснований и фундаментов» Уфимского нефтяного института по адресу: Уфа 62, ул. Космонавтов, дом 1.

## ВВЕДЕНИЕ

Постоянно растущие потребности нашей страны в нефти и нефтепродуктах требуют от работников нефтедобывающей промышленности, в частности от буровиков, наращивания темпов ввода новых нефтеносных площадей в эксплуатацию, а следовательно, и неуклонного повышения скоростей бурения скважин.

Известно, что на скорости бурения скважин, помимо многих других факторов, решающее влияние оказывает бесперебойная работа буровых механизмов и машин, которые эксплуатируются в крайне тяжелых условиях, подвергаясь интенсивному изнашиванию.

Одним из основных видов износа деталей бурового оборудования является абразивное изнашивание, которому подвергаются детали буровых насосов, турбобуров, электробуров, вертлюгов, бурильные трубы и замки и др.

Значительному абразивному изнашиванию подвергаются буровые долота и коронки. Режим работы породоразрушающего инструмента отличается очень большой напряженностью из-за высокой энергоемкости процессов разрушения горных пород. Кроме того, породоразрушающий инструмент предназначен для концентрированной передачи энергии горной породе для ее разрушения в отличие от других деталей, несущих заданную нагрузку при определенных условиях и минимально возможных потерях энергии в узлах трения.

Горные породы, представляющие собой поликристаллические твердые тела, обладают различными механическими свойствами, а следовательно, и в различной степени влияют на износ породоразрушающих инструментов.

Износ буровых долот при трении о горные породы в процессе их разрушения изучался Е. Ф. Эпштейном,

В. С. Федоровым, Л. А. Шрейпером, Е. М. Кузмаком, Э. Л. Мархасипым, В. П. Виноградовым, Г. К. Шрейбером, Я. М. Кершенбаумом, Г. М. Сорокиным и др. [32—34, 74, 76, 116, 148, 169, 189, 199, 200]. Этими исследованиями установлено наличие интенсивного абразивного изнашивания деталей буровых долот.

Исследования, посвященные непосредственно изучению абразивности горных пород, как в СССР, так и за рубежом, мало, что затрудняет установление общих качественных представлений и количественной оценки абразивности горных пород.

Например, Е. Ф. Эпштейн [199, 200] исследовал узкий круг весьма абразивных пород. По работам зарубежных исследователей Хаворза [204], Сиверса [211] и Шеферда [210] также трудно составить какое-либо представление об абразивности, так как и в этих работах рассматривалось небольшое количество пород, иногда совершенно не охарактеризованных петрографически. Кроме того, абразивность в этих работах определялась по отношению к таким металлам как бронза и незакаленная сталь, которые не применяются для изготовления породоразрушающих инструментов и деталей бурового оборудования, работающих в абразивной среде.

В последние годы Л. И. Бароном, А. В. Кузнецовым, О. Н. Голублицевым, Ю. Ф. Алексеевым и др. [1, 12, 13, 49] выполнен ряд исследований по изучению абразивности горных пород применительно к условиям их добычи и разрушения. Л. А. Шрейпером, П. С. Баландиным, А. Н. Поповым совместно с автором и др. [129, 149, 192] абразивность горных пород изучалась применительно к условиям износа вооружения буровых долот. Однако и эти работы не дают полного представления об абразивной способности горных пород.

Недостаточные знания абразивных свойств горных пород часто приводят к затруднениям в решении ряда технических и технологических задач, связанных с установлением рациональных процессов разрушения горных пород и их обработкой.

Если применительно к условиям разрушения горных пород при бурении глубоких скважин для количественной оценки их механических свойств имеется метод вдавливания штампа, разработанный под руководством проф. Л. А. Шрейнера [192], то для оценки абразивности еди-

ного общепринятого метода пока не существует. Поэтому абразивные свойства пород мало исследованы. В связи с этим во многих технологических расчетах, необходимых при разработке режимов бурения скважин, абразивная способность пород учитывается косвенным путем в виде различного рода коэффициентов или показателей степени, которые в количественном отношении очень неопределенны.

Некоторые исследователи, занимавшиеся изучением абразивной способности пород, ставили перед собой задачу создать простой метод испытания на абразивность, пригодный для массового применения и отвечающий запросам практики. Однако до сих пор такой метод применительно к условиям разрушения пород при бурении скважин не создан в основном вследствие большой сложности процесса абразивного изнашивания металлов при трении и разрушении горных пород. Вместе с тем такой метод с практической точки зрения совершенно необходим.

Обычно под абразивным изнашиванием понимается такой вид разрушения, который является следствием микро-резания или царапания. Резание или царапание возможно только в том случае, если одно из взаимодействующих тел является более твердым и обладает высокой степенью шероховатости поверхности. Если исходить из таких представлений о сущности абразивного изнашивания, то при трении закаленных сталей абразивными свойствами будут обладать только кварцевые песчаники и алевролиты, поскольку они обладают большой твердостью зерен и высокой шероховатостью поверхности трения. По отношению же к твердым сплавам или одна из горных пород, разрушаемых при бурении скважин, не может обладать абразивными свойствами.

В связи с этим необходимо выяснить — что же следует понимать под абразивностью горных пород и является ли абразивность особым свойством горной породы?

Абразивность горных пород, как показывают наши и другие исследования [12, 129, 149, 192, 213], не является простым показателем механических свойств горных пород, как прочность, упругость и т. д., а определяется совокупностью механических и структурных свойств трущихся тел.

В данной работе под абразивностью горных пород понимается их способность изнашивать материал породоразрушающих инструментов. При этом имеется в виду,

что изнашивание происходит при трении материала инструмента в процессе разрушения им горной породы.

Следовательно, и изучение абразивных свойств горных пород возможно лишь в процессе изнашивания. Изнашивание — процесс постоянного уменьшения размеров детали или инструмента во времени в период эксплуатации. Не следует процесс изнашивания смешивать с поломками, возникающими в результате кратковременных перегрузок.

На патентность изнашивания влияют режим и условия работы деталей и инструмента. Исследования И. В. Крагельского [77] и Г. И. Едифанова [67] показывают, что по мере изменения условий в области контакта поверхностей одни виды взаимодействия переходят в другие, т. е. с изменением условий может меняться не только количественная, но и качественная картина износа. Поэтому при лабораторных испытаниях на износ Э. Л. Мархисин [117] считает необходимым «по возможности физически моделировать условия работы детали в машине».

Зависимость износа от столь большого числа факторов не позволяет в настоящее время ввести единый показатель абразивности горных пород. Поэтому для конкретных условий показатели относительной абразивности горных пород определяются через показатели износа.

Наши исследования выполнялись применительно к условиям работы вооружения шарошечных долот. В связи с этим абразивность горных пород изучалась по отношению к закаленной стали и твердому сплаву.

Известно, что износ шарошечных долот в большой степени зависит от цикличности взаимодействия элементов вооружения в процессе разрушения пород, от вида и свойств среды, в присутствии которой происходит разрушение пород на забое скважины, от динамического характера взаимодействия зубьев шарошечных долот в процессе разрушения. Влияние перечисленных выше факторов изучалось нами в процессе исследования абразивности горных пород применительно к условиям их разрушения при бурении скважин.

## ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ИССЛЕДОВАНИЯХ В ОБЛАСТИ ТРЕНИЯ И ИЗНАШИВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ

При изнашивании трением обычно наблюдаются как упругие, так и пластические деформации, сопровождающиеся хрупким выкрашиванием, скалыванием, смятием и срезанием частиц.

На величину износа влияют свойства материала трущихся тел, род и характер трения, формы и размеры трущихся поверхностей, температура трущихся поверхностей, скорость трения, давление между телами, свойства и поведение продуктов износа, продолжительность перемещения и т. д.

При таком сложном процессе как изнашивание нельзя ожидать, что один какой-нибудь отличительный признак, например, структура, твердость или точка плавления, мог бы определить износостойкость данного материала. Поэтому речь может идти только об общих тенденциях.

Представители различных направлений в изучении теории трения несколько по-разному подходят и к вопросам о процессе и причинах изнашивания твердых тел.

Б. В. Дерягин [58] считает, что износ является результатом нарушения молекулярных связей между поверхностями трения. Очень часто разрыв связей происходит внутри одного из тел по поверхностям, где сопротивление сдвигу оказывается наименьшим. При этом мягкие материалы могут намазываться на более твердые. В случае хрупких тел происходит выкрашивание отдельных частиц.

Ф. П. Боуден и Д. Тейбор [15] износ связывают со срезом мостиков сварки, происходящим по поверхностям с наименьшим сопротивлением сдвигу. Окисные пленки значительно снижают износ, так как при скольжении по окислу даже при достаточной прочности связи срез ее локализуется внутри окисла. При больших нагрузках возможно разрушение окисла и возникновение металлической связи. Позднее Д. Тейбор [208] развил концепцию о схватывании, которая учитывает совместное действие нормальных и касательных напряжений.

Исследователи, утверждающие двойственность природы трения, рассматривают процесс изнашивания как результат механического и молекулярного взаимодействия. Они выделяют следующие основные причины изнашивания:

механическое разрушение задепившихся неровностей, усталостное разрушение, наклеп и появление хрупкости вследствие деформирования при истирании, отслаивание пленок окислов, образующихся при трении, механическое разрушение молекулярно схватывающихся поверхностей, механическое разрушение неровностей, сварившихся от высокой температуры трения.

Е. М. Швецова и И. В. Крагельский [195] выделяют следующие виды разрушений: при механическом взаимодействии происходят выпарапывание, отслаивание, выкрапывание и микроразрушения; при молекулярном взаимодействии — глубинное вырывание, если силы сцепления велики (молекулярное схватывание), отслаивание, выкрапывание и микроразрушения, если силы сцепления малы и нарушаются дальнейшим скольжением (молекулярное притяжение).

Многобразные причины и явлений, вызывающих износ и разрушение металлов при трении, некоторыми исследователями представляется в виде общих классификаций.

М. М. Хрущов [180] по характеру основных явлений при трении различает три основных вида изнашивания: механический (абразивное изнашивание, изнашивание вследствие пластического деформирования и изнашивание при хрупком разрушении), молекулярно-механический (изнашивание при схватывании) и коррозионно-механический.

А. К. Зайцев [69] предлагает рассматривать изнашивание с точки зрения механического, физико-механического, химико-механического и комплексного взаимодействия поверхностей тел при трении.

Б. И. Костецкий [80] на основании экспериментального изучения характера изменения вида поверхностей и свойств металла в поверхностных слоях выделяет следующие виды изнашивания:

1) изнашивание схватыванием I рода характерно для малых скоростей скольжения и высоких удельных давлений при трении однородных поверхностей, разрушение происходит в отдельных точках с образованием задиров на поверхностях трения;

2) окислительное изнашивание возникает при небольших удельных давлениях и высоких скоростях скольжения, разрушение поверхности локализуется в объеме непрерывно восстанавливающихся окисных пленок и пленок адсорбции;

3) тепловое изнашивание (изнашивание схватыванием II рода) характерно для высоких удельных давлений и скоростей скольжения, поверхность разрушается в условиях термического разупрочнения, что способствует интенсивному развитию схватывания. Наблюдаются явления отпусков, рекристаллизации и вторичной закалки;

4) абразивное изнашивание обуславливается наличием абразивной среды в зоне трения и выражается в местной пластической деформации, микродарапации и микрорезации;

5) основидный износ характерен для трения качения.

В. Д. Кузнецов [84], анализируя понятия, определения и термины в области износа, высказываемые рядом авторов, приходит к выводу, что износ — это такое явление, когда при затрате энергии, равной работе сил трения, с поверхности твердого тела отделяются частицы и масса тела уменьшается.

В действительности, указывает И. Д. Файнман [171], на изнашивание затрачивается энергия, меньшая работы силы трения, так как часть энергии этой работы затрачивается на излучение, звук и т. д.

А. Д. Дубинин [64] рассматривает износ с двух точек зрения: 1) износ, связанный с природой трения, и 2) износ, не связанный с природой трения и возникающий по причинам, вносимым извне.

Износ, связанный с природой трения, возникает в результате термоэлектронных и термических процессов, упругих и пластических волн напряжений. К износу, не связанному с природой трения, он относит механические разрушения поверхности (срез, смятие, выкрашивание и др.)

К сожалению, А. Д. Дубинин неожиданно разрывает единый процесс трения и изнашивания поверхностей. По нашему мнению, различие здесь только в различной концентрации энергии в точках контакта поверхностей, а не в отличии природы процессов.

### Количественная оценка износа

Методы количественной оценки износа характеризуют долговечность и степень влияния перехода от качественно одного вида изнашивания к другому при изменении условий эксплуатации деталей или инструмента.

В настоящее время для количественной оценки износа широко применяются два показателя: интенсивность и скорость изнашивания.

Под интенсивностью изнашивания в соответствии с определением В. Д. Кузнецова [84] следует понимать величину износа детали или образца металла, приходящуюся на единицу работы трения,

$$\omega = V/A, \quad (1)$$

где  $\omega$  — интенсивность изнашивания;  $V$  — износ материала твердого тела за опыт;  $A$  — работа трения за опыт.

В свою очередь

$$A = fPL, \quad (2)$$

где  $f$  — коэффициент трения;  $P$  — нормальная нагрузка;  $L$  — путь трения.

В этом случае

$$\omega = \frac{V}{fPL}.$$

Чаще всего из-за трудосложности определения работы трения интенсивность изнашивания определяют по формуле

$$\omega' = \omega f = \frac{V}{PL}. \quad (3)$$

Такой прием, безусловно, значительно упрощает испытания, однако показатель износа лишается своего физического смысла, а также объективности, поскольку коэффициент трения не является постоянной величиной, а зависит как от материалов пары трения, так и от условий и режима испытаний [79].

В ряде других случаев интенсивность изнашивания определяется как величина износа на единицу пути трения. При этом имеется в виду, что испытания проводятся при  $P = \text{const}$ .

Широкое использование показателя «интенсивность изнашивания» обусловлено тем, что при малых удельных давлениях и скоростях скольжения величина износа определяется в основном работой трения и мало зависит от параметров, характеризующих эту работу. Однако произвольное толкование интенсивности изнашивания как показателя затрудняет обобщение результатов, полученных различными исследователями.

Под скоростью изнашивания следует понимать величину износа детали или образца металла в единицу времени

$$a = V/T, \quad (4)$$

где  $a$  — скорость изнашивания;  $V$  — износ материала твердого тела за опыт;  $T$  — время опыта.

Этот показатель целесообразно использовать в тех случаях, когда износ изучают с целью получения данных для расчета износа деталей или инструмента или для определения их долговечности.

Рассмотрим некоторые результаты количественной оценки износа металла различными методами. Очевидно, интенсивность изнашивания может быть постоянной величиной лишь в том случае, если при изменении режима испытаний не меняется характер изнашивания. В качестве аргументов для характеристики режима работы пары трения принимаются удельное давление  $p$  и скорость скольжения  $v$ .

В работе [80] отмечается, что некоторые исследователи считали характеристикой изнашивания удельную работу трения. Проверку этого положения проводил П. К. Топеха [164]. В качестве аргумента он принял произведение удельного давления  $p$  на скорость скольжения  $v$ , а износ металла определял в весовых единицах, отнесенных к единице пути трения, т. е. была сделана попытка установить зависимость износа металла на единицу пути трения от работы трения в единицу времени, что методически неверно, так как один и тот же путь при разной скорости скольжения образец будет пробегать за разное время. На основании этих данных сделан вывод, что изучение износа в зависимости от удельной энергии необоснованно и лишено физического смысла. Если же привести аргумент и функцию в соответствие, а полученные результаты нанести на график (рис. 1), то можно наблюдать строгую закономерность зависимости скорости изнашивания от удельной мощности трения. Некоторый разброс точек объясняется неточностью аргумента, который должен быть выражен в виде

$$N_{уд} = fpv, \quad (5)$$

где  $N_{уд}$  — удельная мощность трения в кгс·м/см<sup>2</sup>·с;  $f$  — коэффициент трения.

Однако данных о величине коэффициента трения в работе [164] нет.

На основании полученного результата делаем допущение, что параметры режима работы пары трения можно задавать обобщенным показателем — удельной мощностью трения. Проведем проверку принятого допущения.

Исследования износа при трении в широком диапазоне изменения удельного давления и скорости скольжения стальных образцов по стальной поверхности выполнены Н. Л. Голего [50]. Износ стали измерялся в  $\text{г/см}^2$  на 1000 м пути трения. Изучение проводилось для выявления

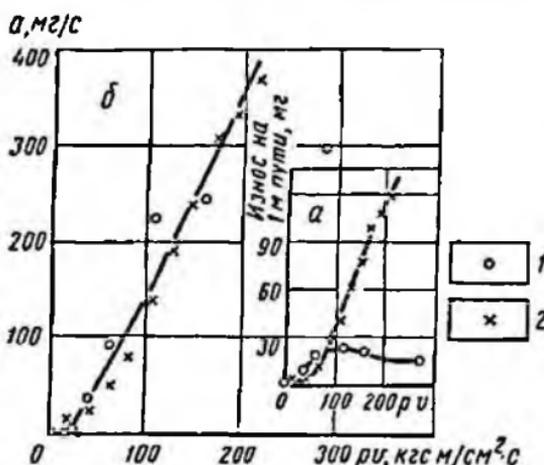


Рис. 1. Зависимость износа стали У10А от удельной работы (по данным Н. К. Топехи).

a — до корректировки; б — после корректировки. 1 — точки, полученные при  $p = \text{const}$ ; 2 — точки, полученные при  $v = \text{const}$ .

границ ведущих видов износа согласно классификации Б. И. Костецкого. Мы воспользовались графическими данными Н. Л. Голего и сделали пересчет для определения интенсивности изнашивания (износа на единицу работы трения) и скорости изнашивания как функций удельной мощности трения. Результаты пересчета приведены на рис. 2.

В серии опытов для стали У8 Н. Л. Голего выделяет две области: область окислительного износа и область теплового износа, а для стали 45 три области износа: область износа схватыванием I рода, область окислительного износа и область теплового износа. На рис. 2 эти области обозначены соответственно I, II и III.

Из рис. 2, а видно, что интенсивность изнашивания может быть принята постоянной только в области окислительного износа (II). В области теплового износа (III) с ростом удельной мощности трения наблюдается тенденция роста интенсивности изнашивания.

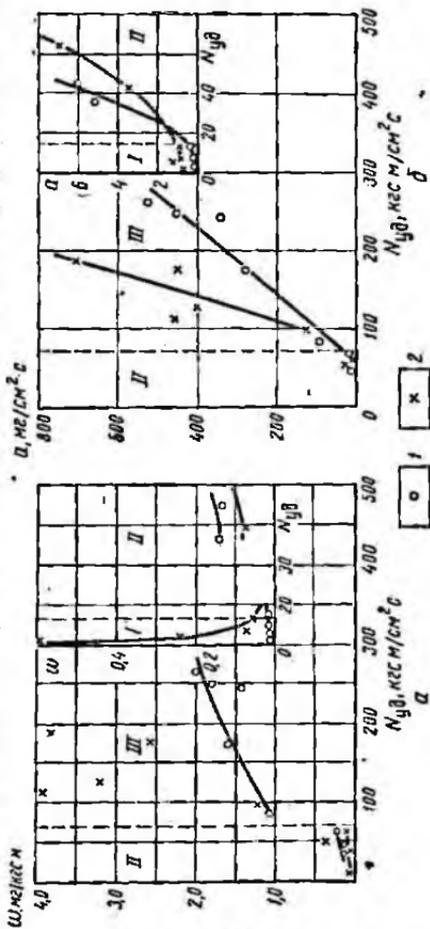
Зависимости скорости изнашивания стали от  $N_{уд}$  (рис. 2, б) аналогичны зависимостям, полученным по данным П. К. Тонехи. В целом же из рис. 2 видно, что удельная мощность трения может характеризовать режим работы пары трения и позволяет довольно четко определять границы областей износа.

Из рис. 2 видно, что область I характеризуется малой удельной мощностью трения. В результате этого энергия активации атомов поверхностных слоев металла недостаточна для восстановления разрушенных при трении пленок окислов, что приводит к непосредственному касанию ювенильных поверхностей металла и их схватыванию. Это приводит к задирам и нарушению нормальной работы машины.

В области II энергия активации атомов поверхностных слоев металла достаточна для того, чтобы разрушенные пленки окислов успевали восстанавливаться в период между отдельными касаниями выступов поверхностей. Более того, наблюдалась значительная диффузия кислорода в поверхность металла. Окислы, обладающие большой

Рис. 2. Износ стали 45, нормализованной, при трении по нормализованному диску из стали 45 и закаленной стали У8 при трении по закаленному диску из стали У8.

а — интенсивность изнашивания; б — скорость изнашивания. 1 — сталь У-8; 2 — сталь 45.



хрупкостью, отделяются от поверхности в виде чешуек [30] и легко удаляются. В результате этого, несмотря на значительный износ поверхностей, условия работы деталей не нарушаются дольше, чем при схватывании Грода. Для области III характерна большая концентрация энергии на контакте трущихся тел. Энергии оказывается достаточно для термического разупрочнения и последующего сдвига значительных объемов металла. При этом

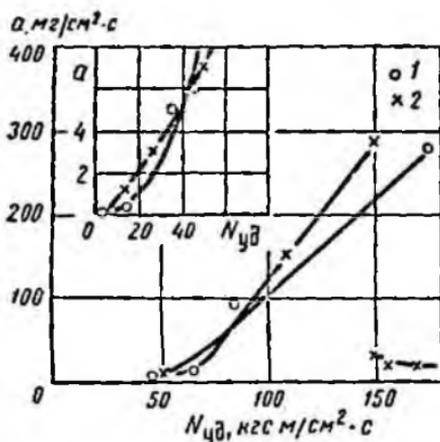


Рис. 3. Влияние граничной смазки МС-20 на износ закаленной стали У8 при трении о закаленный диск на стали У8.

1 — сухое трение; 2 — при наличии смазки.

интенсивно развивается процесс схватывания поверхностей. В машинах этот вид износа является катастрофическим, а для металлорежущего инструмента он является основным [108].

Для качественной оценки влияния смазки на характер зависимости скорости изнашивания стали У8 от удельной мощности трения мы воспользовались графическими данными

Н. Л. Голего и сделали соответствующий пересчет. Результаты пересчета нанесены на график (рис. 3). Для сравнения на этом же рисунке воспроизводим и ранее полученный график для стали У8 при сухом трении.

Сравнивая графики  $a = f(N_{уд})$  при изнашивании стали У8 в воздушной среде и при наличии граничной смазки, можно видеть, что замена диффузии кислорода диффузией углерода из смазки в поверхностные слои металла в области окислительного изнашивания практического влияния не оказывает. В области теплового изнашивания наличие смазки несколько интенсифицирует процесс, однако в области высоких удельных мощностей, где наблюдается сторапие смазки (или ее коксование), износ стали заменяется износом образовавшихся продуктов и соответственно резко снижается. Эти выводы сделаны на основании наблюдений, проведенных Н. Л. Голего при исследованиях.

## Абразивы и абразивное изнашивание металлов

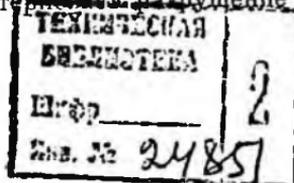
Абразивами называют сыпучие и массивные твердые тела и вещества, служащие орудиями поверхностной обработки (шлифования, истирания, полировки и т. д.) и диспергирования. Поверхностное диспергирование абразивами представляет массовое разрушение и отрыв небольших частиц от поверхности твердого тела в отличие от полного диспергирования, где измельчению путем сжатия, удара и т. п. подвергается тело во всем его объеме.

Абразивы, находящие себе применение в различных технологических процессах, делятся на два класса [86]. Класс несвязанных и слабо связанных абразивов и класс связанных абразивов. К первому классу относятся минеральные частицы, характеризующиеся полным отсутствием взаимной связи (сыпучие абразивы), и суспензии, состоящие из абразивных зерен, воды и других жидкостей (абразивы в так называемой мокрой шлифовке, пасты и т. п.). Ко второму классу относятся абразивные частицы, связанные более или менее пластичными, гибкими и упругими веществами — смолами, органическими клеящими веществами и металлом (полировальные диски, абразивные листы и др.), и коллективы минеральных зерен, связанных хрупкими (природными и искусственными) цементирующими веществами (камни, диски и т. п.).

Следует также различать искусственные и естественные абразивы. Искусственные абразивы получают химической и термической переработкой минерального сырья, в результате которой образуются синтетические продукты, обладающие высокой твердостью, стойкостью и абразивными свойствами (искусственный корунд, карбид кремния, карбид бора и др.). Естественные абразивы состоят из природных минеральных веществ (кварц, корунд, алмаз), находящихся непосредственное применение в раздробленном виде или в виде цементированных горных пород.

В дальнейшем нами будут рассматриваться только естественные абразивы, причем не с точки зрения их применения для обработки материалов, а с точки зрения влияния их на износ металлов.

В. Ф. Лоренц [109] отмечает, что абразивным изнашиванием называется такой процесс, в котором поверхность работающей детали претерпевает разрушение вследствие



трения о нее небольших твердых частиц — абразивных частиц.

Р. Д. Хавора [204] под абразивным понимает механическое изнашивание металла в контакте с неметаллом или абразивом.

В процессе абразивного изнашивания происходит, — как отмечает В. Д. Кузнецов, — отрыв материала от одного тела в результате царапания и срезания поверхности этого тела другим трущимся по нему телом.

Г. М. Заморуев [70] под абразивным понимает изнашивание при трении о твердые неметаллические материалы, а также о твердые металлические частицы при наличии или отсутствии жидкой среды. Из приведенных выше определений абразивного изнашивания видно, что между ними нет принципиальной разницы.

В. Ф. Лоренц [109] различает абразивное изнашивание фиксированными абразивами и свободными абразивными частицами. В зависимости от этого он рассматривает различные виды абразивного изнашивания (абразивной поверхностью, абразивной прослойкой, абразивной струей и т. д.).

Многие исследователи, рассматривая процесс абразивного изнашивания металла как механический снос его более твердыми частицами, отмечают, что решающую роль в абразивном изнашивании играет шероховатость абразивной поверхности и соотношение твердости абразива и изнашиваемого материала [165, 181].

Существуют разные мнения и о характере сноса металла абразивными частицами. И. В. Крагельский [78] считает, что при всяком абразивном изнашивании механизм разрушения металла является хрупким вследствие повторных актов пластического деформирования и наклепа. П. И. Львов [110, 111] утверждает, что абразивный износ обусловлен приведенном в ослабленное состояние металла, выдавливаемого абразивным зерном по бокам канавки. М. М. Хрущов и М. А. Бабичев [182] отмечают, что микрорезание все же имеет существенное значение, хотя и осуществляется лишь немногими, благоприятно расположенными зёрнами абразива.

М. М. Тепенбаум [166] связывает наличие тех или иных процессов изнашивания в контакте с абразивом с темп напряжениями, которые создаются в контакте изнашиваемой поверхности с абразивными зёрнами. Очевидно

различная конфигурация, размеры и прочность зерен обуславливают спектр напряжений, зависящий от режима изнашивания и в первую очередь от нагрузки.

Металл шлифуется при более высоких удельных давлениях и скоростях скольжения. Теория шлифования металлов изложена в работах Е. Н. Маслова [119, 120]. При шлифовании отмечаются все признаки теплового изнашивания (пластическое течение, фазовые превращения и др.) в поверхностных слоях металла [81, 119, 137].

Большое влияние на интенсивность абразивного изнашивания оказывает соотношение твердости поверхности изнашиваемого материала  $H_m$  и твердости абразива  $H_a$ . При уменьшении отношения  $H_m : H_a$  ниже определенной величины увеличение твердости абразива не приводит к увеличению интенсивности изнашивания. По данным М. М. Хруцова и М. А. Бабичева [181], предельное отношение равно 0,75, а по данным М. М. Таненбаума [165] —  $0,5 \div 0,6$ . Условие  $H_m : H_a < 0,5$  лежит в основе испытанной материалов на износостойкость при трении об абразивную поверхность.

Износ стали при трении о горные породы изучался нами [152] при условии  $H_m > H_a$  и  $H_m < H_a$ ; при этом обнаружены отличительные особенности в процессе изнашивания.

На интенсивность абразивного изнашивания большое влияние оказывают удельная нагрузка и скорость скольжения, которые составляют напряженность работы. Исследования Л. А. Алексеева и М. Я. Берковича [4] показали, что при высоких значениях удельного давления и скорости скольжения наблюдается интенсивное термическое разупрочнение поверхности стали. Зерна горных пород, микротвердость которых значительно ниже микротвердости изнашиваемой поверхности стали в обычных условиях, приобретают возможность пластически деформировать металл. При этом изнашивание также носит характер абразивного.

Рассмотренные выше определения абразивного изнашивания сформулированы главным образом на основании изучения износа металла при трении об абразивную поверхность, т. е. для случая  $H_a \gg H_m$ . При трении о горные породы условие  $H_a > H_m$  и условие высокой степени шероховатости по отношению к закаленной стали и тем более к твердому сплаву чаще всего не соблюдается.

Кроме того, изнашивание происходит в присутствии активных сред. Следовательно, механизм изнашивания стали в значительной степени будет определяться физико-химическими процессами в области контакта металла и горной породы. Поэтому в большинстве случаев название «абразивное изнашивание» (в отношении ко всем породам) применяется несколько условно.

Абразивное изнашивание хрупких тел наиболее полно было исследовано В. Д. Кузнецовым [85], абразивное изнашивание металлов и сплавов — М. М. Хрущовым и М. А. Бабичевым, В. Н. Кащеевым [87, 91, 183, 184, 185].

В работах М. М. Хрущова и М. А. Бабичева приводятся данные по износостойкости не только металлов, но и минералов, определенные при одинаковых условиях. Вследствие этого указанные исследования представляют особый интерес. Износостойкость исследовалась при истирании цилиндрических образцов из испытываемых материалов о поверхность абразивного полотна или бумаги, натянутых на плоскую поверхность вращающегося диска. Кроме того, образец имел поступательное движение в радиальном направлении, что обеспечивало его изнашивание в течение всего опыта о свежую абразивную поверхность. В качестве абразива применялся корунд зернистостью 180, а для наиболее твердых материалов — карбид бора той же зернистости, т. е. абразивные зерна всегда имели большую твердость, чем испытываемые материалы. Износ определялся по уменьшению высоты образца, а относительная износостойкость  $\epsilon$  выражалась как отношение линейного износа эталона к линейному износу испытываемого материала на одном и том же абразивном полотне за одинаковый путь трения при одинаковом удельном давлении ( $p = 10 \text{ кгс/см}^2$ ).

Предварительное изучение изнашивания образцов металла в диапазоне изменения удельного давления от 3 до  $32 \text{ кгс/см}^2$  показало, что износ на единицу пути трения пропорционален удельному давлению. Скорость скольжения во время опыта изменялась от 5,6 до  $41,1 \text{ м/мин}$ . Максимальная мощность трения, следовательно, не превышала  $17,5 \text{ кгс} \cdot \text{м/см}^2 \cdot \text{с}$  (величина коэффициента трения принята равной 0,8), что, по классификации Б. И. Костецкого [80], соответствует области окислительного износа.

На рис. 4 приведены диаграммы износостойкости раз-

личных металлов и минералов в зависимости от их микротвердости.

М. М. Хрущовым и М. А. Бабичевым даются следующие зависимости относительной износостойкости  $\varepsilon$  от микротвердости  $H_m$  для испытанных материалов.

Для технически чистых металлов и сталей в отожженном состоянии относительная износостойкость  $\varepsilon$  прямо пропорциональна микротвердости  $H_m$ , т. е.

$$\varepsilon = bH_m, \quad (6)$$

где  $b$  — коэффициент пропорциональности, общий для всех указанных металлов и сталей.

Для сталей в состоянии после закалки и отпуска на различную твердость относительная износостойкость связана с микротвердостью также линейной зависимостью, т. е.

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + b'(H_m - H_0), \quad (7)$$

где  $\varepsilon_0$  и  $H_0$  — соответственно относительная износостойкость и микротвердость данной стали в отожженном состоянии;  $b'$  — коэффициент пропорциональности (он тем больше, чем выше в стали содержание углерода и карбидообразующих элементов).

Для механически наклепанных металлов и сталей (наклеп без фазовых превращений) относительная износостойкость не зависит от твердости, определенной после наклепа, но до испытания на изнашивание. Отсутствие такой зависимости, по мнению авторов [185], связано с тем, что в процессе самого изнашивания наблюдается более высокий наклеп, предшествующий разрушению.

Для минералов, образующих шкалу Мооса, а также для некоторых других минералов в виде кристаллов

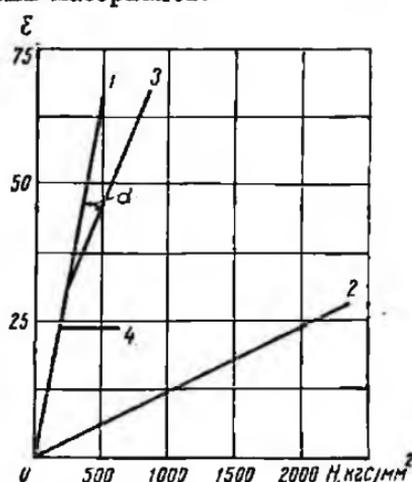


Рис. 4. Зависимость износостойкости материалов от микротвердости (по М. М. Хрущову).

1 — износостойкость чистых металлов и ряда углеродистых и легированных сталей в отожженном состоянии; 2 — износостойкость минералов; 3 — износостойкость одной из сталей, твердость которой увеличилась вследствие термической обработки; 4 — износостойкость одной из сталей, твердость которой повышалась поверхностным наклепом.

относительная износостойкость прямо пропорциональна микротвердости, т. е.

$$e = b'' H_{\mu}, \quad (8)$$

где  $b''$  — коэффициент пропорциональности.

Кроме того, для большого числа металлов, сплавов и минералов, изнашиваемых о жестко закрепленное абразивное зерно, М. М. Хрущовым и М. А. Бабичевым [184] установлено соотношение

$$e = \text{const } E^{1,3}, \quad (9)$$

где  $E$  — модуль упругости.

Наличие зависимости между  $e$  и  $E$  для различных материалов позволило авторам работы [185] заключить, что относительная износостойкость связана с основными физическими свойствами материалов, от которых зависит их прочность.

Авторы этой работы считают, что для всех металлов износостойкость прямо пропорциональна микротвердости, хотя, как известно, при обычных механических испытаниях металлы довольно значительно отличаются друг от друга по своим пластическим свойствам. Но эти различия при тонком поверхностном диспергировании сглаживаются и заметной зависимости износостойкости от пластичности не наблюдается. Точно такая же зависимость износостойкости от микротвердости соблюдается и для минералов, которые при тонком поверхностном изнашивании являются в одинаковой степени пластичными.

Но если сопоставить между собой металлы и минералы, то при одинаковой твердости металлы в 11,4 раза более износостойки, чем минералы. Более высокая износостойкость металлов и объясняется, по-видимому, тем, что их пластичность во много раз больше пластичности минералов и при поверхностном диспергировании.

Степень пластичности различных материалов оказывает большое влияние на их износостойкость, но для одного класса твердых тел при поверхностном разрушении различие в пластичности сглаживается, что значительно облегчает выявление основных закономерностей износа твердых тел. Конечно, это объяснение является упрощенным и не отражает всех деталей данного явления. Скольнибудь полных данных о взаимосвязи механических свойств твердых тел с параметрами их кристаллических решеток в литературе нет. Б. М. Ровинским [144] сделана попытка

установить общие закономерности между механическими свойствами твердых тел и прочностью связей в решетке, легко оцениваемой по характеристической температуре. Б. М. Ровинский, используя опытные данные о механических свойствах металлов некоторых последователей, в том числе М. М. Хруцова и М. А. Бабичева [183], установил, что модуль упругости и модуль сдвига металлов являются линейными функциями коэффициента жесткости решетки  $k$ , связывающего квазиупругую силу взаимодействия атомов решетки с отклонением их от равновесного положения.

То обстоятельство, что металлы при одинаковой твердости в 11,4 раза более износостойки, чем минералы [183, 184], объясняется различным типом связей — металлических для металлов и гомополярных для минералов. Различный тип связей между элементарными частицами обуславливает и различную степень пластичности, которая у металлов во много раз больше, чем у минералов. Кроме того, на различие в износостойкости металлов и минералов оказывает влияние и неодинаковый «уровень чистоты» испытываемых минералов и металлов, т. е. количество и характер примесей, условия предварительной обработки и другие факторы, которые более вероятны у минералов, чем у технически чистых металлов.

В. Н. Кащеев и В. М. Глазков [88, 89], проводя исследования изнашивания технически чистых металлов в потоке абразивных частиц различной твердости, установили наличие тесной связи между износостойкостью (величиной, обратной объемному износу) и силами связи в решетке металла.

Износостойкость металла тем выше, чем выше величина модуля упругости  $E$  или величина коэффициента жесткости решетки  $k$ .

В. Н. Кащеев [87] отмечает, что в настоящее время нет законченной и исчерпывающей теории абразивного изнашивания и абразивной износостойкости, подобной, например, теории упругости. Это связано с тем, что наука не располагает законченной теорией пластичности, прочности и разрушения — теорией более элементарных процессов, чем трение, хотя эти элементарные процессы и определяют механизм абразивного разрушения, так как оно возникает после исчерпывания пластичности в виде частицы износа.

В последние годы появилось новое направление в науке об изнашивании металлов — изнашивание при ударе об абразив. Необходимость исследования ударно-абразивного изнашивания возникла в связи с тем, что детали ряда механизмов и машин эксплуатируются в условиях ударного нагружения в присутствии абразивного материала в виде закрепленных или свободных твердых частиц.

В Институте машиноведения АН СССР М. Д. Крашениным для испытания на ударно-абразивное изнашивание разработана специальная машина (УАМ) [185]. Результаты испытания выражаются относительной износостойкостью, определяемой как частное от деления износа эталона на износ образца исследуемого материала, т. е. аналогично оценке относительной износостойкости, принятой М. М. Хрущовым и М. А. Бабичевым при изучении абразивного изнашивания на безударной машине Х4Б.

Исследованиями [185] при сравнительном испытании на абразивное безударное (скольжение) и ударно-абразивное изнашивание разных материалов установлено, что технически чистые металлы и углеродистые доэвтектоидные стали не различаются по относительной износостойкости. Стали с аустенитной структурой при ударно-абразивном испытании имеют износостойкость выше. Стали мартенситной структуры, содержащие избыточные карбиды, чугуны и материалы минерального характера при ударно-абразивном изнашивании обладают меньшей относительной износостойкостью.

Особого внимания заслуживают исследования, выполненные на машинах для испытания на ударно-абразивное изнашивание в МИИХ и ГИ им. акад. И. М. Губкина. На этих машинах испытывали различные стали с целью применения их для изготовления буровых долот.

На машине для испытания на ударно-абразивное изнашивание о закрепленные абразивные частицы (авторы В. Н. Виоградов, Г. М. Сорокин и Г. К. Шрейбер [35]) исследовали образцы металла диаметром 10 мм и длиной 25—30 мм при энергии удара до 5 кгс·м. Удары наносятся по электрокорундовой шкурке, лежащей на наковальне. Число ударов — 60, 75, 100 в 1 мин. Износ образца определяется по потере массы (взвешиванием). Принципиальная схема испытания на этой машине показана на рис. 5.

В. Н. Виоградовым, Г. К. Шрейбером, Г. М. Сорокиным и В. А. Коротковым разработан новый метод испы-

тания на абразивное изнашивание при ударе по слою свободных абразивных частиц, лежащих на стальной наковальне. Конструкция машины и методика испытаний подробно изложены в работах [36, 37].

В качестве абразивного материала использовались черный карбид кремния и кварцевый песок.

Ударно-абразивное изнашивание В. Н. Виноградовым и др. [34, 38] классифицируется на несколько видов, развите которых связано с определенными условиями.

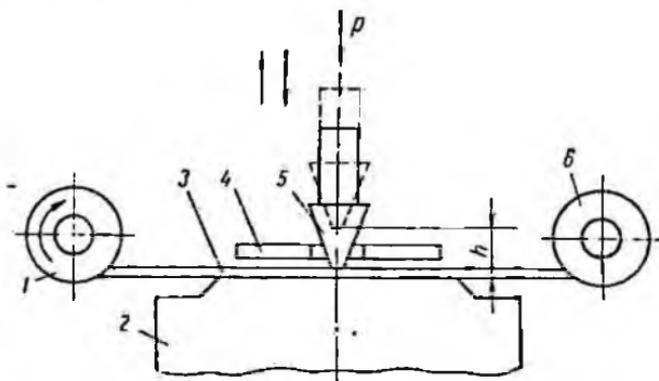


Рис. 5. Привципальная схема испытания на ударно-абразивное изнашивание (по В. Н. Виноградову и др.).

1 — механизм прерывистой подачи абразивной ленты; 2 — металлический забой; 3 — абразивная лента; 4 — направляющая рамка; 5 — образец; 6 — нассета абразивной ленты;  $h$  — высота падения образца под нагрузкой.

Механизм ударно-абразивного изнашивания представляется следующим образом. В момент удара изнашиваемой поверхности по поверхности абразива в местах контакта металла с его зернами развиваются высокие напряжения, вызывающие эластическое деформирование металла. В результате этого часть абразивных зерен внедряется в изнашиваемую поверхность, образуя лулки различной формы и глубины. Механизм внедрения абразивных зерен зависит от ориентации и соотношения твердости зерен абразива и изнашиваемой поверхности металла. В результате многократного пластического деформирования, кроме образования лулок, происходит отрыв частиц. При испытании более твердых и хрупких материалов наблюдается хрупкое выкрашивание.

Если в зоне удара образца по абразивной поверхности имеется слой жидкости, то при многократных ударах возбуждается пульсирующий гидроабразивный поток, вызывающий ударно-гидроабразивное изнашивание.

Поскольку ударно-абразивному изнашиванию свойственна цикличность, то при высоких энергиях удара ведущим процессом может оказаться усталостное разрушение. Этот вид изнашивания назван ударно-усталостным [38].

При высокой удельной энергии удара независимо от твердости изнашиваемой поверхности возможны структурные превращения, вызванные разогревом металла, что облегчает внедрение зерен абразива и последующий отрыв или срез микрообъемов металла. Такой вид изнашивания назван ударно-тепловым.

В работе [38] отмечается, что область существования каждого вида ударного изнашивания определяется многими факторами: энергией удара, зернистостью абразива, наличием в зоне удара жидкости, механическими свойствами металлов и т. д.

Из изложенного выше видно, что характер абразивного изнашивания зависит как от соотношения свойств абразивного и изнашиваемого материалов, так и от режима и условий изнашивания. Различные представления о характере абразивного изнашивания связаны в основном с различием схем и режимов изнашивания и освещают разные стороны одного процесса, являющегося частным случаем общего процесса изнашивания.

#### Физико-химические факторы влияния среды на изнашивание металлов

Среда, кроме смазочного действия, вызывает различные химические, адсорбционные и диффузионные эффекты на поверхностях трения и в поверхностных слоях металла, что не может не отразиться на характере его изнашивания. Эти вопросы освещаются в работах [15, 50, 78, 80, 138, 193 и др.]. Влияние смазки, как и вообще среды, весьма сложно и противоречиво. В работе [201] влияние смазки описывается следующим образом: 1) смазка уменьшает трение и облегчает пластические деформации; 2) уменьшает коэффициент трения и износ контактных поверхностей; 3) проникает в поверхностные трещины и способствует выкрашиванию.

В работах советских и зарубежных ученых — П. А. Ре-

биндера, Б. В. Дерягина, Л. А. Шрейнера, Г. И. Фукса, Г. В. Виноградова, П. И. Санина, Ю. С. Заславского, В. Б. Гарди, Ф. П. Боудена, Д. Тейбора, М. Розенберга и других изучались характер и механизм влияния среды на износ взаимодействующих тел.

Под влиянием длительного неравномерного напряженного состояния в конкретных условиях постепенно развиваются наиболее существенные дефекты в структуре любого твердого тела, в результате чего прочность его уменьшается и происходит разрушение с образованием новой поверхности. Развитие дефектов облегчается, если в процессе образования новая поверхность успевает покрываться адсорбционным слоем поверхностно-активных молекул (эффект Ребиндера) [40, 113, 114, 145, 146].

В. И. Лихтман, Е. Д. Щукли и П. А. Ребиндер [114] отмечают, что процесс разрушения металла под действием циклических нагрузений приводит к образованию и развитию усталостных трещин. Этот процесс подразделяется на три этапа. Первый этап — образование пластических сдвигов и возникающее вследствие этого упрочнение, второй этап — разрыхление решетки после предельного упрочнения, третий этап — образование усталостных трещин в зоне разрыхления и дальнейший рост их вследствие концентрации напряжений в тупиковой части трещин. В присутствии поверхностно-активных веществ эта схема сохраняется, но первый этап значительно сокращается в результате облегчения образования пластических сдвигов и резкого увеличения их числа. Адсорбция поверхностно-активных молекул на стенках трещин в процессе их развития приводит к снижению поверхностной энергии и облегчает тем самым дальнейшее развитие пластических сдвигов и разрыхление металла. Причем в полупроде сжатия адсорбционный слой препятствует смыканию трещин.

За адсорбционными процессами, как правило, следуют коррозионные, которые оказывают значительное влияние на разрушение металлов [114]. Продукты коррозии, объем которых в большинстве случаев превышает объем металла, из которого они образовались, создают в микротрещинах дополнительные напряжения, способствующие дальнейшему развитию усталостных трещин.

Описанные выше общие представления о механизме адсорбционного понижения прочности твердых тел в

жидких средах нашли подтверждение и в работах других исследователей [96, 127 и др.]. В частности, Л. Ф. Колесниченко [96] подтверждает, что в условиях физико-химического взаимодействия внешней среды можно достичь различной степени упрочнения металлов и сплавов при одинаковом пластическом деформировании последних.

Значительный объем исследования в области изучения свойств граничных слоев жидкостей выполнен Б. В. Дерягиным и др. [58—63]. Доказано, что механические свойства жидкостей в объеме и в тонких слоях (порядка 0,1 мк), прилегающих к поверхности твердого тела, неодинаковы. Установлена адсорбционная природа образования граничного слоя, на строение и свойства которого существенно влияет мощное поле сил твердой поверхности. Впервые проведенные Б. В. Дерягиным и И. И. Абрикосовой измерения сил этого поля показали, что действие их может распространяться на десятки и сотни Ангстрем ( $10^{-6}$  —  $10^{-5}$  см).

Смазочное действие жидкости рассматривается в работе Н. К. Адама [11]. Отмечается, что роль смазки состоит либо в полном разделении поверхности, при котором поверхности не могут непосредственно приходить в соприкосновение, либо в обволакивании выступов поверхностей, что уменьшает трение между поверхностями. Адсорбционные пленки кислорода также могут играть роль смазки.

Исследованию смазочной способности жидкостей в условиях граничного трения посвящены работы Г. И. Фукса [175—177].

Исходя из анализа ряда наблюдений, автор приходит к выводу, что смазочная способность является поверхностным свойством жидкостей, снижающим сопротивление контактирующих тел взаимному сдвигу и одновременно препятствующим их сближению.

В работе Е. Е. Клауса и Х. Е. Бибера [97] отмечается, что в основе граничного трения лежат химические реакции, протекающие на поверхности трения. В этих реакциях принимает участие лишь незначительная часть номинальной площади контакта. Вещества, вступающие в химическое взаимодействие с металлом, находятся на поверхности микровыступов в тот момент, когда выступы сопряженных поверхностей соприкасаются друг с другом. Поскольку температуры в контакте микровыступов могут

достичь температур плавления металлов, в зоне контакта имеется достаточный запас энергии для протекания химических реакций.

Г. В. Вишegradов и др. [41—43] исследовали влияние окислительных процессов на граничное трение стали в углеводородных средах. Отмечается, что наиболее благоприятные условия в зоне трения реализуются при протекании окислительных процессов оптимальной интенсивности. В присутствии углеводородов, очень стойких к окислению (бензол), низкие коэффициенты трения регистрируются только при обильном питании зон трения кислородом. В случае легкоокисляющихся углеводородов (дикумилметан) избыток кислорода вреден, так как при этом, видимо, образуются толстые и рыхлые, легко разрушающиеся окисные слои.

Р. С. Файн и К. Л. Кройц [178] также исследовали влияние химического строения углеводородов и концентрации растворенного в них кислорода на граничное трение. Им показано, что как повышение, так и понижение содержания кислорода от оптимального приводит к увеличению износа стали и появлению в зоне трения неорганических продуктов изнашивания. Предполагается, что с точки зрения химии граничного трения наиболее важными характеристиками углеводородов являются степень их насыщенности и растворяющая способность по отношению к кислороду.

Исследования Б. П. Костецкого и И. К. Филичука [80, 82] показали, что пластически деформированные объемы металла, взаимодействуя с кислородом воздуха и смазки, образуют вторичные структуры (пленки) с особыми свойствами, отличающимися от свойств исходного металла повышенной твердостью и хрупкостью. Для снижения окислительного износа при трении предлагается вводить антиокислители или экранировать рабочую поверхность хорошо адсорбируемыми поверхностно-активными веществами.

Отмечая сложность механизма действия смазки, И. В. Крагельский [78], И. В. Васильев и Б. М. Кудрявцева [44] связывают его с физическими и химическими процессами, происходящими в зоне трения. Тонкие слои смазки заменяют физические свойства под действием силового поля твердого тела. В то же время поверхностный слой металла изменяет свойства под действием смазки.

Поэтому И. В. Крагельский предлагает при рассмотрении системы твердое тело — смазка выделять третье тело, обладающее особыми свойствами, отличными от свойств твердого тела и смазки.

Недостаточное внимание уделяется изучению влияния охлаждающей способности среды на износ металлов. Разогрев металла при трении и деформировании приводит к термическому разупрочнению, распаду метастабильных структур и, как следствие, к повышенному износу. В этих условиях охлаждающая способность среды может оказывать решающее влияние на износ взаимодействующих тел. Наиболее полные сведения об охлаждающей способности различных жидких сред приводятся в работе Р. И. Ошера [127] применительно к обработке металлов резанием.

В. Т. Беловым [27] изучалось влияние охлаждения на работу горного режущего инструмента. Исследования проводились с охлаждением водой при резании твердого, крупнозернистого песчаника при скоростях резания 1,92—2,2 м/с, расход воды колебался в пределах 0,8—8,0 л/мин. При всех исследованных режимах охлаждения вода значительно понижала температуру инструмента (с 1050° С без охлаждения до 80—180° С). При постоянном расходе воды температура реза была практически неизменной, а при увеличении расхода она снижалась.

Резание без охлаждения водой вследствие развития высоких температур приводило к полному износу реза на первых же метрах пути резания (при тех же параметрах режима резания). При резании этого песчаника со скоростью 0,3 м/с показатели интенсивности изнашивания охлаждаемого и неохлаждаемого резцов оказались практически одинаковыми. Эти исследования показали существование критической скорости резания (критической температуры), после достижения которой наступает катастрофический износ (потеря формоустойчивости) реза. Величина критической температуры будет зависеть от режима резания породы, материала реза и свойств породы.

К. А. Миджояном [123] изучалось влияние поверхностно-активных добавок на интенсивность изнашивания резцового инструмента при обработке базальта и мрамора. Опыты проводились на токарно-винторезном станке резцом с передним углом 0° и задним 10° при расходе жидкости 1 л/мин. В этих условиях наиболее эффективными добав-

камни оказались монокристал натрия и 5%-ный хлористый кальций. При обработке мрамора износостойкость реза при введении в воду этих добавок повышалась на 20%.

З. Н. Алехова [9], изучая закономерности фрезерования пород, показала, что с увеличением скорости резания песчанка больше 0,67 м/с наблюдается резкое увеличение интенсивности изнашивания резов. При повышении скорости резания малоабразивных пород такого явления не наблюдалось.

Исследования, выполненные С. В. Скоробогатовым [161], показывают, что с увеличением скорости резания интенсивность изнашивания резов (в диапазоне скоростей от 0,2 до 2,0 м/с) при резании аргиллитов примерно пропорциональна скорости резания. При резании более твердых алевролитов и песчаников интенсивность изнашивания резов с увеличением скорости резания в начальный период невелика, но затем резко возрастает: чем тверже и абразивнее порода, тем при меньшей скорости резания наступает резкий перегиб на кривой изнашивания.

Э. А. Мотовилов и К. Б. Шляпин [122] полагают, что под воздействием развивающейся температуры в зоне контакта режущей кромки с породой твердость армирующего сплава снижается. При определенной скорости резания и соответствующей ей температуре наступает состояние, при котором твердость сплава становится сопоставимой с твердостью наиболее твердых зерен разрушаемой породы. Такое состояние названо состоянием равнотвердости. В результате этих исследований установлено наличие корреляционной связи между твердостью горной породы и предельно допустимой скоростью резания  $v_{пр}$ . Применительно к резанию резами, армированными твердыми сплавами типа ВК, они рекомендуют расчетную формулу для определения величины  $v_{пр}$

$$v_{пр} = 0,321 H_{т.с} / H_{пор},$$

где  $H_{т.с}$  — твердость армирующего сплава (по ПМТ-3);  $H_{пор}$  — твердость наиболее твердых зерен разрушаемой породы (по ПМТ-3).

В работе М. М. Таненбаума и др. [167] имеются данные, показывающие, что температура в местах фактического контакта резов с углем при работе угольных комбайнов может достигать 900—1350° С.

По данным французских исследователей [203], температура на режущей кромке резцов породоразрушающих машин достигает приблизительно  $1500^{\circ}\text{C}$ .

При таких температурах твердость металлов и сплавов снижается весьма существенно. По данным работы [205], твердость сплавов ВК по Виккерсу с 1270 (при температуре  $20-200^{\circ}\text{C}$ ) снижается до 420—500 при температуре соответственно  $750-650^{\circ}\text{C}$ .

Данные, приведенные выше, а также имеющиеся в других источниках, показывают, что тепловые явления, возникающие при разрушении горных пород, являются одним из важнейших факторов, определяющих физическую природу изнашивания породоразрушающего инструмента.

Большая сложность проблемы и отсутствие единой точки зрения на природу и характер изнашивания твердых тел при трении, несмотря на накопленный в большом количестве экспериментальный материал, не позволяют ответить на многие вопросы практики. Рассмотренные выше представления о процессе изнашивания твердых тел нуждаются в существенной систематизации. Последняя возможна лишь после анализа методов изучения изнашивания и приведения их к тем или иным общим критериям.

На наш взгляд, наиболее общими факторами, определяющими характер изнашивания, являются работа трения и условия ее реализации, так как процесс внешнего трения — это прежде всего процесс передачи механической энергии от одного тела к другому. Энергия механического движения в области контакта двух тел частично или полностью преобразуется в другие виды энергии, вызывая различные поверхностные эффекты.

## АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ АБРАЗИВНОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД

При дальнейшем изложении материала будем рассматривать факторы, зависящие от строения и свойств горных пород и существенно влияющие на скорость (или интенсивность) изнашивания металла.

В связи с тем что работа выполнялась применительно к условиям разрушения горных пород шарошечными долотами, все результаты исследований в области абразивности горных пород рассматриваются с точки зрения применимости их к условиям разрушения пород при бурении.

Выше было показано, что интенсивность изнашивания зависит от режима трения, который обычно характеризуется скоростью скольжения и удельной нагрузкой. Для вооружения долот эти параметры не остаются постоянными. Наиболее удобно режим трения при этом задать через удельную мощность трения и один из параметров, величина которого оценивается наиболее точно, например скорость скольжения.

По скорости в настоящее время можно выделить два основных способа бурения: роторный (низкооборотный) и турбинный и электробурама (высокооборотный). При роторном способе бурения скорости вращения долота составляют 60—180 об/мин, что соответствует 1,5—4,5 циклам в 1 с взаимодействия элементов вооружения с горной породой. При турбинном способе бурения скорость вращения долота составляет 600—1200 об/мин, что соответствует 15—30 циклам в 1 с. Это значит, что частота взаимодействия при роторном способе бурения на один порядок ниже, чем при турбинном.

#### Оценка условий абразивного изнашивания вооружения шарошечных долот

Оценка скорости скольжения элементов вооружения шарошечного долота относительно забоя скважины. Нами [130] исследована кинематика взаимодействия вооружения долот типа Т с горной породой и составлена методика расчета средних скоростей скольжения относительно плоскости забоя скважины.

Скольжение шарошечных долот при работе по деформируемому забою изучалось ранее [157]. Фактически же взаимодействие зубьев долота с породой более сложно, чем прямо в указанной работе. Наши данные, а также данные других исследователей [19, 141] показывают, что при работе шарошечных долот в твердых породах периферийные венцы создают рейку, периферийный шаг которой больше наибольшего шага периферийного венца шарошки. Невозможность качения шарошек без скольжения даже с конусами «чистого» качения отмечалась в работе [172].

В основу нашей методики расчета скоростей скольжения положено то, что закон движения каждой шарошки определяется взаимодействием периферийного венца с зубчатой рейкой на забое скважины, шаг которой не меняется в процессе работы долота.

По наибольшему диаметру шарошки с наименьшим числом зубьев на периферийном венце определяется шаг. Затем подсчитывается, какое число раз он укладывается в окружность, диаметр которой равен диаметру долота. Полученная величина округляется до целого числа в меньшую сторону, что и составит число зубьев рейки забоя. Скорость вращения шарошки за один оборот долота равна

$$n = z_p / z_n,$$

где  $n$  — скорость вращения данной шарошки за один оборот долота;  $z_p$  — число зубьев рейки забоя;  $z_n$  — число зубьев периферийного венца данной шарошки.

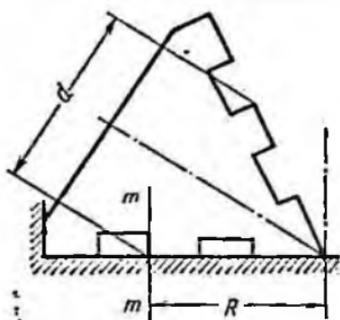


Рис. 6.

Далее допускаем, что долото и шарошки вращаются равномерно.

Поскольку  $z_n$  у всех шарошек различно, то каждая шарошка имеет свою скорость вращения. Этот факт отмечается и в работе [19]. Из схемы на рис. 6 видно, что при износе вооружения шарошек по высоте путь, проходимый любым сечением венца (например,  $m - m$ ) по забою скважины, можно

принять постоянным и равным

$$L = 2\pi R,$$

а переменной является лишь высота зубьев, которая оценивается изменением диаметра  $d$ .

Путь «чистого» качения данного сечения венца составит

$$L' = \pi d n. \quad (10)$$

Тогда разность

$$L - L' = l. \quad (11)$$

составит величину скольжения сечения  $m - m$  венца шарошки за один оборот долота. Скорость скольжения определяется делением величины  $l$  на время одного оборота долота.

Для оценки порядка величины скоростей скольжения приведем расчет для нового долота ОМ21-190Т при ско-

рости вращения вала турбобура 600 об/мин. Шаг периферийного венца с наименьшим числом зубьев составит

$$t = \frac{\pi D_m}{z} = \frac{\pi 122}{19} = 20,2 \text{ мм.}$$

Тогда число зубьев рейки забоя составит

$$z_p = \frac{\pi D_d}{t} = \frac{\pi 190}{20,2} = 29,6.$$

Принимаем  $z_p = 29$ .



Рис. 7. Распределение скоростей скольжения по венцам шарошечных долот ( $n_d = 600$  об/мин).

а — долото ОМ21-190Т;  
б — долото 1В-190Т.



На рис. 7 показаны эпюры скоростей скольжения. Аналогично проведен расчет и для долота 1В-190Т. Из рис. 7 видно, что различные шарошки одного и того же долота имеют различное распределение скоростей скольжения по венцам. Анализ формул (10) и (11) показывает, что при уменьшении высоты зубьев (износ вооружения) величина положительного проскальзывания будет увеличиваться, а отрицательного — уменьшаться, т. е. будет наблюдаться перераспределение скоростей скольжения. При принятых допущениях скорость скольжения элементов вооружения долота прямо пропорциональна скорости его вращения.

Ниже приведены наибольшие скорости скольжения элементов вооружения долота 1В-190Т для характерных скоростей вращения долота.

Скорость вращения долота, об/мин . . .	60	180	600	1200
Наибольшая скорость скольжения, м/с	0,80	0,24	0,80	1,60

Несколько сложнее определить скорость скольжения зубьев долот, фрезерующих стенку скважины. Некоторые

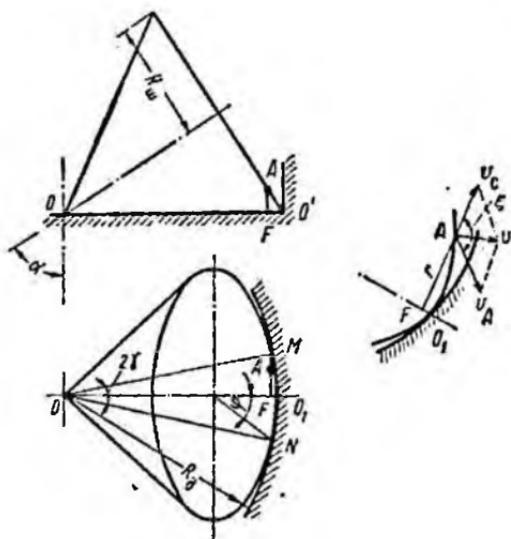


Рис. 8.

исследователи ошибочно принимают эту скорость равной окружной скорости шарошки долота. Из рис. 8 видно, что мгновенная скорость движения любой точки (например,  $A$ ), основания конуса, который катится по плоскости забоя, будет равна

$$v_A = \omega r, \quad (12)$$

где  $\omega$  — угловая скорость конуса относительно мгновенной оси вращения  $OO'$ ;  $r$  — кратчайшее расстояние от рассматриваемой точки до мгновенной оси вращения.

Длина дуги  $MN$  (рис. 8), на которой фрезеруется стенка скважины, зависит от диаметра шарошки, диаметра долота и угла наклона  $\alpha$  оси шарошки к оси долота. При

$\alpha = 50^\circ$ , по данным [121], величина угла  $2\gamma = 20^\circ$ . Из рис. 8 видно, что с большой степенью точности можно принять  $r = \sphericalcap AO_1$ . Тогда максимальное значение радиуса  $r$ , при котором начинается фрезерование стенки скважины, равно

$$r = \frac{\pi R_m}{180} \varphi,$$

где

$$\varphi = \gamma \frac{R_d}{R_m},$$

отсюда

$$r = \frac{\pi R_d \gamma}{180}; \quad \omega = \omega_m \cos(90^\circ - \alpha),$$

где  $\omega_m$  — угловая скорость вращения шарошки.

Одновременно точки периферии шарошки участвуют в движении в направлении вращения долота при проскальзывании.

Следовательно, полная скорость точек периферии равна

$$\vec{v} = \vec{v}_c + \vec{v}_A,$$

где  $\vec{v}_c$  — скорость скольжения периферии шарошки в результате проскальзывания долота;  $\vec{v}_A$  — мгновенная скорость движения точки периферии относительно стенки скважины при качении шарошки без проскальзывания.

Нетрудно показать, что угол  $\xi$  между вектором  $\vec{v}_c$  и вектором  $\vec{v}_A$  (рис. 8) равен

$$\xi = \arctg \frac{1}{\sin \varphi / 2 \cos \alpha}.$$

Нами проведены соответствующие расчеты для долота OM21-190T при скорости его вращения 600 об/мин, результаты которых приведены ниже.

№ шарошки	I	II	III
$v_c$ , м/с	0,14	0,81	0,40
$v_A$ , "	1,21	1,05	1,17
$v$ , "	1,23	1,39	1,27

Из приведенных результатов видно, что наибольшая скорость зубьев долота типа Т относительно стенки скважины примерно в 1,5 раза выше наибольшей скорости скольжения относительно забоя.

Оценка характера динамического нагружения вооружения шарошечных долот. Динамическая нагрузка на долото определяется величиной и характером осевых перемещений корпуса долота.

Р. А. Бадалов [24], В. С. Федоров [170], П. В. Балицкий [25], исходя из допущения, что зубья каждой шарошки расположены по ее образующим, а сами шарошки синхронно перекатываются по забою, т. е. одновременно становятся на забой то одним, то двумя зубьями каждого венца и забой при этом является абсолютно жестким, определяют осевое перемещение долота по формуле

$$h_r = R_{ш} \left( \cos \omega t - \cos \frac{\pi}{z} \right) \cos \beta, \quad (13)$$

где  $R_{ш}$  — радиус шарошки;  $\omega$  — угловая скорость шарошки;  $t$  — время;  $z$  — число зубьев на периферийном венце шарошки;  $\beta$  — угол наклона оси цапфы долота к плоскости забоя.

Теоретическая частота колебаний динамической нагрузки на долото на основании указанных выше допущений определяется по формуле [158]

$$v_r = \frac{z_{ср} D n}{60 d}, \quad (14)$$

где  $z_{ср}$  — среднее число зубьев на периферийных венцах шарошек;  $D$  — диаметр долота;  $n$  — скорость вращения долота;  $d$  — диаметр шарошки.

П. В. Балицкий [26] провел экспериментальные исследования на модели колонны буровых труб с модельными долотами, которые имели по две симметрично расположенные цилиндрические шарошки, приближенно моделирующие периферийные венцы шарошки. Забой скважины был практически недеформируемым, т. е. исследования проводились при всех допущениях, указанных выше. Полученная в результате опыта частота полностью соответствовала теоретической частоте, определенной по формуле (14).

Зубья выпускаемых в настоящее время долот расположены по поверхности шарошки вразбежку. В этом случае для подсчета вертикальных перемещений долота В. С. Федоров [170] предлагает брать число зубьев шарошки в свету. Тогда и при определении частоты изменения ди-

нампческой нагрузки в формулу (14) вместо  $\bar{z}_{cp}$  следует подставлять число зубьев на шарошке в свету. Число зубьев в свету всегда больше, чем среднее число зубьев на периферийных венцах, следовательно, и частота колебаний будет больше, что не соответствует измерениям.

Л. Е. Симоняц [158] на специальном стенде проводил испытания долот диаметром 140 мм. В результате испытаний установлено, что при увеличении скорости вращения долота до 350 об/мин экспериментальное значение частот лишь несколько меньше подсчитанного по формуле (14). При дальнейшем увеличении скорости вращения эта разница возрастает. Измерения скорости вращения шарошек показали, что при этом увеличивается степень скольжения шарошек.

Было выдвинуто предположение, что все три шарошки работают синхронно. Однако анализ полученных осциллограмм не подтвердил это предположение. Частота изменения нагрузки должна была бы соответствовать частоте изменения шк на одной шарошке, как это наблюдается при синхронной работе шарошек, а всех трех, с учетом их скольжения, что также не подтверждается опытом.

Причину несоответствия частоты изменения нагрузки на породу и частоты движения зубьев шарошек Л. Е. Симоняц объясняет тем, что в процессе разрушения породы не все зубья шарошек передают нагрузку на породу, особенно при высоких скоростях вращения долота, хотя скольжение шарошек сравнительно небольшое. Здесь играет роль скачкообразный характер разрушения горной породы и конструкция самого долота. Такое объяснение полученных данных, на наш взгляд, не является убедительным. В связи с этим нами было проведено графо-аналитическое изучение причин вертикальных перемещений долота 1В-190Т с учетом следующих допущений:

1) долото является абсолютно жестким, т. е. деформациями лап, цапф, шарошек и контактными деформациями в подшипниках опор пренебрегаем;

2) забой, по которому работает долото, является недеформируемым;

3) долото в процессе вращения совершает только продольные колебания, т. е. ось вращения долота всегда перпендикулярна плоскости забоя скважины;

4) закон движения шарошек определяется периферийной рейкой забоя.

Результаты выполненного анализа подробно изложены в нашей работе [168].

Анализ показал, что трехшарошечное долото 1В-190Т при работе на забое испытывает ряд возмущений, которые приводят к возникновению вертикальных перемещений долота с различными частотами:

1) частота 75 колебаний/об, обусловленная зубчатостью вооружения долота;

2) частота 28 колебаний/об, обусловленная изменением площади контакта вооружения долота с забоем;

3) частота 3 колебания/об, обусловленная «ухабистостью» забоя скважины, образующейся в результате неравномерного воздействия вооружения долота на забой скважины в процессе работы.

Амплитуда колебаний с частотой 75 колебаний/об невелика и, как показывает анализ осциллограмм [158], не вызывает заметных колебаний нагрузки на долото. Наибольшее значение имеют колебания с частотами 28 и 3 колебания/об. Из осциллограмм, приведенных в работе [158], видно, что колебания с этими частотами играют решающую роль и обуславливают величину динамической нагрузки.

Собственные колебания бурового инструмента определим как для стержня из формулы (46)

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\rho L^2}{3E}}, \quad (15)$$

где  $\rho$  — плотность стали ( $7800 \text{ кг/м}^3$ );  $L$  — длина колонны (примем  $L = 1000 \text{ м}$ );  $T$  — период колебания в с;  $E$  — модуль упругости Юнга ( $20,6 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$ );  $T = 0,704 \text{ с}$ .

Тогда частота колебаний инструмента составит 1,4 Гц. Из формулы (15) следует, что частота колебаний обратно пропорциональна длине, т. е. при длине 10 м собственная частота 140 Гц, при 100 м — 14 Гц, при 1000 м — 1,4 Гц, при 2000 м — 0,7 Гц.

В табл. 1 приведены частоты колебаний долота 1В-190Т при различных скоростях вращения, вызванные рассмотренными нами причинами. Из сравнения результатов, полученных по формуле (15), с данными табл. 1 видно, что наиболее опасным с точки зрения возбуждения резонансных колебаний является возбуждение колебаний низкой частоты.

В связи с тем, что каждый зубец вооружения долота воздействует на забой в различных сочетаниях с другими зубьями, нагрузка на него будет изменяться от взаимодействия к взаимодействию в широких пределах. О характере изменения нагрузки на зубец можно судить по характеру изменения относительной площади контакта в момент взаимодействия данного зубца долота с горной породой. Результаты расчетов для долота 1В-190Т приведены в табл. 2.

Таблица 1

Число колебаний за один оборот	Частота (в Гц) при скорости вращения долота, об/мин				
	45	70	600	800	1000
75	56,0	87,5	750	1000	1250
28	21,0	32,7	280	374	466
3	2,3	3,5	30	40	50

Таблица 2

Диапазон изменения относительной площади контакта при взаимодействии зубьев различных венцов, %

I шарошка			II шарошка	
1-й венец	2-й венец	3-й венец	1-й венец	2-й и 3-й венцы
20,8—62,5	8,3—70,8	20,8—62,5	16,6—70,8	20,8—70,8

Из табл. 2 видно, что при каждом акте взаимодействия данного зубца долота удельная нагрузка на этот зубец в зависимости от сочетания контактирующих зубьев изменяется до 8,5 раз. В условиях деформируемого забоя эта разность будет несколько меньше. Расчеты, приведенные в работе [168], показали, что средняя относительная площадь контакта составляет 29,5%. Следовательно, отклонение максимального удельного давления от среднего составляет  $k_d = 29,5/8,3 = 3,6$  раза.

Очевидно, чем тверже горная порода, тем ближе фактическое отношение максимального удельного давления к среднему к подсчитанной величине. Вероятность того, что величина контактного давления будет максимальной

(площадь контакта долота будет равна 8,3%), равна 0,035, т. е. например, зубья 2-го венца 1 шарошки 35 раз из 1000 будут взаимодействовать с горной породой с максимальной перегрузкой. Высокая степень перегрузки зубьев отдельных венцов, очевидно, и является одной из основных причин смятия и поломки их.

Кроме того, при работе долота на забое в определенные промежутки времени будет накладываться дополнительная нагрузка вследствие низкочастотных колебаний долота (динамическая нагрузка). Следовательно, перегрузка зубьев в отдельные моменты времени может превышать величину, определяемую по формуле

$$k_d = \bar{F}_0 / F_0^{\min},$$

где  $\bar{F}_0$  — средняя относительная площадь контакта;  $F_0^{\min}$  — минимально возможная площадь контакта.

Таким образом, определение удельного давления элементов вооружения долота сводится к изучению колебаний долота в процессе его работы и усилий, возникающих при динамическом деформировании и разрушении горных пород, а также к установлению характера распределения напряжений под элементами вооружения, имеющего различную конфигурацию. Сам по себе каждый из этих вопросов изучен мало и требует постановки специальных экспериментальных исследований. Поэтому в первом приближении режим изнашивания элементов вооружения долота оценим по средней удельной мощности, затрачиваемой долотом на разрушение горной породы.

Оценка величины удельной мощности, реализуемой вооружением шарошечных долот. Расчет величины удельной мощности, реализуемой вооружением в контакте с горной породой, связан со значительными трудностями, так как фактическая площадь контакта элементов вооружения долота с горной породой в общем случае не известна. Поэтому проводим лишь приближенную оценку.

Известно, что как при турбинном, так и роторном способах бурения нагрузка на долото изменяется примерно в одинаковых пределах. Так, при бурении долотами диаметром 190 мм нагрузка на долото составляет  $10^5 \div 2 \cdot 10^5$  Н (10—20 тс) \*. С достаточной для оценочных рас-

\* Здесь и далее размерность будет даваться в старой и новой системе СИ.

четов точностью момент на долоте  $M$  можно определить по формуле

$$M = M_{уд}G, \quad (16)$$

где  $M_{уд}$  — удельный момент;  $G$  — нагрузка на долото.

Для долот типа Т диаметром 190 мм принимаем удельный момент, равный  $5 \cdot 10^{-3}$  Н·м/Н. Тогда работа, совершаемая долотом за один оборот при средней нагрузке на долото  $1,5 \cdot 10^5$  Н, составит  $A_3 = 4,7 \cdot 10^3$  Дж. Средняя работа  $A_3$ , реализуемая за один акт взаимодействия зуба долота с горной породой, может быть определена по формуле

$$A_3 = \frac{A_1 \eta}{i \sum z}, \quad (17)$$

где  $i$  — среднее число оборотов шарошки за один оборот долота (принимаем  $i = 1,5$ );  $\sum z$  — число зубьев долота (для долота 1В-190Т  $\sum z = 150$ );  $\eta$  — коэффициент использования вооруженном долоте подведенной к долоту мощности (для оценочного расчета принимаем  $\eta = 0,8$ ).

После подстановки получаем  $A_3 = 16,8$  Дж, (1,71 кгс·м). Средняя удельная мощность, реализуемая зубом долота, составит:

$$N_{уд} = \frac{A_3 v}{S_3}, \quad (18)$$

где  $v$  — частота взаимодействия зуба долота с горной породой;  $S_3$  — рабочая поверхность зуба нового долота (для долота 1В-190Т  $S_3 = 16,3$  мм<sup>2</sup>).

Однако для шарошечного долота контакт зубьев не является непрерывным, а поэтому среднюю удельную мощность, реализуемую рабочей поверхностью зубца долота за один акт взаимодействия, определим по формуле

$$N'_{уд} = \frac{A_3}{S_3 T_3},$$

где  $T_3$  — среднее время пребывания зуба в контакте с горной породой;  $T_3 = 0,012 * T_0$ , ( $T_0$  — время одного оборота долота).

$$N'_{уд} = \frac{A_3}{S_3 0,012 T_0}. \quad (19)$$

\* Среднее относительное время пребывания зубца долота 1В-190Т в контакте с горной породой [168].

Измерения рабочей поверхности вооружения долот после работы на забое показали, что рабочая поверхность зубьев в процессе износа может возрастать до 5—10 раз. Для расчета средней мощности принимаем

$$S_{\text{ср}} = 3,75 S_3.$$

Результаты расчетов по формулам (18) и (19) сведены в табл. 3.

Таблица 3

Показатели	Скорость вращения долота, об/мин			
	60	180	600	1200
Частота $\nu$ , Гц	1,5	4,5	15	30
$N_{\text{уд}}$ , Вт/мм <sup>2</sup>	1,55	4,7	15,5	31,0
$N'_{\text{уд}}$ , кгс·м/мм <sup>2</sup> ·с	0,16	0,48	1,60	3,2
$N_{\text{уд}}$ , Вт/мм <sup>2</sup>	86	256	860	1720
$N'_{\text{уд}}$ , кгс·м/мм <sup>2</sup> ·с	8,8	26,4	88,0	176,0
$N_{\text{уд}}$ , Вт/мм <sup>2</sup>	0,41	1,23	4,1	8,2
$N'_{\text{уд}}$ , кгс·м/мм <sup>2</sup> ·с	0,042	0,13	0,42	0,84
$N_{\text{уд}}$ , Вт/мм <sup>2</sup>	23	69	230	460
$N'_{\text{удср}}$ , кгс·м/мм <sup>2</sup> ·с	2,35	7,1	23,5	47,0

Из табл. 3 видно, что мощность, реализуемая рабочей поверхностью долот, очень велика. Кроме того, в результате цикличности взаимодействия концентрация энергии в контакте увеличивается почти в 50 раз ( $N'_{\text{уд}}/N_{\text{уд}} = 50$ ).

Оценка условий охлаждения. Калориметрические исследования работы долота при разрушении горючих пород показали, что практически вся реализуемая долотом энергия переходит в тепло [20, 47]. Поэтому особое внимание следует уделить охлаждению долот. Практически долота охлаждаются потоком промывочной жидкости или продувочного агента.

Оценим количество воды, необходимой для охлаждения шарошечных долот диаметром 190 мм. Общая рабочая поверхность вооружения долота 1В-190Т составляет 2450 мм<sup>2</sup>. При турбинном бурении наиболее частый расход воды составляет 25 л/с. Тогда удельный расход воды оценивается величиной

$$q = \frac{25\eta}{2450} = \frac{25 \cdot 0,8}{2450} = 0,0082 \text{ л/с} \cdot \text{мм}^2,$$

т. е.

$$q = 0,01 \text{ л/с} \cdot \text{мм}^2.$$

Оценка напряженного состояния в горной породе при вдавливании в нее элементов вооружения буровых долот.

Элементы вооружения шарошечных долот, представляющие собой притупленный клин, первоначально имеют плоскую рабочую поверхность (точнее, криволинейную с радиусом кривизны, равным радиусу шарошки в данном сечении) без плавного перехода к граням клина. В процессе приработки долота наблюдаются скругления вначале острых кромок, а затем и вершины зубца в целом.

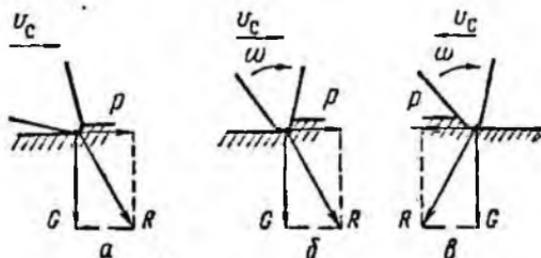


Рис. 9. Схемы работы элементов вооружения долот.

$u_c$  — скорость скольжения;  $\omega$  — скорость вращения шарошки.

Кривизна рабочей поверхности не остается постоянной во времени, а в большой степени обусловлена величиной сработки вооружения и рядом других факторов. Общим для зубчатого вооружения является то, что рабочая поверхность зубьев долота имеет конечный радиус кривизны на протяжении практически всего периода работы на забое.

Схема действия сил на горную породу со стороны элементов вооружения долот показана на рис. 9. Из рис. 9 видно, что основным отличительным признаком работы элементов долот режуще-истирающего типа (рис. 9, а) является непрерывный контакт рабочей поверхности с горной породой, а шарошечных долот — цикличность взаимодействия вследствие вращения шарошки с угловой скоростью  $\omega$  (рис. 9, б и в). При воздействии на горную

породу элементы вооружения долот создают как нормальную, так и касательную нагрузки, обусловленные особенностями взаимодействия вооружения долот с горной породой.

Рассмотрим упругое напряженное состояние в горной породе при вдавливании в нее криволинейной поверхности, приняв следующие допущения: горная порода изотропна; при деформировании соблюдается закон Гука;

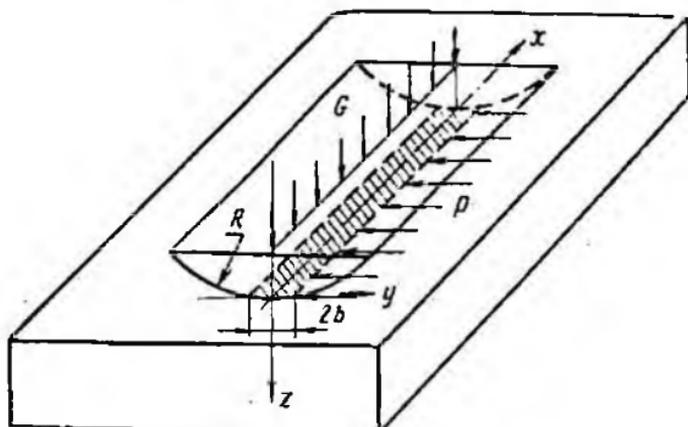


Рис. 10. Расчетная схема.

$G$ ,  $P$  — интенсивность соответственно нормальной и касательной нагрузок;  $R$  — радиус кривизны рабочей поверхности;  $2b$  — ширина площадки контакта.

нормальная и касательная нагрузки приложены статически; разрушение на поверхности горной породы отсутствует; первоначальный контакт поверхностей по линии, длина которой много больше ширины формируемой площадки контакта.

Принятые допущения позволяют воспользоваться принципом независимости действия сил при рассмотрении напряженного состояния в упругой области деформирования. Расчетная схема приведена на рис. 10.

Напряженное состояние при вдавливании цилиндра в поверхность под действием равномерно распределенной нормальной нагрузки по образующей рассмотрено Герцем. При вдавливании формируется площадка контакта, половина ширины которой определяется по формуле [191]

$$b = 2 \sqrt{\frac{2G(1-\mu^2)R}{\pi E_{\text{пр}}}}, \quad (20)$$

где  $G$  — нагрузка на единицу длины образующей цилиндра;  $\mu$  — коэффициент Пуассона;  $R$  — радиус кривизны вдавливаемой поверхности;  $E_{np}$  — приведенный модуль Юнга, равный  $E_{np} = \frac{2E_1E_2}{E_1+E_2}$  ( $E_1$  — модуль Юнга вдавливаемого материала, а  $E_2$  — модуль Юнга горной породы).

Распределение давления по ширине контакта следует эллиптическому закону

$$q(y) = q_0 \sqrt{1 - \frac{y^2}{b^2}}, \quad (21)$$

где  $q_0$  — максимальное нормальное давление на площадке контакта.

$$q_0 = \sqrt{\frac{GE_{np}}{2\pi(1-\mu^2)R}}. \quad (22)$$

Для определения закона распределения касательных напряжений на поверхности контакта М. М. Саверпи [159] воспользовался гипотезой Лоренца, из которой следует, что касательные напряжения пропорциональны нормальному давлению, и нашел выражения для компонентов напряжений при одновременном действии нормальной и касательной нагрузок

$$\left. \begin{aligned} \sigma_z &= q_0 \left[ \omega \operatorname{sh} \alpha \sin \beta \frac{\sin 2\beta}{\operatorname{ch} 2\alpha - \cos 2\beta} - e^{-\alpha} \sin \beta - \right. \\ &\quad \left. - \sin \beta \operatorname{sh} \alpha \left( 1 - \frac{\operatorname{sh} 2\alpha}{\operatorname{ch} 2\alpha - \cos 2\beta} \right) \right] \\ \sigma_y &= q_0 \left[ \omega \left( 2e^{-\alpha} \cos \beta - \sin \beta \operatorname{sh} \alpha \frac{\sin 2\beta}{\operatorname{ch} 2\alpha - \cos 2\beta} \right) - \right. \\ &\quad \left. - e^{-\alpha} \sin \beta + \sin \beta \operatorname{sh} \alpha \left( 1 - \frac{\operatorname{sh} 2\alpha}{\operatorname{ch} 2\alpha - \cos 2\beta} \right) \right] \\ \sigma_x &= 2\mu q_0 e^{-\alpha} (\omega \cos \beta - \sin \beta) \\ \tau_{yz} &= q_0 \left\{ \omega \left[ e^{-\alpha} \sin \beta - \sin \beta \operatorname{sh} \alpha \times \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \times \left( 1 - \frac{\operatorname{sh} 2\alpha}{\operatorname{ch} 2\alpha - \cos 2\beta} \right) \right] - \operatorname{sh} \alpha \sin \beta \frac{\sin 2\beta}{\operatorname{ch} 2\alpha - \cos 2\beta} \right\} \end{aligned} \right\}, \quad (23)$$

где  $\omega$  — отношение касательной нагрузки к нормальной  $\left[ \omega = \frac{P}{G} \text{ (см. рис. 10)} \right]$ ;  $\alpha$  и  $\beta$  — эллиптические координаты, связанные с прямоугольными следующими соотношениями:  $z = b \operatorname{sh} \alpha \sin \beta$ ;  $y = b \operatorname{ch} \alpha \cos \beta$ .

С точки зрения разрушения горных пород при бурении автора интересовали условия достижения предельного состояния в горной породе. Сделаем допущение, что предельное состояние в горной породе наступает при достижении определенного значения интенсивности напряжений, т. е. выполняется условие текучести Мизеса [104]

$$\sigma_1 = \sqrt{(\sigma_z - \sigma_x)^2 + (\sigma_y - \sigma_x)^2 + (\sigma_z - \sigma_y)^2 + 6\tau_{yz}^2} \leq \sigma_0, \quad (24)$$

где  $\sigma_1$  — интенсивность напряжений;  $\sigma_0$  — предельная характеристика испытываемого материала.

Рассмотрим четыре случая:

- $\omega = 0$  — действует только нормальная нагрузка;
- $\omega = 0,2$  } одновременно действуют нормальная и ка-
- $\omega = 0,4$  } сательная нагрузки
- $\omega = 0,6$  }

Коэффициент Пуассона принимаем равным 0,25.

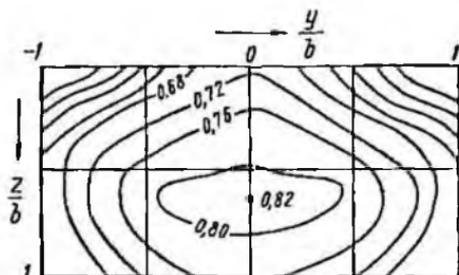
На ЭВМ «Мир» были проведены соответствующие вычисления по формулам (23), которые позволили построить линии равных значений интенсивности напряжений в плоскости, перпендикулярной оси цилиндра. На рис. 11 результаты расчетов приведены в относительных величинах

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_0} = f\left(\frac{y}{b}; \frac{z}{b}\right). \quad (25)$$

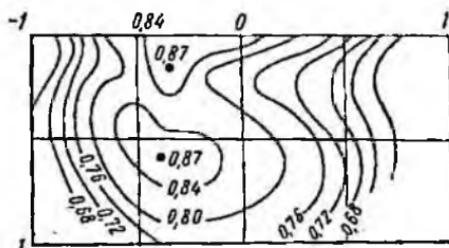
Из рис. 11, а видно, что при вдавливаннии цилиндрической поверхности в горную породу предельное состояние в ней будет достигнуто на некоторой глубине, равной примерно  $0,6 b$  (в общем случае эта величина, по данным Р. М. Эйгелеса [202], зависит от коэффициента Пуассона, однако для оценочных расчетов ее можно принять постоянной). При одновременном действии нормальной и касательной нагрузок зона максимальной интенсивности напряжений смещается в сторону действия касательной силы (рис. 11, б), и в области, прилегающей к поверхности контакта, формируется вторая зона максимальной интенсивности напряжений.

По мере увеличения относительной касательной нагрузки интенсивность напряжения во второй области растет значительно быстрее, чем в первой. При  $\omega = 0,2$  интенсивность напряжений в этих зонах становится примерно равной, а при  $\omega > 0,2$  интенсивность напряжений во второй зоне становится больше, чем в первой (рис. 11, б и в).

Оценим величину  $q_0$  и величину нормальной нагрузки при  $\sigma_1 = \text{const}$ , используя уравнение (22) и данные рис.11. Результаты оценки приведены в табл. 4 в относительных величинах.



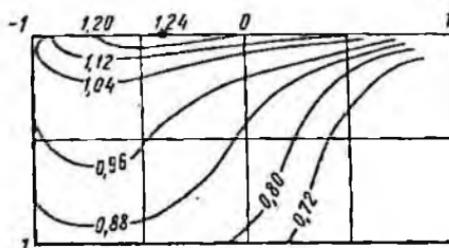
а



б

Рис. 11. Линии равной интенсивности напряжений

$$\frac{\sigma_1}{q_0} = f\left(\frac{y}{b}, \frac{z}{b}\right)$$



в

Из табл. 4 видно, что для достижения одного и того же значения максимальной интенсивности напряжений величина требуемой нормальной нагрузки с ростом касательной нагрузки быстро уменьшается. Аналогичные результаты получены экспериментально Б. В. Байдюком и

Таблица 4

	Значение $\omega$			
	0	0,2	0,4	0,6
$\sigma_t \text{ max}/q_0$	0,82	0,88	1,24	1,68
$q_0$	1,00	0,93	0,66	0,49
$G$	1,00	0,86	0,44	0,24

В. П. Бугаевым [29] при вдавливании штампа и одновременно приложенных нормальной и касательной нагрузках.

Из выражений [23] и [24] видно, что величина интенсивности напряжений пропорциональна максимальному нормальному давлению. Решим уравнение [22] относительно нагрузки  $G$

$$G = \frac{2\pi q_0^2 (1 - \mu^2) R}{E_{\text{пр}}} \quad (26)$$

Условию  $\sigma_t = \text{const}$  соответствует условие  $q_0 = \text{const}$ . Следовательно, можно записать, что при  $\sigma_t = \text{const}$

$$\frac{G_1}{G_2} = \frac{R_1}{R_2}, \quad (27)$$

т. е. нагрузки, требуемые для достижения предельного состояния, пропорциональны радиусам кривизны вдавливаемых поверхностей.

С точки зрения работы вооружения долота на забое можно сделать следующие предварительные заключения:

1) при работе шарошечных долот наличие касательных нагрузок, обусловленных кинематикой долота, играет большую роль в разрушении горных пород, снижая требуемые величины осевых нагрузок для достижения одинакового напряженного состояния;

2) напряженное состояние, создаваемое вооружением долота в горной породе, а следовательно, и эффект разрушения при постоянной нагрузке с ростом радиуса кривизны рабочей поверхности (в результате ее изнашивания) уменьшается.

## Особенности изнашивания вооружения шарошечных долот

Большая удельная мощность, реализуемая вооружением шарошечных долот, оказывает значительное влияние на качественную и количественную картину изнашивания. В дальнейшем величину удельной мощности будем называть напряженностью работы. Изнашивание вооружения освещается в литературе в основном с точки зрения долговечности долот и их производительности.

Долговечность долота определяется долговечностью либо вооружения, либо опоры. В предлагаемой работе рассматривается только изнашивание вооружения. Тем не менее, в литературе при определении долговечности часто не выделяется обуславливающая ее причина.

Ю. А. Грицаенко [51] предлагает ввести комплексный критерий работоспособности долота, который включает как интенсивность изнашивания долота, так и скорость разрушения горной породы. В зависимости от механических свойств горных пород и потенциальных возможностей бурового оборудования мы можем столкнуться с самой различной напряженностью работы вооружения долот. Исследования, проведенные А. А. Петросяцем, Э. Л. Мархасиным [139] и Ю. А. Грицаенко [51], показывают, что изменение геометрии вооружения долот также влияет на интенсивность их изнашивания и производительность. С изменением геометрии вооружения долот связано изменение величины его рабочей поверхности, запаса изнашиваемого металла, а также характера взаимодействия зубьев долота с горной породой, т. е. с изменением геометрии вооружения в значительной степени меняется и напряженность его работы, что подтверждается приведенными выше расчетами.

Качественная картина разрушения и изнашивания вооружения долот изучена к настоящему времени довольно полно. Кажущиеся противоречия данных различных исследований связаны в основном, с нечеткой оценкой условий и напряженности работы вооружения.

Л. А. Шрейнер [191] считает, что изнашивание вооружения долот режущего типа аналогично шлифованию. Изнашивание зависит от удельного давления и скорости скольжения (т. е. от напряженности работы), а также от пути трения и абразивных свойств горных пород.

Е. Ф. Эпштейн [199] отмечает большое влияние на износ характера разрушения горной породы, который определяет восстановление условий трения в контакте металла с горной породой.

Выход из строя вооружения шарошечных долот связан как с поломками зубьев, так и с постепенным их износом. Вопросы поломок зубьев долот изложены в работах [32—34, 71, 76, 117, 148]. Наиболее полно причины и характер разрушения вооружения долот изложены в работах В. Н. Виноградова, Г. К. Шрейбера и Г. М. Сорокина. В период приработки долота происходят выкрашивание и слом небольших участков вершины зубьев, что является следствием кратковременных перегрузок. В процессе работы зубья подвергаются прямому удару и знакопеременному изгибу, приводящим к развитию усталостных трещин и слому зубца под корень. Поломка зубьев не связана непосредственно с абразивными свойствами горных пород, а поэтому не входит в круг вопросов, рассматриваемых в нашей работе.

С абразивными свойствами горных пород связан износ рабочей поверхности вооружения долот. В работах Е. М. Кузмака и его сотрудников [74, 75] износ рассматривается как результат выкрашивания, смятия и абразивного изнашивания рабочей поверхности в условиях действия значительных циклических нагрузок. Аналогично описывается изнашивание вооружения шарошечных долот и объясняется в работе Р. Н. Сейфи [156]. Э. Л. Мархасин и В. Н. Виноградов [116] отмечают, что при бурении с небольшими нагрузками превалирующим является абразивное изнашивание, а при форсированном режиме бурения решающее влияние приобретает смятие и выкрашивание рабочей поверхности зубьев, а также их поломки. В работах М. Г. Бингхема [140] поломки зубьев долот связываются в основном с прочностью горных пород.

В работе В. Н. Виноградова, Г. К. Шрейбера, Г. М. Сорокина [32] механизм изнашивания зубьев шарошечных долот представлен следующим образом. Интенсивность изнашивания зубьев долот определяется главным образом прямым внедрением абразива в поверхность контакта зубца с породой. В момент контакта изнашиваемой поверхности с зернами абразива в местах контакта развиваются большие удельные давления, в результате чего часть абразивных зерен внедряется в изнашиваемую поверх-

ность, вызывая локальную пластическую деформацию металла, и образуют на этой поверхности лунки. В поверхность внедряются «благоприятно» расположенные зерна, твердость которых выше твердости данного металла. При повторном контакте зерна абразива расширяются, углубляют их или завальцовывают, в результате чего происходит отрыв металла.

Большое влияние на износ вооружения оказывает проскальзывание вооружения долот относительно горной породы. Исследования, выполненные Л. А. Алексеевым, М. Я. Берковичем и М. Р. Мавлютовым [6, 7] на долотах, отработанных при турбинном способе бурения, показывают, что распределение износа вооружения по венцам шарошки в значительной степени повторяет распределение скоростей скольжения вооружения долота.

Максимальным скоростям скольжения соответствует и максимальная глубина влияния тепла трения на материал вооружения, максимальная степень пластического деформирования рабочей поверхности зубьев и максимальный относительный износ. Для зубьев 1-го, а иногда и 2-го венца, скорость проскальзывания которых мала, характерны деформации сжатия, а для периферийных венцов, скорость скольжения которых максимальна, характерны деформации сдвига. Рабочая поверхность приобретает полосчатый вид, характерный для абразивного изнашивания при трении скольжения [7]. Поверхности вооружения долот, для которых характерны большие деформации сдвига, покрыты густой сеткой трещин. В работах Е. М. Кузманя [74] и Э. Л. Мархасина [117] отмечалось, что развитие трещин на рабочей поверхности зубьев долот связано с циклическим изменением напряжений и температуры в поверхностных слоях металла.

Как показали наши исследования [154], большое влияние на изнашивание вооружения шарошечных долот, наряду с абразивными свойствами разбуриваемых пород, оказывает режим реализации энергии в процессе разрушения и в основном скорость вращения долота.

Исследование износа вооружения долот, выполненное В. Г. Беликовым и др. [18], показывает, что интенсивность (отношение абсолютного износа вооружения к суммарному числу оборотов долота) и скорость изнашивания уменьшаются по мере увеличения скорости вращения долота (или пройденного пути).

Анализ результатов исследований рабочих поверхностей вооружения отработанных шарошечных долот показывает, что при высокой напряженности работы, характерной для турбинного бурения, износ вооружения аналогичен абразивному изнашиванию и шлифованию. Общая картина изнашивания в значительной степени осложнена динамичностью, циклической работой и влиянием среды.

### Анализ методов определения абразивных свойств горных пород

Оценка абразивности горных пород проводится как по промышленным, так и по экспериментальным данным.

О. Н. Голубищевым [49] сделана попытка классифицировать методы определения абразивности горных пород по следующей схеме:

*Прямые методы определения* — по непосредственному измерению износа рабочих элементов породоразрушающего инструмента:

а) измерение линейного износа, характеризующего уменьшение высоты рабочего элемента (высоты зуба, выступа резцов);

б) измерение прироста площади контакта рабочих элементов (лезвий, зубьев, резцов) инструмента с породой;

в) измерение весового или объемного износа рабочих элементов инструмента.

*Косвенные методы определения* — по относительным характеристикам износа породоразрушающего инструмента:

а) оценка абразивности пород по величине проходки ствола скважины в метрах (в м) до износа породоразрушающего инструмента;

б) оценка абразивности пород по удельному весовому износу материала рабочих элементов породоразрушающего инструмента;

в) оценка абразивности пород по скорости износа долота;

г) оценка абразивности пород по кривой механической скорости бурения.

Лабораторные методы определения — на образцах горных пород:

- а) измерение твердости пород и кинетического коэффициента внешнего трения инструмента о породу;
- б) измерение износа эталонного материала: твердосплавных резцов, стержней, кольца (диска), сверл и др.;
- в) измерение продуктов изнашивания с помощью радиоактивных индикаторов (изотопов) [162, 163].

Лабораторные методы оценки абразивности горных пород в раздробленном виде.

Каждый из перечисленных выше методов оценки абразивности горных пород применяется в зависимости от условий и задач проведения исследования и не является универсальным.

Обзор различных методов изучения абразивности горных пород приведен в работе Л. И. Барона и А. В. Кузнецова [12]. Мы же рассмотрим лишь те методы, которые разрабатывались для определения абразивности применительно к разрушению горных пород при бурении. Известно, что в процессе бурения механическая скорость с течением времени непрерывно уменьшается. Последнее происходит вследствие изнашивания вооружения бурового долота. Изнашивание долота, помимо других факторов, обуславливается абразивной способностью горных пород, которую В. С. Федоров [170] характеризует некоторым коэффициентом  $\theta_n$ , но количественной оценки этого коэффициента не дает.

А. П. Духин [65, 66] предлагает оценивать абразивность горных пород по показателю степени  $m$ , характеризующему темп падения механической скорости во времени. Установление этого показателя связано с определенными параметрами режима бурения. Широких определений показателя  $m$ , а также изучения его взаимосвязи с параметрами режима бурения проведено не было.

А. Ф. Суханов [155] при разработке единой классификации горных пород по буримости и взрываемости для горнодобывающей промышленности характеризовал буримость следующими основными показателями: количеством расходуемых буров на 1 м шпура и временем бурения (в мин) 1 м шпура. В этом случае на показатели буримости тех или иных горных пород существенное влияние оказывала их абразивность. Тем не менее, пользуясь данными этой классификации, судить об абразивных свойствах горных пород в явном виде не представляется возможным.

В. И. Карпов [94] предлагает оценивать абразивность горных пород, используя данные вращательного бурения шпуров, по темпу прироста во времени осевого усилия бурения с постоянной скоростью проходки.

Ю. Ф. Алексеев [1] определял абразивность горных пород по величине обратной относительной проходки на долото. Известно, однако, что проходка на долото далеко не всегда обусловлена долговечностью вооружения, и зависит от стойкости опоры, механических свойств горных пород и режима работы долота.

Из приведенных данных видно, что оценка абразивности пород по промышленным данным (прямые и косвенные методы) связана с более общей проблемой буримости горных пород. Результаты определения абразивной способности пород по промышленным данным зависят от большого числа природных и технологических факторов и не поддаются обобщениям.

Условиям обобщения данных могут отвечать лишь определения абразивности горных пород, полученные в лабораторных условиях. Поэтому основные усилия исследователей были направлены на разработку простых и быстрых методов определения абразивности.

В работе Ю. В. Волкова, З. А. Волковой и Л. М. Кайгородцева [39] описаны методы лабораторно-производственных испытаний износостойкости деталей и машин, работающих в абразивной среде. Во всех этих методах, как правило, используется постоянный абразивный материал (абразивная лента, зерна корунда, кварца и др.) и испытываются при этом различные материалы.

Абразивная способность горных пород (разный абразивный материал) исследуется с использованием постоянного эталонного материала.

При изучении абразивных свойств горных пород применительно к условиям работы породоразрушающих инструментов используются следующие основные схемы изнашивания (рис. 12).

Схема бурения — резания (рис. 12, а). По этой схеме были созданы установки Е. Ф. Эпштейна, Н. В. Пичахчи, Х. Сиверса и др. Е. Ф. Эпштейн [199] изучал износ твердосплавных резаков при различных режимах работы с охлаждающей струей дистиллированной воды. За меру абразивности принималось отношение объемного износа резца к единице работы сил трения (в  $\text{см}^3/\text{кгс}\cdot\text{см}$ ). Позже

абразивную способность горной породы Е. Ф. Эшштейн предложил оценивать произведением коэффициентов объемного износа  $\omega'$  (в  $\text{см}^3/\text{кгс}\cdot\text{см}$ ) и внешнего трения  $f$ . Показатель абразивности ( $f\omega'$ ) определялся по формуле

$$f\omega' = \frac{\Delta W}{P}, \quad (28)$$

где  $\Delta W$  — объем изношенного металла на единицу пути трения;  $P$  — нагрузка.

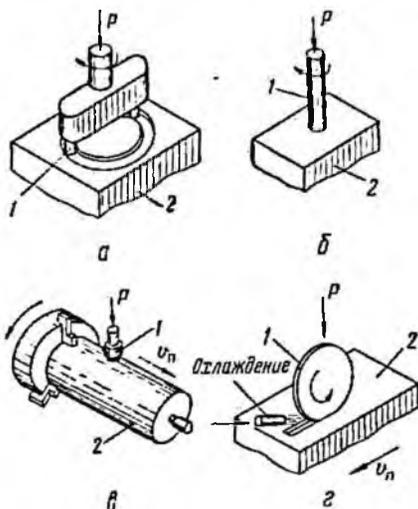


Рис. 12. Основные схемы изнашивания металлов при изучении абразивности горных пород.

1 — образец металла; 2 — образец горной породы;  $P$  — нагрузка на образец;  $v_n$  — скорость подачи.

Были получены зависимости  $f\omega' = \psi(P, v, t)$  ( $v$  — скорость скольжения,  $t$  — время).

По показателю  $f\omega'$ , определенному в стандартных условиях, можно оценить относительную абразивность горных пород. Однако обобщенный критерий абразивности горных пород в этой работе не был получен.

Абразивность горных пород Х. Свверсом [211] определялась по отношению к обычной малоуглеродистой стали, термически не обработанной, с твердостью по Бринеллю 120. При испытании использовались два стальных стержня диаметром 3 мм, установленных на расстоянии 15 мм друг от друга.

Образец горной породы располагали таким образом чтобы испытуемые образцы из стали вращались по его нижней поверхности, поэтому продукты износа удалялись самопроизвольно. Образцы испытались при нагрузке 20 кгс и скорости вращения 160 об/мин в течение 2 мин.

За меру абразивности  $X$ . Сиверсом принималась величина, обратная времени, необходимому для износа стандартного образца на 1 мм по высоте, поэтому чем меньше численное значение этой величины, тем выше абразивность. В этой работе нет ни обоснования условий испытания, ни соответствия материала образца материалу инструмента. Поэтому вряд ли можно ожидать от этого метода сколько-нибудь приемлемых результатов для породообразующих инструментов.

Н. И. Любимовым [112] для оценки абразивности горных пород предложен «способ буровой коронки», сущность которого заключается в износе при бурении самозатачивающейся коронки диаметром 46 мм. Коронка армирована тонколегированными пластинками твердого сплава марки ВКЗ размером  $20 \times 8,5 \times 0,7$  мм.

Абразивность породы определяется по формуле

$$A = \frac{P_1 - P_2}{l}, \quad (29)$$

где  $P_1$  и  $P_2$  — вес коронки до бурения и после него в г;  $l$  — проходка в м.

Испытания предлагается вести при бурении коронкой со скоростью вращения 200 об/мин, с нагрузкой 500 кгс при расходе воды на промывку 10 л/мин.

Преимуществом этого способа является возможность определять абразивность пород при бурении скважин. Однако методически способ разработан слабо. Это не позволяет использовать результаты испытаний для иных инструментов и режимов разрушения горных пород. При соответствующей методической доработке этот способ может стать основным при изучении абразивности горных пород применительно к работе долот режуще-испытающего типа.

Схема сверления или испытания эталонных стержней (рис. 12, б). Эта схема использовалась при изучении абразивности горных пород М. И. Койфманом, Р. Шефердом, Л. И. Бароном, А. В. Кузнецовым, О. Н. Голубинцевым и др. В работе Р. Шеферда [210] за показатель аб-

разности принят весовой износ бронзового стержня (в мг) за 1 мин в стандартных условиях, т. е. для определения абразивности принят материал, не применяющийся для изготовления породоразрушающих инструментов.

Л. И. Баропом и А. В. Кузнецовым [12] предложен метод определения абразивности горных пород, сущность которого заключается в истирании торцов цилиндрических стальных стержней (из стали-серебрянки) при вращательном движении о необработанную поверхность образца испытываемой горной породы. Истирание стальных стержней диаметром 8 мм производится на образцах пород в виде кернов и штуфов.

Установка для определения абразивных свойств пород монтируется на базе настольного сверлильного станка. Испытания ведутся при нагрузке 15 кгс и скорости вращения шпинделя станка 400 об/мин. Длительность испытания 10 мин. В качестве показателя абразивности горных пород принят весовой износ стержня (в мг/мин), т. е. используется показатель — скорость изнашивания в стандартных условиях. Этот метод широко используется для оценки абразивности пород. Его преимущество — быстрота и малая трудоемкость. К недостаткам этого метода относится отсутствие какого-либо моделирования процесса разрушения горной породы как по режиму работы, так и по материалу эталонного стержня.

В. И. Карпов и М. М. Протодьяконов [93] предлагают определять абразивность горных пород по скорости увеличения нагрузки на сверло из стали Р18 при постоянной подаче сверла 0,2 мм/об. Этот метод следует применять при разрушении горных пород долотами режуще-истирающего типа. Однако обоснования выбора материала и режима изнашивания нет. Отсутствует и охлаждение инструмента.

О. Н. Голубинцев [49] для оценки абразивности горных пород предложил комбинированный метод, позволяющий оценивать показатель абразивности одновременно с оценкой твердости этих же пород. Изготовлен специальный прибор, объединяющий два метода — метод вдавливания штампа и метод сверления. Прототипом прибора О. Н. Голубинцева является прибор типа ПТА для определения твердости и абразивности горных пород в массиве методом сверления, предложенный В. И. Карповым

и М. М. Протодьяконовым [93]. Подробное описание прибора и методика работы с ним приводятся в работе [49].

Сущность метода заключается в следующем. В предварительно подготовленную сверлом с твердосплавными вставками коническую лунку на образце породы вставляется эталонное стальное сверло. При сверлении в испытуемой породе в условиях винтовой подачи чем выше абразивность породы, тем быстрее тупится сверло и тем быстрее растет осевое усилие подачи. Твердость породы оценивается величиной осевого усилия, развиваемого при сверлении; более твердая порода оказывает большее сопротивление проникновению сверла.

Показатель абразивности горной породы измеряется средним приращением величины осевого усилия на один оборот сверла диаметром 12 мм, развиваемого при сверлении породы с постоянной подачей (0,2 мм/об), за 50 оборотов сверла, (из стали марки Р18).

К сожалению, в работе [49] отсутствуют количественные данные о показателях абразивности для конкретных горных пород.

Основным преимуществом этого способа является сравнительная оценка абразивных свойств пород одновременно с оценкой их твердости. Последнее необходимо для объективного нормирования и обоснования технико-технологических параметров ведения буровых работ. Кроме этого, рассматриваемый метод сравнительно прост, не требует предварительной обработки испытуемых образцов горных пород, а также электроэнергии и применения аналитических весов для измерения износа эталонного сверла.

Недостатком этого метода, как и метода В. И. Карпова, является применение его лишь для сравнительной оценки абразивных свойств горных пород, причем численные значения показателя абразивности пород сохраняются только в пределах этого метода и зависят от геометрии режущих кромок сверла и от свойств их материала.

Схема изнашивания на цилиндрической поверхности зерна (рис. 12, в). Во всех рассмотренных выше случаях, за исключением опытов Е. Ф. Эпштейна, не предусматривается очистка зоны контакта металла и горной породы. Опыты, выполненные Б. Фишем и др. [206] показали, что засорение продуктами износа поверхностей трения сильно искажает результаты измерений. В связи с этим была предложена схема с непрерывным обновлением поверх-

ности трения. Образец стали представляет собой шарик диаметром  $1\frac{1}{4}$ " (32 мм), закрепленный в державке.

В основе испытания лежит предположение, что износ определяется главным образом площадью фактического контакта поверхностей. Причем площадь фактического контакта для данной пары материалов зависит только от нормальной нагрузки. Опыты проводились при постоянных нагрузках и скорости скольжения. За меру (индекс) абразивности принят износ в мг на 1000 футов (305 м) пути трения. На тех же блоках, из которых были вырезаны образцы для испытания на абразивность, было проведено опытное бурение долотами, армированными твердыми сплавами. Какой-либо связи между индексом абразивности и темпом износа долот не получили.

Некоторая связь наблюдалась лишь между темпом износа долота и абразивным фактором. Под абразивным фактором понимается произведение индекса абразивности на сопротивление горной породы при испытании на одноосное сжатие. Следовательно, этот метод изучения абразивных свойств горных пород применительно к условиям работы породоразрушающего инструмента также ненадежен.

Схема изнашивания диска (кольца) (рис. 12, з). По схеме изнашивания вращающегося диска автором совместно с П. С. Баладиным под руководством проф. Л. А. Шрейнера [16, 192] исследовалась абразивность горных пород.

Впервые такой метод определения сопротивления износу был предложен еще Баушигером и в различных вариантах применяется в современных машинах по износу. Преимущество данного метода заключается прежде всего в том, что при относительно небольшой нагрузке контактное давление между кольцом и испытуемым телом достигает больших значений. Помимо этого, контактная поверхность кольца непрерывно меняется, что облегчает охлаждение и удаление продуктов износа, а также позволяет воспроизвести цикличность взаимодействия рабочей поверхности образца металла при трении, что необходимо при испытаниях на изнашивание применительно к вооружению шарошечных долот.

Из установок, основанных на этом принципе, наибольшее распространение получила машина Савин-Шкода (ЧССР) для определения износа металлов. На этой

машины нами были проведены предварительные опыты по износу сталей при трении о горные породы и выявлены ее преимущества и недостатки.

Проведенные испытания показали, что машина Савин-Шкода обладает следующими недостатками, которые частично отмечались и другими исследователями:

1) в процессе опыта непрерывно увеличивается контактная поверхность, что ведет к уменьшению контактного давления;

2) вследствие того, что испытуемый образец находится в неподвижном состоянии и истирается на одном месте, нет полного обновления поверхности трения на испытуемом образце и поверхность трения загрязняется частицами изношенного металла;

3) нет приспособления для замера окружного усилия на кольце, которое возникает при истирании.

В процессе истирания кольцом испытуемого тела и самого кольца об это тело контактное давление между ними при постоянной нагрузке непрерывно уменьшается вследствие увеличения площади контакта. В связи с этим возникает вопрос, можно ли в этом случае установить общие закономерности износа обоих трущихся тел.

Чтобы ответить на этот вопрос, рассмотрим экспериментальные данные Н. Н. Савина по износу закаленных сталей на машине Савин-Шкода.

В опытах Н. Н. Савина контактная поверхность непрерывно увеличивалась, а контактное давление соответственно уменьшалось, но их произведение было величиной постоянной, равной нагрузке  $P$ . Н. Н. Савиным было получено, что объемный износ закаленной стали прямо пропорционален пути трения и нагрузке на кольцо, т. е.

$$V = \omega' PL = \omega' pSL, \quad (30)$$

где  $\omega'$  — коэффициент пропорциональности;  $p$  — удельное давление;  $S$  — площадь контакта;  $L$  — путь трения.

Можно записать, что

$$\omega' = \frac{V}{pSL} = \text{const.} \quad (31)$$

Коэффициент пропорциональности  $\omega'$  есть не что иное, как интенсивность изнашивания, определяемая по формуле (31). В большинстве случаев наблюдалось постоянство интенсивности изнашивания  $\omega'$ . Вследствие этого

можно было для исследования изнашивания закаленных сталей и твердых сплавов при их трении о горные породы использовать машину Савин-Шкода.

Однако на очень мягких горных породах, обладающих малой износостойкостью, кольцо быстро погружается в образец на значительную глубину и его необходимо часто переставлять на образце прежде, чем будет достигнут износ кольца, который можно измерить. Избежать

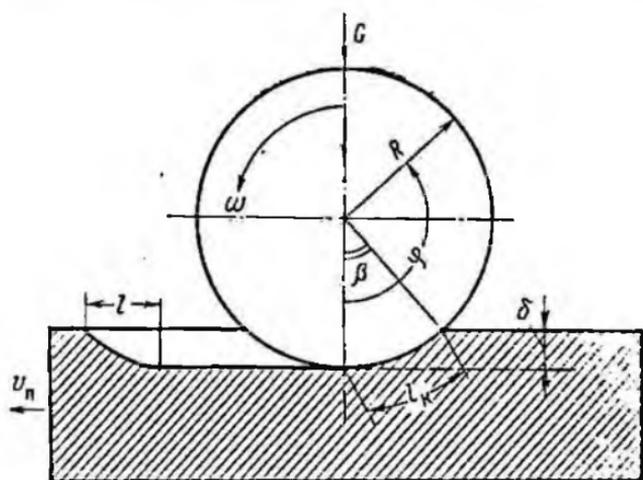


Рис. 13. Схема взаимодействия диска (кольца) с горной породой.

этого можно только в том случае, если образец породы в процессе опыта непрерывно перемещается, а не остается неподвижным, как в машине Савин-Шкода.

При проведении опытов по такой схеме контактное давление также будет изменяться, но в значительно меньшей степени и на небольшом отрезке пути, равном  $l$  (рис. 13), а не в течение всего опыта, как это было на машине Савин-Шкода. Очевидно, величина контактного давления при установившемся износе горной породы зависит от глубины канавки  $\delta$ , которая в свою очередь зависит от износостойкости горной породы при поверхностном изнашивании или от сопротивления разрушению при объеме разрушения и скорости поступательного движения образца горной породы  $v_n$ .

Это реализовано на специальной экспериментальной установке, подробное описание которой можно найти в работе [192]. В схеме установки предусмотрено непрерывное струйное охлаждение образца металла (кольца), равномерная подача образца горной породы и измерение момента трения.

В основу определения абразивности горных пород был положен вывод о постоянстве интенсивности изнашивания, сделанный на основании обобщения работ Н. И. Савина и результатов методических опытов. Коэффициент пропорциональности в уравнении (30) назван нами коэффициентом абразивности и определялся по формуле

$$\omega' = \frac{V}{PL}, \quad (32)$$

где  $V$  — износ металла кольца в  $\text{см}^3$ ;  $P$  — нагрузка на кольцо в кгс;  $L$  — путь трения —  $L = \pi Dn$  ( $D$  — диаметр кольца в м;  $n$  — число оборотов кольца в течение опыта).

Этот вывод хорошо согласуется с результатами опытов М. М. Хрущева и М. А. Бабичева [182], полученными при изучении изнашивания металлов при трении об абразивное полотно. Это же условие не противоречит определениям износа, выдвинутым П. А. Ребиндером и В. Д. Кузнецовым, поскольку при различных скоростях скольжения соблюдается постоянство работы трения, если коэффициент трения при изменении нагрузки не изменяется.

Из выражения (32) видно, что абразивность прямо пропорциональна объемному износу металла и обратно пропорциональна работе трения, так как работа трения  $A$  равна

$$A = fPL, \text{ кгс} \cdot \text{м}.$$

К сожалению, коэффициент трения  $f$  не является постоянной величиной, а зависит от большого числа факторов. Это условие не было учтено при определении абразивности горных пород, а также при проверке влияния скорости скольжения, нагрузки на образец и изменения вида и свойств среды, вследствие чего были получены в некоторых случаях противоречивые результаты. Более строгий физический смысл имеет коэффициент абразивности, определенный по формуле

$$\omega = \frac{V}{fPL}. \quad (33)$$

Первоначально аналогичным образом определял показатель износа твердых сплавов Е. Ф. Эпштейн. В дальнейшем для упрощения измерений он вводит показатель износа как произведение  $f\omega$ .

При изучении абразивности горных пород по схеме вращающегося диска (кольца) был принят следующий режим испытаний: нагрузка на кольцо 10 кгс; скорость вращения кольца 500 об/мин, что соответствует скорости скольжения 0,78 м/с при частоте взаимодействия 8,44 Гц. Это значит, что скорость скольжения и частота взаимодействия соответствуют средним значениям между роторным и турбинным способами бурения.

При испытаниях размеры кольца были приняты постоянными и равными: диаметр кольца 30 мм, ширина кольца 2,5 мм, следовательно, рабочая поверхность кольца составляла

$$S_p = \pi 30 \cdot 2,5 = 236 \text{ мм}^2.$$

Тогда напряженность работы, приведенную к рабочей поверхности кольца, можно определить по формуле

$$N_{уд} = \frac{2\pi M v}{S_p}, \quad (34)$$

где  $M$  — момент трения, равный  $M = fP \frac{D}{2}$ .

Коэффициент трения при изнашивании на образцах осадочных горных пород составлял 0,25—0,56. Соответственно величина

$$N_{уд} = 0,008 \div 0,018 \text{ кгс} \cdot \text{м/мм}^2 \cdot \text{с}.$$

Удельное давление можно определить по формуле

$$p = P/S_k,$$

где  $P$  — нагрузка на кольцо в кгс;  $S_k$  — видимая площадь контакта с горной породой —  $S_k = b l_k$ ;  $l_k$  — длина дуги касания кольца с породой в мм;  $b$  — ширина кольца в мм.

Из схемы на рис. 13 видно, что

$$l_k = 2\pi R \frac{\beta}{360},$$

а

$$\beta = \arccos \frac{R - \delta}{R},$$

отсюда

$$l_k = \frac{\pi R}{180} \arccos \cos \frac{R-\delta}{R}, \text{ мм.} \quad (34')$$

Далее по формуле

$$N'_{уд} = f p v = \frac{f p v}{S_k}, \quad (35)$$

можно подсчитать мощность, реализуемую на площадке контакта кольца с горной породой.

Глубина капавки  $\delta$  — величина переменная и в опытах на осадочных горных породах составляла  $\delta = 0,035 \div 0,40$  мм, что соответствовало площади контакта  $S_k = 2,5 \div 8,7$  мм<sup>2</sup>.

Подставляя предельные значения  $f$  и  $S_k$  в формулу (35), получим

$$N'_{уд} = 0,23 \div 1,75 \text{ кгс} \cdot \text{м/мм}^2 \cdot \text{с.}$$

Сопоставляя полученные результаты с оценкой напряженности работы долот (табл. 3), можно видеть, что принятая нами ранее напряженность работы кольца по меньшей мере на один порядок ниже, чем средняя напряженность работы вооружения долот.

Из проведенного выше анализа видно, что одни методы, с помощью которых проведено массовое определение абразивности горных пород, по основному параметру — напряженности работы — не соответствуют условиям износа вооружения шарошечных долот, а другие методически слабо обоснованы и пригодны лишь для частных случаев разрушения горных пород долотами режуще-истирающего типа.

Какое-либо разработки по применению результатов изучения абразивности горных пород для расчета долговечности вооружения шарошечных долот или для обоснования режима их работы нам не известны.

### Состояние изученности абразивности горных пород

Выше отмечалось, что работ, в которых исследовалась абразивность горных пород, очень мало.

Л. А. Шрейнер [191] показывает, что наибольшей абразивностью обладают кварцевые песчаники, и объясняет

это тем, что высокая абразивность песчаников является следствием шероховатости той поверхности, по которой движется породоразрушающий инструмент в процессе их разрушения при бурении, и тем, что твердость кварца, входящего в состав песчаников, сравнима по своей величине с твердостью материала режущего инструмента.

Е. Ф. Элштейном и Н. В. Пичахи проведены исследования по определению износа твердых сплавов при трении без охлаждения по некоторым наиболее абразивным породам Кривого Рога и Донбасса [199]. Однако каких-либо выводов по абразивности широкого круга горных пород из этих работ сделать нельзя.

Из зарубежных исследований, посвященных изучению абразивности горных пород, рассмотрим работы Сиверса и др. [196, 211, 209]. Сиверс провел большую работу по определению буримости и пытался увязать скорость разрушения при разных видах бурения с механическими и абразивными характеристиками горных пород.

Сиверс испытывал 90 образцов горных пород, но, к сожалению, в опубликованной статье никаких конкретных данных не приводится, а только указывается, что относительная абразивность пород колебалась от 0 до 200. В целом работа Сиверса имеет, видимо, скорее методическое, нежели практическое значение.

Определенный объем исследований по схеме бурения — резания был выполнен Н. И. Любимовым [112].

Таблица 5

Горная порода	Коэффициент абразивности <sup>1</sup>	Горная порода	Коэффициент абразивности <sup>1</sup>
Известняк . . . . .	0,02	Габбро . . . . .	0,60
Доломит . . . . .	0,04	Снепнт . . . . .	0,76
Базальт . . . . .	0,09	Скарп . . . . .	1,16
Руды железосодержащие . . . . .	0,38	Известняк окремненный . . . . .	1,16
Алевролит . . . . .	0,42	Гранит . . . . .	5,27
Диабаз . . . . .	0,43	Джеспилит . . . . .	7,50
Шроксенит . . . . .	0,49	Роговик . . . . .	7,53
Песчаник полишптовый	0,50		

<sup>1</sup> Под коэффициентом абразивности понимается [112] величина абразивности породы, определенная по формуле (29) и поделенная на 10.

Таблица 6

Класс абразивности	Наименование класса	Показатель абразивности, мг	Характерные породы
I	Весьма малоабразивные породы	До 5	Известняки, мраморы, мягкие сульфиды без кварца (галенит, сфалерит, пирротин), анатит, каменная соль
II	Малоабразивные породы	5—10	Сульфидные руды, барито-сульфидные руды, аргиллиты, мягкие сланцы: углистые, глинистые, хлоритовые хлорито-асцидные
III	Породы ниже средней абразивности	10—18	Джеспилиты, роговик (рудные и нерудные), кварцево-сульфидные руды, магматические тонкозернистые породы, песчаники кварцевые и аркозовые тонкозернистые, руды железные, известняки кремнистые
IV	Среднеабразивные породы	18—30	Песчаники кварцевые и аркозовые, мелкозернистые диабазы, плавленый базальт, крупнозернистый пирит, арсениопирит, жильный кварц, кварцевосульфидные руды, мелкозернистые магматические породы, окварцованные известняки, джасперсиды
V	Породы выше средней абразивности	30—45	Песчаники кварцевые и аркозовые средне- и крупнозернистые, плагиограниты, нефелиновые сиениты, мелкозернистые граниты, мелкозернистые диориты, порфириды, грейзены, лампрофиры, габбро, гнейсы, скарны (рудные и нерудные)
VI	Породы повышенной абразивности	45—65	Породы магматические, средне- и крупнозернистые граниты, диориты, гранодиориты, порфириды, нефелиновые сиениты, сиениты, кератофиры, прроксениты, монзониты, амфиболиты, сланцы кварцевые и окварцованные, гнейсы

Продолжение табл. 6

Класс абразивности	Наименование класса	Показатель абразивности, мг	Характерные породы
VII	Высокоабразивные породы	65—90	Порфириты, дIORиты, граниты, гранитоидные нефелиновые слениты
VIII	В высшей степени абразивные	Более 90	Корундсодержащие породы

Результаты определений абразивности некоторых горных пород приведены в табл. 5.

Отмеченные выше методические недостатки этих исследований не позволяют распространить результаты за пределы, ограниченные условиями опыта.

Большой объем определений абразивности горных пород по методу Л. И. Барона и А. В. Кузнецова [12, 13] выполнен как авторами метода, так и другими исследователями [27, 103, 106].

Горные породы в зависимости от их абразивности Л. И. Бароном и А. В. Кузнецовым разделены на восемь классов (табл. 6).

В работе Л. И. Барона и Л. Б. Глатмана [14] отмечается, что существует корреляционная связь между показателем абразивности и интенсивностью текущего износа резцов породоразрушающих инструментов, применяемых в горнодобывающей промышленности.

В работе [49] также предлагается разбивка горных пород на восемь классов. Однако сходство двух классификаций лишь внешнее.

Класс абразивности пород	1	2	3	4	5	6	7	8
Показатель абразивности $a$ , кгс/об	до 1	1—2	2—4	4—6	6—9	9—13	13—18	18 и выше

В. А. Калентьевым и др. [103] проведена количественная оценка абразивности горных пород, слагающих некоторые нефтяные и газовые месторождения Украины. Абразивность пород определялась этими авторами по методу Л. И. Барона и А. В. Кузнецова по отношению к стали У8.

Анализ данных, имеющихся в работе [103], показывает, что абразивность пород зависит в основном от их минералогического состава и строения. Какой-либо закономерной связи между абразивностью глинистых и хемогенных пород с глубиной их залегания и твердостью пород по штампу не наблюдается. Абразивность песчаных пород (алевролитов и песчанков) тем больше, чем меньше их твердость по штампу, что нами отмечалось ранее [192]. Кроме того, абразивная способность таких пород, как глины, мергели, аргиллиты и известняки зависит от содержания в них более твердых и более абразивных примесей. Например, абразивность аргиллитов Предкарпатского района повышается по мере увеличения их песчанности и окремнения.

Абразивность горных пород применительно к условиям работы шарошечных долот определялась лишь под руководством проф. Л. А. Шрейнера [152, 153, 192] совместно с автором по схеме вращающегося диска. Приятая методика определения абразивных свойств минералов и горных пород достаточно полно изложена в наших работах [16, 192], а также в работах других исследователей [1, 13, 49]. Рассмотрим результаты исследований по схеме вращающегося диска несколько подробнее, поскольку они непосредственно относятся к теме данной работы.

Образцы металла были изготовлены из сталей У8, 20ХНЗА и Р18. Стали перед испытаниями подвергались термической обработке; в результате была получена в основном мартенситная структура, а в стали Р18 имелись и карбиды. Ниже приведена величина микротвердости термически обработанных сталей, определенная на приборе ПМТ-3 при нагрузке 100 гс

Марка стали	У8	20ХНЗА	Р18
Микротвердость, кгс/мм <sup>2</sup>	895	950	975

Исследования проводились на плоско-параллельных образцах горных пород и минералов в виде кернов диаметром от 30 до 70 мм и высотой в тех же пределах или в виде кубиков таких же размеров.

Рабочие поверхности этих образцов до опытов шлифовались. Таким образом, перед опытом рабочая поверхность образцов горных пород имела тонкошлифованную поверхность.

В качестве основного показателя абразивности был принят показатель, определяемый по формуле (32). Кроме того, рассматривалась возможность использования показателя «относительный износ»

$$\omega_0 = V/V_n,$$

где  $V$  — объем изношенного металла за опыт;  $V_n$  — объем изношенной (разрушенной) породы за опыт.

Показатель «относительный износ» — это отношение износа металла к износу и разрушению горной породы и может скорее характеризовать производительность инструмента, изготовленного из данного материала, нежели абразивность горной породы, которая лишь косвенно влияет на величину этого показателя. Поэтому использование этого показателя для оценки абразивных свойств горных пород весьма условно.

Наиболее строгий физический смысл имеет показатель — величина работы на единицу износа металла. Этот показатель является величиной обратной интенсивности изнашивания — объемного износа на единицу работы трения.

Использование большого числа показателей нецелесообразно. Поэтому при дальнейшем изложении материала мы ограничимся двумя, наиболее общеприятными характеристиками износа для оценки абразивности горных пород [формулы (32) и (33)].

Рассмотрение двух показателей одновременно необходимо для объяснения возможных противоречий результатов данной работы с ранее опубликованными.

Интенсивность изнашивания испытанных сталей имеет тенденцию к снижению с увеличением их микротвердости. Однако различие часто не выходит за пределы возможных ошибок измерений [192]. В дальнейшем будем рассматривать лишь опыты, проведенные с образцами из стали У8, принятой в качестве основного эталона для оценки абразивности горных пород.

В табл. 7 приведены результаты проверки принятого допущения о постоянстве интенсивности изнашивания и пригодности его для характеристики абразивности горных пород. Из этой таблицы видно, что значения коэффициента  $\omega'$  изменяются для данной горной породы в нешироких пределах, за исключением кварца и кремня. Это в свое время позволило нам принять величину  $\omega'$

Таблица 7

Минерал, горная по- рода, их мик- ротвердость (в кгс/мм <sup>2</sup> )	На- грузка, кгс	Скорость скольже- ния, м/с	Кoeffи- циент трения	Показатели абразивности по отношению к стали У8	
				$\omega \cdot 10^3$ , см <sup>3</sup> /м·кгс	$\omega \cdot 10^3$ , см <sup>3</sup> /кгс·м
Ангидрит, Н-200	5	0,78	0,40	7,0	1,76
	10	0,78	0,23	4,5	1,95
	15	0,78	0,19	6,7	3,60
	10	0,47	0,24	5,2	2,16
	10	1,26	0,22	4,4	2,00
	10	2,20	0,20	5,2	2,60
Мрамор, Н-110	5	0,78	0,68	28,0	4,1
	10	0,78	0,56	25,0	4,5
	15	0,78	0,49	24,0	4,9
	10	0,47	0,61	25,0	4,1
	10	1,26	0,55	23,0	4,2
	10	2,20	0,52	31,0	6,0
Доломит, Н-325	5	0,78	0,59	24	4,1
	10	0,78	0,52	22	4,4
	15	0,78	0,46	21	4,6
	10	0,47	0,56	23	4,1
	10	1,26	0,49	22	4,5
	10	2,20	0,47	23	4,9
Оливинит, Н-800	5	0,78	0,58	34	5,9
	10	0,78	0,48	34	7,1
	15	0,78	0,46	39	8,5
Микроклин, Н-695	5	0,78	0,76	38	5,0
	10	0,78	0,60	40	6,6
	15	0,78	0,52	43	8,3
	10	0,47	0,63	40	6,4
	10	1,26	0,60	43	7,2
	10	2,20	0,58	45	7,8
Кварц, Н-1080	5	0,78	0,80	52	6,5
	10	0,78	0,69	53	7,7
	15	0,78	0,61	82	13,4
	10	0,47	0,67	45	6,7
	10	1,26	0,71	74	10,4
	10	2,20	0,75	105	14,0
Кремль, Н-1000	10	0,47	0,50	23	4,6
	10	0,78	0,52	29	5,6
	10	1,26	0,53	41	7,8
	10	2,20	0,58	61	10,5

в качестве показателя абразивности с определенными ограничениями, а именно как коэффициент для характеристики относительной абразивности горных пород.

Какую-либо четкую закономерность изменения  $\omega'$  с изменением режима испытания для всех горных пород проследить трудно. В то же время изменение показателя  $\omega$  весьма определено — с увеличением как нагрузки, так и скорости скольжения (а следовательно, и напряженности работы) интенсивность изнашивания стали У8 возрастает. А неопределенное поведение показателя  $\omega'$  связано с особенностями изменения коэффициента трения сталь — горная порода.

Изменение коэффициента трения в широких пределах (от 0,20 до 0,80, см. табл. 7) не позволяет при постоянных нагрузке и скорости скольжения получить сопоставимые условия изнашивания по напряженности работы.

Чтобы сделать окончательные выводы, нами были проведены дополнительные исследования по этой же схеме изнашивания, но в более широком диапазоне изменения нагрузки на кольцо, чтобы проследить характер изменения коэффициента  $\omega'$  и  $\omega$  при увеличении напряженности работы. Результаты опытов приведены в табл. 8. Из табл. 8 видно, что коэффициент  $\omega'$  и  $\omega$  не могут однозначно характеризовать абразивность горных пород при повышенной напряженности работы.

Таким образом, мы пришли к необходимости более строгого учета режима испытаний. Режим испытаний однозначно можно охарактеризовать либо средней удельной мощностью, реализуемой всей рабочей поверхностью образца металла, по формуле (34), либо удельной контактной мощностью, по формуле (35).

Поскольку в качестве аргумента предлагается работа в единицу времени, то и изнашивание металла целесообразно охарактеризовать показателем «скорость изнашивания»

$$a = \frac{v}{ST}, \quad (36)$$

где  $S$  — рабочая поверхность кольца в  $\text{мм}^2$ ;  $T$  — время опыта в ч.

Показатель  $a$  равен скорости уменьшения радиуса кольца и аналогичен по своему характеру скорости уменьшения высоты зубьев шарошек домот. Выбор такой

Таблица 8

Горная порода	Нагрузка на кольцо, кгс	Скорость скольжения, м/с	Коэффициент трения	Показатели абразивности по отношению к стали У8	
				$\omega \cdot 10^4$ , см <sup>2</sup> /м·кгс	$\omega \cdot 10^4$ , см <sup>2</sup> /кгс·м
Мрамор «Коелга»	10	0,45	0,56	22,0	3,93
	20	0,45	0,60	22,0	3,67
	30	0,45	0,64	22,4	3,50
	50	0,45	0,62	21,8	3,52
	10	1,41	0,52	22,0	4,24
	20	1,41	0,60	23,0	3,84
	30	1,41	0,63	23,0	3,66
	50	1,41	0,49	26,0	5,30
Известняк	10	0,45	0,32	29,0	9,1
	40	0,45	0,46	28,0	6,1
	75	0,45	0,67	51,7	7,7
	10	1,41	0,21	14,0	6,7
	25	1,41	0,54	34,0	6,3
	50	1,41	0,56	88,6	15,8
	100	1,41	0,46	104	23,6
Песчаник	10	0,45	0,74	47	6,35
	20	0,45	0,82	59	7,20
	35	0,45	0,75	101	13,5
	75	0,45	0,44	472	107,0
	10	1,41	0,65	52	8,0
	25	1,41	0,40	1470	368,0
	75	1,41	0,34	2390	705,0

размерности имеет целью повысить наглядность полученных результатов.

Чтобы окончательно выбрать показатель, характеризующий режим испытаний, были поставлены методические опыты с образцами из стали У8 при изнашивании их на образцах мрамора «Коелга». Изменением скорости подачи образца горной породы были получены различные значения удельной контактной мощности при практически неизменном значении средней удельной мощности. Результаты испытаний приведены в табл. 9.

Из табл. 9 видно, что какой-либо связи между скоростью изнашивания стали и величиной удельной контактной мощности не наблюдается. Это связано с тем, что видимая площадь контакта является результатом процесса разрушения горной породы, т. е. функцией реализуемой мощности, а не начальным условием опыта, как это при-

Таблица 9

Нагрузка на кольцо, кгс	Скорость скольжения, м/с	Частота взаимодвижения, Гц	Скорость изнашивания стали а, мм/ч	Удельная контактная мощность, Вт/мм <sup>2</sup>	Средняя удельная мощность, Вт/мм <sup>2</sup>
50	0,90	10	0,021	32,4	1,19
50	0,90	10	0,021	39,8	1,20
50	0,90	10	0,020	48,5	1,12
50	1,41	15	0,028	33,8	1,42
50	1,41	15	0,027	44,0	1,40
50	1,41	15	0,028	69,0	1,41

нимается в схемах изнашивания с постоянным контактом металла с горной породой.

В то же время связь между скоростью изнашивания и величиной средней удельной мощности прослеживается очень четко. Дополнительно нами были проведены опыты при широком изменении параметров режима испытаний и размеров колец (изменялась их ширина). Результаты испытаний приведены в табл. 10.

Таблица 10

Горная порода	Нагрузка на кольцо, кгс	Скорость скольжения, м/с	Частота взаимодвижения, Гц	Рабочая поверхность кольца В, мм <sup>2</sup>	Средняя удельная мощность, Вт/мм <sup>2</sup>	Скорость изнашивания стали а, мм/ч
Известняк	75	0,45	5	234	0,95	0,032
	40	0,90	10	240	0,89	0,024
	100	0,45	5	150	1,57	0,070
	25	2,86	30	233	1,52	0,069
	100	1,41	15	235	2,64	0,224
Доломит	50	2,86	30	231	2,74	0,249
	100	0,45	5	153	1,01	0,042
	50	1,41	15	238	1,01	0,041
	75	1,41	15	155	2,45	0,532
	75	2,86	30	236	2,54	0,560

Из табл. 10 видно, что скорость изнашивания стали зависит в основном от мощности, реализуемой единицей рабочей поверхности образца стали.

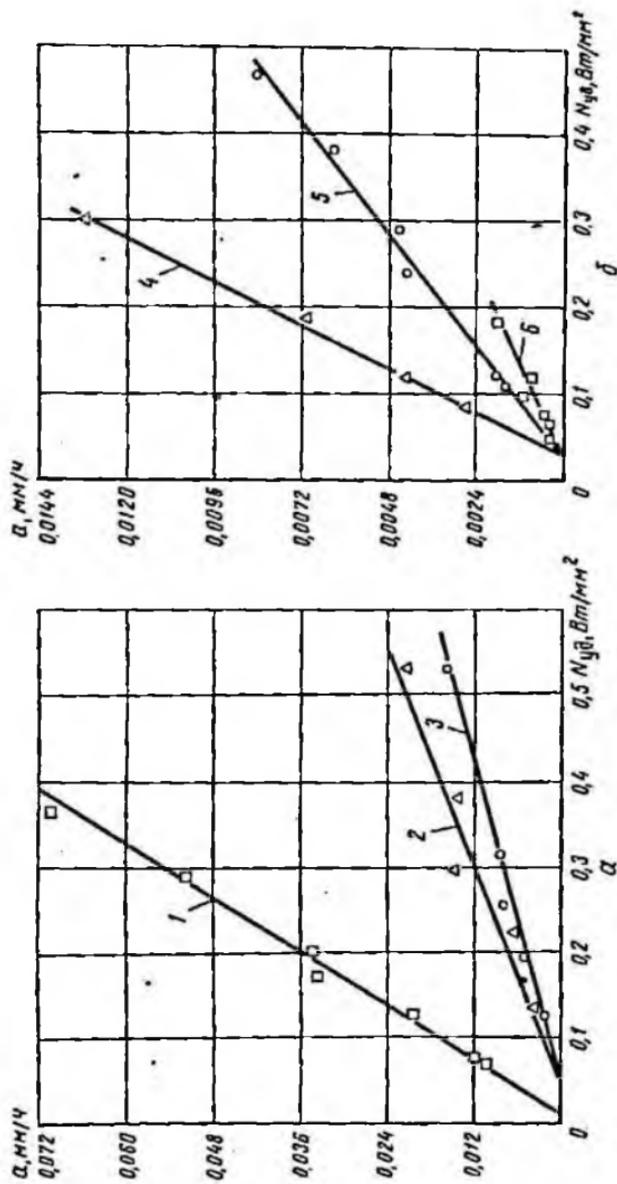


Рис. 14. Зависимость скорости кристаллизации стали У8 от напряженности.  
 1 — корунд; 2 — кварц; 3 — микролин; 4 — нефелин; 5 — мрамор; 6 — ангалит; а — при трении о минералы; б — при трении о кристаллические горные породы.

Оценим тесноту связи между скоростью изнашивания и напряженностью работы, для чего определим коэффициент корреляции [147]

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (a_i - \bar{a})(N_{уд_i} - \bar{N}_{уд})}{(n-1)S_1S_2}$$

где  $\bar{a}$  — среднее арифметическое значение скорости изнашивания;  $\bar{N}_{уд}$  — среднее арифметическое значение напряженности работы;  $n$  — число опытов;  $S_1$  — среднеквадратичное отклонение значений скорости изнашивания;  $S_2$  — среднеквадратичное отклонение значений  $N_{уд}$ .

Для известняка  $r = 0,99$ .

Поскольку коэффициент корреляции близок к единице, то это означает, что связь близка к функциональной.

Из проведенного анализа следует, что удельная мощность, реализуемая рабочей поверхностью образца стали, может служить надежным аргументом, характеризующим напряженность работы при изучении абразивного изнашивания стали. Изучение зависимости скорости изнашивания стали от напряженности работы при трении о различные горные породы в различных условиях позволит подойти к определению абразивности горных пород.

В отличие от методики исследования, принятой нами ранее [192], предлагается переход от отдельного учета нагрузки и скорости скольжения к обобщенному показателю напряженности работы — удельной мощности — и от износа на единицу пути трения — к скорости изнашивания.

Рассмотрим результаты ранее выполненных исследований [192] с точки зрения новых методических предпосылок. Нами пересчитаны основные результаты изучения изнашивания стали У8 при трении о кристаллические горные породы и минералы. На рис. 14 эти данные представлены графически. Из рис. 14 видно, что наблюдается линейная зависимость между скоростью изнашивания стали и напряженностью работы пары трения, которая может быть представлена в виде

$$a = AN_{уд} + B. \quad (37)$$

Значения коэффициентов  $A$  и  $B$ , определенные методом наименьших квадратов, приведены в табл. 11.

Таблица 11

Горная порода, минерал	Микро- твер- дость, кгс/мм <sup>2</sup>	Структура	Коэффициенты	
			A·10 <sup>2</sup>	B·10 <sup>6</sup>
Мрамор	110	Среднезернистая	1,93	0,07
Ангидрит	200	»	1,01	0,02
Доломит	325	Крупнозернистая	1,78	0,02
Нефелин	600	Среднезернистая	4,28	0,06
Оливинит	800	»	3,88	0,16
Кремень	1000	Скрытокристалличе- ская	4,52	0,37
Микроклин	695	Монокристалл	2,86	0,07
Кварц дымчатый	1080	»	5,40	0,41
Корунд (рубин)	2300	Монокристалл синтети- ческий	20,80	0,43

Формула (37) справедлива при  $N_{уд} > 0,10$  Вт/мм<sup>2</sup>. Верхняя граница применимости формулы будет оценена далее.

Из рис. 14 видно, что наблюдается общая тенденция увеличения скорости изнашивания стали при увеличении микротвердости породообразующих минералов. Однако есть и исключения: например, микротвердость ангидрита больше, чем кальцита, однако скорость изнашивания при трении об ангидрит меньше, чем при трении о мрамор, то же самое наблюдается на нефелине и оливините. Помимо, наряду с микротвердостью, существенное влияние на величину износа оказывает химический состав минералов и их взаимодействие с водой и поверхностью стали в условиях активизации трением.

Влияние структуры кристаллических горных пород на скорость изнашивания стали У8 рассмотрим на примере доломита (табл. 12).

Таблица 12

Горная порода	Структура	$N_{уд}$ , Вт/мм <sup>2</sup>	$\sigma$ , мм/ч
Доломит I	Крупнозернистая	0,123	0,0020
» II	Среднезернистая	0,121	0,0023
» III	Мелкозернистая	0,123	0,0021
» IV	»	0,123	0,0020

Из табл. 12 видно, что структура кристаллической горной породы при небольшой напряженности работы не оказывает существенного влияния на скорость изнашивания стали. Это позволяет проводить испытания не на всех горных породах, а на отдельных характерных образцах, т. е. вывод, сделанный ранее [192], справедлив и при новом подходе к оценке изнашивания.

Исследования П. С. Баландина показали, что абразивность обломочных горных пород имеет некоторые отличительные особенности по сравнению с кристаллическими [192].

Из обломочных горных пород наиболее важное значение имеют кварцевые песчаники и алевролиты. Другие породы подобного типа, состоящие из обломков минералов с меньшей твердостью, обладают такими же абразивными свойствами, как и соответствующие им по минеральному составу кристаллические породы.

Многие малоабразивные породы — глинистые, сульфатные и карбонатные — часто содержат то или иное количество обломков кварца, что резко повышает их абразивные свойства.

М. И. Кофман [86] для абразивных кругов, помимо шероховатости большего порядка (по его терминологии рельеф первого порядка — в основном отклонения геометрической формы от круглой, плоской и т. д.), отмечает рельеф второго порядка, образуемый порами, размерами и формой абразивных зерен, и рельеф третьего порядка, создаваемый извилистой поверхностью самих абразивных зерен. Для обломочных горных пород большое значение имеет рельеф второго порядка, при этом чем больше пористость, крупнее обломки и остроугольнее их форма, тем больше шероховатость поверхности и ее абразивность. Вследствие более высокой степени шероховатости контактное давление, отнесенное к истинной площади контакта, у обломочных пород значительно выше, чем у одинаковых с ними по минеральному составу кристаллических пород при прочих равных условиях.

Все отмеченное ранее имеет существенное значение только в том случае, если твердость обломков близка к твердости истираемого тела или превышает ее. У пород, сложенных обломками относительно небольшой твердости, по сравнению с изнашиваемым телом, может происходить только повышенный износ пород без заметного увеличения

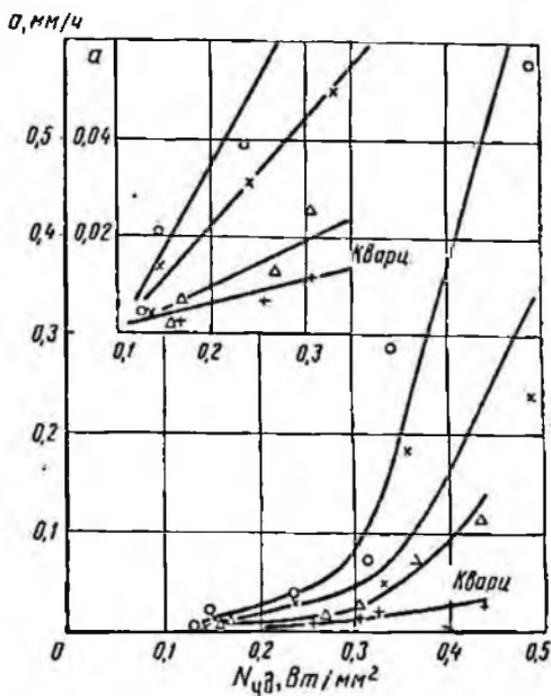
Таблица 13

Горная порода и ее описание	Твердость по штампу, кгс/мм <sup>2</sup>	Нагрузка, кгс	Скорость сколь- жения, м/с	Коэффициент трения	Средняя удель- ная мощность, Вт/мм <sup>2</sup>	Скорость изна- шивания стали л, мм/ч
<i>Песчаник I</i> пористый, цемент кон- тактный, зерна угловатые и полуокатанные, размер около 0,1 мм	55	5	0,78	0,80	0,13	0,4
		10	0,78	0,73	0,24	3,9
		15	0,78	0,70	0,34	28,9
		10	0,47	0,75	0,15	2,1
		10	1,26	0,60	0,32	7,2
		10	2,20	0,54	0,49	58,0
<i>Песчаник II</i> пористый, цемент кон- тактный, зерна полуока- таны, размер 0,1—0,2 мм	80	5	0,78	0,86	0,14	0,4
		10	0,78	0,74	0,24	3,0
		15	0,78	0,73	0,36	18,6
		10	0,47	0,75	0,15	1,5
		10	1,26	0,64	0,33	5,0
		10	2,20	0,54	0,49	24,1
<i>Песчаник III</i> слабопористый, цемент регенерационный, зерна угловатые и полуокатан- ные, размер 0,1—0,2 мм	225	5	0,78	0,96	0,16	0,2
		10	0,78	0,83	0,27	1,4
		15	0,78	0,64	0,36	7,6
		10	0,47	0,85	0,17	0,7
		10	1,26	0,58	0,30	2,5
		10	2,20	0,48	0,44	11,4
<i>Песчаник IV</i> плотный, с карбонатным базальным цементом, зерна полуокатаны, размер 0,1— 0,2 мм	325	5	0,78	0,96	0,16	0,2
		10	0,78	0,84	0,27	1,1
		15	0,78	0,64	0,31	3,5
		10	0,47	0,86	0,17	0,4
		10	1,26	0,66	0,35	1,9
		10	2,20	0,58	0,53	4,6
<i>Песчаник V</i> плотный с регенерацион- ным цементом, зерна ока- танные, размер 0,10— 0,25 мм	520	5	0,78	0,94	0,15	0,1
		10	0,78	0,79	0,26	0,6
		15	0,78	0,66	0,32	1,8
		10	0,47	0,82	0,16	0,2
		10	1,26	0,58	0,30	1,2
		10	2,20	0,48	0,44	2,8

абразивности. По этой причине абразивные свойства обломочных кварцевых пород по отношению к закаленным сталям и твердым сплавам не могут быть одинаковыми.

Рассмотрим особенности изнашивания стали У8 при трении об обломочные горные породы на примере песчаников, для которых в работе [192] имеется достаточно

Рис. 15. Зависимость скорости изнашивания стали У8 от напряженности работы для песчаников.



данных. Мы провели пересчет, исходные данные и результаты которого приведены в табл. 13. На рис. 15 приведены зависимости скорости изнашивания стали У8 от напряженности работы. Из рис. 15 видно, что все кривые располагаются выше кривой изнашивания на кварце. Причем кривая тем выше, чем меньше твердость по штампу. Скорость изнашивания при трении о наиболее прочные песчанники ( $p_{ш} = 520$  кгс/мм<sup>2</sup>) практически одинакова со скоростью изнашивания о кварц.

С ростом напряженности работы прямая пропорциональность скорости изнашивания стали от  $N_{уд}$  нарушается, причем тем раньше и тем с большей интенсивностью, чем меньше твердость песчанника по штампу.

Твердость по штампу характеризует прочность цементирующего вещества песчаника, т. е. характеризует прочность закрепления зерен. Следовательно, скорость изнашивания при трении о песчаник обусловлена характером и скоростью обновления поверхности трения.

Если поверхность обновляется вследствие износа кварцевых зерен, то скорость изнашивания прямо пропорциональна напряженности работы и близка к скорости изнашивания на кварце. Наличие пористости песчаника обуславливает повышенную шероховатость поверхности и повышенную скорость изнашивания. Причем чем больше пористость, тем меньше твердость по штампу. Под воздействием силы трения отдельные зерна кварца могут быть вырваны с поверхности трения. Вероятность этого явления возрастает с ростом напряженности работы. Обновление поверхности трения ускоряется, а шероховатость ее резко возрастает, что обуславливает нарушение прямой пропорциональности между скоростью изнашивания и напряженностью работы.

Исследования по износу твердых сплавов ВК15 и ВК6 проводились на очень ограниченном числе минералов и горных пород с микротвердостью  $\geq 700$  кгс/мм<sup>2</sup>.

Износ твердого сплава ВК15 даже на самых абразивных породах, включая и кварцевые песчаники, прямо пропорционален нагрузке, тогда как для закаленных сталей такая зависимость имеется только при износе на кристаллических горных породах, за исключением кварцевых.

Износ сплава ВК15 на единицу пути не зависит от окружной скорости, что было проверено на шокшинском кварците и корунде при изменении окружной скорости в диапазоне от 50 до 140 м/мин.

Выше отмечалось, что с уменьшением твердости по штампу обломочных кварцевых горных пород их абразивность по отношению к закаленным сталям резко увеличивается. Для твердого сплава ВК15 при уменьшении твердости песчаников с 525 до 80 кгс/мм<sup>2</sup> износ возрастает всего на 10%, тогда как для закаленных сталей в этом же диапазоне твердости по штампу абразивность увеличивается в 5 раз. Этот результат не является неожиданным, так как твердость кварца значительно меньше твердости карбида вольфрама.

Можно полагать, что все зависимости по износу, установленные для сплава ВК15, вполне справедливы и для

твердых сплавов других марок с большей агрегатной микротвердостью.

Таким образом, общие закономерности износа твердых сплавов на единицу пути на всех породах оказались такими же простыми, как для закаленных сталей на малоабразивных породах.

### Абразивность раздробленных минералов и горных пород

Выше мы рассматривали работы, касающиеся абразивного изнашивания при трении материала породоразрушающих инструментов о монолитные горные породы. Абразивному изнашиванию часто подвергаются многие детали и узлы буровых и эксплуатационных механизмов и машин и при наличии обломков пород, находящихся во взвешенном состоянии в промывочной жидкости или на забое скважины.

Для исследования изнашивания сталей раздробленными горными породами автором была изготовлена установка, подобная установке А. В. Кольченко [92], принципиальная схема и методика исследования на которой изложены в работах [151, 192].

В табл. 14 приведены экспериментальные данные, полученные при изнашивании закаленной стали У8 струей глинистого раствора, содержащей частицы различного минералогического состава. Исследование на стали 20ХНЗА, имеющей твердость изнашиваемой поверхности как и у стали У8, показало аналогичные результаты.

Незначительная разница между абразивностью кварца и корунда (см. табл. 14) объясняется тем, что у минералов, обладающих твердостью более высокой, чем твердость изнашиваемого твердого тела, начальные производительности близки. При многократном же использовании одной и той же суспензии из кварца и корунда производительность кварцевой суспензии снижалась бы быстрее, чем производительность корундовой суспензии, в результате более интенсивного измельчения. Исследование начальной производительности и ее снижение во времени для связанных абразивов с различной твердостью, в том числе для кварца и корунда, было проведено М. И. Койфманом [86], а позже В. Н. Кашевым [90].

Что же касается относительной абразивности, определяемой по отношению к глине, то она колеблется в широких

Таблица 14

Горная порода, минерал	Микро- твердость $H_a$ кгс/мм <sup>2</sup>	Износ стали $Z^8$ — $\Delta V_M \cdot 10^3$ , см <sup>3</sup>	Относительная абразивность
Глина . . . . .	—	0,03	1,0
Мрамор . . . . .	110	0,05	1,9
Кальцит . . . . .	110	0,06	1,9
Барит . . . . .	120	0,06	2,3
Доломит . . . . .	325	0,18	6,9
Гематит . . . . .	520	1,21	45,6
Полевой шпат (микро- клин) . . . . .	695	1,95	75,0
Оливинит . . . . .	800	3,12	120,0
Кремнь . . . . .	1000	2,32	89,2
Кварц . . . . .	1090	3,68	142,0
Корунд (руда месторождения Семиз-Бугу)	1850	3,92	150,0

пределах. Например, кварц абразивнее глины примерно в 140 раз, тогда как мрамор, кальцит и барит абразивнее глины лишь в 2—2,5 раза.

Во многих нефтяных районах страны скважины бурятся в сложных геологических условиях, требующих применения утяжеленных глинистых растворов. Утяжеленные глинистые растворы качественно отличаются от нормальных растворов повышенным содержанием твердой фазы, которая способствует усиленному износу деталей бурового оборудования и инструмента.

Абразивная способность утяжелителей исследовалась на той же установке по той же методике, что и для раздробленных горных пород. В качестве утяжелителей применялись барит трех месторождений (туркменский, кутапский и кировобадский), гематит и концентрат колошиковой пыли. Гранулометрический состав утяжелителей был примерно постоянным во всех опытах, что достигалось смешиванием одинакового (в процентном отношении) количества зерен различного размера.

Опыты показали, что износ стали увеличивается с возрастанием твердости и размера зерен утяжелителя.

Форма зерен утяжелителя оказывает влияние на износ лишь в том случае, если твердость их выше твердости из-

пашиваемой поверхности. Остроугольные зерна более мягких минералов быстро притупляются и становятся округлыми, практически не оказывая влияния на износ.

Примером этого может служить барит. До дробления барит — крупнокристаллическая мономинеральная горная порода. В процессе дробления барита получаются зерна, по форме соответствующие его спайности (призматические), имеющие острые ребра и острые углы. После заводского помола и многократной транспортировки зерна барита быстро теряют «остроту» и становятся почти окатанными. Это происходит потому, что барит имеет сравнительно низкую твердость ( $120 \text{ кгс/мм}^2$ ). Твердость поверхности изнашиваемого им металла всегда в 6—7 раз больше, поэтому форма зерен барита практически не будет оказывать влияния на износ.

У гематита зерна имеют угловатый вид и, кроме того, поверхность их сильно шероховата. При этом твердость гематита примерно в 5 раз больше, чем барита, и немного уступает твердости поверхности изнашиваемого им металла. Поэтому при использовании гематита или других утяжелителей, близких к нему по твердости и по минеральному составу, на величину износа металла значительное влияние будет оказывать как твердость зерен, так и их форма.

Исследования, выполненные С. Г. Бабаевым и Л. И. Зильберманом [17] по оценке абразивности утяжеленных буровых растворов, подтвердили результаты наших работ [150, 151] и показали необходимость улучшения очистки утяжеленных растворов от посторонних более твердых примесей (главным образом кварцевого песка), попадающих в раствор в результате разрушения кварцсодержащих пород.

Н. И. Любимов [112] отмечает, что алмазные и твердосплавные коронки изнашиваются в основном в результате действия бурового шлама (раздробленной породы); чем абразивнее шлам, тем интенсивнее изнашивается буровой снаряд. В связи с этим Н. И. Любимов предложил метод, позволяющий определять абразивность раздробленных пород в полевых условиях по износу свинцовых шариков. Для этого используется прибор шагуно-кривошипного типа [112]. Устройство этого прибора следующее: на вал электрического мотора устанавливается эксцентрик-кривошип радиусом 8 мм. На шейку вала кривошипа крепится

штатуп, к которому с противоположной стороны монтируется рабочая камера с пробиркой. Об абразивности породы судят по износу свинцовых шариков (охотничьей дробь), помещенных в пробирке вместе с пробой раздробленной породы или бурового шлама в рабочую камеру, при вибрации (встряхивании) за определенный период времени.

В качестве матерпала для определения абразивности используется фракция 0,5 мм и менее раздробленной породы, получаемая при установлении ее динамической прочности по методу толчения. При этом на одном образце породы можно определить два параметра — динамическую прочность и абразивность.

Определение абразивности горных пород по этому методу заключается в следующем. Восемь дробинok нулевого номера (4,2—4,3 мм) взвешивают и помещают в пробирку. Затем породу фракции 0,5 мм объемом 1 см<sup>3</sup> сыплют в эту же пробирку, которую вставляют в рабочую камеру прибора. Прибор включают на 20 мин. После этого извлекают дробь из пробирки, промывают ее в воде и взвешивают для установления потери веса (в мг). Количество опытов для каждой пробы пород колеблется от двух до пяти в зависимости от воспроизводимости результатов.

Коэффициент абразивности  $k_a$  вычисляют по формуле

$$k_a = \frac{Q}{100},$$

где  $Q$  — потеря веса дробей в мг.

В табл. 15 приводятся результаты определения абразивности осадочных, изверженных и метаморфических пород, причем типичные разности изученных пород разделены на шесть групп с интервалом изменения коэффициента абразивности 0,5.

Из табл. 15 видно, что в группы I и II вошли в основном бескварцевые породы, в V и VI группы — кварцосодержащие, в III и IV группы — в основном породы с небольшим содержанием кварца.

Ю. Ф. Алексеев [1] оценивал абразивность горных пород Урало-Поволжья на гидроскоструйной установке. Основные положения методики исследования были апа-логичными [192] и А. В. Кольченко [92]. Пластина из Ст. 3 устанавливалась под углом 45° на расстоянии 55 мм от торца твердосплавной насадки с внутренним

Таблица 15

№ группы	Показатели абразивности $K_a$	Степень абразивности породы	Горная порода
I	0,5 и менее	Малоабразивные	Мрамор, известняк, эпидозит, ангидрит, алевролит
II	0,5—1,0	Умеренно абразивные	Руда марганцевая, туфобрекчия, доломит, хлорито-кремнисто-магнетитовая порода, скари преимущественно карбонато-пироксенового состава, сланец серпичито-хлорито-карбонатного состава, полевоплатицированный известняк, частично окремненный
III	1,0—1,5	Среднеабразивные	Карбонато-хлорито-эпидотовая порода полевоплатицированная, скари карбонатный окремненный, диабаз, туфопесчаник, скари эпидото-хлорито-пироксеновый, туф кислого аффузива, пироксен-альбитовая порода, туф кварцевых порфиров, адамелит-порфир, диорит скарированный
IV	1,5—2,0	Абразивные	Диорит эпидотизированный с сульфидами, скари рудный, спенит, туф ороговикованный, гранодиорит, диабазовый порфирит, габбро-диабаз, диорит кварцевый, альбитофир ороговикованный, кварцевый порфир, туф кварцевого альбитофира, роговик пироксеновый, скари гранато-пироксеновый, песчаник ороговикованный
V	2,0—2,5	Сильно абразивные	Кварц жильный, гранит, граптоспенит-порфир, песчаник кварцевый, кварц-турмалиновая порода, адамелит, роговик сплкатно-магнетитовый, скари гранатовый
VI	2,5—3,0	Весьма абразивные	Яшмовидная порода, кварцит, роговик калишпатированный, гранит мелкозернистый, ороговикованная калишпатовая порода

диаметром 3,5 мм. Смесь жидкости (воды) с раздробленной породой истекала из насадки под давлением сжатого воздуха со скоростью 47 м/с. На один опыт использовалось 100 см<sup>3</sup> раздробленной породы из частиц размером 0,16—0,50 мм. За показатель абразивности  $a$  принимается песочный износ стальной пластинки (в мг).

Исследования Ю. Ф. Алексеева показали, что наиболее высокой абразивностью ( $a > 10$  мг) обладают песчанники кварцевые, полево-шпатовые, кварциты, порфиристы и доломиты; наименьшей ( $a < 1$  мг) — известняки мелкокристаллические, пелитоморфные, глинистые.

Результаты, полученные Ю. Ф. Алексеевым, показывают, что для большинства исследованных пород с повышением их твердости в монолите увеличивается и абразивность, причем последняя более закономерно связана с микротвердостью породообразующих минералов этих пород, чем с твердостью породы, определяемой по методу вдавливания штампа.

Анализ приведенных выше результатов исследования показывает, что абразивность раздробленных горных пород в основном зависит от микротвердости, величины и формы зерен, а также от соотношения твердостей зерен и поверхности изнашиваемого материала.

В целом предложенная нами в работе [192] классификация горных пород, в которой в качестве основного признака принят минералогический состав горных пород, является, на наш взгляд, наиболее удачной. Однако в представленном виде эта классификация характеризует лишь относительную абразивность горных пород, как фактора, определяющего износ в рассмотренном диапазоне изменения напряженности работы. Детализация этой классификации и получение данных, необходимых для расчета абразивного изнашивания, потребовали проведения дополнительного объема экспериментальных работ. Причем основное внимание необходимо было уделить изучению закономерностей изнашивания при значительно большей напряженности работы, характерной для износа вооружения буровых долот.

Схема вращающегося диска, позволяющая наиболее полно воспроизвести условия изнашивания элементов вооружения долот, принята нами в качестве основной для продолжения работ. Однако эта схема имеет и ряд недостатков, наиболее крупным из которых является отсут-

ствие динамического приложения нагрузки. Кроме того, созданная ранее установка [192] не позволяет проводить исследования при высокой напряженности работы.

Сложные задачи изучения абразивности применительно к условиям разрушения горных пород шарошечными долотами вызвали необходимость создания ряда оригинальных экспериментальных установок.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ II МЕТОДИКА ИЗУЧЕНИЯ АБРАЗИВНОСТИ ПРИ РАЗРУШЕНИИ ГОРНЫХ ПОРОД

### Особенности моделирования изнашивания элементов вооружения буровых долот

При изучении абразивности горных пород автором использовались принципы физического моделирования изнашивания элементов вооружения шарошечных долот. Известно [8, 10, 55, 56, 126], что физическое моделирование предполагает изучение физически подобных процессов на установках, сохраняющих физическую природу явлений и основные влияющие факторы.

На основании проведенного обзора и ранее выполненных исследований будем считать, что изнашивание элементов вооружения долот и основные влияющие факторы определяются следующими величинами, характеризующими:

1) элемент вооружения долота: длину зубца  $b$  в м, радиус кривизны поверхности  $R$  в м, микротвердость рабочей поверхности  $H_m$  в  $\text{H}/\text{M}^2$ ;

2) состав и свойства горной породы: микротвердость породообразующих минералов  $H_n$  в  $\text{H}/\text{M}^2$ , предел текучести горной породы (по Л. А. Шрейнеру)  $p_0$  в  $\text{H}/\text{M}^2$ , размер зерен горной породы  $d$  в м;

3) режим изнашивания вооружения долот: удельную мощность  $N_{уд} \left[ \frac{\text{H} \cdot \text{м}}{\text{с} \cdot \text{M}^2} \left( \frac{\text{Bm}}{\text{M}^2} \right) \right]$ , частоту взаимодействия  $\nu$  в 1/с, удельный расход промывочной жидкости  $q$  в м/с, скорость соударения элементов вооружения долота с горной породой  $v_y$  в м/с, скорость скольжения элементов вооружения долота относительно горной породы  $v_c$  в м/с; время контакта  $t_k$  в с.

Можем записать, что скорость изнашивания  $a$  является функцией следующих величин

$$a = f(b, R, H_m, H_n, p_0, d, N_{уд}, v, q, v_y, v_c, t_k). \quad (39)$$

Для перехода к критериям подобия выбираем в качестве основных единиц  $R, H_m, v$  — величины, которые наиболее просто и с большей точностью могут быть заданы в опытах. Определитель, составленный из показателей степеней размерностей  $[R], [H_m]$  и  $[v]$ , равен

$$\begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -2 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{vmatrix} = -1 \neq 0,$$

что доказывает независимость основных единиц.

Используя метод нулевых размерностей, получим

$$\frac{a}{vR} = f\left(\frac{b}{R}; 1; 1; \frac{H_n}{H_m}; \frac{p_0}{H_m}; \frac{d}{R}; \frac{N_{уд}}{H_m R v}; 1; \frac{q}{Rv}; \frac{v_y}{Rv}; \frac{v_c}{Rv}; t_k v\right) \dots \quad (40)$$

Обозначим

$$\begin{aligned} \frac{a}{vR} &= \Pi_1; & \frac{b}{R} &= \Pi_2; & \frac{H_n}{H_m} &= \Pi_3; & \frac{p_0}{H_m} &= \Pi_4; \\ \frac{d}{R} &= \Pi_5; & \frac{N_{уд}}{H_m v R} &= \Pi_6; & \frac{q}{Rv} &= \Pi_7; & \frac{v_y}{vR} &= \Pi_8; \\ \frac{v_c}{vR} &= \Pi_9; & t_k v &= \Pi_{10}. \end{aligned}$$

Тогда

$$\Pi_1 = f(\Pi_2, \Pi_3, \Pi_4, \Pi_5, \Pi_6, \Pi_7, \Pi_8, \Pi_9, \Pi_{10}) \dots \quad (41)$$

В соответствии с  $\Pi$ -теоремой для равенства критериев  $\Pi_{1m} = \Pi_{1n}$ , где  $n$  — индекс натурности,  $m$  — индекс модели, необходимо равенство соответствующих критериев, стоящих в скобках.

Опыт предполагается вести на натуральных образцах горных пород (керпах) при изнашивании образцов металла, изготовленных из материалов вооружения долот, и подвергнутых такой же химико-термической обработке, как и вооружение долот, т. е. для любых схем изнашивания будем иметь

$$\Pi_3 = \text{idem}; \quad \Pi_4 = \text{idem}; \quad \Pi_5 = \text{idem}.$$

Остальные критерии являются определяющими при выборе схемы изнашивания и проектировании экспериментальных установок. Значение критериев, рассчитанные для стального вооружения долота 1В-190Т по результатам оценки условий работы вооружения приведены в табл. 16.

Величины  $N_{уд}$ ,  $q$ ,  $v$  и  $t_k$  определяют тепловой режим в области контакта металл — горная порода, а поэтому для физического подобия процессов необходимо, чтобы их значения на модели варьировали в тех же пределах, что и в натуре.

Таким образом, приходим к необходимости воспроизводства изнашивания элементов вооружения долота в лабораторных условиях.

Изучение изнашивания элементов вооружения в реальных условиях в принципе возможно, но громоздко и не отвечает основному требованию эксперимента: не обеспечивается точность измерений и регистрация условий и параметров испытания. Поэтому нами использован метод приближенного моделирования с последующей проверкой сделанных допущений.

Широкий диапазон изменения значений критериев подобия, а также величин, обуславливающих физическое моделирование процесса, накладывает большие трудности на создание экспериментальных установок и проведение исследований, а поэтому изучение абразивности горных пород было проведено по этапам.

Первоначально была сконструирована и изготовлена совместно с А. Н. Поповым экспериментальная установка по схеме изнашивания вращающегося диска применительно к условиям турбинного способа бурения, охватывающая сравнительно узкую область изменения критериев подобия. Установка условно названа АИ-2 (абразивное изнашивание — второй вариант). Первый вариант установки создан в 1955 г. и подробно описан в работах [16, 192]. На установке АИ-2 абразивное изнашивание вооружения долота моделировалось по критериям  $\Pi_2$ ;  $\Pi_4$ ,  $\Pi_7$ ,  $\Pi_9$  и  $\Pi_{10}$  в сравнительно узкой области их изменения (см. табл. 16).

Позднее для расширения моделируемой области работы вооружения долот совместно с Г. В. Колесевым и А. Н. Поповым была сконструирована и изготовлена установка АИ-3 также по схеме изнашивания вращающегося диска. Область моделирования приведена в табл. 16, из которой

## Область изменения критериев подобия

Тип долота, эксперименталь- ная установка	Область изменения критериев подобия					
	$\Pi_1 = \frac{b}{R}$	$\Pi_2 = \frac{N_{yA}}{H_{\Sigma} \sqrt{R}}$	$\Pi_3 = \frac{\eta}{Rv}$	$\Pi_4 = \frac{v_y}{Rv}$	$\Pi_5 = \frac{v_c}{Rv}$	$\Pi_6 = k^2 v$
4В-190Т:						
Роторный	0,13 ÷ 10	До 32 · 10 <sup>-3</sup>	14 ÷ 5330	До 8	До 5,4	До 150 · 10 <sup>-3</sup>
Турбинный	0,13 ÷ 10	» 21 · 10 <sup>-3</sup>	3 ÷ 5300	» 53	» 36	» 150 · 10 <sup>-3</sup>
• АИ-2	0,10 ÷ 0,25	» 5,1 · 10 <sup>-3</sup>	До 200	0	6,28	» 100 · 10 <sup>-3</sup>
АИ-3	0,10 ÷ 0,30	21,0 · 10 <sup>-3</sup>	» 2000	0	6,28	» 100 · 10 <sup>-3</sup>
АИ-4	0 ÷ 10	» 40 · 10 <sup>-3</sup>	» 7000	До 130	» 74	» 150 · 10 <sup>-3</sup>

видно, что недостатки установки АИ-2, хотя и в меньшей степени, присущи и установке АИ-3.

Наиболее полное моделирование работы вооружения долот осуществлено на установке АИ-4, сконструированной и изготовленной совместно с Б. Н. Трушкиным и А. Н. Поповым. Установка создана по схеме бурения одним элементом вооружения. Моделируемая область приведена в табл. 16. Однако сложность проведения испытаний на изнашивание и необходимость бурения на блоках горных пород не позволяют изучать абразивность пород по кернам. Поэтому на установке АИ-4 была оценена возможность экстраполяции данных, полученных на установках АИ-2 и АИ-3, на области работы вооружения долот, не моделируемые этими установками. Создание установки АИ-4 преследовало и более общие цели изучения работы элементов вооружения долот, выходящие за рамки данной работы.

### Экспериментальная установка АИ-2

Экспериментальная установка АИ-2 отличается от первого варианта установки тем, что она представляет собой отдельный станок, смонтированный на бетонном фундаменте; изготовлена более мощная система нагружения образцов, что позволило значительно расширить диапазон нагрузок при проведении экспериментов; массивный бетонный фундамент, а также массивный маховик на шпинделе установки позволяют значительно снизить вибрации и крутильные колебания; изготовлена система измерения момента трения с непрерывной записью на ленте электронного самописца. Кинематика и устройство установки показаны на рис. 16. Установка состоит из следующих основных узлов и систем.

**Привод и редуктор установки.** Приводом установки служит электродвигатель 1 мощностью 0,6 кВт при скорости вращения 1420 об/мин. Вращение от электродвигателя через муфту 2 передается на вал редуктора и далее через сменные шестерни 3 на вал 4. Между зубчатыми колесами редуктора, установленными на валах 4 и 6, помещена промежуточная шестерня 5, которая служит датчиком моментомера. Промежуточная шестерня связана через маятник 7 с балкой 8, изготовленной из автомобильной рессоры. На балку наклеены тензодатчики 9.

Три пары смещенных шестерен редуктора обеспечивают шесть скоростей вращения шпинделя: 290, 420, 595, 895, 1200 и 1820 об/мин. Это позволяет охватить диапазон скоростей скольжения (при диаметре образца стали 30 мм) от 0,45 до 2,86 м/с.

Крепление образца металла и система нагружения. Образец испытываемого металла 10, представляющий собой кольцо, крепится на шпинделе 11. На противоположном конце шпинделя расположен маховик 12. Шпиндель

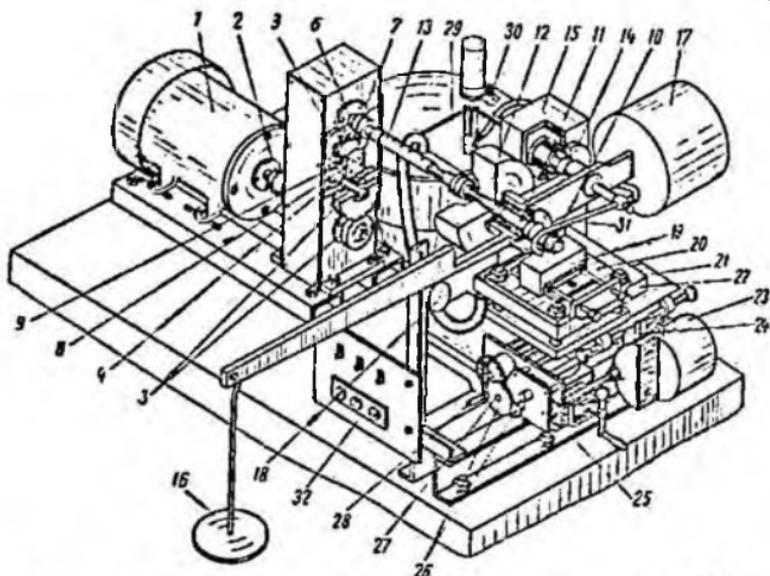


Рис. 16. Кинематика и устройство установки АИ-2.

получает вращение от выходного вала редуктора 6 через кардан 13. Шпиндель монтируется на шарикоподшипниках № 205 в корпусе рычага 14, опорой которого служит стойка 15. Соотношение плеч рычага 1 : 5. На конце рычага подвешена тарелка 16 для установки гирь. На противоположном конце рычага противовес 17. Нагруженный рычаг удерживается от опускания с помощью эксцентрика 18. Система нагружения позволяет создавать нагрузку на испытываемый образец до 175 кгс.

Крепление образца горной породы. Образец горной породы 19 крепится на столе установки 20 с помощью тисочков. Стол крепится на стойках к салазкам суппорта 21 и с помощью гаек позволяет устанавливать образец горной породы горизонтально на наружной высоте. Вап-

точка 22 служит для сбора охлаждаемой жидкости. На направляющей верхних салазок суппорта смонтированы электродвигатель 23 подачи стола установки, конечный выключатель 24 и редуктор 25. Шестерни 26 редуктора сменные. Комбинации сменных шестерен обеспечивают следующие скорости подачи стола установок: 0,06, 0,27, 1,16 и 5,46 мм/с. Стол, приводящийся в движение с помощью ходового винта 27, можно перемещать вручную рукояткой 28.

**Система охлаждения.** На установке смонтирована замкнутая система охлаждения испытываемых образцов. Жидкость из стеклянной емкости 29 с помощью насоса 30, смонтированного под крышкой емкости, подается по резиновому шлангу и подводящей трубке 31 для охлаждения образца. Отработанная жидкость из ванночки самодетком возвращается в стеклянную емкость. Производительность насоса при подаче воды 0,16 л/с. Управление установкой сосредоточено на пульте 32.

**Система измерения и записи момента трения и регистрации скорости вращения шпинделя.** При создании моментомера, как и в установке, созданной ранее [16], использован принцип измерения усилия выдавливания из зацепления промежуточной шестерни. Усилие от шестерни 5 передается на балку 8, с обеих сторон которой наклеено по два тензодатчика по 350 Ом каждый (см. рис. 16). Схема наклейки датчиков и их соединения в мост постоянного тока приведена на рис. 17. Электрический ток от сети через стабилизатор напряжения 1 подается на выпрямитель 2. Рабочий ток устанавливается по миллиамперметру 3 с помощью сопротивления 4. Измерительный мост 6 балансируется с помощью сопротивления 5, представляющего собой кусочек константановой проволоки. Когда мост сбалансирован, провод питания припаивается к сопротивлению 5, чтобы не разбалансировался мост от вибраций при работе установки. В диагональ моста включен электронный ленточный самописец 7 типа «КВТ», предназначенный для непрерывной записи момента трения.

Для тарировки моментомера подготовлен тормоз Прони. Сравнительные динамическая и статическая тарировки показали полное их совпадение, а поэтому в ходе опытов тарировка проверялась только статическим способом.

Чувствительность системы измерения момента изменяется силой тока питания моста.

Тарировочная кривая представляет собой прямую линию, поэтому удобно вычислить масштаб записи момента

$$m = M/l,$$

где  $m$  — масштаб записи момента трения на диаграммной бумаге в кгс·м/см;  $M$  — величина измеряемого момента в кгс·м;  $l$  — пробег каретки прибора, соответствующий измеряемому моменту, в см.

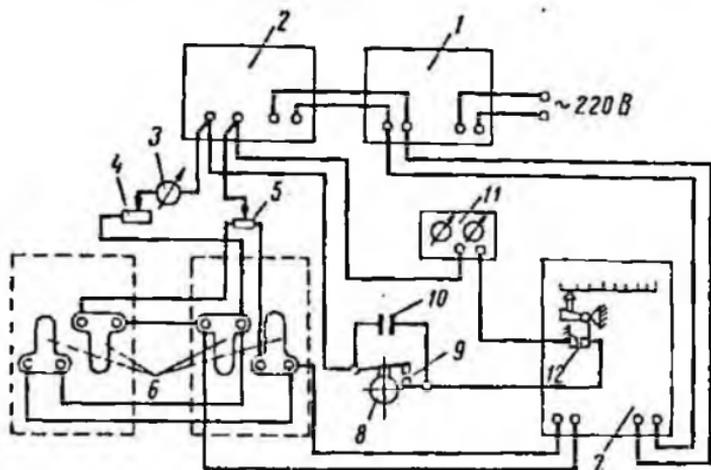


Рис. 17. Электрическая схема регистрации момента трения и скорости вращения шпинделя.

В процессе опытов был установлен и контролировался масштаб записи, равный 0,05 кгс·м/см. Этому масштабу записи соответствовал рабочий ток питания моста 50 мА.

Для регистрации скорости вращения использовался импульсный счетчик 11 (см. рис. 17). На выходном валу редуктора установлен кулачок 8, размыкающий контакты 9. Конденсатор 10 служит для гашения искры. Питание подается от выпрямителя 2. Включение счетчика автоматическое от каретки электронного самописца. Если момент трения равен нулю, то контакты 12 разомкнуты, и счетчик не работает. При введении вращающегося кольца в контакт с горной породой каретка, реагируя на увеличение момента трения, включает счетчик, а при отрыве кольца от горной породы, т. е. при снятии момента трения, каретка, пробегая в обратном направлении, отключает счетчик. При необходимости к контактам 12 подключался электрический секундомер.

### Экспериментальная установка АИ-3

Отличительными особенностями установки АИ-3, по сравнению с установкой АИ-2, являются более широкий диапазон изменения скоростей скольжения, большая мощность привода, создание нагрузки на образец стали с помощью пневматической системы. Замкнутая циркуляция позволяет широко изменять расход промывочной жидкости. Специальная камера обеспечивает полное погружение образца металла в жидкость в процессе всего опыта. Принципиальная схема этой установки приведена на рис. 18.

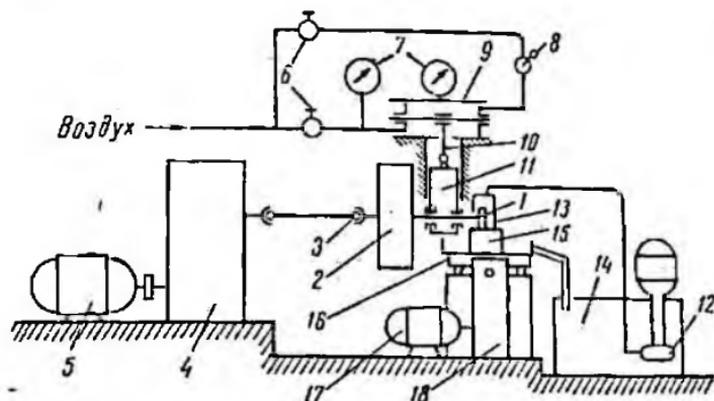


Рис. 18. Схема экспериментальной установки АИ-3.

Образец металла 1 в виде кольца устанавливается на шпинделе. Массивный маховик 2 обеспечивает плавность вращения образца металла. Шпиндель приводится во вращение от электродвигателя 5 через кардан 3, коробку скоростей 4. Скорости вращения изменяются ступенчато от 70 до 3400 об/мин (12 ступеней), что соответствует изменению частоты взаимодействия от 1,2 до 57 Гц. Нагрузка на образец металла создается с помощью пневматической системы, в которую входят два редуктора 6, два манометра 7, кран 8 и цилиндр с диафрагмой 9, вследствие разности давлений в верхней и нижней полостях цилиндра. Давление в нижней полости поддерживают постоянным и таким, чтобы обеспечить быстрый отрыв образца металла от горной породы в конце опыта, выпустив воздух из верхней полости. Диафрагма через шток 10 связана

с ползуном 11, в котором на подшипниках установлен шпиндель.

Образец металла охлаждается жидкостью, подаваемой центробежным насосом 12 в специальную камеру 13, которая обеспечивает полное погружение образца в промывочную жидкость и исключает ее разбрызгивание. Отработанная промывочная жидкость самотеком возвращается в емкость 14.

Образец горной породы 15 крепится на суппорте 16. Во время опыта образцу горной породы сообщается поступательное движение от электродвигателя 17 через коробку скоростей 18. Установка имеет 11 скоростей подачи в диапазоне от 0,1 до 10 мм/с.

Электрическая схема управления установкой, схема измерения момента и регистрации времени опыта те же, что и на установке АИ-2.

#### Экспериментальная установка АИ-4 для разрушения горных пород одним зубцом

Разработка схемы взаимодействия элемента вооружения долота (зубца) с горной породой основана на двух допущениях: 1) шарошка вращается равномерно; 2) передаточное число от долота к шарошке постоянно и равно отношению числа зубьев рейки забоя к числу зубьев периферийного венца. Методика определения скорости вращения шарошек изложена ранее. Дальнейшие расчеты выполнялись по методике, изложенной в работе [102].

Схема взаимодействия зубца долота с породой. Движение зубца относительно породы не изменится, если остановить вращение долота, а забой вращать в сторону, противоположную вращению долота. Этот принцип использован нами при разработке схемы, воспроизводящей закон движения зубца любого венца долота относительно породы (рис. 19). Сущность схемы заключается в следующем: образец металла 1, имеющий форму зубца долота, вращается относительно оси  $ac$  с угловой скоростью  $\omega_{ш}$ , равной угловой скорости вращения шарошки, в то время как образец породы 2 вращается с угловой скоростью  $\omega_p$  в направлении, указанном выше. Угловая скорость породы  $\omega_p$  должна быть немного больше  $\omega_{ш}$ , чтобы зубец при первом проходе поражаля породу с шагом  $t$ , а при следу-

ющем проходе — с шагом  $t_1$ . Образец породы непрерывно движется вертикально вверх, чтобы зубец постоянно углублялся в породу на одну и ту же величину. Изменяя вертикальную скорость подачи образца породы, можно изменять глубину погружения зубца в породу, а следовательно, и изменять напряженность его работы.

Из схемы на рис. 19 видно, что скорость скольжения зубца относительно породы равна

$$v_{ск} = v_1 - v_2,$$

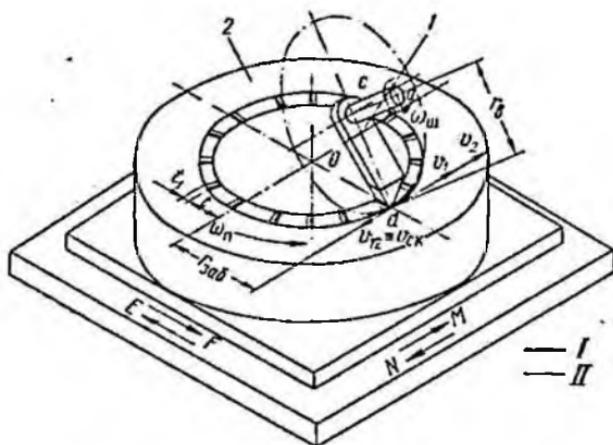


Рис. 19. Схема взаимодействия зубца с породой.  
I — поражение породы при первом проходе зубца; II — поражение породы при втором проходе зубца.

а по абсолютной величине

$$v_{ск} = v_1 - v_2 = cd\omega_{ш} - od\omega_{п} = r_n\omega_{ш} - r_{зab}\omega_{п}.$$

Направление и величина скорости скольжения зависят от абсолютных величин  $v_1$  и  $v_2$ . При постоянных значениях  $\omega_{ш}$  и  $\omega_{п}$   $v_{ск}$  будет зависеть от  $r_n$  и  $r_{зab}$ .

Чтобы исследовать работу и износ зубьев долота различных венцов при какой-то определенной скорости его вращения, необходимо подобрать соответствующие величины радиусов  $r_n$  и  $r_{зab}$ . Величина радиуса  $r_n$  изменяется при подборе диаметра оправки, в которую вставляется зубец, а радиус  $r_{зab}$  — при перемещении оси вращения породы (рис. 19) в направлениях, указанных стрелками E и F.

Известно [102], что величина и направление скорости скольжения зубьев долот со смещенными в плане осями шарошек зависят также от величины смещения  $k$ . Поэтому при моделировании работы зубьев долот необходимо давать смещение оси  $ac$ , вокруг которой вращается испытуемый

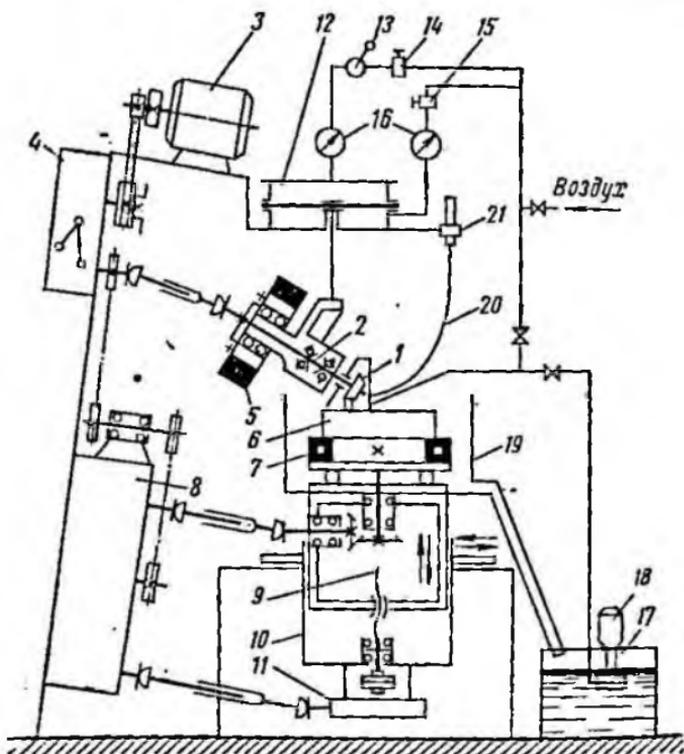


Рис. 20. Принципиальная схема экспериментальной установки АИ-4.

зубец, относительно оси вращения породы. Это осуществляется перемещением оси вращения породы в направлениях, указанных стрелками  $N$  и  $M$  (см. рис. 19). Описанная схема работы зубца долота выполнена на специальной установке.

Установка состоит из следующих систем (рис. 20).

Система вращения испытуемого зубца. Оправка с зубцом 1, установленная на шпинделе 2, получает вращение от электродвигателя 3 ( $N = 4,5$  квт,  $n = 1440$  об/мин) через клипоременную передачу, коробку скоростей 4

и карданный вал. Маховик 5 на шпинделе необходим для поддержания скорости вращения зубца при его взаимодействии с породой в определенных пределах. Коробка скоростей 4 и клиноремennая передача позволяют иметь 18 скоростей вращения шпинделя от 122 до 1685 об/мин.

Система вращения породы. Образец породы 6, установленный на столе 7, служащем одновременно маховиком (маховик опирается на упорный подшипник), получает вращение от электродвигателя 3 через клиноремennую передачу, коробку скоростей 4, цепные передачи, редуктор 8, карданный вал и конические шестерни. Сменные шестерни редуктора 8 обеспечивают шесть различных значений шага поражения породы зубцом.

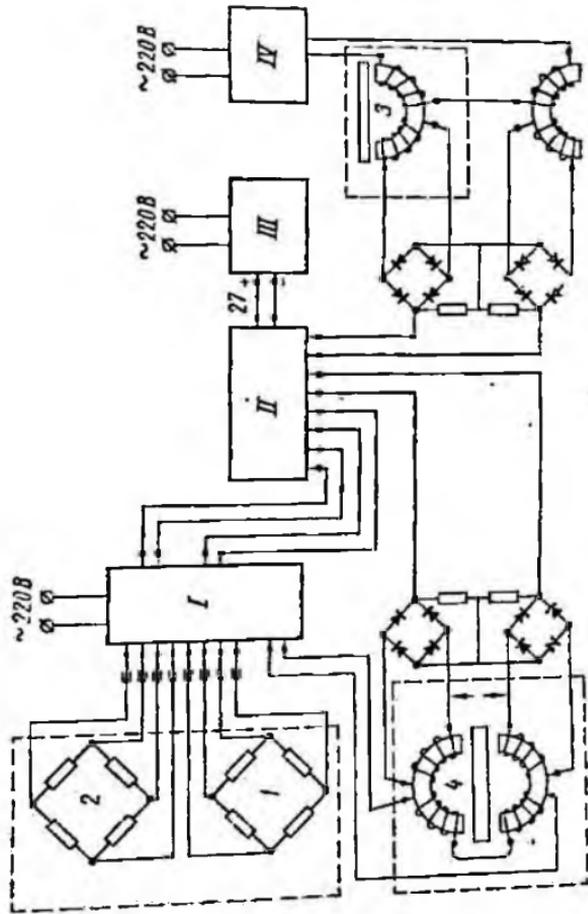
Система вертикальной подачи образца породы. Вертикальная подача образца породы 6 вместе со столом осуществляется ходовым винтом 9 в направляющие корзинки 10. Ходовой винт получает вращение от редуктора 8 через карданный вал и червячный редуктор 11. Сменные шестерни редуктора 8 позволяют задавать столу 7 одиннадцать скоростей вертикальной подачи. Корзину 10 можно перемещать в продольном и поперечном направлениях, изменяя тем самым положение оси вращения образца породы относительно оправки с зубцом и таким образом задавая величины радиуса выработки на забое и смещение оси вращения зубца.

Система регулирования жесткости и отрыва зубца от породы. Система состоит из цилиндра 12 с диафрагмой, к которой прикреплен шток, связанный с системой подвески шпинделя 2. В верхнюю часть цилиндра подается сжатый воздух через редуктор 14 и двухходовой кран 13, а в нижнюю часть — через редуктор 15. Манометры 16 служат для контроля давления в нижней и верхней полостях цилиндра.

Во время опыта давление в верхней полости цилиндра значительно больше, чем в нижней, и диафрагма прижата к выступу нижней полости цилиндра. Жесткость системы, с которой связан шток цилиндра, будет изменяться в зависимости от давления в верхней полости цилиндра. Поворотом двухходового крана 13, сжатый воздух из верхней полости цилиндра выпускается в атмосферу, а сжатый воздух, находящийся в нижней полости цилиндра, расширяется и поднимает вверх диафрагму и связанные с ней узлы.

Рис. 21. Принципиальная электрическая схема измерительной системы установки АИ-4.

I — усилитель УТ<sub>4</sub>-1; II — осциллограф Н-700; III — выпрямитель; IV — генератор 10 кГц.



Система охлаждения и очистки. На установке смонтирована замкнутая система охлаждения и очистки, которая состоит из емкости 17 и центробежного насоса с электродвигателем 18. Жидкость от насоса подается по трубопроводу к камере, которая закрывает испытуемый образец

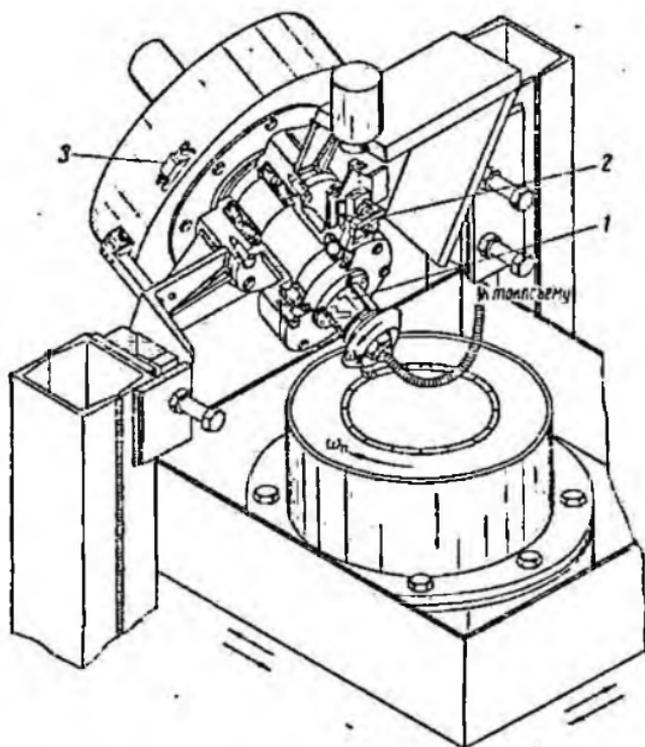


Рис. 22. Конструкция исполнительного органа установки АИ-4.

1 — датчик крутящего момента и нормальной нагрузки на зубец; 2 — датчик вертикального перемещения шпинделя; 3 — датчик вертикального положения зубца.

металла и обеспечивает его полное погружение в жидкость. Отработанная жидкость собирается в емкости 19 и по желобу стекает в приемную емкость 17.

На установке предусмотрена возможность охлаждения и очистки образцов воздухом.

Система измерений. Принципиальная электрическая схема системы измерений приведена на рис. 21. Система измерений состоит из тензометрических датчиков 1

крутящего момента и нормальной нагрузки 2 на зубец, наклеенных на шпиндель установки, трансформаторных датчиков 3 вертикального положения зубца, вертикального перемещения шпинделя 4, тензометрического усилителя УТЧ-1 и осциллографа Н-700.

Провода подводятся к датчикам на шпинделе 2 (см. рис. 20) через специально сконструированный и изготовленный ртутный токосъем 21, соединенный со шпинделем гибким валом 20, внутри которого размещены провода.

Конструкция исполнительного органа установки АН-4 и размещение на нем основных датчиков показаны на рис. 22.

### Образцы металла, горных пород и промывочные жидкости

В качестве эталона при изучении абразивности горных пород по отношению к закаленной стали принята сталь 20ХНЗА, цементованная и термообработанная в соответствии с технологией химико-термической обработки шарошек долот. При проведении предварительных опытов, а также опытов для отработки методики были использованы образцы из стали У8, закаленной до твердости  $H_m = 850$  кгс/мм<sup>2</sup>. Эти опыты, а также опыты, выполненные нами ранее [192] показали, что износостойкость этих сталей близка. Выбор стали 20ХНЗА обусловлен тем, что исследования проводятся для изучения абразивных свойств горных пород применительно к условиям работы вооружения буровых долот, а также для выяснения возможности расчета долговечности стального вооружения долота при работе в горных породах с различной напряженностью. Эту задачу нельзя решить без анализа отработанных долот и без сопоставления данных этого анализа и экспериментальных данных. Одинаковый материал и одинаковая исходная структура и твердость образцов стали и стального вооружения долот значительно упрощают эти задачи.

В качестве основной характеристики механических свойств стали использовали величину микротвердости, определенную на приборе ПМТ-3 при нагрузке 200 гс. Оценим устойчивость величины микротвердости стали как показателя, характеризующего механические свойства стали. Для этого было вырезано по три зубца с новых

долот ОМ575-8Т и ОМ21-190Т и сделано по три замера микротвердости на глубине от 0,05 до 0,3 мм. Микротвердость цементированного слоя вооружения долота ОМ575-8Т с надежностью 0,95 составляет  $782 \pm 22$  кгс/мм<sup>2</sup>, а долота ОМ21-190Т —  $786 \pm$  кгс/мм<sup>2</sup>. Микротвердость испытываемых образцов стали 20ХНЗА, определенная

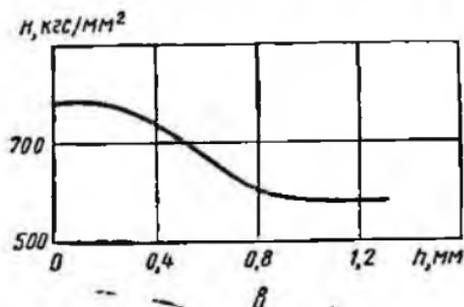
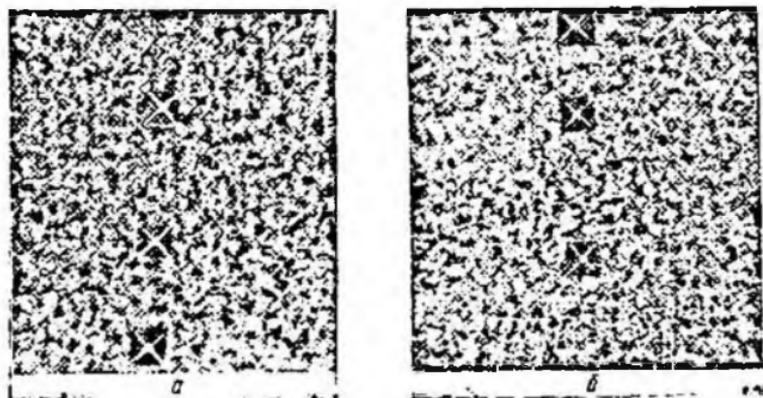


Рис. 23.

аналогичным образом, составляла  $784 \pm 5$  кгс/мм<sup>2</sup>. Отсюда видно, что микротвердость цементированного слоя стали 20ХНЗА — достаточно устойчивый показатель.

На рис. 23, б приведена микроструктура (450\*) зубца нового долота ОМ21-190Т и образца стали 20ХНЗА (рис. 23, а), подготовленного к опытам. Из рис. 23, а и б видно, что структура цементированной области и ее микротвердость на зубьях долота и на образце стали одинаковы. Из рис. 23, в, на котором приведен график распределения микротвердости по глубине образца стали, видно, что толщина слоя с постоянной микротвердостью

составляет 0,2 мм, а общая толщина цементированного слоя около 0,8 мм. Отсюда потеря диаметра образца стали (кольца) во время опытов не должна превышать 0,4 мм.

Кроме того, на изнашивание испытывались образцы из твердого сплава ВК15 для оценочной характеристики износа твердосплавного вооружения. Сплав ВК15 по содержанию кобальта занимает промежуточное положение между сплавами ВК8В и ВК20М и по результатам исследований Н. А. Кудря и др. [101] занимает также промежуточное положение по количеству поломок и абразивному изнашиванию зубьев шарошечных долот, армированных твердыми сплавами различных марок.

Закономерности абразивного изнашивания изучались на группах сульфатных, карбонатных и обломочных горных пород, которыми представлены разрезы нефтяных месторождений Башкирии, Татарии, Куйбышевской, Пермской и Тюменской областей. Сравнительно небольшой объем исследований выполнен также на некоторых горных

Таблица 17

Вид и состав промывочной жидкости	Условное обозначение жидкости	Относительный удельный вес	Условная вязкость, с	Содержание глисса, %	рН
Вода техническая	—	1,00	15	0	7,0
Глинистый раствор: вода + глинопорошок Куганакского завода	ГР-1	1,16	20	0,7	7,5
	ГР-2	1,30	60	1,0	8,5
Эмульсионный глинистый раствор: вода + глинопорошок + 0,6% КМЦ + 6,0% нефти	ЭГР-1	1,20	45	1,0	10
	ЭГР-2	1,30	60	1,0	10
Эмульсионный крахмальный раствор: 5% (по весу) картофельного крахмала + 0,5% каустика + 10% нефти + 3% ИЧК + вода до 100%	ЭКР	1,00	100	0	10
Раствор на нефтяной основе: 14% битума + 14% негашеной известь + 3,5% воды для гашения известь + дизельное топливо до 100%	РНО	0,98	60	0	10

породах, характерных для нефтяных месторождений Казахстана, Белоруссии, западной части Украины и Ухты. Образцы пород для исследования подбирались таким образом, чтобы они характеризовали разрезы основных нефтяных месторождений. Кроме того, одноименные образцы подбирались с разных глубин одного и того же месторождения с таким расчетом, чтобы они обладали различными структурными и механическими характеристиками.

Методические опыты параллельно на установках АИ-3 и АИ-4 проводились на блоках песчаника и доломита.

Для сравнения абразивной способности осадочных и изверженных пород небольшой объем исследований выполнен на образцах пород Армении.

Влияние свойств промывочных жидкостей на скорость абразивного изнашивания металла при разрушении горных пород изучалось на ограниченном количестве образцов пород, характерных для данного типа.

В табл. 17 приведены состав и характеристика жидкостей, при промывке которыми были проведены опыты. Кроме того, было изучено влияние добавок к воде поверхностно-активных веществ ОП-10 и СНС и некоторых серу-, хлор- и фосфорсодержащих присадок.

#### Методика изучения абразивного изнашивания металла

Подготовка образцов стали и горной породы. После термообработки боковые поверхности образца стали шлифуются. Рабочая поверхность кольца прорабатывается на шкурке КЗ-10 при скорости скольжения 1,41 м/с, нагрузке 10 кг и охлаждается водой, чтобы удалить верхний обезуглероженный слой. Продолжительность проработки 30 000 оборотов шпинделя.

Поверхность образцов горной породы для испытания на установках АИ-2 и АИ-3 шлифуется порошком электрокорунда одной и той же зернистости на стекле с водой. Основная цель шлифовки — удалить участки разрушения, полученные на поверхности в результате обработки образца, или следы от разрушения в предыдущих опытах.

Грубая поверхность образцов затрудняет замеры глубины разрушения на горной породе и приводит к большому разбросу точек. Блок породы для испытания на установке АИ-4 цементируется в державке, устанавливается

на стол установки, выравнивается резцом с промывкой водой. Перед началом испытаний резцовая головка снимается.

**Проведение опытов.** Подготовленный к опыту образец стали устанавливается на шпинделе установки. На столе крепится образец горной породы. При работе на установке АИ-2 на чашу рычага кладется требуемый груз, а при работе на установке АИ-3 в системе нагружения создается давление, соответствующее требуемой нагрузке, затем включается двигатель системы охлаждения, протяжка ленты самописца и холостое вращение шпинделя, что позволяет отметить полюс моментомера. Последним включается двигатель подачи горной породы. Плавно с помощью эксцентрика кольцо приводится в контакт с горной породой, при этом автоматически включается счетчик оборотов шпинделя или электросекундомер. На установке АИ-3 кольцо прижимается к горной породе поворотом крана для впуска воздуха в верхнюю полость цилиндра. По окончании опыта на установке АИ-2 кольцо быстро отрывается от горной породы с помощью эксцентрика, а на установке АИ-3 — путем выпуска воздуха из верхней полости цилиндра в атмосферу. Затем последовательно выключаются насос, двигатель подачи горной породы, протяжка ленты самописца и вращение шпинделя. Со счетчика снимается общее число оборотов шпинделя за опыт или записывается время по электросекундомеру.

При работе на установке АИ-4 в системе регулирования жесткости устанавливается требуемое давление воздуха, включаются промывка и основной двигатель. В момент начала взаимодействия зубца с горной породой включается секундомер, а в требуемый момент времени — осциллограф для записи параметров опыта. В конце опыта, выпустив воздух из верхней полости цилиндра, зубец быстро выводят из работы и выключают секундомер, промывку и двигатель.

Длительность опыта зависит от режима испытания и типа горной породы и подбирается таким образом, чтобы получить величину износа 5—20 мг. Испытание на определенном режиме разбивается на ряд опытов для контроля за изменением износа и формированием рабочей поверхности образца стали. Как правило, первый опыт не принимается во внимание, так как значительную часть его занимает неуставившийся процесс изнашивания. По

окончании опыта образец стали снимают, осматривают и взвешивают. Зубья дополнительно обмеривают на измерительном микроскопе МИИ-1.

**Обработка результатов опыта.** При испытании на установках АИ-2 и АИ-3 по записи момента трения подсчиты-

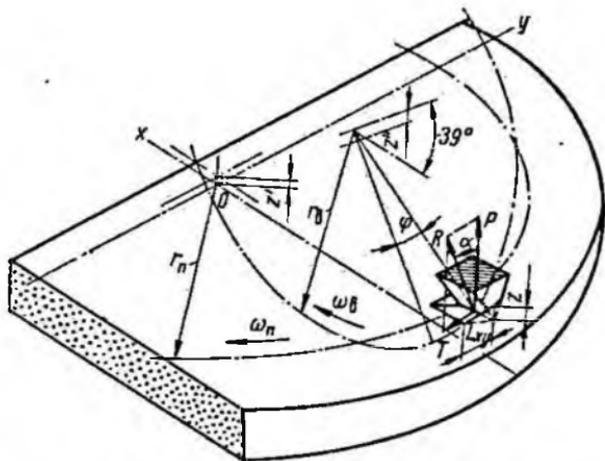


Рис. 24. К расчету сил взаимодействия зубца с горной породой.

вается средняя удельная мощность  $N_{уд}$ , реализуемая рабочей поверхностью кольца по формуле

$$N_{уд} = 1,02 \frac{Mn}{S}, \text{ Вт/мм}^2, \quad (42)$$

где  $M$  — средний момент трения за опыт в кгс·м;  $n$  — скорость вращения шпинделя в 1 мин;

$$S = 2\pi Rb,$$

( $R$  — радиус кольца,  $b$  — ширина кольца).

При испытаниях на установке АИ-4 работа взаимодействия элемента вооружения с горной породой определяется обработкой осциллограмм. Расчетная схема и вид осциллограммы приведены на рис. 24 и 25. Осциллограф регистрирует во времени силу  $P$ , нормальную к плоскости образца горной породы (сила  $P$  параллельна оси  $oz$ ).

см. рис. 24), и момент на шпиделе  $M$ . Сила, действующая в плоскости  $xoy$ , определяется из выражения

$$T = \frac{M - Pr_n \cos 39^\circ \sin \varphi}{r_n \cos \varphi},$$

где  $r_n$  — радиус вращения вершины зубца в среднем сечении;  $\varphi$  — угол между вертикальным положением зубца и положением зубца в момент времени  $t$  — в плоскости вращения.

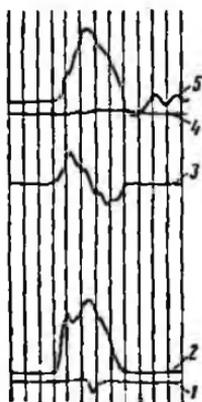


Рис. 25. Оциллограмма работы зубца.

1 — отметка вертикального положения зубца; 2 — нагрузка  $P$ ; 3 — момент на шпиделе; 4 — вертикальное перемещение горной породы; 5 — вертикальное перемещение шпиделя.

Тогда реакция забоя равна

$$R = \sqrt{P^2 + T^2},$$

а угол наклона реакции к оси  $oz$  —  $\alpha = \arctg \frac{T}{P}$ .

Работа взаимодействия равна

$$A = A_P + A_T,$$

где

$$A_P = \int_z P(z) dz; \quad A_T = \int_{L_{xy}} T(L_{xy}) dL_{xy} \quad (43)$$

( $L_{xy}$  — проекция пути трения на плоскость  $xoy$ ).

Вертикальное перемещение зубца относительно горной породы в момент времени  $t$  равно

$$z(t) = z_n - (z' + z'');$$

$$z_n = r_n (\cos \varphi - \cos \varphi_0) \cos 39^\circ = r_n (\cos \omega_n t - \cos \omega_n t_0) \cos 39^\circ,$$

где  $t_0$  — время с момента встречи зубца с горной породой до момента прохождения вертикальной плоскости;  $z'$  — вертикальное перемещение шпинделя в момент времени  $t$ ;  $z''$  — вертикальное перемещение горной породы в момент времени  $t$  (перемещения  $z'$  и  $z''$  определяются непосредственно по осциллограммам 5 и 4 (рис. 25).

Перемещение зубца в горизонтальной плоскости к моменту времени  $t$  составит

$$L_{xy} = \int_{t_0}^t v_{ск}(t) dt,$$

где  $v_{ск}$  — скорость скольжения зубца относительно породы

$$v_{ск} = \omega_n r_n - \omega_b r_b \cos \varphi = \omega_n r_n - \omega_b r_b \cos \omega_b t.$$

Установка маховиков на шпинделе и столе позволяет принять

$$\omega_n = \text{const}; \quad \omega_b = \text{const}.$$

Для определения работы графики изменения  $P$  и  $T$  перестраиваются в координатах нагрузка — перемещение и находятся значения интегралов (43). Средняя удельная мощность, реализуемая рабочей поверхностью зубца, равна

$$N_{уд} = \frac{A\omega_n}{2\pi S}, \quad (44)$$

где  $S$  — рабочая поверхность элемента вооружения долота.

Обмер осциллограмм и измерение рабочей поверхности зубца проводятся на измерительном микроскопе МИИ-1.

Износ образцов металла определяется весовым способом с точностью до 0,1 мг. Перед взвешиванием образец металла промывается спиртом. Затем подсчитывается средняя скорость изнашивания металла

$$a = \frac{q}{\gamma S T_0}, \quad (45)$$

где  $q$  — износ образца металла за опыт в мг;  $T_0$  — время опыта в ч;  $\gamma$  — удельный вес материала образца в мг/мм<sup>3</sup>.

Величина  $a$  — средняя толщина слоя металла, изнашиваемого за 1 ч с рабочей поверхности образца стали.

Скорость разрушения горной породы подсчитывается по глубине канавки разрушения  $\delta$  на поверхности образца (см. рис. 13). Глубина канавки измеряется индикатором с ценой деления 10 мк. Делается десять замеров в различных участках канавки и берется среднее арифметическое значение. При испытаниях на установках АИ-2 и АИ-3 подсчитывается средняя приведенная глубина разрушения  $\delta_0$  в 1 с

$$\delta_0 = \frac{\delta v_n}{2\pi R}, \text{ мм/с}, \quad (46)$$

где  $v_n$  — скорость подачи образца горной породы.

Физический смысл величины  $\delta_0$  — отношение объема, описываемого кольцом внутри горной породы, к площади рабочей поверхности кольца в единицу времени.

Для оценки процессов взаимного изнашивания металла и горной породы определяется относительный износ пары металл — горная порода

$$\omega = \frac{a}{3600\delta_0}. \quad (47)$$

Коэффициент трения пары металл — горная порода подсчитывается по формуле

$$f = \frac{M}{RG}, \quad (48)$$

где  $G$  — нагрузка на кольцо.

Обработка экспериментальных результатов. Чтобы избежать случайных ошибок, опыты повторялись. Обработка результатов опытов проводилась по методике, изложенной в работах [30, 72, 105, 125, 143, 147].

Уменьшение случайной ошибки достигалось увеличением числа повторных измерений. Исследования показали, что для принятой методики в большинстве случаев достаточно повторять опыты 3—4 раза. При этом коэффициент вариации при разрушении хомогенных пород не превышает 10—15%, а при разрушении терригенных — 20—25%. Результаты опытов оформлялись в виде графиков зависимости

$$a = f(N_{уд}); \quad \delta_0 = \varphi(N_{уд}) \text{ и т. д.}$$

Наиболее характерные участки графиков зависимости  $a = f(N_{уд})$  проверялись специальными опытами. При

этом рабочая поверхность образцов металла фотографировалась под микроскопом, снимались профилограммы сходных поверхностей до работы и после нее, а также готовились микрошлифы для изучения структурных изменений и фазовых превращений в поверхностных слоях металла.

**Оценка влияния варьирования критериев подобия на скорость абразивного изнашивания, определяемую по схеме вращающегося диска**

Из табл. 16 видно, что при изучении абразивности горных пород по схеме вращающегося диска на установках АИ-2 и АИ-3 варьирующими критериями являются  $\Pi_2$ ,  $\Pi_8$ ,  $\Pi_7$  и  $\Pi_{10}$ . Проведем качественную оценку влияния параметров испытания на величину критерия  $\Pi_1$ . Ранее [99, 134] мы отмечали, что увеличение расхода промывочной жидкости больше определенной величины не оказывает влияния на скорость изнашивания стали 20ХНЗА. Для оценки уровня предельного значения расхода воды как промывочной жидкости представим эти данные в критериальной форме. Результаты расчетов по данным методических опытов на образце доломита приведены в табл. 18.

Результаты сгруппированы по критерию  $\Pi_6$ ; остальные критерии в пределах групп оставались постоянными. Из табл. 18 видно, что граница предельного расхода воды лежит на очень низком уровне. Принятый в опытах расход промывочной жидкости  $q > 0,01$  л/с·мм<sup>2</sup> = 10 м/с вполне обеспечивает надежное охлаждение рабочей поверхности стали, и критерий  $\Pi_7$  может быть исключен из дальнейшего анализа варьирующих критериев при промывке водой.

Из сопоставления табл. 16 и 18 видно, что при работе долота на забое при высокооборотном режиме бурения возможно возникновение условий недостаточного охлаждения вооружения.

Проверка влияния радиуса кривизны рабочей поверхности и ширины образцов стали при изнашивании по схеме вращающегося диска была проведена на образце доломита и песчанка.

Таблица 18

Параметры опытов					Значения критериев		
$R$ , мм	$v$ , 1/с	$q$ , м/с	$N_{уд}^*$ Вт/мм <sup>2</sup>	$a$ , мм/ч	$\Pi_1 \cdot 10^3$	$\Pi_2 \cdot 10^3$	$\Pi_7$
15	14	0,2	1,5	0,80	1,0	0,91	0,94
15	14	0,4	1,5	0,45	0,58	0,91	1,88
15	14	0,8	1,5	0,40	0,52	0,91	3,76
15	14	1,2	1,5	0,40	0,52	0,91	5,64
15	14	1,6	1,5	0,40	0,52	0,91	7,52
<hr/>							
15	14	0,2	3,0	3,7	4,8	1,83	0,94
15	14	0,4	3,0	2,2	2,9	1,83	1,88
15	14	0,8	3,0	1,2	1,6	1,83	3,76
15	14	1,2	3,0	1,15	1,5	1,83	5,64
15	14	1,6	3,0	1,15	1,5	1,83	7,52
<hr/>							
15	14	0,4	6,0	9,2	12,0	3,66	1,88
15	14	0,8	6,0	6,7	8,7	3,66	3,76
15	14	1,2	6,0	6,4	8,3	3,66	5,64
15	14	1,6	6,0	6,4	8,3	3,66	7,52
15	14	2,0	6,0	6,4	8,3	3,66	9,41

Результаты обработки экспериментальных данных приведены в табл. 19.

Из табл. 19 видно, что при разрушении доломита влияние изменения радиуса и ширины кольца в пределах, возможных при работе на установках АИ-2 и АИ-3, не оказывает существенного влияния на значение критерия  $\Pi_1$ .

Снижение частоты взаимодействия (переход от высокооборотного к низкооборотному режиму реализации мощности) от 14 до 2 Гц вызывает некоторое снижение величины  $\Pi_1$ , что, по-видимому, обусловлено изменением критерия  $\Pi_{10}$ .

При разрушении песчанка существенное влияние на величину критерия  $\Pi_1$  оказывает ширина кольца, тогда как изменение радиуса, так же как и при разрушении доломита, существенной роли не играет. Следовательно, при разрушении высокоабразивных горных пород необходимо использовать кольцо шириной не менее 3,5 мм. В качестве базового размера кольца для дальнейших исследований принимается радиус кольца  $R = 15$  мм.

Таблица 19

Горная порода	Параметры опытов					Значение критериев		
	R, мм	b, мм	v, 1/с	N <sub>уд</sub> , Вт/мм <sup>2</sup>	σ, кг/см <sup>2</sup>	Π <sub>1</sub> · 10 <sup>8</sup>	Π <sub>2</sub>	Π <sub>3</sub> · 10 <sup>8</sup>
Доломит	14,8	3,9	14	3,0	1,02	1,37	0,26	1,86
	19,8	3,35	14	4,0	1,30	1,59	0,17	1,86
	25,1	3,8	14	5,0	2,00	1,58	0,15	1,86
	29,8	3,2	14	5,9	2,40	1,30	0,11	1,86
	15,0	1,9	14	3,0	0,95	1,26	0,13	1,86
	14,8	4,0	2	0,43	0,012	1,12	0,27	1,86
	19,8	4,0	2	0,57	0,016	1,12	0,20	1,86
	24,7	3,9	2	0,72	0,018	1,01	0,16	1,86
	Песчаник	15,0	1,74	15	3,2	55	72,5	0,12
15,0		2,50	14	3,0	34	44,9	0,17	1,86
14,9		3,50	14	3,0	19	25,1	0,23	1,86
14,8		4,50	14	3,0	17	22,0	0,30	1,86
19,8		4,0	14	4,0	25	18,0	0,20	1,86
24,8		4,0	14	4,9	29	16,0	0,16	1,86
29,2		4,1	14	5,8	42	20,0	1,14	1,86
15,2		4,0	14	3,0	16	21,0	0,26	1,86

При испытаниях по схеме вращающегося диска время контакта любой точки поверхности кольца равно

$$t_k = \frac{l_k}{2\pi v R},$$

тогда

$$\Pi_{10} = vt_k = \frac{l_k}{2\pi R}.$$

Подставляя значение  $l_k$  из выражения (34'), получаем

$$\Pi_{10} = \frac{\arccos\left(1 - \frac{\delta}{R}\right)}{2\pi}. \quad (49)$$

Из выражения (49) видно, что критерий  $\Pi_{10}$  при постоянном значении  $R$  определяется величиной глубины разрушения на образце горной породы.

На установках по схеме вращающегося диска изменение глубины разрушения  $\delta$  при заданных значениях  $N_{уд}$

и  $v$  достигается изменением скорости подачи  $v_n$  образца горной породы. Проверка влияния критерия  $\Pi_{10}$  была сведена к проверке влияния скорости подачи образца на скорость абразивного изнашивания стали 20ХНЗА. Результаты проверки показали, что как для карбонатных, так и для терригенных пород изменение скорости подачи образца породы при  $v_n > 1$  мм/с незначительно влияет на скорость абразивного изнашивания стали.

Таким образом, на первой стадии испытаний по схеме вращающегося диска выражение (41) может быть сведено к виду  $\Pi_1 = f(\Pi_6)$  при следующих ограничениях:  $\Pi_7 > \Pi_7^{кр}$ ;  $b \geq 3,5$  мм;  $v_n \geq 1$  мм/с;  $R = 15$  мм. Для наглядности и упрощения обработки экспериментальный материал представлен в виде зависимости

$$a = f(N_{уд}).$$

## ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ АБРАЗИВНОГО ИЗНАШИВАНИЯ ЗАКАЛЕННОЙ СТАЛИ И ТВЕРДОГО СПЛАВА ПРИ РАЗРУШЕНИИ ГОРНЫХ ПОРОД

О характере разрушения горных пород  
и его влиянии на скорость абразивного  
изнашивания стали

При работе породоразрушающего инструмента с изменением затрат энергии на разрушение горных пород наблюдается не только количественное, но и качественное изменение процесса их разрушения. На рис. 26 приведены зависимости механической скорости бурения  $v_m$  (скорости разрушения горной породы) от мощности  $N$ , реализуемой долотом, полученные Ю. Ф. Потаповым и В. В. Симоновым [141]. Из рис. 26 видно, что скорость разрушения горной породы зависит не только от величины реализуемой мощности, но и от ее параметров. При  $N = \text{const}$  меньшей скорости вращения долота соответствует большая нагрузка. По-видимому, при разрушении горной породы наиболее существенную роль играет величина напряжений в горной породе, обуславливаемая нагрузкой

на долото. В то же время нагрузка на долото является средством отбора мощности от забойного двигателя или вращающейся колонны, и в большинстве случаев реализуемая долотом мощность примерно прямо пропорциональна нагрузке  $G$ . Следовательно, в первом приближении можно сопоставлять непосредственно зависимости скорости разрушения горных пород от напряженности работы и механической скорости бурения от нагрузки, полученные при постоянных скоростях вращения.

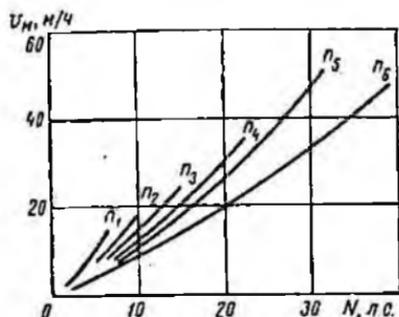


Рис. 26. Зависимость механической скорости бурения от мощности, подводимой к долоту 1В-6АТ.

$n_1 = 60$  об/мин;  $n_2 = 132$  об/мин;  $n_3 = 245$  об/мин;  $n_4 = 358$  об/мин;  $n_5 = 640$  об/мин;  $n_6 = 940$  об/мин.

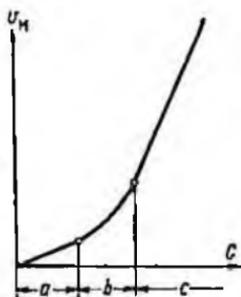


Рис. 27. Зависимость механической скорости бурения от нагрузки.

На рис. 27 приведен график типичной зависимости мгновенной механической скорости бурения от нагрузки на долото, взятый из работы Л. А. Шрейнера и др. [192]. Л. А. Шрейнером на графике выделяются три области разрушения горной породы: а) область поверхностного истирания; б) область усталостного разрушения; в) область объемного разрушения.

Изучение закономерностей разрушения горных пород по схеме вращающегося диска было проведено на образцах известняка (табл. 20), ангидрита (табл. 21), доломита (табл. 22) при промывке водой<sup>1</sup>. На рис. 28 результаты представлены графически. Сопоставляя графики на рис. 28 с графиками на рис. 26 и 27, можно видеть их полную аналогию.

<sup>1</sup> Результаты изложенных здесь исследований были получены при промывке водой. Влияние других сред рассматривается далее.

Таблица 20

Нагрузка на кольцо, кгс/мм	Частота взаимодействия, Гц	Скорость разрушения горной породы $\delta \cdot 10^3$ , мм/с	Скорость изнашивания стали $a \cdot 10^2$ , мм/ч	Удельная мощность $N_{уд}$ , Вт/мм <sup>2</sup>
8	4,87	0,014	0,27	0,11
11	4,87	0,06	0,74	0,28
22	4,87	0,60	3,60	0,75
36	4,87	0,98	4,60	0,93
72	4,87	2,21	7,10	1,50
127	4,87	12,40	11,50	2,00
4	14,9	0,02	0,34	0,12
7	14,9	0,04	0,67	0,31
8	14,9	0,20	1,75	0,63
13	14,9	0,49	5,30	1,10
25	14,9	0,95	7,50	1,50
36	14,9	2,64	18,30	2,20
65	14,9	8,49	31,80	3,00
86	14,9	16,00	43,00	3,80
120	14,9	55,00	65,40	4,80
26	30,4	4,68	37,40	2,80
54	30,4	11,80	93,60	4,30
126	30,4	71,00	283,00	8,10

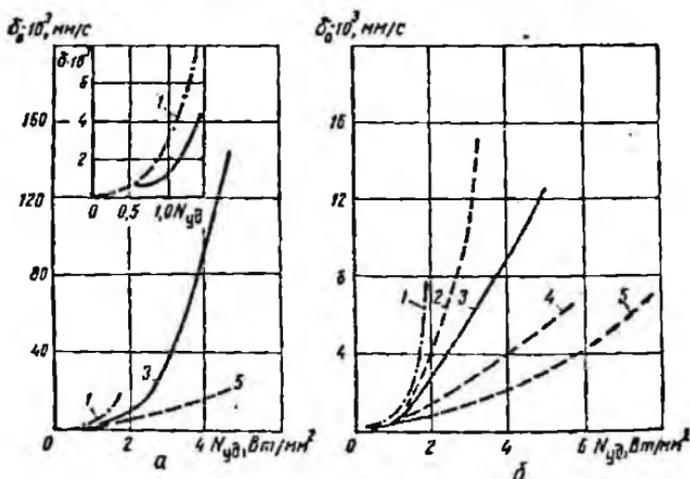


Рис. 28. Зависимость скорости разрушения горных пород от напряженности работы при различных частотах взаимодействия.

Частота взаимодействия, Гц: 1 — 4,87; 2 — 9,90; 3 — 14,9; 4 — 20,0; 5 — 30,4. а — агидрит; б — доломит.

Таблица 21

Нагрузка на кольцо, кгс/мм	Частота взаимодействия, Гц	Скорость разрушения горной породы $\delta \cdot 10^3$ , мм/с	Скорость изнашивания стали $\alpha \cdot 10^2$ , мм/ч	Удельная мощность $N_{уд}$ , Вт/мм <sup>2</sup>
10	4,87	0,06	0,17	0,07
18	4,87	0,16	0,21	0,16
30	4,87	0,28	0,33	0,29
54	4,87	1,0	0,49	0,75
91	4,87	10,5	2,96	1,50
10	14,9	0,09	0,33	0,21
12	14,9	0,25	0,30	0,34
21	14,9	0,59	0,56	0,68
33	14,9	1,29	0,80	1,00
41	14,9	6,77	2,46	1,60
67	14,9	16,1	6,38	2,40
117	14,9	84,0	22,90	3,90
135	14,9	130,0	—	4,50
20	30,4	2,21	1,90	1,20
41	30,4	8,22	6,60	2,40
66	30,4	—	17,60	3,70
72	30,4	19,7	—	4,40

При малой напряженности работы скорость разрушения горной породы прямо пропорциональна мощности трения и практически не зависит от частоты взаимодействия. При некотором значении удельной мощности прямая пропорциональная зависимость нарушается и скорость разрушения начинает быстро возрастать. Причем, интенсивность роста тем выше, чем меньше частота взаимодействия.

Рассмотрим изменение характера разрушения горных пород на примере ангидрита. В области изменения удельной мощности, где соблюдается прямая пропорциональная зависимость, наблюдается поверхностное истирание горной породы (рис. 29, а). При нарушении этой зависимости скорости разрушения горной породы с ростом напряженности работы на дне дорожки износа на горной породе появляются, а в дальнейшем интенсивно развиваются поверхностные трещины (рис. 29, б). Глубина их

Таблица 22

Нагрузка на кольцо, кгс/мм	Частота взаимодействия, Гц	Скорость разрушения горной породы $\delta_s \cdot 10^3$ , мм/с	Скорость изнашивания стали $a \cdot 10^3$ , мм/ч	Удельная мощность $N_{уд}$ , Вт/мм <sup>2</sup>
20	4,87	0,04	0,21	0,16
40	4,87	0,36	2,62	0,78
64	4,87	1,14	6,10	1,30
105	4,87	7,26	14,70	1,90
34	9,9	1,30	8,8	1,30
69	9,9	6,64	39,2	2,50
105	9,9	13,6	104,0	3,20
7	14,9	0,06	0,45	0,33
10	14,9	0,10	0,66	0,48
11	14,9	0,13	0,81	0,57
20	14,9	0,49	3,88	1,00
24	14,9	1,05	9,30	1,30
50	14,9	4,18	67,40	2,40
83	14,9	7,64	243,0	3,60
114	14,9	11,1	413,0	4,70
41	20	1,72	57,70	2,30
74	20	3,81	186,0	3,80
125	20	6,03	588,0	5,40
28	30,4	1,10	19,80	2,30
50	30,4	1,92	91,00	3,80
82	30,4	3,57	308,0	5,50
130	30,4	6,80	757,0	7,50

проникновения растет с ростом напряженности работы, что хорошо согласуется с теорией, рассмотренной ранее. По-видимому, нижней границе области соответствует предельное состояние в горной породе под кольцом в процессе изнашивания (нагрузка на кольцо при частоте 14,9 Гц составляла около 25 кгс/мм). При достижении предельного состояния в изнашивании горной породы принимает участие значительная по толщине область сдвигообразования. Развитие трещиноватости и сдвигообразований создает область предразрушения в горной породе, аналогичную



Рис. 29. К механизму разрушения горной породы.

области предразрушения при статическом и динамическом вдавливании штампа, с той лишь разницей, что напряжения достигают предельного значения не в глубине, а на поверхности. По аналогии с процессами, наблюдающимися при динамическом вдавливании штампа, момент достижения предельного состояния в горной породе назовем первым скачком разрушения [173]. Рассмотренная область разрушения соответствует области  $b$  на рис. 27.

Область  $b$  (рис. 27) по мере увеличения нагрузки переходит в область  $c$  — область объемного разрушения горной породы. В наших опытах по мере увеличения напряженности работы наблюдалось развитие первого скачка разрушения, и при определенной величине  $N_{уд}$  характер разрушения горной породы качественно изменялся, при этом скорость разрушения горной породы резко возрастала. Вид канавки разрушения на горной породе показан на рис. 29, *в*. Начало этой области разрушения названо нами вторым скачком разрушения горных пород, как и в работах [173, 174]. При дальнейшем увеличении напряженности работы наблюдается развитие второго скачка разрушения (объемное разрушение горной породы). Исследования процессов разрушения горных пород шарошечными долотами [140] свидетельствуют о том, что при бурении могут быть достигнуты скачки разрушения более высоких порядков.

Проведенные исследования показывают, что припаятая схема изнашивания позволяет не только реализовать заданную мощность, но и получить разрушение горной породы, аналогичное по характеру разрушению шарошечными долотами.

Анализ табл. 20 и 21 показывает, что влияние частоты взаимодействия на скорость изнашивания стали велико и противоречиво. Наиболее существенное влияние частоты взаимодействия отмечено при разрушении доломита (табл. 22). Рассмотрим результаты опытов, проведенных с доломитом, более подробно. На рис. 30 приведены зависимости скорости изнашивания стали и разрушения горной породы от частоты взаимодействия при постоянных значениях  $N_{уд}$ .

Из рис. 30 видно, что с ростом частоты взаимодействия скорость изнашивания стали не изменяется лишь в области небольших значений  $N_{уд}$ . При увеличении  $N_{уд} > 1,5 \text{ Вт/мм}^2$  с ростом частоты наблюдается сначала рост

скорости изнашивания стали, а затем ее снижение. При этом экстремальные значения скорости изнашивания стали соответствуют области резкого изменения скорости разрушения горной породы. Это явление доказывает существование определенной взаимосвязи между скоростью абразивного изнашивания и интенсивностью разрушения горных пород.

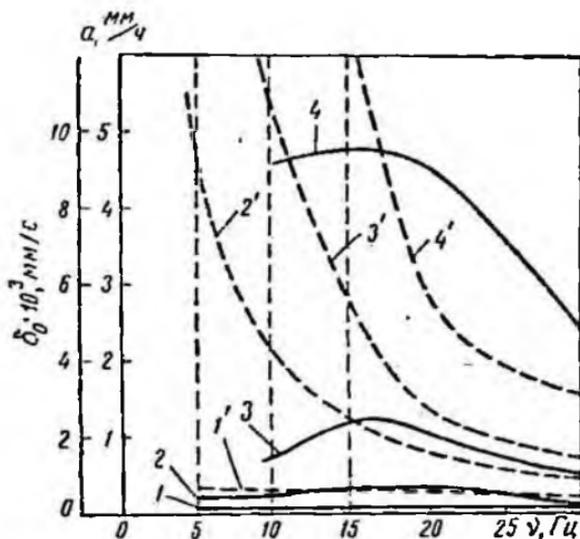


Рис. 30. Влияние частоты взаимодействия на скорость разрушения доломита и изнашивания стали.

1—4 — зависимость  $a$  от  $v$ ; 1'—4' — зависимость  $\delta_0$  от  $v$ .  
 $N_{уд}$ , Вт/см<sup>2</sup>: 1,1' — 1,0; 2,2' — 2,0; 3,3' — 3,0; 4,4' — 5,0.

С началом развития первого скачка разрушения горных пород резко увеличивается их шероховатость в области контакта с металлом, а следовательно, увеличивается концентрация энергии в точках фактического контакта. В конечном счете это должно приводить к увеличению скорости изнашивания стали. Однако увеличение глубины области сдвигообразования в горной породе приводит к тому, что все большая часть энергии реализуется не на контакте с металлом, а внутри горной породы на поверхностях сдвигообразования. Этот процесс должен приводить к снижению темпа роста скорости изнашивания,

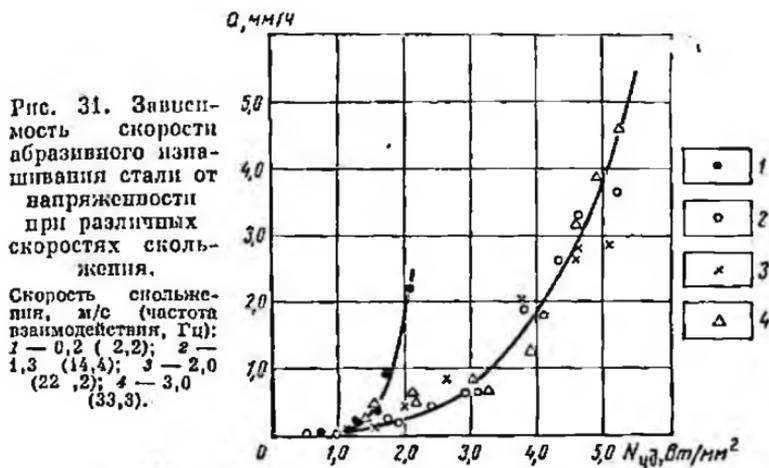
а в некоторых случаях и к снижению величины скорости изнашивания. Например, из рис. 30 видно, что при  $N_{уд} = \text{const}$  по мере перехода от поверхностного разрушения доломита к объемному скорость изнашивания стали возрастает, а в дальнейшем с развитием объемного разрушения горной породы снижается. Отсюда видно, что с точки зрения долговечности породоразрушающего инструмента далеко не безразлично, в какой степени режим разрушения горной породы соответствует условиям ее наиболее эффективного разрушения.

### Влияние режима реализации мощности на скорость абразивного изнашивания стали при разрушении горных пород

Опыты, проведенные применительно к условиям высокооборотного способа бурения, показали, что изменение частоты взаимодействия поверхности металла с горной породой в большинстве случаев несущественно влияет на скорость абразивного изнашивания стали, однако в отдельных случаях это влияние было значительным и весьма противоречивым [133].

В связи с этим были поставлены специальные опыты по изучению влияния скорости скольжения и частоты взаимодействия на скорость абразивного изнашивания стали от удельной мощности. Максимальные скорости проскальзывания рабочих поверхностей зубьев шарошечных долот, наиболее широко используемых в бурении (диаметрами 190 и 214 мм) в условиях высокооборотного бурения достигают 2,0—2,5 м/с, а при низкооборотном — 0,3—0,4 м/с. Частота взаимодействия при этом изменяется соответственно в пределах 10—25 Гц — для высокооборотного и 1,5—4,5 Гц — для низкооборотного режима работы.

На рис. 31 показаны зависимости скорости абразивного изнашивания стали от  $N_{уд}$  при различных скоростях скольжения. Изменение скорости скольжения достигалось изменением частоты взаимодействия. Из рис. 31 видно, что изменение скорости скольжения и частоты взаимодействия в пределах одного режима разрушения не оказывает существенного влияния на скорость абразивного изнашивания стали. Поэтому в дальнейших исследованиях при высокооборотном режиме скорость скольжения и



частота взаимодействия были приняты соответственно равными 1,3 м/с и 14,4 Гц, а при низкооборотном режиме — 0,2 м/с и 2,2 Гц. Опыты проводились на известняках, доломите и песчанике, отличающихся друг от друга по твердости и абразивности.

Нагрузка на образец металла изменялась в диапазоне от 20 до 600 кгс на 1 мм ширины образца стали. Верхний предел нагрузки ограничивается прочностью образцов горной породы.

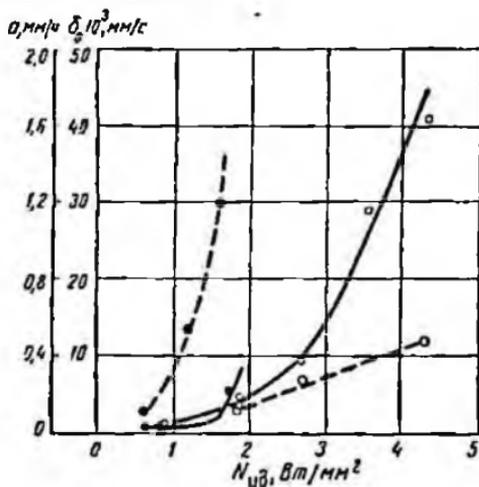


Рис. 33. Зависимость скорости абразивного изнашивания стали и скорости разрушения известняка от напряженности работы.

Обозначения те же, что на рис. 32.

На рис. 32 приведены зависимости скорости абразивного изнашивания стали и скорости разрушения от напряженности работы, полученные при разрушении известняка с твердостью по штампу 140 кгс/мм<sup>2</sup>. Из рис. 32 видно, что по мере увеличения напряженности работы скорость изнашивания стали при высокооборотном режиме растет быстрее, чем при низкооборотном. Особенно велико влияние изменения частоты взаимодействия и скорости скольжения на скорость разрушения известняка. Из рис. 32 видно, что скорость разрушения известняка при низкооборотном режиме выше в несколько раз, чем при высокооборотном. Аналогичные зависимости скорости изнашивания стали и скорости разрушения породы были получены на других образцах карбонатных пород, отличающихся небольшой твердостью.

На рис. 33 приведены зависимости скорости абразивного изнашивания и скорости разрушения известняка

с твердостью по штампу  $370 \text{ кгс/мм}^2$ , характерные для карбонатных пород повышенной твердости. Из рис. 33 видно, что при небольшой напряженности изменение режима работы не оказывает существенного влияния на скорость изнашивания стали. Однако при  $N_{уд} > 1,5 \text{ Вт/мм}^2$  наблюдается резкий рост скорости изнашивания стали при низкооборотном режиме работы. При увеличении  $N_{уд} > 3 \text{ Вт/мм}^2$  и при высокооборотном режиме работы наблюдается резкий рост скорости изнашивания стали.

Исследование микроструктуры на шлифах образцов металлов показывает, что при этом наблюдается интенсивное течение металла, прилегающего к рабочей поверхности, в направлении сил трения.

Течение металла обусловлено термическим разупрочнением вследствие действия тепла трения и касательных напряжений, обусловленных силами трения и блокировкой поверхности стали внедрившимися зернами горной породы [133]. Это явление аналогично потере формоустойчивости режущего инструмента [108] и может быть названо потерей устойчивости рабочей поверхности стали.

При разрушении песчанников скорость изнашивания значительно выше, чем при разрушении карбонатных пород в результате интенсивного царапания поверхности стали твердыми зернами кварца. При высокой напряженности работы интенсивно образуется стружка металла, т. е. происходит резание металла.

При разрушении песчанников небольшой твердости —  $100 \text{ кгс/мм}^2$  (рис. 34) — скорость изнашивания стали при низкооборотном режиме работы намного меньше, чем при высокооборотном; скорость разрушения песчанника при низкооборотном режиме значительно выше, чем при высокооборотном (рис. 34), т. е. наблюдается качественно то же явление, что и при разрушении карбонатных пород небольшой твердости.

При разрушении очень твердого песчанника (рис. 35) с твердостью по штампу  $450 \text{ кгс/мм}^2$  получены зависимости скорости изнашивания стали от напряженности работы, качественно аналогичные показанным на рис. 33. При небольшой напряженности работы скорость изнашивания стали мало зависит от режима реализации мощности. Однако при  $N_{уд} > 1,0 \text{ Вт/мм}^2$  наблюдается резкий рост скорости изнашивания стали при низкооборотном режиме

работы. При этом наблюдалось интенсивное намазывание металла на поверхности разрушаемого песчаника. Ско-

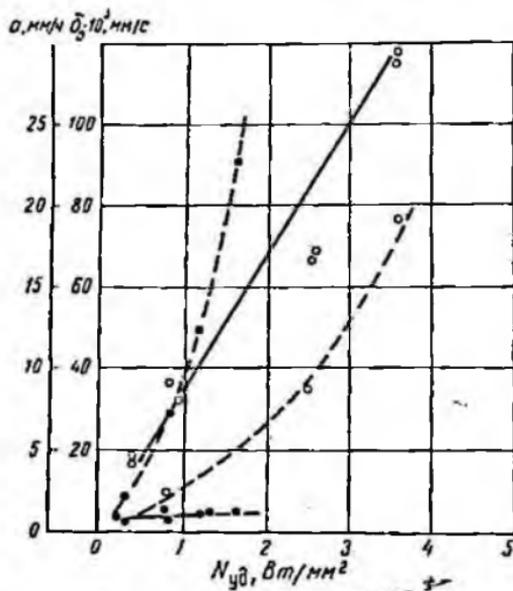
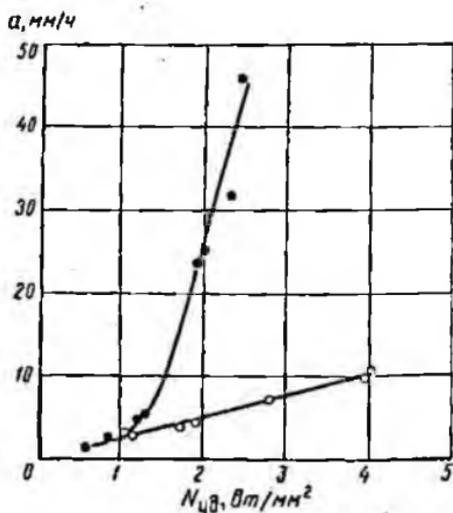


Рис. 34. Зависимость скорости абразивного изнашивания стали и скорости разрушения песчаника от напряженности работы. Обозначения те же, что на рис. 32.

Рис. 33. Зависимость скорости абразивного изнашивания стали от напряженности работы. Обозначения те же, что на рис. 32.



рость разрушения этого песчаника как при высокооборотном, так и при низкооборотном режимах незначительна.

Таким образом, при разрушении горных пород небольшой твердости с уменьшением частоты взаимодействия

и скорости скольжения наблюдается уменьшение скорости изнашивания стали и увеличение скорости разрушения горной породы. Рост скорости разрушения горной породы более значительный, чем снижение скорости изнашивания стали.

Объем металла, подверженный пластическим деформациям и износу (деформациям с отделением частиц), и объем горной породы, подверженный разрушению и процессам сдвигообразования, в данный момент времени составляют область реализации энергии.

Повышение скорости разрушения горной породы вызывает увеличение области реализации энергии в горной породе, а это должно сопровождаться уменьшением области реализации энергии в металле, что и приводит к уменьшению скорости изнашивания металла. Следовательно, с изменением режима реализации мощности изменяется соотношение величин мощности, реализуемой на разрушение горной породы, и мощности, затрачиваемой на деформирование и износ металла.

При разрушении горных пород повышенной твердости в определенной области реализации мощности влияние режима реализации несущественно. Однако при увеличении удельной мощности выше определенной величины наблюдается интенсивный рост изнашивания стали, связанный с потерей устойчивости рабочей поверхности металла. Изменение соотношения скорости изнашивания стали и скорости разрушения горной породы может оказаться неблагоприятным и вызвать уменьшение производительности инструмента. Изучение износа вооружения шарошечных долот показало, что явление потери устойчивости рабочей поверхности широко распространено при высокооборотном режиме бурения [6].

При низкооборотном режиме работы потеря устойчивости рабочей поверхности стали наступает при напряженности работы, в 2—3 раза меньшей, чем при высокооборотном. Нагрузка на образец металла при реализации постоянной удельной мощности при низкооборотном режиме в 7—10 раз выше, чем при высокооборотном. Следовательно, потеря устойчивости при низкооборотном режиме наступает при нагрузках, в несколько раз больших, чем при высокооборотном.

Полученные результаты подтверждают мнение о необходимости дифференцированного подхода к выбору

материалов для изготовления долот, разрушающих горные породы различной твердости и абразивности, и о необходимости строгого обоснования режима работы породоразрушающего инструмента. При использовании данных об абразивности горных пород следует учитывать режим реализации мощности, при котором эти данные были получены. В дальнейшем абразивное изнашивание стали и абразивность горных пород при их разрушении применительно к работе долот изучались нами с учетом режима реализации мощности — низкооборотного и высокооборотного.

### Влияние минералогического и петрографического составов горных пород на абразивное изнашивание стали и твердого сплава

Выше отмечалось, что с увеличением микротвердости породообразующих минералов абразивность горных пород увеличивается. Однако такие результаты были получены при очень малой напряженности работы. Характер изменения влияния микротвердости породообразующих минералов при увеличении напряженности работы изучали на образцах мономинеральных горных пород примерно одинаковой структуры и твердости по штампу. Изнашиванию подвергались образцы из стали У8А при частоте взаимодействия 14,9 Гц. Результаты опытов приведены в табл. 23, из которой видно, что характер и скорость разрушения горных пород были примерно одинаковы, что исключало влияние скорости разрушения горных пород на изнашивание стали.

На основании табл. 23 составлена табл. 24.

Из табл. 24 видно, что при небольших значениях  $N_{уд}$  скорость изнашивания закаленной стали мало зависит от микротвердости породообразующих минералов. С повышением же  $N_{уд} > 0,5$  Вт/мм<sup>2</sup> темп роста скорости изнашивания стали и влияние микротвердости породообразующих минералов увеличиваются. Чем больше микротвердость породообразующих минералов, тем выше темп роста скорости изнашивания стали, т. е. тем выше абразивность горной породы по отношению к закаленной стали.

Рассмотрим общие закономерности абразивности основных групп осадочных горных пород, слагающих нефтяные и газовые месторождения.

Таблица 23

Нагрузка на кольцо, кгс/мм	Скорость разрушения горной породы $\delta_0 \cdot 10^2$ , мм/с	Скорость изнашивания стали $\alpha \cdot 10^2$ , мм/ч	Удельная мощность $N_{уд}$ , Вт/мм <sup>2</sup>
<b>Известняк</b>			
6	0,08	0,41	0,45
10	0,74	1,40	0,92
20	4,07	2,60	1,60
31	13,9	3,30	2,40
<b>Ангидрит</b>			
10	0,09	0,32	0,21
20	0,20	0,44	0,30
30	0,44	0,49	0,55
40	3,70	3,30	1,60
60	7,66	6,00	2,30
<b>Доломит</b>			
6	0,15	0,49	0,49
10	0,73	2,30	0,63
20	1,39	3,20	1,10
30	4,71	5,40	1,70
46	6,56	8,20	2,20
<b>Песчанник</b>			
2	0,02	0,57	0,22
4	0,04	1,90	0,48
6	0,10	18,60	0,52
10	0,92	41,0	0,85
25	—	1015,0	1,50

Карбонатные и сульфатные породы. Исследовали известняки, доломит и ангидриты разных месторождений; залегающие на разных глубинах. На рис. 36 приведены табличные зависимости скорости абразивного изнашивания стали 20ХНЗА от напряженности работы для известняков при высокооборотном (а) и низкооборотном (б) режимах реализации мощности. Из рис. 36 видно, что

Таблица 24

Горная порода	Твердость по штампу, кгс/мм <sup>2</sup>	Микротвердость породообразующих минералов, кгс/мм <sup>2</sup>	Скорость изнашивания стали $a \cdot 10^3$ (мм/ч) при $N_{уд}$ Вт/мм <sup>2</sup>			
			0,25	0,50	1,50	2,50
Известняк . . . . .	150	110 *	0,32	0,44	2,10	3,80
Ангидрит . . . . .	150	200	0,34	0,46	2,90	6,90
Доломит . . . . .	160	350	0,36	0,51	5,10	10,60
Песчаник . . . . .	140	1100 **	0,60	2,10	1015,0	—

\* Микротвердость кальцита.

\*\* Микротвердость кварца.

во всем исследованном диапазоне напряженности работы абразивная способность известняков растет с увеличением  $N_{уд}$ . Однако темп роста скорости абразивного изнашивания различный для разного режима реализации мощности и разных известняков. При высокооборотном режиме скорость абразивного изнашивания стали на один порядок больше по сравнению с низкооборотным. Выполненный петрографический анализ на микрошлифах показал, что образцы известняков 56, 58, 65 сильно глинистые, загипсованные, а образец 65 трещиноватый; трещины заполнены глинистым материалом и гипсом. В связи с этим интенсивность и величина скорости абразивного изнашивания стали на этих образцах значительно меньше, чем на образцах 5 и 20, представляющих собой более однородные, плотные, без заметных следов примесей, известняки.

Анализ экспериментальных результатов, полученных при изнашивании стали на известняках показал, что эмпирическая зависимость скорости изнашивания от  $N_{уд}$  имеет вид:

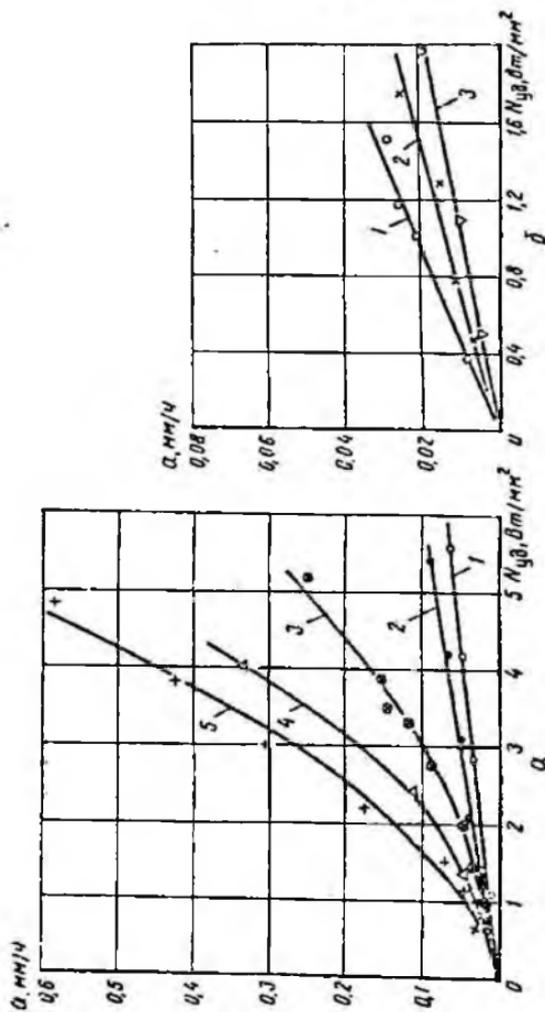
$$a = AN_{уд}^k, \quad (50)$$

где коэффициент  $A$  и показатель степени  $k$  характеризуют абразивную способность породы.

Для неоднородных известняков при высокооборотном и низкооборотном режимах реализации мощности  $k = 1$ , а для однородных известняков при высокооборотном режиме  $k \neq 1$ .

Рис. 36. Зависимость скорости абразивного изнашивания стали от напряженности работы при разгрузке извне ступиков.

$a$  — высотоборотный режик; кривые 1, 2, 3, 4, 5 соответствуют образцам известников — 58, 58, 65, 20; 5; 6 — низоборотный режик; кривые 1, 2, 3 соответствуют образцам известников — 58, 58, 65, 00.



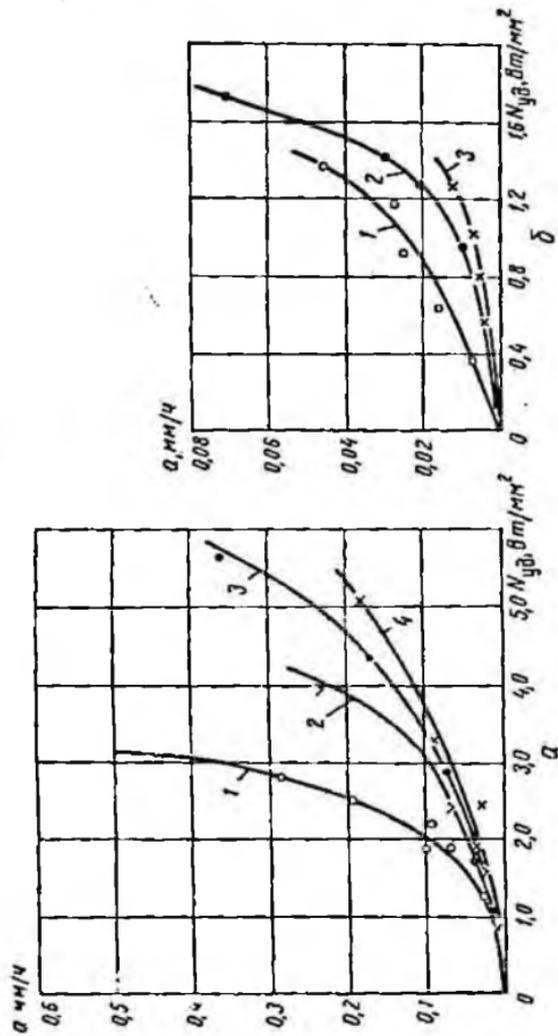


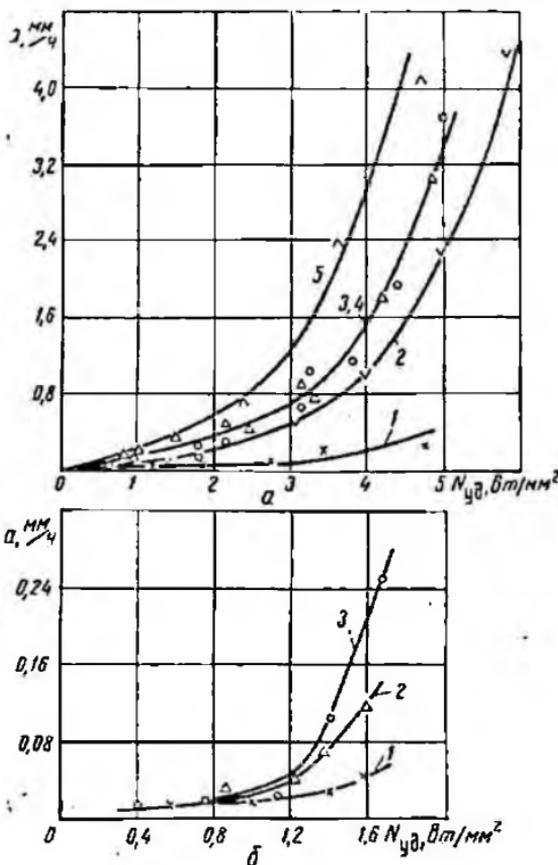
Рис. 37. Зависимость скорости абразивного изнашивания стали от напряженности работы при разрушении ангидритов.

а — высокооборотный режим: кривые 1, 2, 3, 4 соответствуют образцам ангидритов — 62, 7, 59, 63; б — низкооборотный режим: кривые 1, 2, 3 соответствуют образцам ангидритов — 62, 59, 63.

На рис. 37 и 38 показаны типичные зависимости скорости абразивного изнашивания стали 20ХНЗА от  $N_{уд}$  соответственно для ангидритов и доломитов. Из этих рисунков видно, что так же, как и для известняков (см. рис. 36), абразивная способность ангидритов и доломитов

Рис. 38. Зависимость скорости абразивного изнашивания стали от напряженности работы при разрушении доломитов.

$\alpha$  — высокооборотный режим: кривые 1, 2, 3, 4, 5 соответствуют образцам доломитов — 55, 61, 66, 57, 9;  $\beta$  — низкооборотный режим: кривые 1, 2, 3 соответствуют образцам доломитов — 55, 57, 66.



растет с увеличением  $N_{уд}$ . Наблюдаемое различие в абразивной способности одноименных пород связано с различием их прочности и строения.

В рассматриваемой группе пород наибольшей абразивностью обладают доломиты; они примерно в 10 раз абразивнее известняков и ангидритов, а абразивная способность двух последних при прочих равных условиях примерно одинакова.

Эмпирическая зависимость скорости абразивного изнашивания стали от  $N_{уд}$  на ангидритах и доломитах как для высокооборотного, так и для низкооборотного режимов реализации мощности аналогична зависимости (50).

Исследование абразивности пород рассматриваемой группы по отношению к твердому сплаву ВК15 показало (рис. 39), что зависимости  $a = f(N_{уд})$  также же простые, как и для стали, но величина скорости изнашивания твердого сплава во много раз меньше. Характер эмпирической

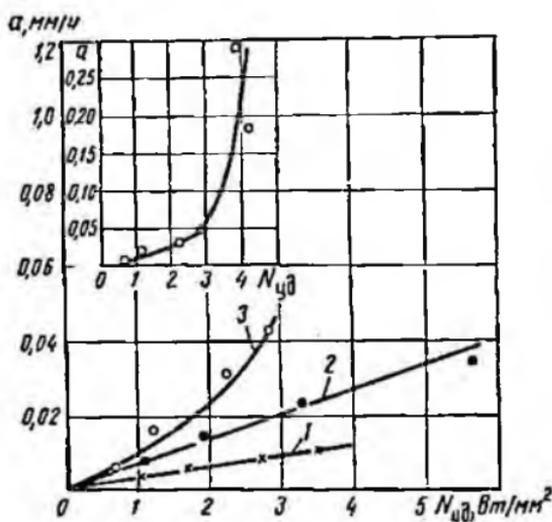


Рис. 39. Зависимость скорости абразивного изнашивания твердого сплава от напряженности работы при разрушении доломита, известняка и ангидрита.

1 — образцы ангидрита 62; 2 — образцы известняка 58; 3 — образцы доломита 57;

зависимости  $a = f(N_{уд})$  аналогична зависимости (50), причем для доломитов, так же как и для стали, сохраняется степенная зависимость, а для известняков и ангидритов  $k = 1$ .

Терригенные породы. Нами исследована абразивность большой группы терригенных пород (песчаники, алевролиты, аргиллиты, мергели, сланцы) разного состава и строения.

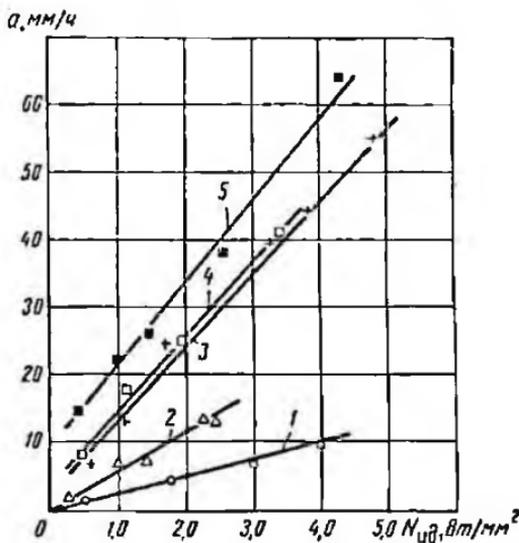
Песчаники — наиболее абразивные породы в разрезах скважин, что в значительной степени определяет трудность их разбуривания.

Выше отмечалось, что при малой напряженности работы ( $< 0,5$  Вт/мм²) скорость изнашивания стали на кварце и на очень твердых песчаниках увеличивается прямо пропорционально  $N_{уд}$ . По мере уменьшения твер-

дости песчанков по штампу и с ростом напряженности работы прямая пропорциональная зависимость между скоростью изнашивания стали и  $N_{уд}$  нарушается (см. рис. 15).

На рис. 40 приведены типичные зависимости скорости изнашивания стали на кварцевых песчанках при напряженности работы  $> 0,5$  Вт/мм<sup>2</sup>. Из рис. 40 видно, что наименьшая скорость абразивного изнашивания стали

Рис. 40. Зависимость скорости изнашивания стали 20ХНЗА от напряженности работы при разрушении кварцевых песчанков.  
Кривые 1, 2, 3, 4, 5 соответствуют образцам песчанков — 14, 104, 92, 103, 109.



наблюдается на песчанке 14 ( $p_{ш} = 450$  кгс/мм<sup>2</sup>), а наибольшая — на песчанке 109 (предел текучести по штампу 51 кгс/мм<sup>2</sup>). Таким образом, и при большой напряженности работы сохраняется тенденция к увеличению абразивной способности песчанков с уменьшением их твердости по штампу.

В общем виде эмпирическая зависимость скорости изнашивания стали от  $N_{уд}$  на кварцевых песчанках имеет вид:

$$a = AN_{уд} + B, \quad (51)$$

где  $A$  и  $B$  — коэффициенты, характеризующие абразивную способность пород.

Как показали исследования, зависимость (51) является типичной практически для всех терригенных пород как

при высокооборотном, так и при низкооборотном режимах реализации мощности. Для некоторых пород этой группы коэффициент  $B = 0$ .

Величины скорости изнашивания стали  $a$  с увеличением напряженности работы  $N_{уд}$  для разных пород этой группы зависят от многих факторов, характеризующих их состав и строение.

В табл. 25 приведены данные об абразивности некоторых терригенных пород северо-восточной части Прикаспийской впадины, полученные при высокооборотном режиме реализации мощности. Скорость изнашивания стали  $a$  соответствует постоянной мощности  $N_{уд}$ , равной  $2,5 \text{ Вт/мм}^2$ .

Таблица 25

Порода	№ образца	Твердость по штампу, кгс/мм <sup>2</sup>	Содержание обломков полевых шпатов, кварца и других минералов в породе, %	Преимущественный размер обломков, мм	Скорость изнашивания стали $a$ , мм/ч
		Предел текучести, кгс/мм <sup>2</sup>			
Песчаники полимиктовые	92	88/73	80	0,3 ÷ 0,5	30,0
	72	90/80	35	0,03 ÷ 0,5	20,0
Алевриты полимиктовые	70	93/78	70	0,02 ÷ 0,2	5,5
	68	90/60	50	0,03 ÷ 0,1	3,5
Аргиллит	75	97/84	20	0,03 ÷ 0,08	2,6
Мергель	76	60/30	15	0,02 ÷ 0,05	2,4

Из табл. 25 видно, что при практически одинаковых прочностных характеристиках этих пород скорость изнашивания стали зависит от содержания в породе обломков кварца и полевых шпатов, а также от их размеров: чем больше обломочного материала в породе и чем больше размер обломков, тем выше абразивная способность данной породы.

В геологических разрезах нефтяных и газовых месторождений значительное место занимают такие неоднородные по минералогическому составу и строению породы, как кремнистые известняки и доломиты, известняки глинистые, песчаные, сланцы глинистые, углистые и некоторые другие.

На рис. 41 показаны зависимости скорости абразивного изнашивания стали от  $N_{уд}$  для четырех известняков, содержащих примеси кремния и кварца, и для глинистого сланца.

Из рис. 41 видно, что абразивность известняков, содержащих примеси кремния и кварца до 20—25% от объема породы, соизмерима с абразивностью алевролитов. Кроме того, абразивность таких пород также связана с размером обломков кварца. Например, известняк 99 содержит

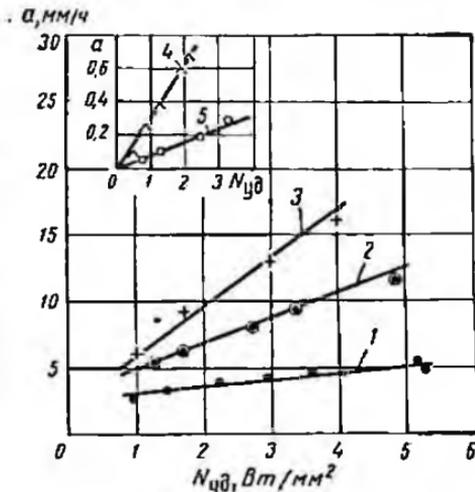


Рис. 41. Зависимость скорости изнашивания стали от напряженности работы при разрушении известняков и сланца.

1 — образец известняка песчано-алевритового 100; 2 — образец известняка песчанистого 99; 3 — образец известняка окремнистого 23; 4 — образец известняка алевритистого 09; 5 — образец сланца глинистого, углистого 21.

обломки кварца размером до 0,3 мм, а известняк 100 — до 0,2 мм с преобладанием алевролитовой (до 0,06 мм) размерности. Несмотря на практически одинаковую твердость этих образцов пород абразивность известняка 100 много меньше абразивности известняка 99.

На рис. 42 приведены зависимости скорости изнашивания твердого сплава ВК15 от  $N_{уд}$  при разрушении песчаников. Из рис. 42 видно, что абразивность песчаников по отношению к твердому сплаву примерно на два порядка ниже, чем по отношению к стали (см. рис. 40). Кроме того, абразивная способность песчаников по отношению к твердому сплаву располагается в соответствии с твердостью породы. Чем тверже песчаник, тем больше его абразивность, а по отношению к стали наблюдается обратное явление. Это связано с тем, что образец твердого сплава в исследуемом диапазоне изменения напряженности

работы активно разрушает породу любой твердости, тогда как при разрушении пород стальным инструментом (по мере увеличения твердости породы) снижается скорость ее разрушения и изменяется характер разрушения, приближаясь (по мере увеличения твердости породы) к поверхностному истиранию.

На образцах пород большой твердости по мере увеличения напряженности работы наблюдается намазывание металла на образец породы. Эти явления хорошо подтверждаются результатами исследования абразивности

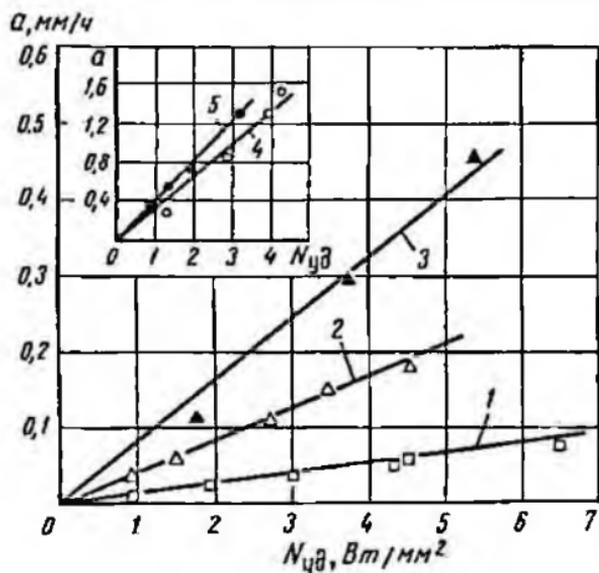
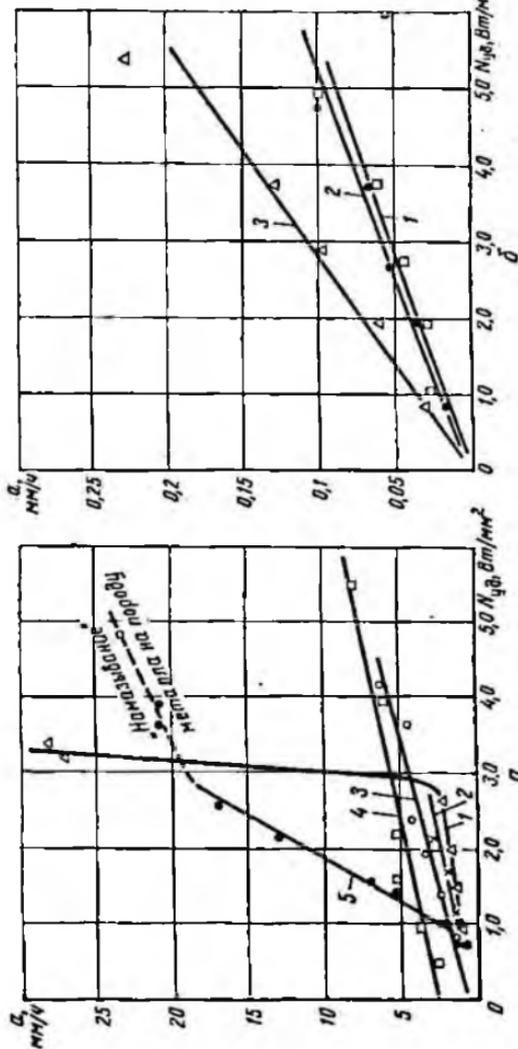


Рис. 42. Зависимость скорости изнашивания твердого сплава от напряженности работы при разрушении кварцевых и полумиктового песчаников. 1 — образец полумиктового песчаника; 2, 3, 4, 5 соответствуют образцам кварцевых песчаников — 04, 34, 14, 27.

некоторых изверженных пород, полученными автором по отношению к стали и твердому сплаву (рис. 43). Абразивность при разрушении изверженных пород небольшой твердости, таких как туф, фельзит и отчасти габбро по отношению к стали аналогична как по характеру зависимости, так и по величине скорости изнашивания кварцсодержащим терригенным породам (см. рис. 40, 41). При разрушении изверженных пород большой твердости зависимость  $a = f(N_{уд})$  резко отличается от предыдущей. Скорость изнашивания стали при напряженности работы до  $3 \text{ Вт/мм}^2$  при разрушении базальта растет пропорционально увеличению  $N_{уд}$ , а при разрушении гранита скорость изнашивания стали, хотя и увеличивается с увеличением  $N_{уд}$ , но остается меньше, чем на других испытанных изверженных породах.

Рис. 43. Зависимость скорости истирания стали и твердого сплава от напряжения при разрушении изверженных горных пород.

а — сталь; 1 — гранит; 2 — туф; 3 — фельзит; 4 — габбро; 5 — базальт; б — твердый сплав; 1 — габбро; 2 — базальт; 3 — гранит.



При  $N_{уд} > 3$  Вт/мм<sup>2</sup> темп увеличения скорости изнашивания стали при разрушении базальта снижается, так как при этом наблюдается намазывание металла на породу, что приводит к изменению характера разрушения породы и металла. При этом трение металла по породе заменяется трением металла по металлу. При разрушении гранита только при  $N_{уд} > 3,0$  Вт/мм<sup>2</sup> начинается активное разрушение породы, что приводит к резкому увеличению скорости изнашивания стали. Скорость изнашивания твердого сплава ВК15 также увеличивается с увеличением  $N_{уд}$  (рис. 43, б), но характер этой зависимости более простой, чем при разрушении изверженных пород стальным образцом. Причем скорость изнашивания твердого сплава на два порядка меньше, чем скорость изнашивания стали.

Анализ результатов экспериментального исследования абразивности горных пород различного минералогического, петрографического составов и строения показывает, что эмпирическая зависимость скорости изнашивания стали и твердого сплава от напряженности работы может быть представлена в виде

$$a = AN_{уд}^k + B, \quad (52)$$

где коэффициенты  $A$  и  $B$  и показатель степени  $k$  зависят от свойств породы и характеризуют их абразивную способность в процессе разрушения. Величины этих коэффициентов будут рассмотрены ниже. Формула (52) справедлива для напряженности работы  $N_{уд} > 0,5$  Вт/мм<sup>2</sup>.

Таким образом, скорость разрушения горных пород зависит от их твердости и определяется величиной реализуемой мощности и режимом ее реализации. С изменением характера разрушения горной породы связано и изменение скорости изнашивания стали. Решающее влияние на скорость изнашивания стали и твердого сплава оказывают микротвердость породообразующих минералов и строение горных пород. Резкое изменение скорости изнашивания стали с началом объемного разрушения горной породы свидетельствует об изменении процесса в области контакта: трение об абразивный монолит переходит в трение об абразивную прослойку, представляющую собой продукты объемного разрушения горной породы.

## О механизме абразивного изнашивания закаленной стали при разрушении горных пород

Экспериментальное изучение механизма абразивного изнашивания стали при трении о горные породы при циклическом взаимодействии и охлаждении водой проводилось нами и ранее [152, 192]. Однако эти исследования преследовали несколько иную цель и были проведены в узком диапазоне изменения напряженности работы.

Энергетический подход при проведении исследований позволил нам проследить развитие абразивного изнашивания при трении о различные горные породы в сопоставимых условиях. Общий характер изменения зависимости  $a = f(N_{уд})$  при трении о различные горные породы позволяет выделить характерные области изнашивания.

При  $N_{уд} < 0,5$  Вт/мм<sup>2</sup> наблюдается фактически прямая пропорциональная зависимость между скоростью изнашивания стали и удельной мощностью трения. Изучение рабочих поверхностей, микроструктуры и профиллограмм<sup>1</sup>, приведенных на рис. 44, 45, 46, показывает, что при этом наблюдается незначительное пластическое деформирование наиболее выступающих участков поверхности, которое приводит к отслаиванию окисных пленок, обуславливающему износ стали. Шероховатость поверхности снижается по сравнению с исходной.

Структурные особенности карбонатных и сульфатных горных пород в этой области не играют существенной роли, так как происходит взаимная приработка поверхностей, что также снижает вероятность флуктуации энергии в отдельных точках. При трении о песчаник вероятность флуктуации энергии вследствие высокой шероховатости и микротвердости зерен кварца, выступающих на его поверхности, остается весьма высокой. Из рис. 46 видно, что действительно при трении о песчаник наблюдается значительное пластическое деформирование и царапание поверхности стали зернами кварца.

Вид поверхностей стали после работы на карбонатных породах (рис. 44) существенно отличается от вида поверхности после работы на ангидрите (рис. 45). По-видимому,

<sup>1</sup> Профиллограммы снимались с помощью изготовленного нами профиллографа, описанного в работе [132].

на формирование поверхностных пленок определенное влияние оказывает химический состав минералов горных пород. Каких-либо структурных изменений и фазовых

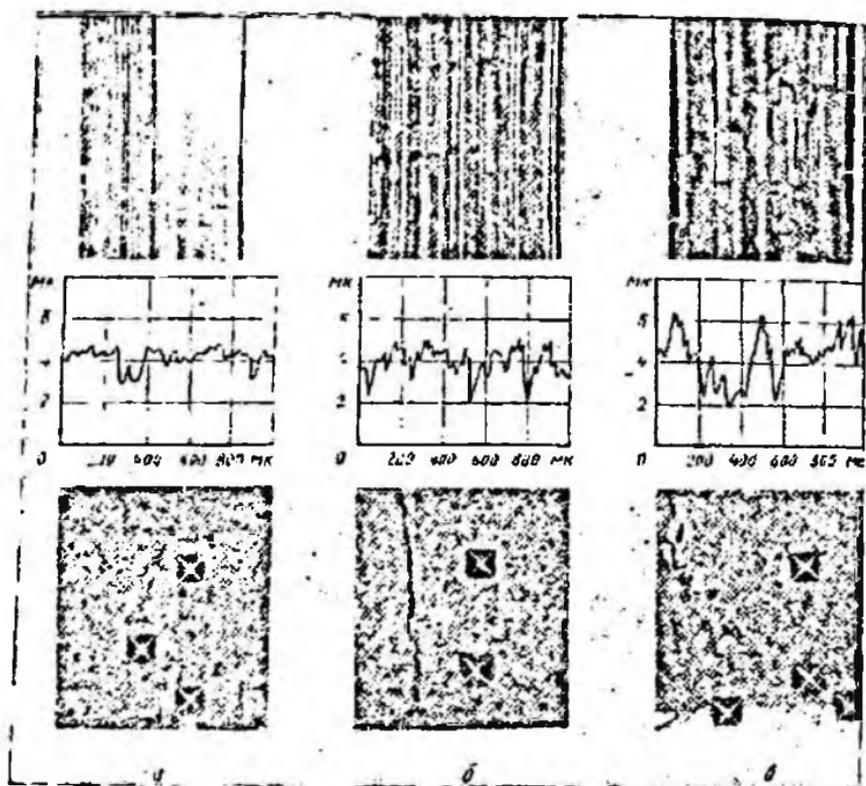


Рис. 44. Вид рабочих поверхностей ( $70\times$ ); профиллограммы и микро-структура ( $450\times$ ) образцов стали 20ХНЗА после работы по дол-зупту.

При  $N_{уд}$ , Вт/мм<sup>2</sup>: а — 0,4; б — 1,5; в — 4,2.

превращений в поверхностных слоях стали не наблю-дается.

При  $N_{уд} \approx 0,5$  Вт/мм<sup>2</sup> микротвердость поверхностных слоев стали резко уменьшается. При трении о карбонат-ные и сульфатные породы на поверхности стали по-

являются отдельные надрывы. Изучение микрошлифов показало, что понижение твердости связано с отпуском поверхностных слоев стали в результате действия тепла трения. Изменение свойств металла в поверхностных слоях

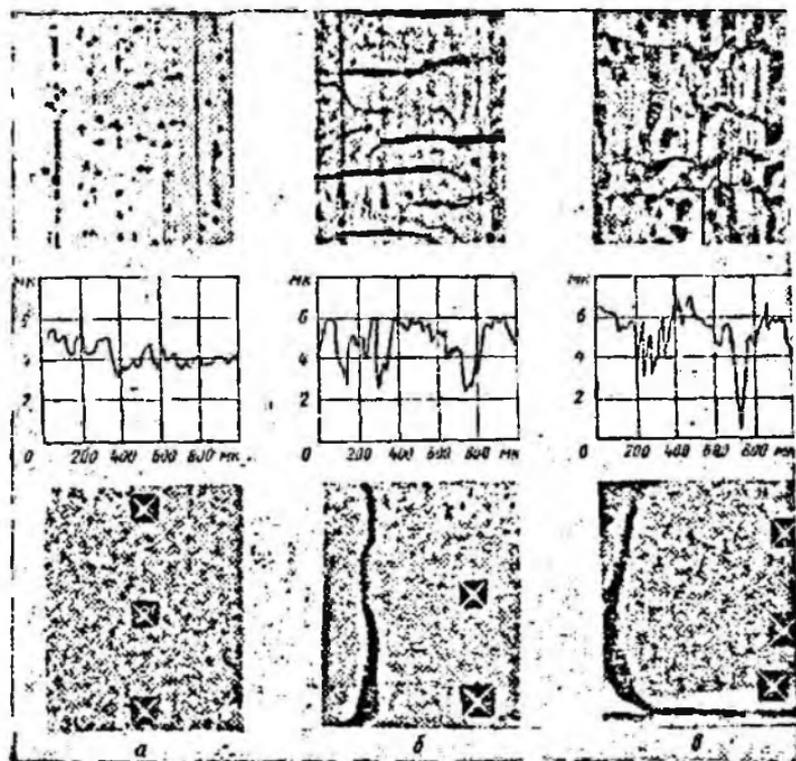


Рис. 45. Вид рабочих поверхностей (70 $\times$ ), профилограммы и микроструктура (450 $\times$ ) образцов стали 20ХН3А после работы по андирпту.

При  $N_{уд}$ , Вт/мм $^2$ : а — 0,3; б — 2,0; в — 4,5.

является основной причиной увеличения темпа прироста скорости изнашивания стали с увеличением напряженности работы.

При трении о песчанку (рис. 46) незначительного термического разупрочнения поверхностных слоев металла оказывается достаточно для массового развития процессов

на формирование поверхностных пленок определенное влияние оказывает химический состав минералов горных пород. Каких-либо структурных изменений и фазовых

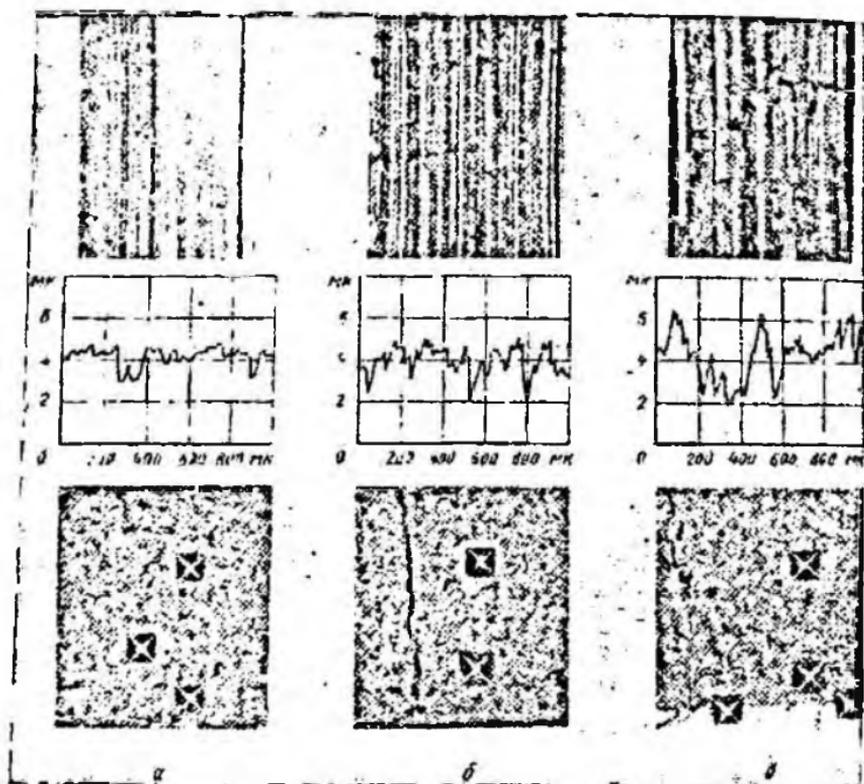


Рис. 44. Вид рабочих поверхностей (70 $\times$ ); профилограммы и микро-структура (450 $\times$ ) образцов стали 20ХН3А после работы по до-зынту.

При  $N_{уд}$ , Вт/мм $^2$ : а — 0,4; б — 1,5; в — 4,2.

превращений в поверхностных слоях стали не наблю-дается.

При  $N_{уд} \approx 0,5$  Вт/мм $^2$  микротвердость поверхностных слоев стали резко уменьшается. При трении о карбонат-ные и сульфатные породы на поверхности стали по-

являются отдельные надрывы. Изучение микрошлифов показало, что повышение твердости связано с отпуском поверхностных слоев стали в результате действия тепла трения. Изменение свойств металла в поверхностных слоях

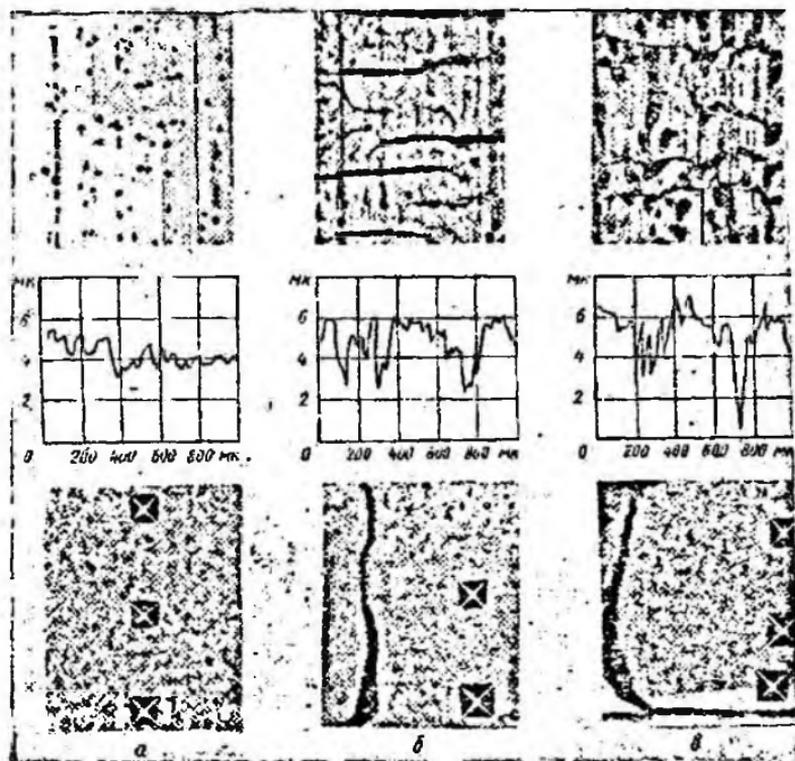


Рис. 45. Вид рабочих поверхностей (70 $\times$ ), профилограммы и микроструктура (450 $\times$ ) образцов стали 20ХН3А после работы по ангидриду.

При  $N_{уд}$ , Вт/мм $^2$ : а — 0,3; б — 2,0; в — 4,5.

является основной причиной увеличения темпа прироста скорости изнашивания стали с увеличением напряженности работы.

При трении о песчанку (рис. 46) незначительного термического разупрочнения поверхностных слоев металла оказывается достаточно для массового развития процессов

пластического передеформирования и царапания поверхности зернами кварца. Концентрация энергии в отдельных точках столь велика, что деформирование сопровождается

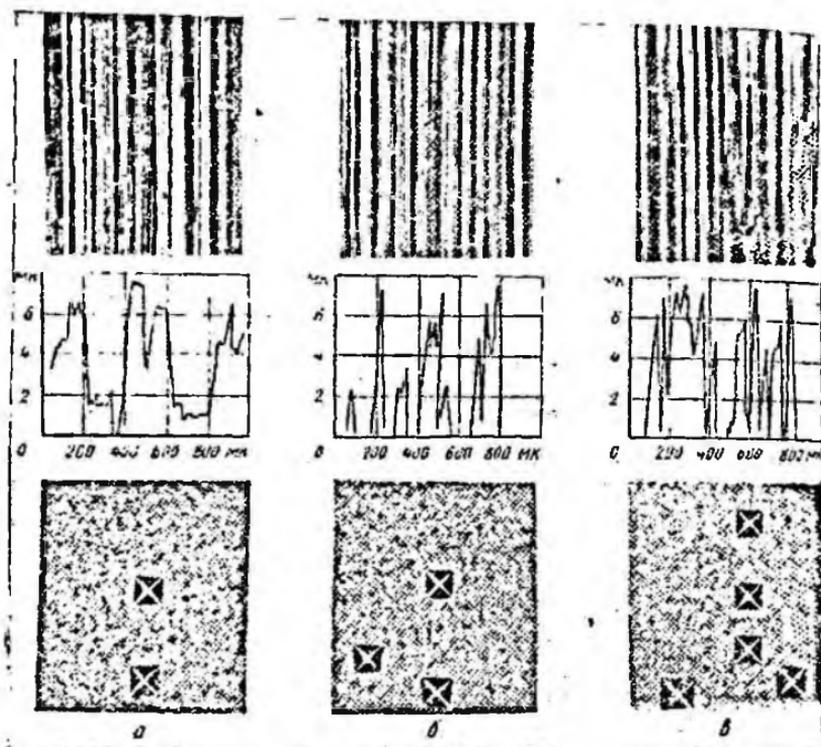


Рис. 46. Вид рабочих поверхностей ( $70\times$ ), профилограммы и микроструктура ( $450\times$ ) образцов стали 20ХН3А после работы по песчаннику.

При  $N_{уд}$ , Вт/мм<sup>2</sup>: а — 0,3; б — 0,5; в — 1,4.

образованием «белой фазы», которая при передеформировании отслаивается в виде тонких блестящих чешуек. При  $N_{уд} > 1,0$  Вт/мм<sup>2</sup> образуется витая стружка.

Существенные качественные и количественные изменения в характере изнашивания стали при трении о карбопатные и сульфатные горные породы связаны с развитием их объемного разрушения. Развитие сдвигообразований

в горной породе увеличивает шероховатость поверхности контакта ее с металлом. Увеличение шероховатости поверхности горной породы и непрерывное повышение степени термического разупрочнения стали с увеличением  $N_{уд}$  создают благоприятные условия для развития пластического деформирования поверхности металла зернами разрушаемой горной породы.

Записи профилограмм (рис. 44, 45) хорошо иллюстрируют этот процесс. Из этих рисунков видно, что по мере увеличения  $N_{уд}$  повышается шероховатость изнашиваемой поверхности стали. Циклическое термическое воздействие и передеформирование поверхностных слоев металла создают благоприятные условия для образования и разрушения поверхностных пленок. Отдельные надрывы поверхности по мере увеличения удельной мощности трения развиваются в сетку поверхностных трещин.

Дальнейшее увеличение напряженности работы ( $N_{уд} > 2,0 \text{ Вт/мм}^2$ ) приводит к столь значительному термическому разупрочнению поверхностных слоев стали, что зерна горных пород, внедряясь в поверхностные слои металла, оказываются способными блокировать отдельные ее участки и вызвать пластический сдвиг поверхности в направлении силы трения, что хорошо видно на рис. 44, 45. О глубине и степени термического разупрочнения поверхностных слоев металла можно косвенно судить по данным замеров микротвердости на микрошлифах. На основании этих замеров построены графики зависимости микротвердости стали  $H$  от глубины замера  $h$  (рис. 47) после работы образца стали при определенной напряженности. Из рис. 47 видно, что по мере увеличения  $N_{уд}$  растет как степень, так и глубина влияния тепла трения на поверхностные слои стали. При  $N_{уд} > 3,0 \text{ Вт/мм}^2$  образуется «белая фаза», с развитием которой и связано увеличение микротвердости поверхностных слоев стали, показанное на рис. 47.

Глубина и интенсивность процесса течения поверхностных слоев стали, кроме того, зависят и от величины и прочности зерен горной породы и степени их закрепления, т. е. от структуры горной породы, ее минералогического состава и характера разрушения. Чем больше размер зерен и чем выше их твердость, тем больше глубина блокирования и выше интенсивность течения поверхности стали. Однако слишком большая шероховатость

поверхности, как например, у песчаника (см. рис. 46), при большой глубине деформирования металла не обеспечивает достаточной для сдвига блокировки поверхности, в результате чего наблюдается не пластическое течение, а пропахивание, царапание и резание поверхности стали зернами горной породы.

Чтобы процесс резания металла шел нормально, необходимо обеспечить выход стружки. Это условие с увеличением  $N_{уд}$  выполняется при объемном разрушении песчаника и нарушается, если достичь объемного разрушения

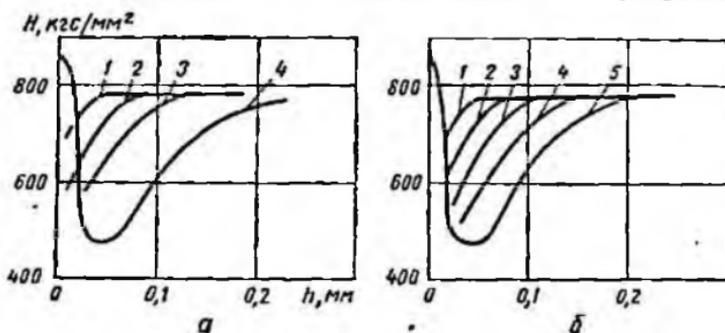


Рис. 47. Распределение микротвердости поверхностных слоев стали 20ХНЗА при различных значениях напряженности.

*a* — при разрушении известняка 5: 1 — 0,6; 2 — 1,1; 3 — 2,1; 4 — 4,6 Вт/мм<sup>2</sup>; *b* — при разрушении доломита 10: 1 — 0,6; 2 — 1,1; 3 — 2,2; 4 — 3,0; 5 — 4,6 Вт/мм<sup>2</sup>.

песчаника не удастся. В этом случае металл намазывается на поверхность песчаника и трение стали по горной породе в значительной степени подменяется трением стали по стали. Это, по нашему мнению, и является основной причиной снижения темпа роста скорости изнашивания стали с увеличением  $N_{уд}$ , которое наблюдалось при трении о песчаник и изверженные породы большой твердости.

Из профиллограмм, приведенных на рис. 48, видно, что и при трении о карбонатные породы, если размер зерен сравнительно большой, может наблюдаться наряду с пластическим течением и пропахивание поверхности. Этот процесс является основной причиной такого большого влияния строения горной породы на ее абразивную способность. «Порог абразивности», по-видимому, связан с прекращением пропахивания и царапания с уменьшением размера зерна.

С развитием пластического передеформирования поверхности стали увеличивается и интенсивность химического взаимодействия поверхностей трения и среды. При трении о карбонатные породы поверхность стали приобретает темный цвет, что связано с образованием темных окалиноподобных пленок (см. рис. 44), а при трении об ангидрит — характерный пятнистый цвет (см. рис. 45)

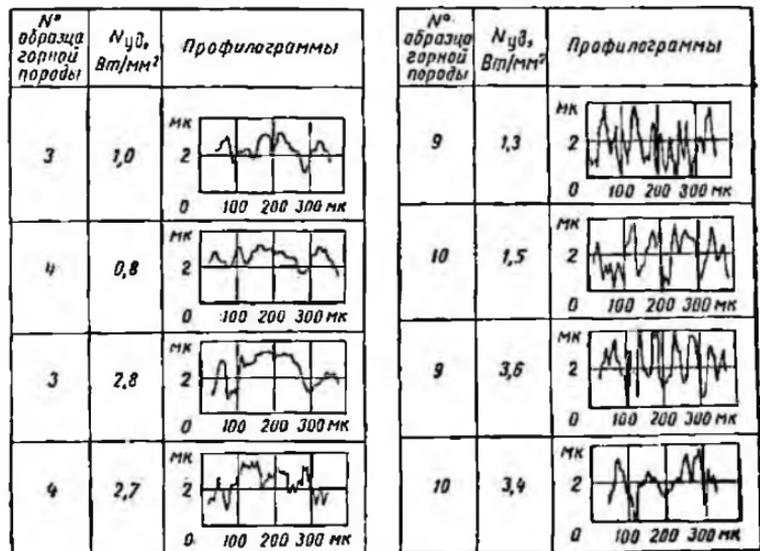


Рис. 48. Влияние структуры горных пород на шероховатость поверхности стали.

Номера образцов: 3 — известняк скрытокристаллический; 4 — известняк равнозернистый (размер зерна 0,04—0,13 мм); 9 — доломит (размер зерна 0,11 мм); 10 — доломит (размер зерна 0,003 мм).

С увеличением удельной мощности свыше 3 Вт/мм<sup>2</sup> на поверхности стали появляются светлые пятна, связанные с развитием «белой фазы». На микрошлифах зубьев шарошечных долот, отработанных при промышленном бурении в различных средах, также образуются «белая фаза» и отпущенный слой.

О природе и причинах возникновения «белой фазы» в настоящее время существует много точек зрения [15, 64, 80, 95, 118]. Одни исследователи считают, что «белая фаза» является результатом насыщения металла азотом, другие — кислородом, а третьи утверждают, что «белая фаза»

является структурой закаленного металла. Условия работы породоразрушающего инструмента — разогрев до высоких температур и быстрое охлаждение — наиболее благоприятны для образования «белой фазы» аустенитно-мартенситной структуры.

По мере развития «белой фазы» все большую роль начинает играть выкрашивание и отслаивание отдельных участков передеформированной поверхности стали. Этот процесс усугубляется наличием сетки поверхностных трещин. Термически разупрочненный металл как бы раскалывается на более холодной основе, сползая и выкрашиваясь на краях поверхностных трещин.

Таким образом, общепринятым определениям абразивного изнашивания и шлифования наиболее полно отвечает лишь изнашивание при разрушении песчанка. В остальных случаях абразивное изнашивание в значительной степени осложнено интенсивными термохимическими процессами.

Наблюдаемые нами процессы хорошо согласуются с концепцией Б. И. Костецкого [83], выделяющего две четко выраженные формы проявления абразивных процессов, отличающихся характером взаимодействия частиц с поверхностью металла: 1) «с преобладанием механического разрушения» (пластическое деформирование поверхностных объемов, их окисление и последующее разрушение образующихся пленок); эта форма вполне соответствует процессам, происходящим при разрушении сульфатных и карбонатных пород (см. рис. 44, 45); 2) «с преобладанием механического разрушения металла поверхностных слоев» (внедрение абразивных частиц и разрушение поверхностных объемов металла без отделения частиц металла или со снятием микростружки); эта форма соответствует процессам, происходящим при разрушении кварцсодержащих терригенных пород типа песчаников (см. рис. 46).

Наблюдаемые нами процессы сдвигообразований в поверхностных слоях металла аналогичны описанным в работах Г. И. Епифанова [67, 68], хотя эти исследования и выполнены на других материалах и в других условиях, а механизм выкрашивания поверхности в значительной степени аналогичен механизму контактных разрушений при качении с проскальзыванием, описанному в работе Л. Б. Эрлиха [201].

**Сравнительные результаты изучения  
абразивного изнашивания стали 20ХНЗА  
на установках АИ-3 и АИ-4**

Сравнительные испытания по изучению скорости изнашивания стали 20ХНЗА на установках АИ-3 и АИ-4 проведены на блоке алеврита с твердостью по штампу 110 кгс/мм<sup>2</sup> ( $\rho_0 = 67$  кгс/мм<sup>2</sup>). Частота взаимодействия на обеих установках составляла 14 Гц. Вертикальная составляющая скорости удара на установке АИ-4 составляла 1,3 м/с.

На рис. 49 приведены виды и профили рабочих поверхностей зубьев, испытанных на установке АИ-4. На рис. 49, а профиль и вид рабочих поверхностей зубьев соответствует условию  $\omega_n r_n = \omega_b r_b$ , т. е. условие можно принять  $v_{ск} = 0$ . На рис. 49, б профиль и вид поверхностей соответствуют условию  $\omega_n r_n - \omega_b r_b = 1,3$  м/с.

Из выражения для определения скорости скольжения

$$v_{ск} = \omega_n r_n - \omega_b r_b \cos \omega_b t$$

видно, что  $v_{ск} = 0$  только в вертикальном положении зубца. В любом ином положении зубца скорость скольжения отличается от нуля. Для рассматриваемого случая скорость скольжения (горизонтальная составляющая скорости движения зубца относительно торной породы) в момент входа в контакт составляла 0,2 м/с.

Из рис. 49 видно, что на зубьях преимущественно изнашивается набегающая грань. Рабочие поверхности набегающих граней имеют полосчатость, характерную для изнашивания по схеме скольжения, а поверхность с проскальзыванием, близким нулю, имеет вид, соответствующий ударно-абразивному изнашиванию [32].

Результаты измерений скорости изнашивания приведены в табл. 26. На установке АИ-3 была получена зависимость  $a = f(N_{уд})$  в диапазоне изменения  $1,0 < N_{уд} < 8,0$  Вт/мм<sup>3</sup>. Затем были проведены испытания на установке АИ-4 при трех режимах. В табл. 26 внесены средние значения из трех испытаний на каждом режиме. Значения скорости изнашивания, полученные на установке АИ-3, взяты из графика зависимости  $a = f(N_{уд})$ . Из табл. 26 видно, что скорости изнашивания, полученные на установке АИ-4, лишь незначительно превышают скорости изнашивания, полученные на установке

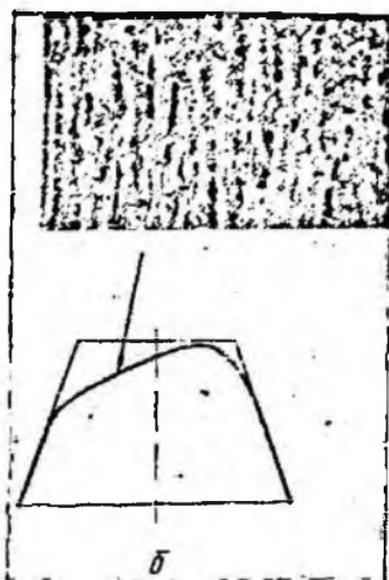
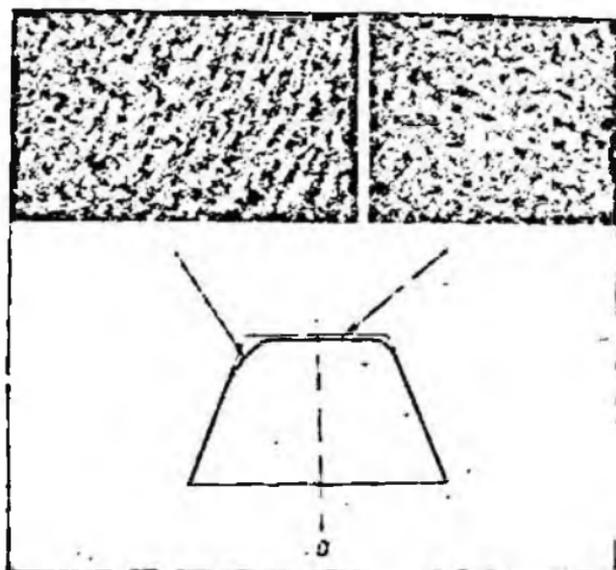


Рис. 49. Профили и вид (70\*) рабочих поверхностей зубьев.

а — после работы без скольжения; б — после работы со скоростью скольжения 1,3 м/с.

АН-3 при одинаковых скоростях скольжения. Скорость изнашивания поверхности, имеющей минимальное проскальзывание, в несколько раз ниже, чем скорость изнашивания поверхностей со значительным проскальзыванием.

Т а б л и ц а 26

Напряженность работы, Вт/мм <sup>2</sup>	Скорость изнашивания стали (в мм/ч) на установках		
	АН-3 $v_y = 0$ $v_{ск} = 1,3$ м/с	АН-4	
		$v_y = 1,3$ м/с $v_{ск} = 0$	$v_y = v_{ск} = 1,3$ м/с
1,5	1,8	0,5	—
2,9	2,6	—	2,6
4,8	3,8	1,5	—
7,3	5,4	—	6,0

Таким образом, результаты изучения абразивного изнашивания, полученные по схеме вращающегося диска, могут быть распространены на элементы вооружения долот, работающих с существенным проскальзыванием без каких-либо поправок.

#### Определение напряженности работы элементов вооружения шарошечных долот

На протяжении ряда лет нами изучался износ вооружения шарошечных долот. Эти работы предшествовали, а также велись параллельно с экспериментальным изучением абразивного изнашивания стали на экспериментальных установках и легли в основу разработки условий моделирования.

Кроме того, такое изучение позволило проверить правильность допущений, принятых при постановке экспериментальных исследований, а также разработать метод оценки напряженности работы элементов вооружения долот.

Рассмотрим эти вопросы на примере двух долот, поднятых из скважины в работоспособном состоянии (рис. 50). Долово № 4022 (рис. 50, а) работало в известняках,

Таблица 27

Тип долота	№ долота	Давление на стойке, кгс/см <sup>2</sup>	Нагрузка на долото, тс	Тип турбобура	Время бурения, ч	Проходка на долото, м
OM575-8T	4022	100	10—11	ТС4М-6 <sup>5</sup> / <sub>8</sub> " (три секции)	1,64	37
OM21-190T	5353	70—80	12	ТС4М-6 <sup>5</sup> / <sub>8</sub> " (три секции)	1,25	10



Рис. 50. Общий вид вооружения долот.

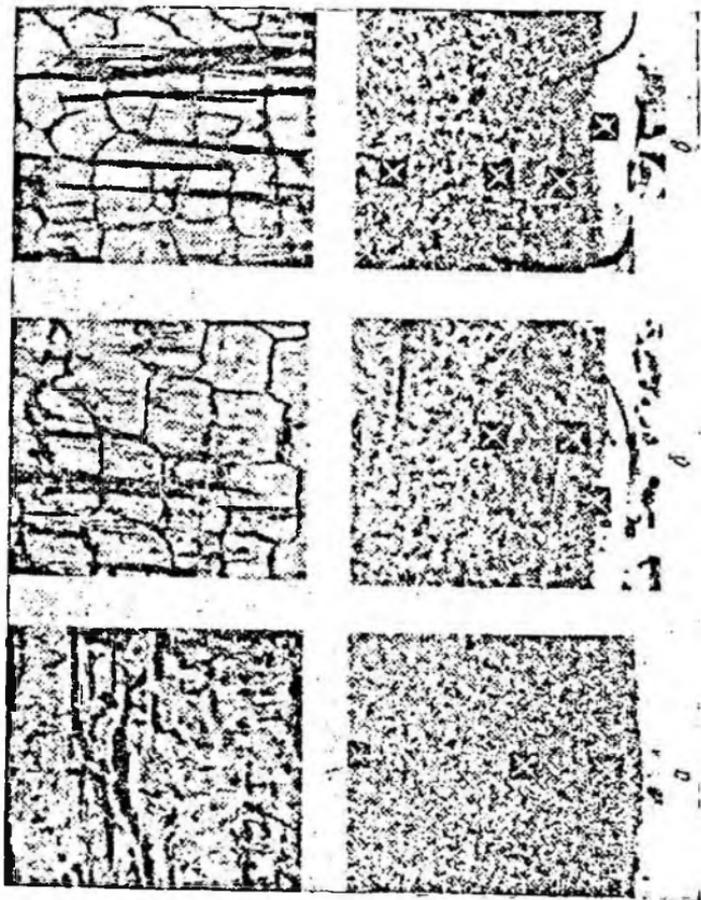
а долото № 5353 (рис. 50, б) — в доломитах. Основные сведения о работе этих долот приведены в табл. 27.

С каждого венца этих долот были вырезаны зубья для изучения под микроскопом рабочих поверхностей. Затем были приготовлены микрошлифы и промерена микротвердость металла.

Фотографии рабочих поверхностей и микроструктуры зубьев второй шарошки долота № 5353 приведены на рис. 51. Из рис. 51 видно, что на рабочих поверхностях зубьев наблюдается полосчатость и трещины, характерные для абразивного изнашивания стали в условиях высокой напряженности работы (см. рис. 44, 45). Исключения составляют зубья 1-го венца, скольжение которого, как видно из рис. 51, незначительно. Вид микроструктуры стали и характер изменения размеров отпечатков микротвердомера полностью аналогичны полученным результатам

Рис. 51. Вид рабочих поверхностей (70<sup>\*</sup>) и соответствующих им микроструктур (450<sup>\*</sup>) вольфрамовой шарошки долота ОМ21-190Т (№ 5353).

а — 1-й лопец; б — 2-й лопец; в — 3-й лопец.



при изучении механизма абразивного изнашивания стали на экспериментальных установках (см. рис. 44, 45). Все это позволяет сделать вывод, что принятые допущения при моделировании не искажают качественной картины процесса изнашивания вооружения долота.

Чем больше напряженность работы образца стали, тем больше глубина и степень термических изменений в металле, прилегающем к рабочей поверхности (см. рис. 47). Оценим зависимость между величиной микротвердости стали в области повышенной травматичности (в области, где наблюдается термическое разупрочнение) и напряженностью работы, определив коэффициент корреляции.

В табл. 28 приведена микротвердость сталей, измеренная при разных значениях частот взаимодействия рассматриваемых участков рабочей поверхности стали с горной породой на глубине 0,1 мм от поверхности. Количество охлаждающей воды было постоянным и достаточным для нормального охлаждения. Коэффициент корреляции между значениями  $H$  и  $N_{уд}$ , приведенными в табл. 28, равен 0,95. Это показывает, что связь между микротвердостью стали на данной глубине и напряженностью работы близка к функциональной.

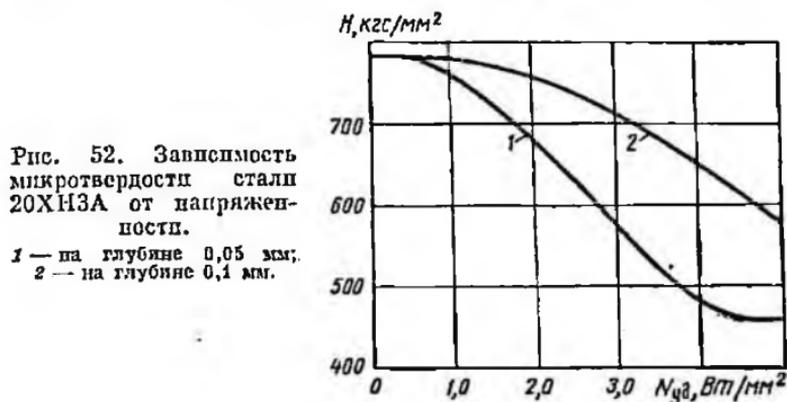
Таблица 28

Горная порода, ее твердость по штампу $R_{шт}$ , кгс/мм <sup>2</sup>	Условия опыта		Микротвер- дость $H$ , кгс/мм <sup>2</sup>
	частота взаимодей- ствия, Гц	напряжен- ность работы $N_{уд}$ , Вт/мм <sup>2</sup>	
Ангидрит, 150	15	21	742
	30	4,4	648
Известняк, 240	15	4,6	620
	30	4,3	683
Доломит, 260	15	30	708
	30	5,3	586

Так как практически вся энергия, реализуемая на контакте, в конечном счете обращается в тепло, то при прочих равных условиях одинаковые затраты энергии будут определять и одинаковый термический эффект. Это допущение позволяет непосредственно перейти к опре-

делению напряженности работы элементов вооружения долота по результатам замеров микротвердости.

Определение проводится следующим образом. На основании графиков распределения микротвердости по глубине образцов стали (см. рис. 47) строим зависимости микротвердости стали на определенной глубине (в данном случае на глубинах 0,05 и 0,1 мм) от  $N_{уд}$  (рис. 52). Рассматриваемые долота и образцы стали отработаны на одних и тех же горных породах. В среднем поперечном



сечении зубца определяется микротвердость металла на глубине 0,05 и 0,1 мм (глубина выбирается так, чтобы отпечатки микротвердомера располагались в средней области повышенной травимости стали) не менее чем в трех точках (под серединой набегающей рабочей поверхности, под вершиной и под серединой сбегающей рабочей поверхности зубца). По рис. 52 определяется напряженность работы в данной точке, а затем среднее арифметическое значение по всем замерам. Специфика работы периферийных венцов требует проведения замеров не менее чем в трех поперечных сечениях. Результаты определения напряженности работы вооружения для рассматриваемых долот приведены в табл. 29.

Из табл. 29 видно, что мощность, реализуемая вооружением долота, в конце рейса составляла при бурении долотом № 4022 — 40 л. с., а при бурении долотом № 5353 — 36 л. с. Оценим реальность этих цифр.

Из хронометражных данных известны компоновка инструмента, тип турбобура и давление на стояке.

Таблица 29

№ долота	№ ширинки	№ венца	Удельная мощность $N_{уд}$ , Вт/мм <sup>2</sup>	Общая рабочая поверхность венца, мм <sup>2</sup>	Мощность реализуемая венцом, Вт	Мощность, реализуемая вооружением долота, Вт (л. с.)
4022	I	1	1,7	560	950	29 830 (40)
		2	2,2	1190	2620	
		3	2,4	2250	5400	
	II	1	3,5	560	1950	
		2	3,8	990	3770	
		3	3,0	2450	7360	
	III	1	1,2	800	960	
		2	1,7	860	1460	
		3	4,8	1120	5360	
5353	I	1	2,0	230	460	27 360 (36)
		2	2,5	690	1730	
		3	4,0	1100	4400	
	II	1	2,4	292	700	
		2	3,3	760	2510	
		3	4,5	2025	9100	
	III	1	1,7	398	680	
		2	2,3	990	2280	
		3	4,3	1280	5500	

Решая уравнение гидравлических потерь напора в системе относительно расхода промывочной жидкости  $Q$ , получаем, что при бурении долотом № 4022  $Q = 29$  л/с, а при бурении долотом № 5353  $Q = 25$  л/с. По справочнику [197] находим, что максимальная мощность турбины турбобура ТС4М-6 $\frac{5}{8}$ " (три секции) для долота № 4022 составит:  $N_{\max}^* = 138$  л. с. и для долота № 5353  $N_{\max}^* = 88$  л. с. Измерения, выполненные во ВНИИБТ [73] для турбобура ТС4Е-6 $\frac{5}{8}$ " (две секции), показывают, что максимальная мощность на валу турбобура составляет 0,76 максимальной мощности турбины, а при работе одной нижней секции этого турбобура — 0,89. Для трехсекционных турбобуров такие замеры не проводили. Экстра-

полируя эти данные для трехсекционных турбобуров, получаем 0,63. Таким образом, максимальная мощность, которая может быть реализована долотом, составляет: для долота 4022  $N_{уд} = 138 \cdot 0,63 = 87$  л. с., а для долота № 5353  $N_{уд} = 88 \cdot 0,63 = 56$  л. с.

Следует учесть, что при работе изношенными долотами в опорах теряется мощности до 40% и более [170, 187]. Кроме того, вероятность эксплуатации турбобура в режиме его максимальной мощности весьма мала. Таким образом, величина мощности, реализуемая вооруженным долотом № 4022, — 40—50 л. с., а вооруженным долотом № 5353 — 30—40 л. с. Эти результаты хорошо согласуются с данными табл. 29. Следовательно, разработанная нами методика оценки напряженности работы элементов вооружения долота и принятые допущения вполне приемлемы.

Таким образом, метод измерения микротвердости позволяет изучать напряженность работы отдельных элементов вооружения долота.

Из изложенного можно сделать следующие выводы.

1. Скорость абразивного изнашивания закаленной стали при данной напряженности работы зависит от характера разрушения горной породы, ее минералогического состава и структуры. Скорость абразивного изнашивания тем выше, чем выше твердость породообразующих минералов и больше размер зерна. Влияние твердости породообразующих минералов и структуры горных пород с ростом напряженности работы быстро возрастает.

2. Абразивное изнашивание стали и абразивность горных пород при их разрушении существенно зависят от режима реализации мощности — низкооборотного или высокооборотного.

3. Абразивность горных пород по отношению к закаленной стали и твердому сплаву может быть оценена с помощью параметров уравнения (52), зависящих от минералогического состава и строения горной породы.

4. Процесс абразивного изнашивания закаленной стали при циклическом взаимодействии с горной породой и охлаждении водой при малой напряженности работы имеет окислительный, а при высокой напряженности — сложный термохимический характер. При разрушении сульфатных и карбонатных пород преобладает механическое разрушение поверхностных слоев стали, а при

разрушения терригенных кварцсодержащих пород — механическое разрушение.

5. Воспроизведение процесса изнашивания вооружения долот в лабораторных условиях позволяет решать обратную задачу: определить напряженность работы элементов вооружения долота.

## ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ АБРАЗИВНОГО ИЗНАШИВАНИЯ СТАЛИ И ТВЕРДОГО СПЛАВА В РАЗЛИЧНЫХ СРЕДАХ

Породоразрушающий инструмент в большинстве случаев работает в водной среде или в растворах на водной основе. Однако находят применение и растворы на нефтяной основе, эмульсии и различные газообразные агенты. Выбор того или иного вида среды связан с конкретными условиями бурения и определяется требованиями технологии проводки нефтяных и газовых скважин, предупреждения и борьбы с осложнениями. Выполненные к настоящему времени исследования показывают, что среда оказывает существенное влияние на работоспособность породоразрушающего инструмента. Среда влияет и на износ инструмента, и на процесс разрушения горных пород. В связи с этим обоснованный выбор и применение надлежащего промывочного или продувочного агента являются значительными резервами повышения эффективности использования долот.

Влияние среды на работоспособность породоразрушающего инструмента оценивается по результатам как промышленных, так и лабораторных исследований. Но получение данных, пригодных для обобщений и в том и в другом случаях, довольно затруднительно, поскольку механизм и характер влияния среды тесно связаны с конкретными условиями взаимодействия инструмента и горной породы. Эти условия в основном определяются свойствами среды, материала породоразрушающего инструмента и горных пород и, что особенно важно, количеством реализуемой энергии и способом ее реализации.

По мере изнашивания рабочая поверхность инструмента увеличивается и, следовательно, уменьшается количество реализуемой энергии через единицу поверхности в единицу времени, т. е. напряженность работы постепенно

уменьшается. Выполненные нами исследования показывают, что при прочих равных условиях влияние того или иного агента наиболее эффективно только в определенной области изменений напряженности работы породоразрушающего инструмента. Причем решающее влияние на его износ и работоспособность в соответствующей области изменения напряженности работы оказывают те или иные факторы, обусловленные некоторой совокупностью свойств среды. В частности, наблюдения показывают, что при малой и средней напряженности работы вооружения долота эффективна среда с более высокой смазочной способностью, а в условиях высокой напряженности — с лучшей охлаждающей способностью.

Одновременное действие и взаимовлияние перечисленных выше факторов значительно затрудняют установление механизма и характера влияния среды на работоспособность долот. Поэтому при постановке исследований в лабораторных условиях необходимо по возможности воспроизводить реальные условия изнашивания породоразрушающего инструмента и разрушения горных пород. При проведении промысловых исследований влияния промысловых и продувочных агентов на работоспособность долот необходимо обеспечивать постоянство условий испытания в различных средах. Для выполненных к настоящему времени исследований характерна недооценка влияния условий взаимодействия при их постановке и интерпретации полученных результатов. Так, при анализе промысловых данных по влиянию промысловых и продувочных агентов на работоспособность долот в большинстве случаев недооценивается сопоставимость условий их отработки при бурении сравниваемых скважин. Для исследований, выполненных в лабораторных условиях, характерна недооценка необходимости соответствия энергетической загрузки взаимодействующих тел энергетической нагрузке долота при промышленном бурении.

Влияние различных сред на абразивную способность пород и абразивное изнашивание вооружения шарошечных долот и породоразрушающих инструментов в целом остается недостаточно изученным и требует постановки специальных исследований.

Рассмотрим основные закономерности абразивного изнашивания стали и твердого сплава в группе сред,

наиболее широко применяемых при бурении скважин. Исследование выполнялось на экспериментальных установках по изложенной ранее методике.

### Основные закономерности абразивного изнашивания стали и твердого сплава при промывке глинистым раствором

Глинистый раствор является наиболее распространенной промывочной жидкостью в бурении. Поэтому с точки зрения оценки параметров абразивного изнашивания при разрушении горных пород глинистый раствор заслуживает особого внимания. Изнашивание стали 20ХНЗА при промывке глинистым раствором изучали на образцах ангидрита, известняка, доломита и песчаника.

На рис. 53, а и б приведены зависимости скорости абразивного изнашивания стали от напряженности работы при разрушении известняка соответственно при низкооборотном и высокооборотном режимах работы. Из рис. 53, а и б видно, что применение глинистого раствора в качестве промывочной жидкости вызывает существенное увеличение скорости изнашивания стали, причем с ростом его удельного веса и вязкости<sup>1</sup> скорость изнашивания стали возрастает.

Из рис. 53, б видно, что при промывке глинистыми растворами при  $N_{уд} > 2,5 \div 3$  Вт/мм<sup>2</sup> наблюдается интенсивный рост скорости изнашивания стали, тогда как при промывке водой этого не происходит. Ранее выполненные нами [99] исследования показали, что аналогичное явление наблюдается и при промывке водой, но при разрушении более твердых известняков, причем как при высокооборотном, так и при низкооборотном режимах работы. Это обусловлено изменением характера изнашивания поверхности стали, что связано с развитием течения поверхности — потерей устойчивости поверхностного слоя стали.

Влияние глинистых растворов на характер изменения и распределение скоростей изнашивания стали при разрушении других хемогенных пород (ангидрита и доломита) аналогично.

<sup>1</sup> Характеристика применяемых сред приведена в табл. 17.

В табл. 30 приведены скорости изнашивания твердого сплава ВК15 в зависимости от напряженности работы при промывке водой и глинистыми растворами в процессе разрушения доломита.

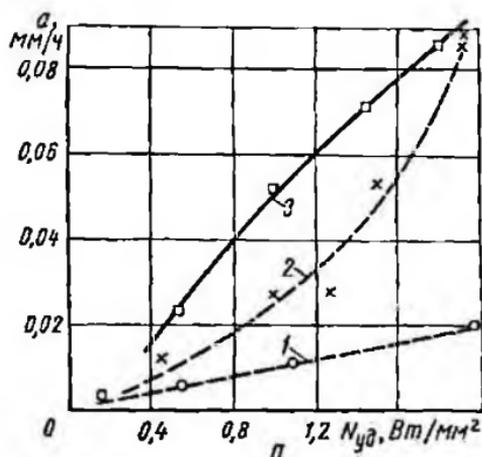
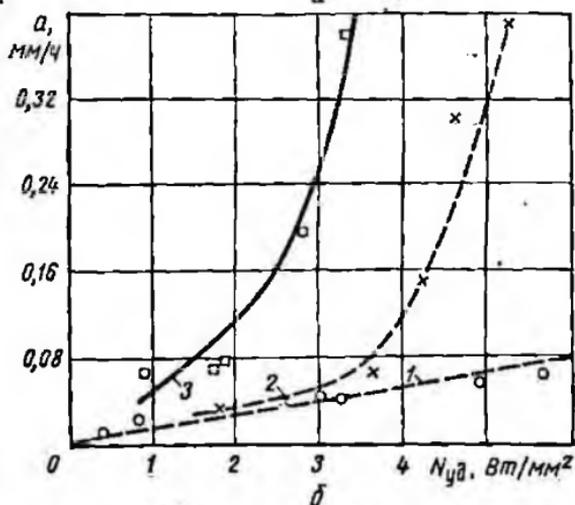


Рис. 53. Зависимость скорости изнашивания стали от напряженности работы при разрушении известняка.

1 — вода; 2 — глинистый раствор-1; 3 — глинистый раствор-2.



Из табл. 30 видно, что скорость изнашивания твердого сплава (в сопоставимых условиях) намного меньше, чем скорость изнашивания стали. Скорость изнашивания твердого сплава при промывке водой значительно меньше, чем при промывке глинистыми растворами.

Среда	Скорость изнашивания $a \cdot 10^3$ , мм/ч Напряженность работы $N_{уд}$ , Вт/мм <sup>2</sup>				
Вода	$\frac{2,5}{1,0}$	$\frac{8,0}{2,8}$	$\frac{12,0}{3,6}$	$\frac{23,0}{5,0}$	$\frac{37,0}{6,0}$
Глинистый рас- твор-1	$\frac{15,0}{1,6}$	$\frac{20,0}{2,7}$	$\frac{70,0}{3,9}$	$\frac{150,0}{5,1}$	—
Глинистый рас- твор-2	$\frac{15,0}{1,0}$	$\frac{25,0}{1,9}$	$\frac{40,0}{3,0}$	$\frac{55,0}{3,7}$	$\frac{140,0}{5,0}$

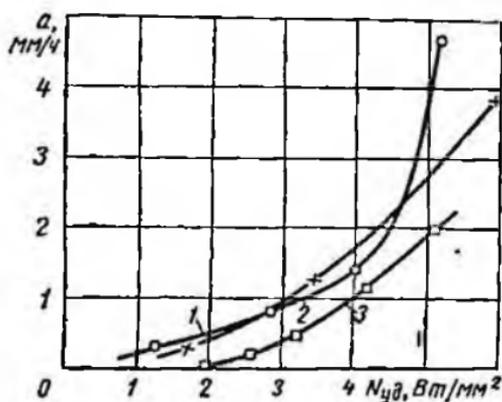


Рис. 54. Зависимость скорости изнашивания твердого сплава BK15 от напряженности работы при разрушении песчаника.

1 — вода; 2 — глинистый раствор-1; 3 — глинистый раствор-2.

В целом скорость изнашивания твердого сплава при разрушении хомогенных пород невелика и не является решающей при определении долговечности породоразрушающего инструмента. А поэтому вопрос о режиме работы инструмента с твердосплавным вооружением и о виде промывочной жидкости должен решаться с точки зрения эффективности разрушения горной породы.

Общий вид зависимости  $a = f(N_{уд})$  для твердого сплава BK15 при разрушении песчаника (рис. 54) аналогичен зависимости, полученной при изнашивании стали. Разница скоростей изнашивания твердого сплава и стали при разрушении песчаника значительно меньше (около

10 раз), чем при разрушении хемогенных горных пород. Скорость изнашивания твердого сплава настолько велика, что может обуславливать долговечность инструмента в целом.

Таким образом, применение глинистого раствора в качестве промывочной жидкости вместо воды приводит к увеличению скорости изнашивания стали, причем чем меньше твердость и абразивность горных пород, тем значительно растет скорость изнашивания стали при замене воды глинистым раствором.

### Основные закономерности абразивного изнашивания стали и твердого сплава при промывке эмульсионными растворами

В настоящее время, когда глубины бурения увеличиваются, применение эмульсионных растворов является наиболее перспективным в связи с их меньшей восприимчивостью к температурному воздействию, чем восприимчивость растворов, не содержащих нефти. В работах [52, 98] отмечается положительное влияние эмульсионных растворов на работу долот.

Наиболее просты в приготовлении и эксплуатации эмульсионные растворы типа «масло в воде» или эмульсии первого рода. Намп изучено влияние эмульсионного глинистого раствора (ЭГР) и эмульсионного крахмального раствора (ЭКР) на скорость и характер абразивного изнашивания стали и твердого сплава.

Эмульсионные глинистые растворы. Эмульсионные глинистые растворы приготовляли введением в химически обработанный глинистый раствор добавок нефти в количестве 6—10% по весу.

На рис. 55 приведены зависимости скорости изнашивания стали от напряженности работы при разрушении известняка при промывке водой, глинистым раствором 2 и ЭГР-2. Из рис. 55 видно, что введение нефти в глинистый раствор снижает скорость изнашивания и сдвигает в область большей напряженности работы начало развития интенсивного изнашивания стали по сравнению с глинистым раствором, однако скорость изнашивания при промывке водой все же значительно ниже.

Влияние ЭГР на скорость изнашивания стали при разрушении других хемогенных пород аналогично.

Положительное влияние по сравнению с глинистым раствором оказывает ЭГР и на изнашивание твердого сплава (табл. 31) вследствие более высокой скорости

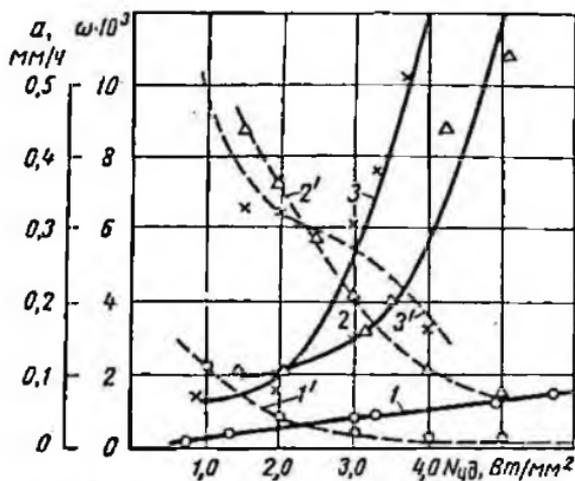


Рис. 55. Зависимость скорости изнашивания и относительного износа стали от напряженности работы при разрушении известняка.

1, 2, 3 — скорость изнашивания; 1', 2', 3' — относительный износ; 1, 1' — вода; 2, 2' — ЭГР-2; 3, 3' — глинистый раствор-2.

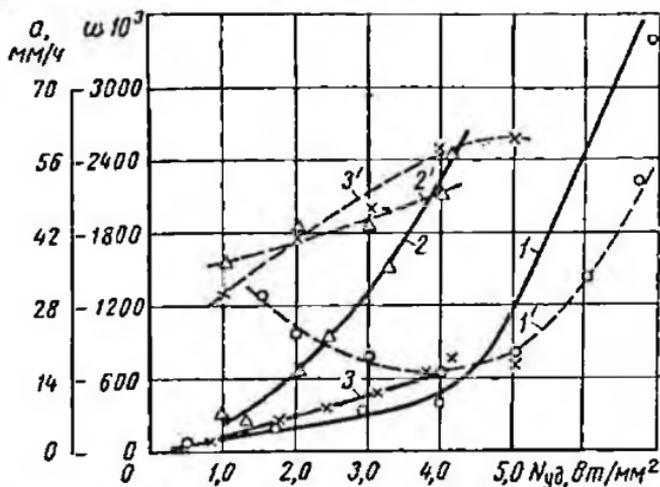


Рис. 56. Зависимость скорости изнашивания и относительного износа стали от напряженности работы при разрушении песчашка.

Обозначения те же, что на рис. 55.

разрушения доломита. Однако как относительный износ, так и скорость изнашивания твердого сплава при промывке водой значительно ниже, чем при промывке ЭГР.

Таблица 31

Среда	Скорость изнашивания $\alpha \cdot 10^3$ , мм/ч					
	Относительный плюс $\omega \cdot 10^3$					
	Напряженность работы $N_{уд}$ , Вт/мм <sup>2</sup>					
Вода	$\frac{3,0}{0,07}$ 1,0	$\frac{4,0}{0,05}$ 2,0	$\frac{7,0}{0,06}$ 3,0	$\frac{12,0}{0,08}$ 4,0	$\frac{21,0}{0,07}$ 5,0	$\frac{37,0}{0,08}$ 6,0
Глинистый раствор-2	$\frac{15,0}{0,56}$ 1,0	$\frac{27,0}{0,42}$ 2,0	$\frac{40,0}{0,29}$ 3,0	$\frac{60,0}{0,24}$ 4,0	$\frac{125,0}{0,29}$ 5,0	—
ЭГР-2	$\frac{20,0}{0,35}$ 1,0	$\frac{32,0}{0,25}$ 2,0	$\frac{52,0}{0,20}$ 3,0	$\frac{100,0}{0,18}$ 4,0	$\frac{150,0}{0,17}$ 5,0	—

На рис. 56 приведены зависимости скорости абразивного изнашивания стали от напряженности работы при разрушении песчанника. Из рис. 56 видно, что применение ЭГР в качестве промывочной жидкости привело к увеличению скорости изнашивания стали как по сравнению с водой, так и с глинистым раствором. Аналогичное влияние оказывает ЭГР при разрушении песчанника и на скорость изнашивания твердого сплава.

Таким образом, проведенные исследования показали, что ЭГР эффективнее при использовании его в качестве промывочной жидкости вместо глинистого раствора при разрушении хемогенных горных пород в тех случаях, когда применение воды в качестве промывочной жидкости исключено по геологическим причинам.

Эмульсионные крахмальные растворы. Эмульсионные крахмальные растворы применяются при разбуривании соленосных отложений [142]. Характерной особенностью этих растворов является изменение вязкости в течение определенного времени после приготовления. Приготовленный

нами ЭКР имел исходную условную вязкость 100 с. Через 12 сут условная вязкость ЭКР снизилась до 25 с. Эта особенность ЭКР была использована нами для оценки влияния вязкости среды на скорость абразивного изнашивания стали, поскольку известно, что с увеличением вязкости охлаждающая способность жидкости снижается.

На рис. 57 приведены зависимости скорости и относительного износа пары сталь — известняк от напряженности работы. Из рис. 57 видно, что при высокооборотном

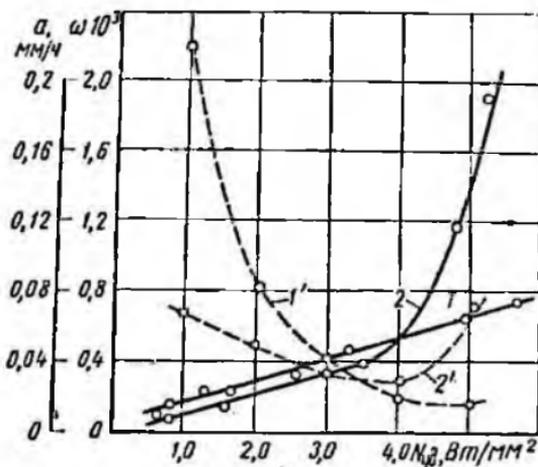


Рис. 57. Зависимость скорости изнашивания и относительного износа стали от напряженности работы при разрушении известняка. 1, 2 — скорость изнашивания; 1', 2' — относительный износ; 1, 1' — вода; 2, 2' — ЭКР.

режиме в области малой и средней напряженности работы применение ЭКР в качестве промывочной жидкости вместо воды приводит к снижению как скорости изнашивания стали, так и относительного износа. В области высокой напряженности работы при промывке ЭКР наблюдается более быстрый рост скорости изнашивания стали, чем при промывке водой.

В опытах при разрушении доломита при высокооборотном режиме было проверено влияние условной вязкости на скорость изнашивания стали. Результаты опытов приведены на рис. 58. Из рис. 58 видно, что при напряженности работы  $N_{уд} < 3,7$  Вт/мм<sup>2</sup> применение ЭКР вместо воды в качестве промывочной жидкости приводит к снижению как скорости изнашивания стали, так и относительного износа. Однако при высокой напряженности работы темп роста скорости изнашивания стал значи-

тельно выше при промывке ЭКР по сравнению с промывкой водой. Причем, как и предполагалось, при высокой напряженности работы с увеличенной вязкости повышается скорость изнашивания стали.

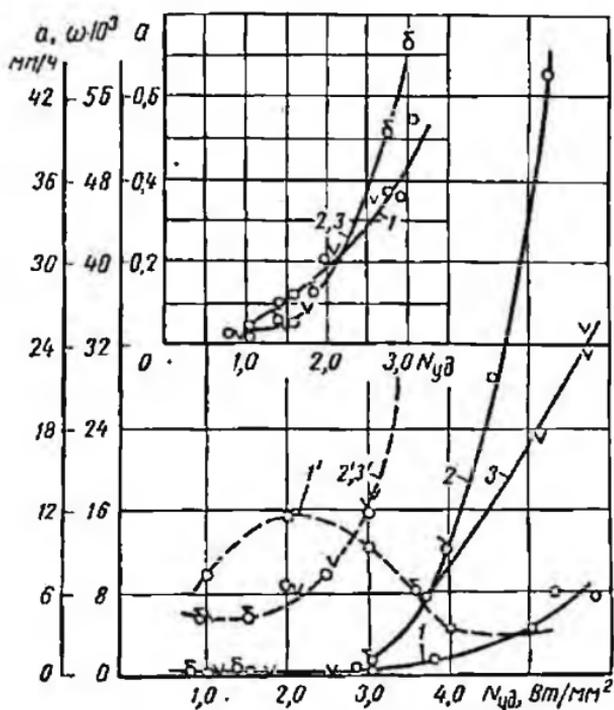


Рис. 58. Зависимость скорости изнашивания и относительного износа стали от напряженности работы при разрушении доломита.

1, 2, 3 — скорость изнашивания; 1', 2', 3' — относительный износ; 1, 1' — вода; 2, 2' — ЭКР-1; 3, 3' — ЭКР-2.

Опыты, проведенные на хемогенных породах, показали, что эмульсионные крахмальные растворы при средней напряженности работы обладают преимуществом по сравнению с промывкой водой. Однако в условиях высокой напряженности работы, когда наблюдается потеря устойчивости рабочей поверхности стали, применение ЭКР приводит к значительному увеличению скорости изнашивания стали по сравнению со скоростью ее изнашивания при промывке водой.

Таким образом, выполненные лабораторные исследования показали, что эмульсионные растворы как промывочные жидкости с точки зрения уменьшения скорости изнашивания вооружения долот в большинстве случаев не могут конкурировать с водой. Однако когда применение воды исключено по геологическим причинам, эмульсионные растворы весьма перспективны по сравнению с глинистыми. ЭГР могут успешно применяться и при высокой напряженности работы, тогда как ЭКР целесообразно использовать при средней напряженности работы.

### Основные закономерности абразивного изнашивания стали при промывке водой с добавками поверхностно-активных веществ

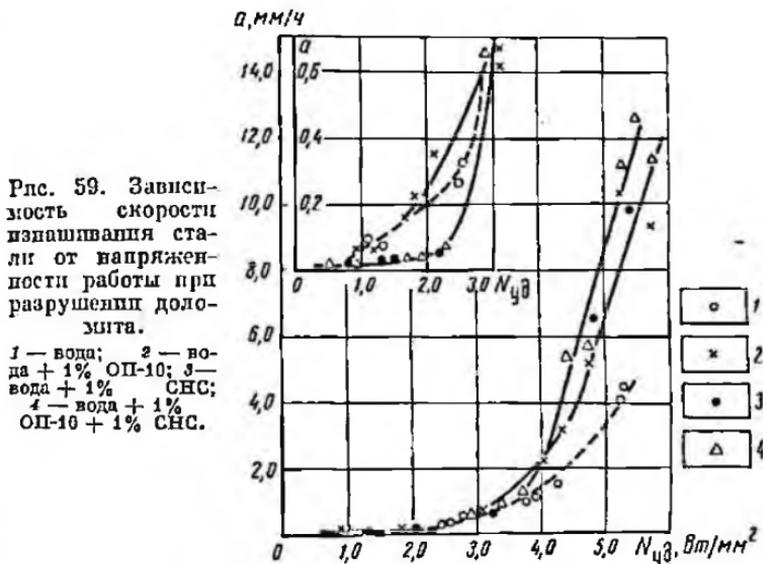
Проведенные исследования показывают, что при турбинном способе бурения в настоящее время вода с точки зрения работы вооружения долот является одной из лучших промывочных жидкостей. Однако вода имеет и ряд отрицательных качеств, которые нередко исключают возможность применения ее как промывочной жидкости. В частности, при промывке водой резко снижается качество вскрытия продуктивных пластов. В настоящее время для улучшения качества вскрытия продуктивных пластов с промывкой скважин водой все шире применяют добавки поверхностно-активных веществ (ПАВ).

Промысловые данные о влиянии ПАВ на износ долот и их производительность по сравнению с промывкой водой без добавок ПАВ весьма противоречивы.

Влияние ПАВ на скорость изнашивания стали с целью объяснения промысловых данных было исследовано нами ранее [134]. Позже изучено влияние добавок поверхностно-активных веществ ОП-10 и СНС к воде на скорость абразивного изнашивания стали в более широком диапазоне изменения напряженности работы. Кроме того, было проверено совместное влияние добавок ОП-10 и СНС к воде при высокооборотном режиме работы. Результаты опытов приведены на рис. 59. Из этого рисунка видно, что при напряженности работы  $N_{уд} < 3,0$  Вт/мм<sup>2</sup> ОП-10 не оказывает существенного влияния на скорость абразивного изнашивания стали. Добавки только СНС и СНС совместно с ОП-10 способствуют уменьшению скорости изнашивания стали. При напряженности работы  $N_{уд} >$

$> 3,0$  Вт/мм<sup>2</sup> поверхностно-активные добавки к воде способствуют более резкому увеличению скорости изнашивания стали, чем при промывке водой без добавок.

Таким образом, из рассмотренных типов ПАВ для снижения скорости абразивного изнашивания вооружения шарошечных долот при промывке водой эффективно применение добавок СНС и комбинированных добавок (СНС + ОП-10) лишь при малой и средней напряженности



работы вооружения. Аналогичные результаты действия этих ПАВ были получены и другими исследователями [3, 160] по отношению к опорным элементам шарошечных долот.

В работах ряда исследователей [41, 45] показана высокая эффективность противозносных присадок к маслам соединений серы, хлора и фосфора. Особенно эффективны эти присадки в тяжелых условиях граничного трения. Поэтому нам было исследовано влияние некоторых из серу-, хлор- и фосфорсодержащих присадок на абразивное изнашивание стали. Поскольку выпускаемые промышленностью присадки водонерастворимы, их вводили в глинистый и эмульсионный крахмальный растворы.

Исследования показали, что добавка водонерастворимых серу-, хлор- и фосфорсодержащих присадок в глинистый раствор лишь ухудшает условия работы породоразрушающего инструмента в результате вспенивания промывочной жидкости.

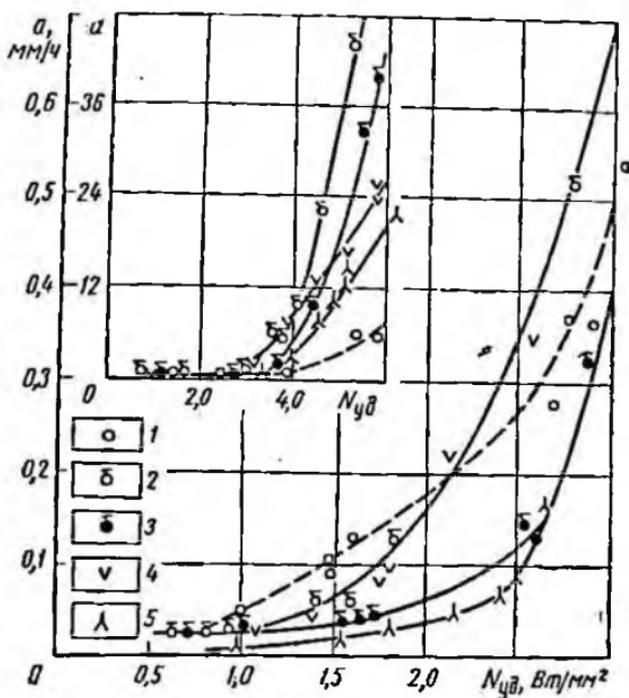


Рис. 60. Зависимость скорости изнашивания стали от напряженности работы при разрушении доломита.

1 — вода; 2 — ЭКР-1; 3 — ЭКР-1 + 1,5% хлорэф-40; 4 — ЭКР-2; 5 — ЭКР-2 + 2% ДФ-11.

Введение подобных присадок в эмульсионный крахмальный раствор не вспенивает его, поэтому ЭКР был использован для качественной оценки эффективности присадок, содержащих соединения хлора, серы и фосфора. Положительные результаты были получены при введении добавок хлорэф-40 и ДФ-11. В ЭКР-1 была введена присадка хлорэф-40 (бутиловый эфир трихлорметилфосфиновой кислоты), содержащая 34% хлора и 10% фосфора.

В ЭКР-2 добавляли ДФ-11. Эта присадка представляет собой диалкилдитиофосфат цинка и содержит около 10% серы, 5% фосфора и 5% цинка. Опыты были проведены при высокооборотном режиме.

На рис. 60 приведены зависимости скорости абразивного изнашивания стали от напряженности работы при разрушении доломита. Из рис. 60 видно, что скорость изнашивания стали при промывке ЭКР-1 с добавкой 1,5% присадки хлорэф-40 значительно ниже, чем при промывке ЭКР-1 во всем изученном интервале изменения напряженности. Аналогичная картина наблюдается и при сравнении влияния на скорость изнашивания стали ЭКР-2 и ЭКР-2 с добавкой 2% присадки ДФ-11. Скорость изнашивания стали при промывке ЭКР с присадками в области  $N_{уд} < 3,0 \text{ Вт/мм}^2$  меньше, чем при промывке водой.

Таким образом, введение серо-, хлор- и фосфорсодержащих присадок в буровые промывочные жидкости, видимо, позволит значительно увеличить долговечность и повысить производительность работы породоразрушающего инструмента. Однако применение выпускаемых промышленностью присадок ограничено в связи с тем, что они водонерастворимы. Поэтому было бы целесообразно синтезировать серо-, хлор- и фосфорорганические водорастворимые соединения для добавления их в промывочную воду и жидкости на водной основе.

### О механизме влияния среды на абразивное изнашивание стали и твердого сплава

Исследования показывают, что механизм влияния среды на износ взаимодействующих тел в конкретных условиях определяется множеством факторов, из которых основными являются: теплофизические свойства системы, смазочные и окислительные свойства жидкой фазы по отношению к твердой, физико-химические процессы в металлах при больших контактных нагрузках и повышенных температурах, формирование физического микрорельефа поверхностей контакта, механохимические явления на контакте фаз, адсорбционное понижение прочности (эффект Ребиндера).

Процесс изнашивания инструмента на контакте с породой является существенно необратимым и сопровождается необратимым рассеиванием мощности, подводимой к долоту,

В такой системе рассеивание энергии приводит к производству энтропии и возникновению ряда потоков, из которых в качестве важнейших примем: поток механического процесса (поток дислокаций при пластической деформации на контакте), поток химической реакции окисления (при окислительном износе), поток образования новых поверхностей (разрушение материала) и тепловой поток (вследствие градиента температур). Без учета последнего потока выражение производства энтропии и соответствующие феноменологические уравнения ранее были получены в работе [57].

Присоединяя теперь к выражению производства энтропии вклад процессов теплопереноса внутри системы, получаем:

$$T \frac{ds}{dt} = \dot{n}A + J\bar{A} + I(-\Delta\sigma) + Ju \left( -\frac{\Delta T}{T} \right), \quad (53)$$

где  $T$  — абсолютная температура;  $ds/dt$  — возникновение энтропии;  $\dot{n}$  — поток дислокаций;  $A$  — средство процесса пластической деформации;  $J$  — поток химической реакции;  $\bar{A}$  — средство химического процесса;  $I$  — поток новых поверхностей;  $\Delta\sigma$  — изменение поверхностного натяжения;  $Ju$  — тепловой поток;  $\Delta T$  — перепад температур.

Тогда соответствующая система феноменологических уравнений запишется

$$\left. \begin{aligned} \dot{n} &= L_{11}A + L_{12}\bar{A} + L_{13}(-\Delta\sigma) + L_{14}\left(-\frac{\Delta T}{T}\right) \\ J &= L_{21}A + L_{22}\bar{A} + L_{23}(-\Delta\sigma) + L_{24}\left(-\frac{\Delta T}{T}\right) \\ I &= L_{31}A + L_{32}\bar{A} + L_{33}(-\Delta\sigma) + L_{34}\left(-\frac{\Delta T}{T}\right) \\ Ju &= L_{41}A + L_{42}\bar{A} + L_{43}(-\Delta\sigma) + L_{44}\left(-\frac{\Delta T}{T}\right) \end{aligned} \right\}, \quad (54)$$

причем по соотношениям взаимности Онзагера  $L_{ik} = L_{ki}$ .

Анализ этой системы уравнений показывает, что возникновение градиента температур в системе приводит к появлению дополнительных потоков (с коэффициентами  $L_{14}$ ): потока дислокаций (т. е. пластифицирование и облегчение деформации элементарных сдвигов), массопереноса (в частности — окислительного износа), образование по-

вых поверхностей (т. е. разрушение материала). Билинейная форма (53) произведений потоков и сил обладает свойством аддитивности и потому каждый член суммы следует рассматривать как сумму однородных членов, число которых зависит от числа процессов данного вида. Поэтому, рассматривая произведение  $J\dot{A}$  как сумму вкладов производства энтропии от всех процессов переноса массы в системе под действием разности химических потенциалов (определяющей химическое средство), в том числе и диффузии компонентов в стали, заключаем, что градиент температур наряду с межфазным массопереносом (окислительный износ) вызывает внутрифазные процессы, например, различные фазовые превращения в стали. Отсюда вытекает важность изучения распределения температур в системе контактирующих тел применительно к условиям работы бурового инструмента, характеризующихся циклическим разогревом и охлаждением с высокими скоростями рабочих поверхностей зубьев долот при многократном деформировании. Степень разогрева металла зависит в основном от напряженности работы, величины области реализации энергии (области, захваченной остаточными деформациями и разрушением) и от условий теплоотвода.

Температурный режим существенно зависит от термического контактного сопротивления между металлом породоразрушающего инструмента и горной породой. В связи с этим были поставлены специальные экспериментальные исследования.

Экспериментальное исследование контактного термического сопротивления металл — порода. В периодической печати можно встретить ряд работ по изучению контактного термического сопротивления между металлами [198, 212], однако нам не известны работы по изучению этого важного параметра для пары металл — горная порода.

Температура двух соприкасающихся поверхностей, через которые проходит тепловой поток, может быть только в том случае одинаковой, если контакт идеальный. Но контакт между твердыми телами всегда имеет дискретный характер. Многочисленными исследованиями установлено, что площадь фактического контакта составляет незначительную долю от номинальной площади соприкосновения поверхностей. Это означает, что между соприкасающимися поверхностями всегда имеются полости, запол-

ненные воздухом или иной средой, часто имеющей меньшую теплопроводность, чем теплопроводность металлов, что значительно уменьшает переход тепла через контактную зону. При сжатии поверхностей будет увеличиваться площадь фактического контакта и перераспределяться тепловой поток. Тепло от одной соприкасающейся поверхности к другой в общем случае может передаваться следующими путями: теплопроводностью через места непосредственного контакта; теплопроводностью через среду, заполняющую пространство между выступами шероховатостей контактирующих поверхностей; конвективным переносом тепла средой, заполняющей это пространство, и лучистым теплообменом между поверхностями.

Ограниченные размеры зазоров препятствуют возникновению конвективных токов, интенсивность которых определяется критерием  $(GrPr)$ . При значениях  $(GrPr) > 10^{-3}$  получаем, что  $Nu = 0,5$  и остается постоянным, откуда следует, что конвективным теплообменом можно пренебречь, и все тепло через зазоры передается посредством теплопроводности среды [124] (здесь:  $Gr$  — критерий Гросгофа,  $Pr$  — критерий Прандтля,  $Nu$  — критерий Нуссельта). В обычных условиях поток тепла, переносимого посредством лучистого теплообмена, составляет доли процента и им можно пренебречь [198].

Для экспериментального исследования контактного сопротивления была спроектирована и изготовлена специальная установка<sup>1</sup>, принципиальная схема которой представлена на рис. 61. Влияние среды на контактное сопротивление исключалось установкой образца в вакууме (проверялось специальными опытами). Установка состоит из герметичной рабочей камеры, форвакуумного насоса типа VZ-3 и измерительной аппаратуры. Рабочая камера, показанная на рис. 62 в разрезе, представляет собой массивную плиту 5 из стали 1X18H9T толщиной 20 мм, к которой притерт стеклянный колпак 12. Внутри камеры помещены опытные образцы 7, 9.

Верхний образец 9, выполненный из стали 1X18H9T, во всех экспериментах оставался неизменным, внутри него помещался нагреватель 3 (см. рис. 61) в виде спирали из нихромовой проволоки диаметром 0,8 мм. Мощность

---

<sup>1</sup> Установка спроектирована и изготовлена совместно с Л. Н. Татариновым и Э. М. Гутманом.

нагревателя регулировалась автотрансформатором и контролировалась амперметром и вольтметром. Токопроводы 8, выполненные из латуни, несут механическую нагрузку. В качестве уплотнения применяются фторопластовые прокладки 6. Все места соединений, кроме того, промазывали вакуумной замазкой. В качестве нижнего образца 7 брали керны пород диаметром 11 мм. Керны вставляли

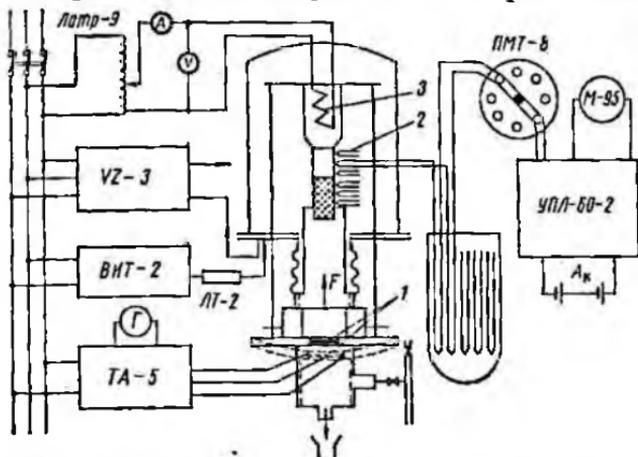


Рис. 61. Принципиальная схема установки для измерения контактного термического сопротивления.

в корпус холодильника 1, который охлаждался проточной водопроводной водой. Корпус холодильника выполнен в виде трубки фильда из стали 1X18Н9Т.

Образцы сжимали с помощью гайки 3 и упорной шайбы 2 (рис. 62), на которой наклеены тензодатчики 1 (см. рис. 61). Давление на образец передавалось через стальной сильфон 4, который припаян серебром к холодильнику 1 (см. рис. 62). Для центровки образцов и в качестве верхнего упора изготовлена балка 11 толщиной 4 мм из стали 1X18Н9Т. Валка изолирована от токопроводов гетинаксовыми прокладками 10. Нагрузка на образцы контролировалась тензостанцией ТА-5. Тензодатчики тарируют динамометром ДОСМ-1. В процессе исследования в камере поддерживалось разрежение  $1 \times 10^{-2}$  мм рт. ст., контроль разрежения осуществлялся понижационно-термопарным вакуумметром ВНТ-2 и термопарной лампой ЛТ-2.

Для измерения градиента температуры на поверхности образцов крепили хромель-алюмелевые термопары 2 (см. рис. 61) диаметром 0,3 мм. Они выводились из рабочей камеры через фторопластовые уплотнения. Все термопары подсоединены к переключателю ПМТ-8, коммутирующему их с потенциометром УПЛ-60-2, с которого

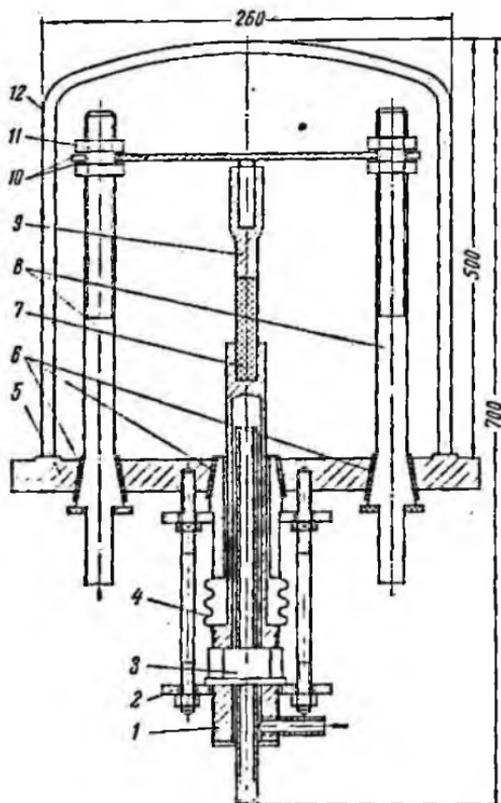


Рис. 62. Рабочая камера установки.

спимается э. д. с., развиваемая на термопарах; в качестве нулевого индикатора использовали прибор М-95. Предварительно термопары проверяли на идентичность показаний.

При проведении опытов измеряли следующие величины: температуру по длине испытываемых образцов, силу сжатия образцов, давление газовой среды. Опыты по

определению термического сопротивления проводили при установившемся режиме, который обычно наступал через 1—1,5 ч после включения установки. Образцы нагружали циклически от 0 до 250 кгс/см<sup>2</sup> через каждые 50 кгс/см<sup>2</sup>. При изменении нагрузки стабилизация режима наступала через 30—40 мин. Зависимость термического сопротивления от давления снимали для различных удельных тепловых потоков. Опытные данные фиксировали в виде температур, измеренных по длине образцов, далее линейной экстраполяцией (рис. 63) определяли перепад температур в зоне контакта  $T_k$ , величина которого менялась от 20 до 150° С в зависимости от давления  $p$  и теплового потока  $q$ . Для определения величины термического сопротивления контакта необходимо определить тепловой поток через контактную зону, который вычисляли по градиенту температуры на верхнем образце и величине теплопроводности  $\lambda$  стали 1Х18Н9Т, зависимость которой от температуры известна [48]

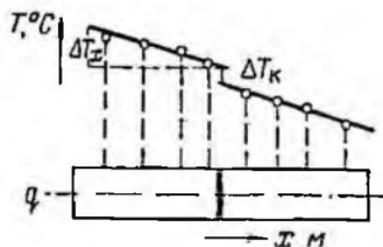


Рис. 63. Распределение температур по длине образца.

$$q = -\lambda \frac{\Delta T_x}{\Delta x}, \quad (55)$$

где  $\Delta T_x$  — перепад температур по длине цилиндра  $\Delta x$ .

Термическое сопротивление контакта  $R$  и условный коэффициент теплообмена контактной поверхности  $\alpha_1$  вычислялись по формуле

$$R = \frac{1}{\alpha_1} = \frac{\Delta T_k}{q}. \quad (56)$$

Затем строили графики  $R = f(p, T_k)$ . Для экспериментов использовали керны известняка, доломита, ангидрита и мрамора.

Зависимости  $R = f(p, T_k^{\max})$  показаны на рис. 64 и 65.

Как следует из графиков, отмечается явная зависимость контактного термического сопротивления от контактного давления, различная для разных пород. С увеличением давления сопротивление уменьшается (за исклю-

чемшем контакта стали с ангидритом при повышенной температуре), что объясняется увеличением площади фактического контакта зерен породы с металлом. Однако, если для меньших температур ( $150^{\circ}\text{C}$ ) спад сопротивления с ростом давления происходит вначале резко, а затем стремится к постоянной величине (доломит и ангидрит), то при повышенной температуре ( $340\text{--}490^{\circ}\text{C}$ ), эта зависи-

$R \cdot 10^3, \text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град} / \text{ккал}$

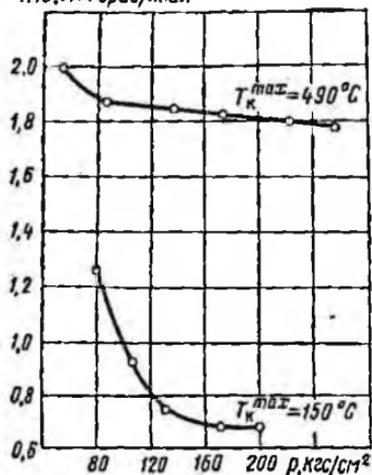


Рис. 64. Зависимость контактного термического сопротивления от давления на контакте сталь-доломит.

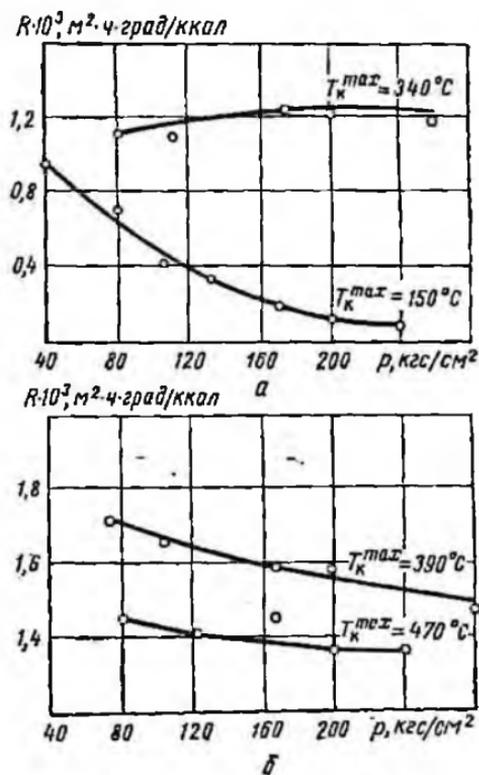
мость становится значительно слабее, а величина сопротивления — больше. Причиной этого является образование на стали при повышенной температуре окисных пленок, принимающих на себя перепад температур вследствие более низкой теплопроводности окислов. В процессе бурения поверхность зубца периодически обновляется вследствие срыва окисной пленки (обладающей малой прочностью), а развиваемые высокие температуры обеспечивают непрерывное окисление свежей поверхности и, следовательно, интенсивный окислительный износ стали.

Измерение контактного термического сопротивления по описанной методике позволяет не только получить величины, необходимые для расчета тепловых процессов при абразивном изнашивании рабочих органов бурового инструмента, но и, изучая кривые  $R = f(p, T_k)$  для различных пород, получить информацию об изменении физико-механических свойств конкретных пород в приповерхностном слое (оказывающем наибольшее влияние на термическое сопротивление контакта) при нагружении поверхности металлическим инструментом.

Располагая необходимыми теплофизическими параметрами, полученными экспериментально, проведем оценочный расчет возможной температуры рабочей поверхности породоразрушающего инструмента.

Оценочный расчет температуры рабочей поверхности металла при разрушении горной породы. Расчетная схема (см. рис. 13): диск радиуса  $R$  и шириной  $b'$ , вращающийся с угловой скоростью  $\omega$ , находится в контакте с поверхностью разрушаемой горной породы. Длина дуги контакта  $l_k = R\beta$ .

Рис. 65. Зависимость контактного термического сопротивления от давления на контакте сталь — ангидрит (а) и сталь — известняк (б).



Рассматриваем горную породу как полубесконечное пространство. Свободная поверхность диска и горной породы охлаждается промывочной жидкостью или воздухом.

Обозначим:  $Q$  — количество тепла, выделяющегося в единицу времени в зоне контакта диска с породой;  $Q_1$  — количество тепла, поступающего в единицу времени из

зоны контакта в металл диска;  $Q_2$  — количество тепла, поступающего в породу, причем

$$Q = Q_1 + Q_2. \quad (57)$$

Принимаем, что величина  $Q$  эквивалентна мощности, затрачиваемой на процесс разрушения горной породы. Результаты калориметрических последовательных процесса разрушения горных пород показывают [21, 47], что величина энергии образования новой поверхности в оцепочных расчетах можно пренебречь. Поэтому величину  $Q$  можем считать известной и решать стационарную задачу, исходя из уравнения баланса тепла (57).

Учитывая, что максимальное рассеивание энергии происходит в разрушаемой фазе, будем считать, что тепловые источники располагаются в приповерхностном слое горной породы. Тогда для величины теплового потока в металл имеем

$$Q_1 = \int_S \alpha_1 (t_n - t_m) \Big|_{r=R} dS, \quad (58)$$

где  $S$  — площадь контакта;  $t_n$  — температура горной породы;  $t_m$  — температура металла;  $\alpha_1$  — коэффициент теплообмена от породы к металлу;  $R$  — радиус диска.

Для определения теплового потока в породу используем то обстоятельство, что размеры контакта весьма малы по сравнению с размерами массива породы, участвующего в формировании температурного поля, которое подчиняется стационарному уравнению теплопроводности Пуассона

$$\Delta t = - \frac{F}{\lambda_n}, \quad (59)$$

где  $\Delta$  — дифференциальный оператор Лапласа;  $F$  — плотность тепловых источников;  $\lambda_n$  — коэффициент теплопроводности породы.

Распределение тепловых источников на поверхности контакта диска с породой с учетом сказанного относительно размеров контакта приближенно можно заменить эквивалентными равномерно распределенными источниками на полусфере радиуса  $R_{\text{ф}}$ , суммарная мощность которых равна  $Q_2$ . Тогда решение уравнения (59) будет иметь вид

$$t_n(r) = \frac{Q_2}{2\pi\lambda_n r}, \quad (60)$$

и поверхности равной температуры в породе будут иметь форму концентрических полусфер с центром в зоне контакта.

Обозначив температуру поверхности породы в зоне контакта через  $t_n^*$ , получим

$$t_n^* = t_n(R) = \frac{Q_2}{2\pi\lambda_n R_{эф}}. \quad (61)$$

Подставляя уравнения (61) и (58) в выражение (57), составляем уравнение теплового баланса

$$\int_S \alpha_1 (t_n^* - t_m|_{r=R}) dS + 2\pi\lambda_n R_{эф} t_n^* = Q, \quad (62)$$

откуда можно было бы определить  $t_n^*$ , если найти зависимость  $t_m|_{r=R}$  от  $t_n^*$ .

Для получения этой зависимости воспользуемся результатами расчета температуры в прокатном валке [31] применительно к данной задаче и получим для температуры на поверхности диска

$$t_{m1}|_{r=R} = t_n^* - b_1 \exp(-k_1\varphi), \quad 0 < \varphi < \beta; \quad (63)$$

$$t_{m2}|_{r=R} = b_2 \exp(-k_2\varphi), \quad \beta < \varphi < 2\pi, \quad (64)$$

где

$$b_1 = t_n^* \frac{1 - \exp[k_2(\beta - 2\pi)]}{1 - \exp[-k_1\beta - k_2(2\pi - \beta)]}; \quad (65)$$

$$b_2 = t_n^* \frac{\exp(k_2\beta) [1 - \exp(-k_1\beta)]}{1 - \exp[-k_1\beta - k_2(2\pi - \beta)]} \quad (66)$$

и

$$k_1 = \frac{4Bi_1}{A(Bi_1 + 2)}; \quad (67)$$

$$k_2 = \frac{4Bi_2}{A(Bi_2 + 2)}. \quad (68)$$

Величины  $Bi_1$  и  $Bi_2$  являются критериями Био и равны

$$Bi_1 = \frac{\alpha_1 R}{\lambda_m}; \quad Bi_2 = \frac{\alpha_2 R}{\lambda_m}, \quad (69)$$

где  $\lambda_m$  — коэффициент теплопроводности металла;  $\alpha_2$  — коэффициент теплообмена от металла к охлаждающей жидкости.

Безразмерный параметр  $A$  характеризует влияние скорости вращения диска на тепловой режим

$$A = \frac{\omega R^2}{a}, \quad (70)$$

где  $a$  — температуропроводность металла.

Подставляя выражения (64) и (63) в формулу (62), получаем уравнение для определения  $t_n^*$

$$\int_0^\beta \alpha_1 b_1 \exp(-k_1 \varphi) b' R d\varphi + 2\pi \lambda_n R_{\text{эф}} t_n^* = Q. \quad (71)$$

Решая уравнение, выражаем температуру  $t_n^*$  на поверхности породы в зоне контакта через известные величины

$$t_n^* = \frac{Q}{2\pi \lambda_n R_{\text{эф}} + \frac{\alpha_1 b' R}{k_1} \left[ 1 - \exp(-k_1 \beta) \frac{1 - \exp[k_2(\beta - 2\pi)]}{1 - \exp[-k_1 \beta - k_2(2\pi - \beta)]} \right]}. \quad (72)$$

Определив  $t_n^*$ , можем вычислить тепловые потоки в металл  $Q_1$  и породу  $Q_2$ , а также найти максимальное значение температуры диска в точке  $\varphi = \beta$  и минимальное в точке  $\varphi = 0$

$$t_M^{\max} = t_n^* \frac{1 - \exp(-k_1 \beta)}{1 - \exp[-k_1 \beta - k_2(2\pi - \beta)]}; \quad (73)$$

$$t_M^{\min} = t_M^{\max} \exp[-k_2(2\pi - \beta)]. \quad (74)$$

Вычисления по этим формулам позволяют оценить кинетику тепловых процессов при наличии теплофизических параметров металла и породы, определяемых лабораторными методами.

Приведем пример расчета. Металлический диск шириной  $b' = 5$  мм с коэффициентом теплопроводности  $\lambda_m = 48,85$  Вт/м·°С и радиусом  $R = 15$  мм вращается с угловой частотой  $\omega = 9,42$  с<sup>-1</sup>. Коэффициент температуропроводности металла равен:  $a = 0,05$  м<sup>2</sup>/ч. На протяжении угла  $\beta = 0,2$  диск соприкасается с горной породой, коэффициент теплопроводности которой равен:  $\lambda_n = 3,16$  Вт/м·°С. На протяжении угла  $2\pi - \beta$  поверхность диска охлаждается; это охлаждение характеризуется коэффициентом теплообмена  $\alpha_2 = 150$  Вт/м<sup>2</sup>·°С, который в основном зависит от количества воды, подаваемой при охлаждении.

Коэффициент теплообмена от породы к металлу  $\alpha_1 = 1000 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{С}$ .

Энергоемкость процесса  $8 \text{ Вт/мм}^2$ , что соответствует тепловой мощности, подаваемой в зону контакта диска с горной породой, —  $Q = 120 \text{ Вт}$  (поверхностной энергией диспергированной породы пренебрегаем).

По формулам (69) и (70) находим критерии Био и специфический параметр  $A$

$$Bi_1 = \frac{\alpha_1 R}{\lambda_m} = 0,33; \quad Bi_2 = \frac{\alpha_2 R}{\lambda_m} = 0,05; \quad A = \frac{\omega R^2}{a} = 0,04.$$

Соответственно по формулам (67) и (68) найдем

$$k_1 = \frac{4Bi_1}{A(Bi_1 + 2)} = 14; \quad k_2 = \frac{4Bi_2}{A(Bi_2 + 2)} = 2,5.$$

Принимая  $R_{зф} = 0,005$  \*, вычисляем по формулам (72), (73) и (74) соответственно температуру  $t_n^*$  на поверхности породы в зоне контакта \*\*, максимальное и минимальное значения температуры диска

$$t_n^* = 1165^\circ \text{С}; \quad t_m^{\max} = 1131^\circ \text{С}; \quad t_m^{\min} = 610^\circ \text{С}.$$

Таким образом, температуры в приповерхностном слое породоразрушающего инструмента могут достигать значения температуры фазовых превращений в стали и, в частности, мартенситного превращения с образованием вторичных структур, что и наблюдается на практике [6].

Поскольку в процессе разрушения горных пород при бурении на контакте породоразрушающего инструмента с породой возникают высокие температуры, а время контакта составляет несколько миллисекунд, то значительную роль приобретают охлаждающие свойства промышленных агентов.

Оценка относительной охлаждающей способности промышленных агентов. Охлаждающая способность промышленного агента определяется в основном его теплоемкостью, теплопроводностью, скрытой теплотой парообразования, вязкостью и плотностью.

\* Величина  $R_{зф}$  оценена по площади пятна контакта.

\*\* По данным Л. А. Алексеева и др. [4, 6], температура на контакте рабочей поверхности зубьев шарошечных долот с породой при разрушении турбинным способом достигает  $1000^\circ \text{С}$  и выше.

Относительную охлаждающую способность последующих промывочных жидкостей и воздуха можно экспрессно оценить по формуле, рекомендуемой для расчета теплосъема жидкостями при резании металлов

$$W = 8,7AC\gamma(\theta_k - \theta_n)\sqrt{aBv}, \text{ ккал/ч}, \quad (75)$$

где  $A$  — средняя ширина потока жидкости в м;  $C$  — теплоемкость жидкости в дж/кг·град,  $\gamma$  — удельный вес жидкости в кгс/м<sup>3</sup>;  $\theta_k$  — температура кипения жидкости в °С (для случая, когда температура охлаждаемой поверхности превышает температуру кипения жидкости);  $\theta_n$  — начальная температура жидкости в °С;  $B$  — протяженность контакта жидкости с охлаждаемой поверхностью в направлении движения потока в м;  $v$  — скорость струи в м/мин;  $a$  — коэффициент температуропроводности в м<sup>2</sup>/ч.

Коэффициент температуропроводности  $a = \frac{\lambda}{c\gamma}$ , где  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности в Вт/м·град.

Применительно к работе шарошечного долота для расчета теплосъема промывочной жидкостью в настоящее время пока отсутствуют данные о размерах и направлениях омывающих потоков жидкостей. Однако формула (75) дает возможность оценить относительную (по отношению к охлаждающей способности воды) охлаждающую способность среды. Исходные данные для расчета относительного теплосъема основных промывочных жидкостей и воздуха приведены в табл. 32.

Таблица 32

Среда	Удельный вес, 10 <sup>4</sup> Н/м <sup>3</sup>	Коэффициенты		
		теплопроводности $\lambda$ , Вт/м·град	теплоемкости $C$ , дж/кг·град	температуропроводности $a$ , 10 <sup>-4</sup> м <sup>2</sup> /ч
Вода . . . . .	1,0	0,572	4200	0,515
РНУ (нефть) . . . . .	0,98	0,140	1890	0,286
Глинистый раствор-1 . . . . .	1,16	0,574	3150	0,59
Глинистый раствор-2 . . . . .	1,3	0,644	2604	0,72
Воздух . . . . .	0,0011	0,024	1008	77,4

При расчете относительного теплосъема скорость струи жидких сред  $v_{ж}$  была принята постоянной, а величина скорости струй воздуха  $v_{в}$  — равной  $v_{в} = 15 v_{ж}$  в связи с фактическим соотношением расходов жидкости и воздуха в промышленных условиях. Значения коэффициентов  $\lambda$  и  $C$  для глинистых растворов взяты из работы [100]. Расчет выполнен для условий, когда температура охлаждаемой поверхности  $\theta$  ниже температуры кипения жидкости ( $\theta < \theta_{к}$ ), и для условий, когда  $\theta > \theta_{к}$ . Первый случай относится к отводу средой тепла, аккумулированного телом шарошки, т. е. к снижению ее объемной температуры.

Охлаждающая способность сред, рассчитанная для второго случая, характеризует отвод тепла непосредственно от рабочей поверхности зубца долота.

Полученные величины относительной охлаждающей способности промысловых жидкостей и воздуха приведены в табл. 33.

Таблица 33

Температура охлаждаемой поверхности	Относительная охлаждающая способность сред				
	вода	глинистый раствор-1	глинистый раствор-2	РНО	воздух *
$\theta < \theta_{к}$	1,0	0,94	0,95	0,32	0,015
$\theta > \theta_{к}$	1,0	0,88	0,78	0,72	0,14

\* Для воздуха расчет проведен при  $\theta = 800^{\circ} \text{C}$ .

Из табл. 33 видно, что промысловые жидкости и воздух по мере снижения охлаждающей способности располагаются в ряд: вода, глинистые растворы-1 и 2, РНО, воздух. При низких температурах охлаждаемой поверхности вода и глинистые растворы имеют гораздо лучшую охлаждающую способность, чем РНО и тем более воздух. Следовательно, при прочих равных условиях в данных средах температура корпуса долота и шарошек будет минимальной, а скорость теплоотвода от рабочей поверх-

ности зубца долота в глубь металла — наибольшей. Также выше в среде воды и глинистых растворов будет скорость теплоотвода от рабочей поверхности зубца долота непосредственно в среду, хотя и в меньшей степени, чем в первом случае. Из табл. 33 видно, что величины охлаждающей способности агентов при температуре выше  $\theta_k$  сближаются.

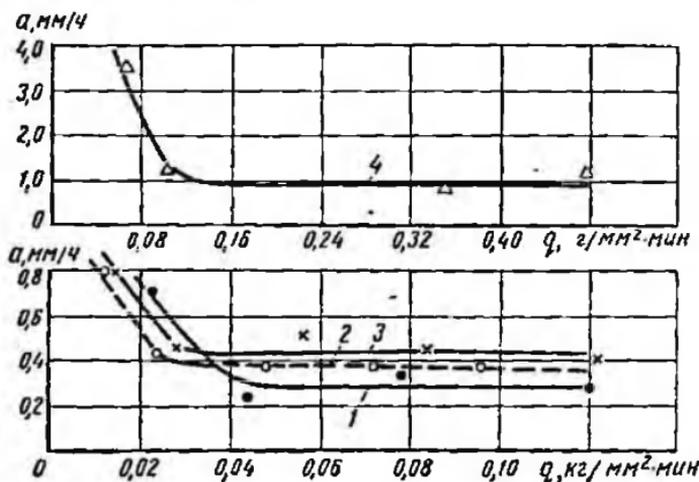


Рис. 66. Зависимость скорости изнашивания стали от удельного расхода промывочных агентов при разрушении доломита (при  $N_{уд} = 3,0$  Вт/мм<sup>2</sup>).  
1 — РНО; 2 — вода; 3 — глинистый раствор; 4 — воздух.

На рис. 66 приведены результаты исследования влияния удельного расхода промывочных жидкостей и воздуха на скорость абразивного изнашивания стали. С изменением расхода охлаждающая способность среды меняется не только вследствие изменения скорости струи, но и расхода, что формулой (75) не учитывается. Однако для сопоставления по охлаждающей способности различных сред это не имеет существенного значения.

Из рис. 66 видно, что влияние увеличения расхода промывочной жидкости на скорость абразивного изнашивания прекращается тем раньше, чем выше ее относительная охлаждающая способность. Величины скорости изнашивания стали при малом удельном расходе промывочных жидкостей также располагаются в соответствии с их

охлаждающей способностью. При значительном удельном расходе решающее влияние на скорость абразивного изнашивания стали, помимо охлаждающей способности, оказывают и другие свойства промывочного агента. В этой области величины скоростей изнашивания располагаются в соответствии с влиянием рассматриваемых агентов на процесс абразивного изнашивания при установившихся условиях теплоотвода.

Влияние удельного расхода воздуха на скорость изнашивания стали аналогично. Однако величина скорости изнашивания стали, как и следовало ожидать, значительно выше, чем при охлаждении жидкими агентами.

Фазовые и структурные превращения в металле. Как было показано выше, анализом теплофизических процессов температуры в породоразрушающем инструменте достигают величин, определяющих фазовые и структурные превращения в стали.

Поскольку разогрев металла сопровождается термическим разупрочнением и отпуском, по степени изменения микротвердости можно косвенно охарактеризовать процесс отвода тепла от рабочей поверхности внутрь образца стали. Для этого из образцов стали, отработанных при постоянной напряженности работы  $N_{уд} = 5,5 \text{ Вт/мм}^2$  при промывке жидкостями и продувке воздухом, были приготовлены микрошлифы и измерена микротвердость в направлении от рабочей поверхности вглубь.

Образцы были отработаны на доломите при высоких удельных расходах промывочных жидкостей и воздуха, чтобы исключить влияние возможных колебаний величины расхода на скорость абразивного изнашивания стали. Результаты измерений представлены на рис. 67.

На микрошлифах (при всех исследованных промывочных жидкостях и воздухе) наблюдается «белая фаза», прилегающая к рабочей поверхности образца стали и характеризующаяся повышенной микротвердостью (рис. 67). Из рис. 67 видно, что толщина «белой фазы» не превышает 0,05—0,06 мм. Под слоем «белой фазы» располагается отпущенный слой, характеризующийся пониженной микротвердостью. Аналогичное распределение микротвердости наблюдается и в поверхностных слоях зубьев долот.

Из рис. 67 видно, что интенсивному термическому воздействию при охлаждении жидкими агентами подвержена

сравнительно небольшая по глубине (до 0,40 мм) часть поверхностного слоя металла. В момент взаимодействия металлического образца с горной породой основной тепловой поток направлен в глубь металла вследствие высокого градиента температур при промывке жидкостями.

При выходе зубца долота из контакта с горной породой рабочая поверхность его резко охлаждается и тепловой поток раздваивается. Часть тепла идет в глубь образца металла и рассеивается его боковыми гранями в жидкость,

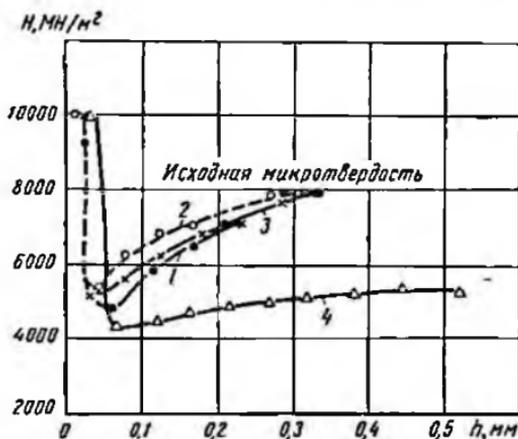


Рис. 67. Влияние различных промывочных жидкостей и воздуха на распределение микротвердости, в области, прилегающей к рабочей поверхности стали. Обозначения те же, что на рис. 66.

а большая часть тепла отводится в жидкость непосредственно через рабочую поверхность стали. При достаточно высоком удельном расходе промывочных жидкостей влияние их охлаждающей способности на распределение микротвердости в поверхностных слоях металла незначительно.

При продувке воздухом наблюдается более интенсивный разогрев металла образца и отпуск его на значительную глубину (рис. 67). Очевидно, из-за худшей охлаждающей способности воздуха тепло с каждым актом взаимодействия аккумулируется образцом стали. Объемная температура образца достигает значительной величины, что приводит к возникновению в контакте металл — горная порода в процессе взаимодействия наиболее высокой температуры при меньшей, чем при охлаждении жидкими агентами, скорости теплоотвода в глубь металла. Последнее вызывает большее термическое разупрочнение поверхностных слоев металла и, как следствие, приводит к повышенной скорости изнашивания.

При продувке воздухом значительно большая часть тепла, чем при промывке жидкостями, отводится в глубь горной породы, создавая дополнительные термические напряжения и способствуя более интенсивному разрушению горной породы. Очевидно, это и является одной из причин более высокой скорости разрушения пород при продувке воздухом, чем при промывке жидкостями.

Однако высокая интенсивность изнашивания породоразрушающего инструмента при разрушении средне- и высокоабразивных горных пород делает нецелесообразным применение сред с низкой охлаждающей способностью в условиях турбинного бурения. Повышение охлаждающей способности промывочных и продувочных агентов является одним из путей увеличения долговечности породоразрушающего инструмента, что особенно важно в связи с ростом глубин бурения.

Смазочная способность сред. Наряду с охлаждающей способностью на работоспособность породоразрушающего инструмента существенное влияние оказывает смазочная способность сред. Для более четкого представления механизма влияния смазочной способности среды на износ двух взаимодействующих тел необходимо рассматривать образующееся в процессе взаимодействия «третье тело» [78], представляющее собой совокупность поверхностной пленки металла и граничного слоя жидкости.

Состав и свойства поверхностных пленок металла определяются составом и свойствами металла и среды и условиями их взаимодействия.

Известно, что поверхность металла всегда покрыта пленкой окислов. Отмечается, что на поверхности металла практически мгновенно образуется тонкая пленка окислов толщиной 10—14 Å. По данным И. В. Гребенщикова, за 0,05 с на поверхности металла образуется пленка окислов толщиной 14 Å. Особенно активны металлы к химическому взаимодействию с увеличением температуры и при пластическом деформировании [53]. Характерной особенностью для всех подобных пленок (окисных, сульфидных и др.), образующихся на поверхности металла, является их повышенная хрупкость и ослабленная связь с ювенильной поверхностью металла.

Для установления химического состава поверхностных слоев металла нами был выполнен рентгеноструктурный анализ рабочих поверхностей отработанных стальных

образцов. Возможности рентгеноструктурного анализа по установлению химического состава ограничены, поскольку этим методом анализа можно установить химический состав лишь кристаллических фаз. При разрушении различных горных пород в различных средах, включая и такие химически активные добавки, как ДФ-11 и хлорэф-40, на рабочей поверхности стального образца каких-либо химических соединений, помимо окислов, не наблюдается. Межфазные расстояния кристаллов образующихся при этом фаз, определенные по рентгенограммам, соответствуют оксидам хрома ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CrO}_3$ ) и железа ( $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Интенсивность дифракционных волн от окислов хрома очень слабая, что указывает на их малое количество.

Теоретические основы и экспериментальные результаты окисления металлов и сплавов подробно изложены в работе [128]. Из этой работы, в частности, следует, что закись железа ( $\text{FeO}$ ) может образовываться лишь при температурах выше  $570^\circ\text{C}$ . Ниже этой температуры она может существовать только в метастабильном состоянии и при обычной температуре стремится к распаду на железо и магнетит ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ). В условиях быстрого охлаждения образующаяся окалина независимо от ее состава может скалываться, поскольку коэффициент расширения ее отличается от такового для металла-подложки. Очевидно, вероятность скалывания окисла в условиях деформирования увеличивается.

В зависимости от вида промывочной жидкости и внешних условий на рабочей поверхности породоразрушающего инструмента и горной породы образуются граничные слои жидкости, обладающие определенными свойствами. Полярные молекулы промывочной жидкости, адсорбируясь на поверхностях твердых тел, кроме понижения их свободной поверхностной энергии, а следовательно, и прочности (эффект Ребиндера) так же, как и неполярные молекулы, образуют граничные слои, значительно снижающие силу трения.

При определенных условиях (температуре, давлении) граничный слой жидкости может обладать особыми физическими свойствами, отличными от ее свойств в большем объеме — повышенной вязкостью, способностью выдерживать значительные нормальные давления, не выходя за предел упругости и др. Опыты с органическими кисло-

тамп (миристиновой и стеариновой), нанесенными на поверхность стали, показали, что при определенных температуре и давлении существует критическая толщина слоя, ниже которой скольжения между молекулярными рядами не будет.

В настоящее время пока еще нет общепринятой терминологии в области трения, износа и смазки. Некоторые исследователи под смазочной способностью понимают способность среды понижать износ взаимодействующих тел [22, 23, 179]. В частности, в работе [22] за критерий смазочной способности глицистых растворов предлагается принимать величину предельной нагрузки до заедания, определяемой на машине МАСТ-1 (по методу кольца и шара). Однако с этим трудно согласиться, поскольку нагрузка до заедания характеризует в определенной степени прочность граничного слоя жидкости, а не смазочную способность. По мнению автора работы [175], смазочная способность «является поверхностным свойством жидкостей, благодаря которому они снижают сопротивление взаимному сдвигу контактирующих твердых тел и одновременно препятствуют сближению этих тел». В работе подчеркивается, что жидкость может обладать смазочной способностью только в том случае, если проявляются оба эффекта одновременно.

Учитывая исследования этих авторов, а также наши наблюдения за смазочной способностью сред и исходя из ее физического смысла, под смазочной способностью следует понимать способность среды создавать «третье тело» с низким сопротивлением сдвигу и высоким сопротивлением сжатию под действием соответственно касательных и нормальных напряжений. Свойства граничных слоев жидкостей и поверхностных пленок металлов, оказывающих влияние друг на друга, и определяют смазочную способность сред в конкретных условиях.

Основной характеристикой смазочной способности среды в этом смысле является коэффициент трения взаимодействующей пары в исследуемой среде. Если учесть при этом, что знание величин коэффициентов трения крайне необходимо для инженерных расчетов, то становится понятным повышенный интерес многих исследователей к изучению коэффициентов трения взаимодействующих тел.

Данных о величинах коэффициентов трения применительно к работе породоразрушающего инструмента крайне

мало. Величины коэффициентов трения пар сталь — горная порода, полученные в различных условиях, приводятся в работах [135, 193]. Результаты наших наблюдений показали, что величина коэффициента трения зависит в основном от напряженности работы ( $N_{уд}$ ), типа горной породы (ее минералогического состава и структуры) и среды, в которой взаимодействуют трущиеся тела. Величины коэффициентов трения, полученные нами для пар закаленная сталь — горная порода и твердый сплав — горная порода в различных средах и для различных пород, изменяются в пределах 0,04—0,45 для стали и 0,11—0,45 для твердого сплава.

На рис. 68 приведены зависимости коэффициента трения пары сталь — доломит в различных средах от напряженности работы для условий высокооборотного режима реализации энергии. Величины коэффициентов трения располагаются в соответствии со смазочной способностью исследованных сред.

Из рис. 68 видно, что коэффициент трения пары сталь — доломит наименьший при промывке РНО и ЭКР с добавками хлорэф-40 и ДФ-11. Очень низкий коэффициент трения и при промывке ЭКР. Наибольший коэффициент трения наблюдается при промывке водой. Коэффициент трения при промывке ЭГР и глинистым раствором меньше, чем при промывке водой, но больше, чем при продувке воздухом.

Добавки в воду поверхностно-активных веществ снижают коэффициент трения пары сталь — доломит. Особенно активно при этом ионогенное ПАВ — сульфонатриевая соль. Значительно снижается коэффициент трения и при совместной добавке СНС и ОП-10.

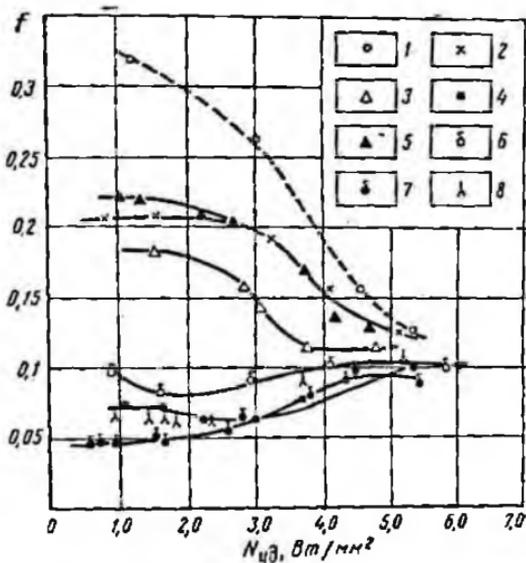
Наблюдаемое расположение величин коэффициентов трения в различных средах связано со свойствами «третьего тела». При разрушении горной породы с промывкой жидкостями условия образования поверхностей окисной пленки металла (условия доступа кислорода к ювенильной поверхности) сопоставимы и основное влияние на коэффициент трения оказывают свойства граничного слоя жидкости. Естественно, что данное положение справедливо при отсутствии химического взаимодействия между жидкостью и металлом. Из рис. 68 видно, что граничные слои, образованные РНО и ЭКР с добавками и без них, обладают лучшим сочетанием механических свойств (со-

противление сжатию и сдвигу), чем при промывке водой и глинистыми растворами.

При продувке воздухом, по принятой нами терминологии, «третье тело» состоит лишь из поверхностной окисной пленки металла. Из условий опыта можно предположить, что толщина ее значительно больше, чем при промывке жидкостями. При этом известно, что сопротивление сдвигу

Рис. 68. Зависимость коэффициента трения от напряженности работы для пары сталь — доломит в различных средах.

1 — вода; 2 — глинистый раствор; 3 — воздух; 4 — РНО; 5 — ЭКР; 6 — ЭКР; 7 — ЭКР + хлорф-40; 8 — ЭКР + ДФ-11.



подобных пленок с увеличением их толщины, как правило, уменьшается [188]. Из рис. 68 видно, что коэффициент трения, а следовательно, и сопротивление сдвигу «третьего тела» при продувке воздухом меньше, чем при промывке водой и глинистым раствором, и больше, чем при промывке другими жидкостями. Вместе с тем сопротивление сдвигу поверхностных слоев металла в значительной степени определяется и их термическим разупрочнением. В силу низкой охлаждающей способности воздуха термическое разупрочнение поверхностных слоев стали значительнее, чем при промывке жидкостями и, следовательно, коэффициент трения при продувке воздухом снижается, видимо, и по этой причине.

В области, предшествующей второму скачку разрушения породы, смазочная способность в зависимости от вида среды изменяется в довольно широких пределах.

С развитием объемного разрушения горной породы под влиянием усиливающегося воздействия температуры и шероховатости происходит более интенсивное разрушение «третьего тела», что ведет к сближению коэффициентов трения.

Среда с лучшей смазочной способностью особенно с более высоким сопротивлением «третьего тела» сжатию оказывает большее защитное действие по отношению к ювенильной поверхности металла. Это означает, что при реализации одинаковой удельной мощности скорость изнашивания породоразрушающего инструмента будет меньше при более низких величинах коэффициентов трения в условиях более высокой прочности «третьего тела». При этом в известном выражении мощности величина  $P$  возрастает во столько же раз, во сколько уменьшается  $f$ . Увеличение же нагрузки, передаваемой через породоразрушающий инструмент и граничный слой жидкости на горную породу, в свою очередь вызывает рост скорости разрушения горной породы. Применительно к промышленному бурению снижение коэффициента трения позволит при сохранении забойной мощности двигателя увеличить нагрузку на долото и тем самым повысить скорость разрушения горной породы. Данное положение хорошо подтверждается результатами исследований (рис. 69).

На рис. 69 приведены зависимости скорости абразивного изнашивания стали от удельной мощности при разрушении доломита и известняка при промывке водой и РНО. Из рис. 69 видно, что при разрушении малоабразивного известняка скорость изнашивания стали при промывке РНО меньше, чем при промывке водой во всем интервале изменения удельной мощности. Низкое сопротивление сдвигу и достаточно высокая прочность «третьего тела» при использовании РНО обусловили в данном случае лучшую защиту рабочей поверхности стали от износа, чем при промывке водой. При разрушении более абразивной горной породы — доломита меньшая скорость износа стали при промывке РНО наблюдается лишь в области напряженности  $N_{уд} < 3,2$  Вт/мм<sup>2</sup>. В области  $N_{уд} > 3,2$  Вт/мм<sup>2</sup> наступает интенсивное разрушение граничного слоя РНО и на распределение скоростей абразивного изнашивания стали решающее влияние оказывают другие свойства промывочных жидкостей. В частности, большая скорость изнашивания стали при промывке РНО в области  $N_{уд} > 3,2$  Вт/мм<sup>2</sup>

может быть связана с его худшей охлаждающей способностью, чем у воды.

Таким образом, улучшение смазочной способности среды может существенно повысить долговечность и производительность породоразрушающего инструмента в определенной области энергетической загрузки.

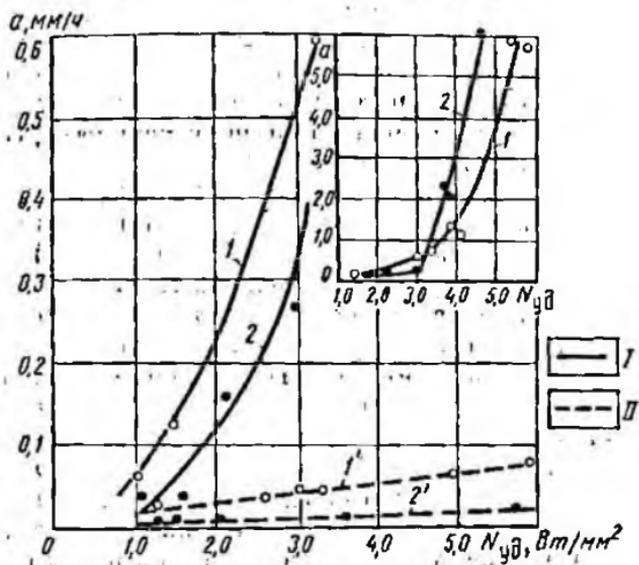


Рис. 69. Зависимость скорости изнашивания стали от напряженности работы при разрушении доломита и известняка.

1, 1' — вода; 2, 2' — РНО; I — доломит; II — известняк.

Влияние шероховатости и характера разрушения горных пород на их абразивность в присутствии сред. Исследования показывают, что характер и механизм абразивного изнашивания стали и твердого сплава при изменении напряженности в значительной степени определяются характером разрушения горных пород. Особенности абразивного изнашивания стали в области, предшествующей первому скачку разрушения горных пород, и при его наступлении при промывке водой описаны выше. Наблюдения показали, что для этой области энергий характерно постепенное уменьшение шероховатости поверхности стали по сравнению с исходной, т. е. металл и горная порода взаимно прирабатываются. [Никаких

структурных или фазовых изменений в подповерхностных слоях металлического образца не наблюдалось. Износ стали при этом определяется в основном изнашиванием микровыступов рабочей поверхности.

В переходной области от первого скачка разрушения ко второму концентрация реализуемой энергии на рабочей поверхности стального образца становится достаточной для термического разупрочнения подповерхностных слоев металла. На рабочей поверхности стального образца появляются надрывы и вмятины, которые по мере увеличения напряженности при определенных условиях развиваются в сетку поверхностных трещин, о чем свидетельствует выполненный нами металлографический анализ. Однако в подобных условиях, но с промывкой РНО, ЭКР и продувкой воздухом трещины на рабочей поверхности стального образца не наблюдались.

Образование трещин на поверхности стального образца в основном определяется механическими свойствами поверхностного слоя металла, величиной нормальных и касательных напряжений, возникающих в результате реализации энергии, а также величиной температурных напряжений. В условиях циклического взаимодействия образца металла и горной породы развитие трещин наступает при меньших величинах напряжений. Отсутствие трещин на рабочей поверхности стали при промывке РНО и ЭКР и продувке воздухом и появление трещин при промывке другими исследованными жидкостями, очевидно, связано с различной величиной температурных напряжений. Температурные напряжения в данных условиях определяются температурой нагрева и скоростью охлаждения поверхностных слоев металла, связанных с охлаждающей способностью сред.

С характером абразивного изнашивания породоразрушающего инструмента тесно связано изменение рельефа рабочей поверхности стали при изменении напряженности работы. На рис. 70 приведены профпюграммы рабочей поверхности стального образца, снятые после разрушения доломита при различной напряженности с промывкой водой. Крупные неровности, обведенные на рисунке пунктиром, будем условно называть макрорельефом. Из этого же рисунка видно, что несмотря на работу породоразрушающего инструмента каждый раз по обновленной поверхности горной породы при увеличении  $N_{уд}$  макро-

рельеф рабочей поверхности стали изменился незначительно в сторону выравнивания. Наблюдается также и некоторое сглаживание микрорельефа.

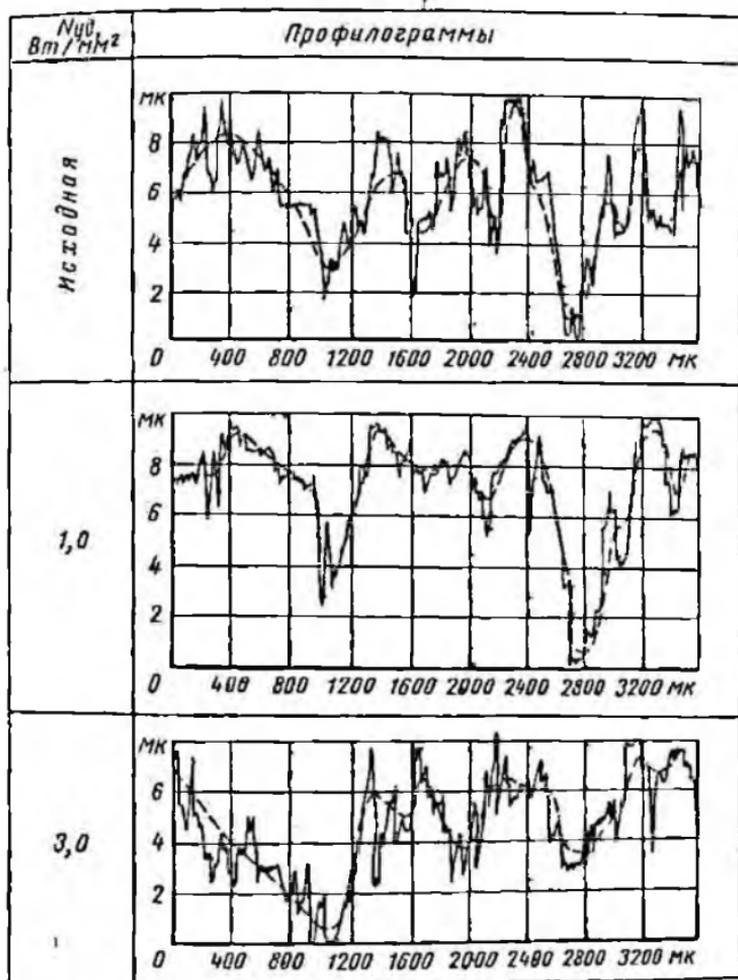


Рис. 70. Изменение шероховатости рабочей поверхности стального образца с изменением напряженности при разрушении деломита с промывкой водой.

Таким образом, механизм абразивного изнашивания породоразрушающего инструмента в первой области изнашивания во всех случаях характеризуется образованием

и отделением поверхностных пленок металла при нагреве и передеформировании. По-видимому, таким характером износа и обусловлено незначительное изменение рельефа рабочей поверхности при промывке водой.

При промывке глинистым раствором характер изменения рельефа поверхности имеет отличительные особенности.

В данном случае при малых  $N_{уд}$  наблюдается увеличение шероховатости поверхности по сравнению с исходной, что связано, вероятно, с участием глинистых частиц в процессе изнашивания стали, поскольку интенсивность разрушения горной породы при промывке водой и глинистым раствором в этой области энергией практически одинакова. С увеличением энергии шероховатость рабочей поверхности стали при промывке глинистым раствором снижается, в то время как при промывке водой шероховатость резко возрастает (рис. 71).

Хотя шероховатость рабочей поверхности стали при промывке глинистым раствором меньше, скорость изнашивания стали при этом остается более высокой, чем при промывке водой. Следовательно, при промывке глинистым раствором за один акт взаимодействия с рабочей поверхностью стального образца изнашивается слой большей толщины (средней), чем при промывке водой. Но поскольку условия взаимодействия при промывке водой и глинистым раствором равны, увеличение толщины изнашиваемого слоя стали возможно только при изнашивании более «мягкой» рабочей поверхности.

Очевидно, в результате худшей охлаждающей способности глинистого раствора поверхностные слои стали нагреваются до более высоких температур и, следовательно, подвергаются более высокому отпуску. Вместе с этим снижение шероховатости рабочей поверхности стали при промывке глинистым раствором указывает на эффект некоторого «сглаживания» острых выступов на разрушаемой поверхности горных пород. «Сглаживание» особенно эффективно при разрушении высокоабразивных горных пород — песчаников. Уменьшение шероховатости поверхности стали в данном случае (рис. 72) сопровождается лишь незначительным увеличением скорости изнашивания стали по сравнению с промывкой водой и существенным уменьшением по сравнению с промывкой глинистым раствором с малым содержанием глинистого порошка. При

этом глинистый раствор-1 обладает лучшей охлаждающей способностью, чем глинистый раствор-2.  
 При промывке РНО и ЭКР и продувке воздухом характер изменения рельефа рабочей поверхности стали в целом

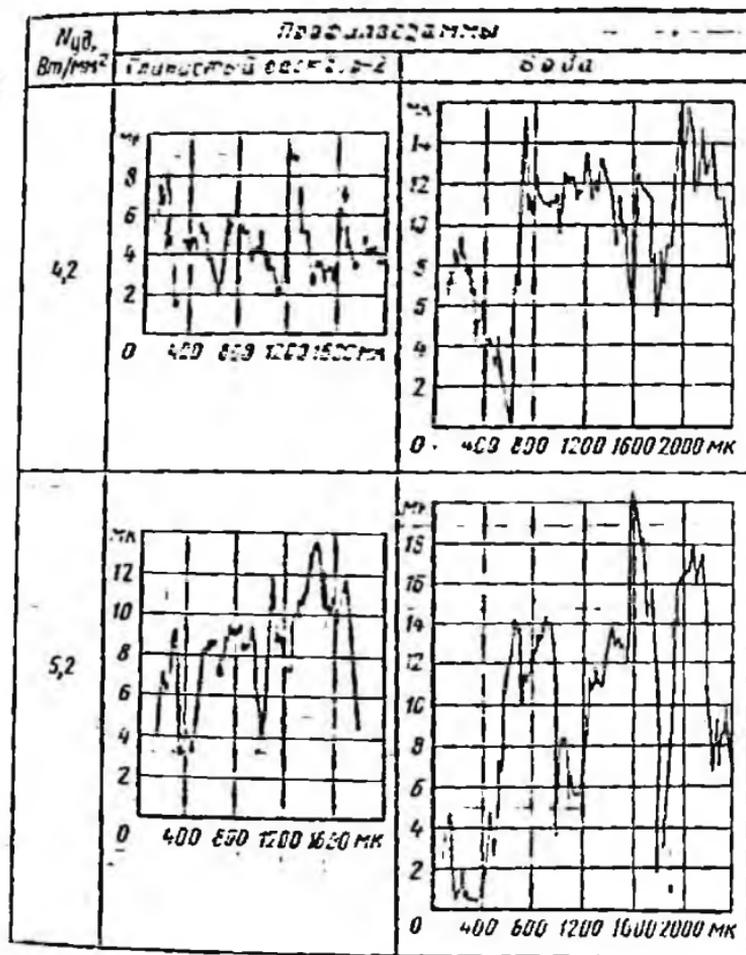


Рис. 71. Изменение шероховатости рабочей поверхности стального образца с изменением напряженности при разрушении доломита.

остается таким же, как и при промывке водой, т. е. в начальной области рельеф меняется незначительно, а в области высоких энергий шероховатость резко возрастает.

Однако резкое увеличение шероховатости в этих средах наступает при меньших энергиях. Так, при промывке

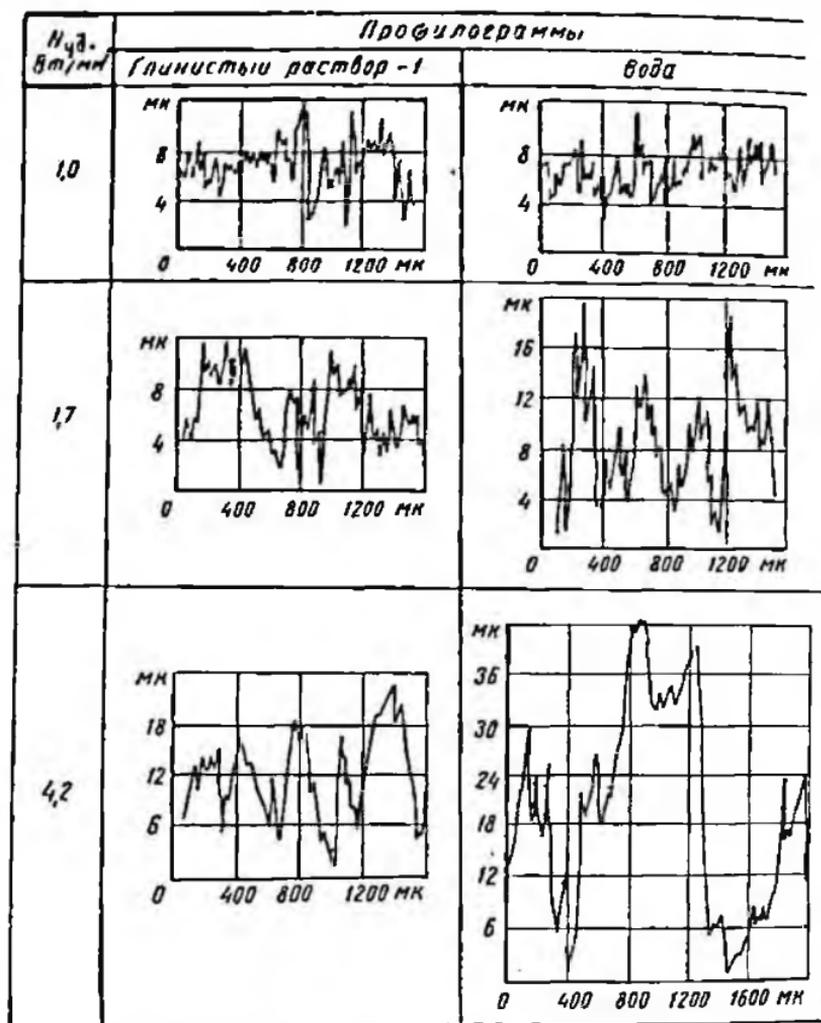


Рис. 72. Изменение шероховатости рабочей поверхности стального образца с изменением напряженности при разрушении песчанника.

ЭКР шероховатость рабочей поверхности стали резко возросла уже при  $N_{уд} = 3$  Вт/мм<sup>2</sup>, а при продувке воздухом — при  $N_{уд} = 2$  Вт/мм<sup>2</sup>.

В области установившегося объемного разрушения горных пород механизм изнашивания породообразующего инструмента становится более сложным. При достижении второго скачка разрушения увеличение шероховатости горных пород приводит к росту концентрации реализуемой энергии на выступах поверхности породы и, как правило, к росту шероховатости и скорости изнашивания рабочей поверхности стали. С другой стороны, при объемном разрушении горной породы увеличивается область (глубина) реализации энергии, т. е. все большая часть энергии реализуется не на контакте рабочей поверхности стали и горной породы, а внутри горной породы, на поверхностях сдвигообразований [131]. Этот процесс приводит к снижению скорости изнашивания стали. В условиях термического разупрочнения поверхностных слоев стали с ростом реализуемой энергии при объемном разрушении породы решающее влияние на скорость изнашивания стали оказывает шероховатость горной породы, в связи с чем зависимость  $a = f(N_{уд})$  всегда имеет возрастающий характер.

Увеличение реализуемой энергии при объемном разрушении горных пород в условиях циклического нагрева и охлаждения приводит к росту ранее образовавшихся трещин, а при определенных условиях — к появлению в поверхностных слоях рабочей поверхности стали «белой фазы». Появление «белой фазы» при высокооборотном режиме реализации энергии наблюдалось при промывке всеми исследованными жидкостями и продувке воздухом при разрушении различных горных пород. Появление «белой фазы» при низкооборотном режиме также возможно, но при разрушении горных пород, интенсивность разрушения которых мала.

Исследование микрошлифов образцов стали, обработанных на доломите в различных средах при высокооборотном режиме реализации энергии при одинаковых  $N_{уд}$ , показало, что поверхностный слой — «белая фаза», обладающий повышенной микротвердостью, расположен на более «мягком» подстилающем слое металла. Микротвердость «белой фазы», измеренная с помощью ПМТ-3, порядка  $10\,000\text{ МН/м}^2$ , а подстилающего ее слоя — порядка  $4000\text{—}5000\text{ МН/м}^2$ . Микротвердость исходной поверхности стали после термообработки была около  $8000\text{ МН/м}^2$ .

Независимо от природы возникновения «белой фазы» появление ее на рабочей поверхности зубьев долот существенно влияет на скорость изнашивания вооружения [5]. Высокоскоростной нагрев и охлаждение поверхностных слоев металла вызывают большие внутренние напряжения, которые обуславливают повышенную хрупкость «белой фазы». Многократное деформирование хрупкой «белой фазы» наряду с динамическим приложением нагрузки приводят к ее выкрашиванию и, как следствие, — к увеличению скорости изнашивания стали. Вместе с этим в момент взаимодействия зубца долота с горной породой при реализации высоких энергий в результате высокотемпературного разогрева поверхностные слои, включая и «белую фазу», подвергаются высокому отпуску и легко изнашиваются. При выходе зубца долота из контакта вновь образуется хрупкая «белая фаза» и мягкий подповерхностный отпущенный слой. В условиях низкооборотного режима реализации энергии при разрушении хемогенных пород образования «белой фазы» не наблюдалось.

Введение различных добавок (КМЦ, нефти, ПАВ и др.) в промывочные жидкости не оказало заметного влияния на описанный выше механизм изнашивания стали при разрушении горных пород в различных областях энергетической загрузки.

Механизм абразивного изнашивания твердого сплава ВК15 в различных средах в первой области изнашивания обуславливается в основном истиранием, а во второй — интенсивностью микровыколов частиц карбида вольфрама.

Экспериментальные данные, изложенные выше, позволяют сделать следующие основные выводы.

1. Применение глинистых растворов в качестве промывочных жидкостей вместо воды приводит к существенному увеличению скорости изнашивания стали. Причем увеличение скорости изнашивания тем больше, чем больше удельный вес и вязкость глинистого раствора, особенно при высокой напряженности работы породоразрушающего инструмента.

2. Применение эмульсионных растворов вместо глинистых в интервалах, где использование воды, а также воды с добавками ПАВ невозможно, позволяет существенно снизить скорость изнашивания стали. Однако при применении этих промывочных жидкостей целесообразно

ограничить напряженность работы вооружения долот средней областью ( $A_{уд} < 3 \text{ Вт/мм}^2$ ).

3. Перспективным с точки зрения повышения производительности породоразрушающего инструмента является применение серо-, хлор- и фосфорорганических соединений в качестве добавок в эмульсионные растворы.

4. Добавки в воду неионогенного ПАВ ОП-10 или неионогенного СНС практически не оказывают влияния на относительный износ стали и горной породы, однако их совместная добавка в области малой и средней напряженности работы значительно снижает относительный износ.

5. Общие закономерности скорости изнашивания твердого сплава ВК15 в различных средах аналогичны соответствующим закономерностям изнашивания стали. При разрушении хемогенных пород скорость изнашивания твердого сплава весьма мала и не может служить причиной выхода вооружения из строя. Выбор промывочной жидкости в этом случае обуславливается эффективностью разрушения горной породы и долговечностью опоры долота:

При разрушении песчанников изнашивание вооружения долота, армированного твердым сплавом, может служить причиной выхода его из строя. Наиболее благоприятны условия для работы твердосплавного вооружения создаются при промывке водой и глинистым раствором.

6. Исследования термического контактного сопротивления между металлом и породой и выполненный оценочный расчет температуры рабочей поверхности породоразрушающего инструмента показывают, что температуры, возникающие в приповерхностном слое металла, могут достигать величин, соответствующих фазовым превращениям с образованием вторичных структур, а перераспределение тепловых потоков зависит от величины контактной нагрузки (напряженности работы):

7. Оценка охлаждающей и смазывающей способности основной группы сред, используемых в бурении, показала, что лучшей охлаждающей способностью обладает вода; а худшей — РНО и воздух. Лучшей смазывающей способностью обладают РНО и ЭКР с добавками хлор-, фосфор- и сероорганических соединений, худшей — глинистый раствор, ЭГР и вода.

8. Из основной группы сред, используемых в бурении (вода, глинистые растворы, РНО, воздух), применительно

к условиям турбинного способа бурения наиболее благоприятные условия для работы стального породоразрушающего инструмента создаются при промывке РНО. Однако с ростом абразивности горных пород положительное влияние РНО на относительный износ стали уменьшается.

9. Применительно к условиям роторного способа бурения наиболее эффективно применение продувки воздухом. Применительно к бурению электробурами продувка воздухом эффективна лишь при разрушении малоабразивных пород.

## КЛАССИФИКАЦИЯ ОСАДОЧНЫХ ГОРНЫХ ПОРОД ПО АБРАЗИВНОСТИ

Шкалы абразивности горных пород, полученные разными исследователями и приведенные ранее (см. табл. 5, 13, 14) показывают, что последовательность в абразивной способности различных горных пород, за небольшим исключением, сохраняется, несмотря на разные условия и методы ее определения. Что же касается «коэффициентов абразивности», на основании которых построены эти шкалы, то их величины практически несопоставимы, так как они зависят от многих факторов, в том числе и от методов их определения.

В связи с этим приведенные выше шкалы могут служить лишь пособием для оценки относительной абразивности обрабатываемых и разрушаемых горных пород и в некоторых конкретных случаях для нормирования горных работ.

Анализ выполненных исследований показывает, что создать классификацию горных пород по абразивности в абсолютных величинах невозможно. Поэтому на основании полученных общих закономерностей изнашивания различных металлов и сплавов при трении (в процессе разрушения) о горные породы разного минералогического состава и строения можно их классифицировать лишь по относительной абразивности.

Полученные нами и рассмотренные ранее зависимости скорости абразивного изнашивания закаленной стали и твердого сплава от напряженности работы для разных пород и эмпирическая формула (52), описывающая эти зависимости, позволяют перейти непосредственно к оценке абразивности горных пород.

Скорость абразивного изнашивания в определенных условиях является наиболее наглядной и удобной характеристикой относительной абразивности горных пород и в каждом конкретном случае может быть определена, если известны параметры уравнения (52).

Ниже рассматриваются результаты обобщения экспериментальных исследований по оценке скорости абразивного изнашивания стали и абразивности горных пород применительно к работе шарошечных долот с промывкой водой, поскольку основной объем бурения скважин на нефть и газ осуществляется с промывкой водой или растворами на водной основе.

### Статистический анализ результатов изучения абразивности терригенных горных пород

В геологических разрезах, слагающих нефтяные месторождения, значительную часть занимают терригенные породы. Так, в разрезах нефтяных месторождений Урало-Поволжья они составляют одну треть, а в разрезах нефтяных месторождений Кавказа, Сибири, Казахстана, Украины и некоторых других терригенные породы составляют более половины разреза.

Основными представителями этой группы пород являются песчаники, алевролиты, аргиллиты, глины, мергели и сланцы разного состава и строения. Как правило, эти породы содержат обломки кварца и некоторых других твердых минералов, что обуславливает их высокую абразивную способность по сравнению с породами сульфатными и карбонатными. Испытанные песчаники и алевролиты, как правило, были разнородные, преимущественно с окатанными зернами кварца, кремня и полевых шпатов. Размер зерна (за небольшим исключением) не превышал 0,5 мм. Песчаники имели в основном карбонатно-глинистый, карбонатно-сульфатный цемент базального и контактного типов. Исследования проводились в диапазоне изменения  $N_{уд}$  от 0,5 до 6,0 Вт/мм<sup>2</sup>, что соответствует фактической напряженности работы вооружения долот при современной технологии бурения.

С учетом некоторой сложности определения абразивности горных пород на специальных установках, описанных ранее, и значительного объема экспериментальной работы для характеристики геологических разрезов

в целом, большой интерес представляло изыскание возможности оценки абразивности по основным показателям характеризующим строение и свойства пород. В качестве полиции, характеризующих абразивность горных пород, приняты коэффициенты  $A$  и  $B$  уравнения (52).

Предварительный корреляционный анализ показал, что на полиции коэффициентов  $A$  и  $B$  существенное влияние оказывают следующие параметры, характеризующие строение и свойства пород:

- 1) размер зерен и обломков, слагающих горную породу —  $d$ , мм;
- 2) содержание обломков и зерен твердых минералов (кварца, кремния и др.) —  $c$ , %;
- 3) абсолютная пористость горных пород —  $m$ , %;
- 4) предел текучести породы по Л. А. Шрейнеру —  $P_0$ , кгс/мм<sup>2</sup>.

Размер зерен горных пород варьирует в очень широких пределах и какого-либо определенного мнения о том, что принимать за характеристику структуры при панашивании, нет. Очевидно, в качестве такой характеристики целесообразно принять параметры распределения зерен, т. е. использовать статистическую характеристику.

Для установления закона распределения и выбора характеристики был изучен фракционный состав 21 образца терригенных горных пород, взятых из разрезов месторождений Казахстана, Тюменской и Пермской областей. Образцы пород были растерты и подвергнуты ситовому анализу. Наиболее характерные образцы описаны в табл. 34. Гипотеза о нормальности распределения была проверена вычислением критерия Пирсона [143]. Результаты вычислений для первых четырех образцов приведены ниже.

№ образца . . . . .	1	2	3	4
Расчетное значение критерия Пирсона				
$\chi^2$ . . . . .	13,9	18,5	7,6	2,8
Критическое значение критерия Пирсона $\chi^2_{0,95}$ . . . . .	7,8	9,5	9,5	7,8

Из приведенных данных видно, что гипотеза о нормальности распределения не всегда верна. Тем не менее, для решения данной задачи принимается, что распределение размеров зерен следует нормальному закону, а основной характеристикой структуры является средний размер зерна.

Таблица 34

№ об- разца	Район, площадь, интервал глубин, м	Краткое описание
1	Тюмень, Тобольская, 1684—1694	Песчаник полимиктовый с известковым цементом, содержание кварца около 25%
2	Пермь, Ольховская, 1770—1775	Песчаник кварцевый с известковым цементом, зерна кварца составляют около 60% породы
3	Тюмень, Тайлаковская, 2165—2179	Песчаник преимущественно кварцевый с карбонатно-глинистым цементом, зерна кварца составляют около 30% породы
4	Тюмень, Миасская, 1391—1405	Песчаник преимущественно кварцевый с глинистым контактово-поровым цементом, зерна кварца составляют около 35% породы
5	Казахстан. Северно-Локтыбайская, 3087—3089	Аргиллит известковистый; алевролитовый материал представлен в основном зернами кварца и составляет не более 20% породы
6	Казахстан, Ащинская, 2039—2045	Алевролит полимиктовый; цемент сульфатный порового типа, зерна кварца составляют около 25% породы
7	Тюмень, Назаровская, 733—738	Песчано-алевролитовый известняк, содержащий 20% зерен кварца
8	Пермь, Ольховская, 1905—1909	Песчаник кварцевый с контактным цементом, зерна кварца составляют до 75% породы

Ситовой анализ твердых обломочных горных пород связан с практически непреодолимыми трудностями из-за дробления зерен при растирании. Совместный анализ гистограмм и петрографического описания шлифов горных пород показал, что эти трудности преодолимы, так как можно принять средний диаметр зерен обломочных горных пород приблизительно равным половине диаметра наиболее крупных зерен, принимающих существенное участие в составе горной породы (5—10% по весу). Проведенные измерения для 21 исследуемого образца показали, что разница определений двумя методами не превышает 15%.

Содержание кварца и твердых обломков при петрографическом описании шлифов оценивалось в %.

Так как большинство терригенных пород, по классификации Л. А. Шрейнера [192], относится к категории не дающих хрупкого разрушения, то в качестве основной характеристики был принят предел текучести  $p_0$ , который определялся на установке УМГП-3.

Абсолютная пористость образцов горных пород устанавливалась объемным способом [107].

Для определения уравнений регрессии величин  $p_0$ ,  $d$ ,  $c$  и  $m$  на коэффициенты  $A$  и  $B$  были использованы данные 51 образца терригенных пород. Кроме этого, все данные по характеру влияния размера зерна на коэффициент  $A$  разделены на две группы: I группа —  $d < 0,10$  мм; II группа —  $d > 0,10$  мм. Затем по группам был проведен корреляционный анализ на ЭВМ по стандартной программе.

В табл. 35 приведены значения парных и общих коэффициентов корреляции.

Таблица 35

Анализируемый признак	Коэффициент корреляции с факторами				Общий коэффициент корреляции
	$d$	$p_0$	$c$	$m$	
$A_I$	0,61	-0,36	0,25	0,43	0,82
$B_I$	0,63	0,36	0,01	-0,58	0,81
$A_{II}$	0,50	-0,28	0,62	0,35	0,82
$B_{II}$	0,55	0,44	0,11	-0,66	0,75

Из табл. 35 видно, что рассматриваемые факторы оказывают решающее влияние на величины коэффициентов уравнения (52). Тогда выражение для определения скорости изнашивания стали имеет вид:

для I группы пород ( $d < 0,1$  мм)

$$a = (16,71d + 0,0003p_0 + 0,010c + 0,046m - 0,91) N_{уд} + 24,22d + 0,0009p_0 + 0,0024c - 0,076m + 0,40; \quad (76)$$

для II группы пород ( $d > 0,1$  мм)

$$a = (21,36d - 0,012p_0 + 0,047c + 0,26m - 2,58) N_{уд} + 16,20d + 0,009p_0 + 0,011c - 0,44m + 3,11. \quad (77)$$

В табл. 36 приведены результаты расчета скорости изнашивания стали 20ХНЗА и определения ее экспериментальным путем.

Таблица 36

Размер зерна $d$ , мм	Скорость изнашивания (в мм/ч) при $N_{уд} = 3 \text{ Вт/мм}^2$		Размер зерна $d$ , мм	Скорость изнашивания (в мм/ч) при $N_{уд} = 3 \text{ Вт/мм}^2$	
	измеренная	расчетная		измеренная	расчетная
0,01	0,92	0,86	0,10	6,76	6,65
0,03	2,44	2,20	0,15	16,80	17,44
0,05	2,53	2,57	0,20	24,57	23,23
0,07	4,15	4,74	0,28	37,98	26,79
0,09	6,60	6,74	0,40	47,64	40,58

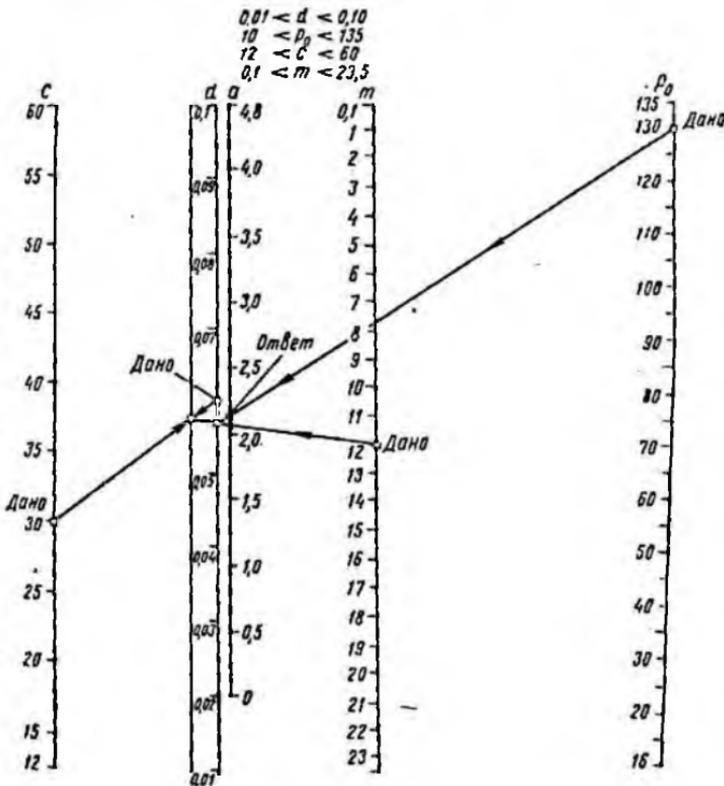


Рис. 73. Номограмма для определения скорости абразивного изнашивания стали (а) при разрушении терригенных пород ( $N_{уд} = 1,0 \text{ Вт/мм}^2$ ).

Из табл. 36 видно, что результаты расчета хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Для характеристики относительной абразивности горных пород принимаем два значения скорости изнашивания

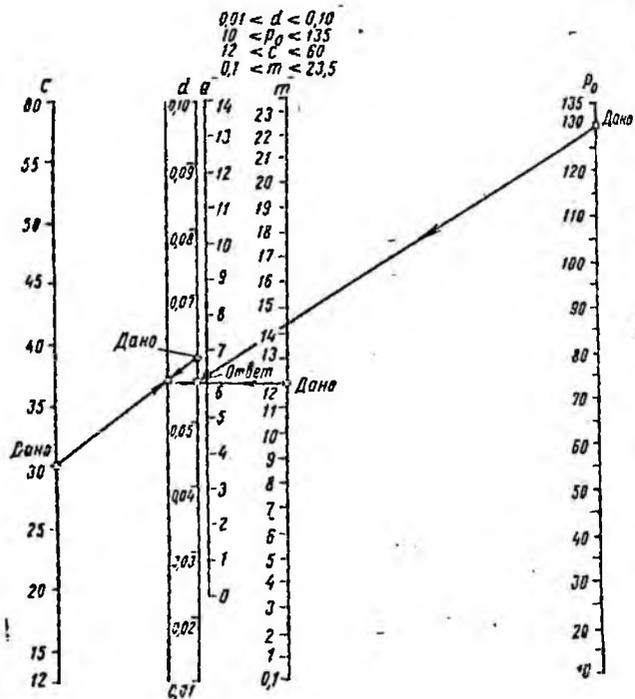


Рис. 74. Номограмма для определения скорости абразивного изнашивания стали ( $a$ ) при разрушении терригенных пород ( $N_{уд} = 5,0 \text{ Вт/мм}^2$ ).

при напряженностях работы 1 и 5 Вт/мм<sup>2</sup>. Такой прием делает наглядными показатели абразивности и позволяет путем линейной интерполяции получить скорость изнашивания стали для любого значения  $N_{уд}$ . Значения скорости изнашивания ( $a_1$  и  $a_6$ ) могут быть определены либо на экспериментальных установках, либо подсчитаны по уравнениям (76) и (77). Представление уравнений (76) и (77) в виде номограмм [186] значительно упрощает вычисления. На рис. 73 и 74 приведены номограммы,

соответствующие уравнению (76), а на рис. 75 и 76 — номограммы, соответствующие уравнению (77). На номограммы нанесен ключ, показывающий порядок работы с номограммами.

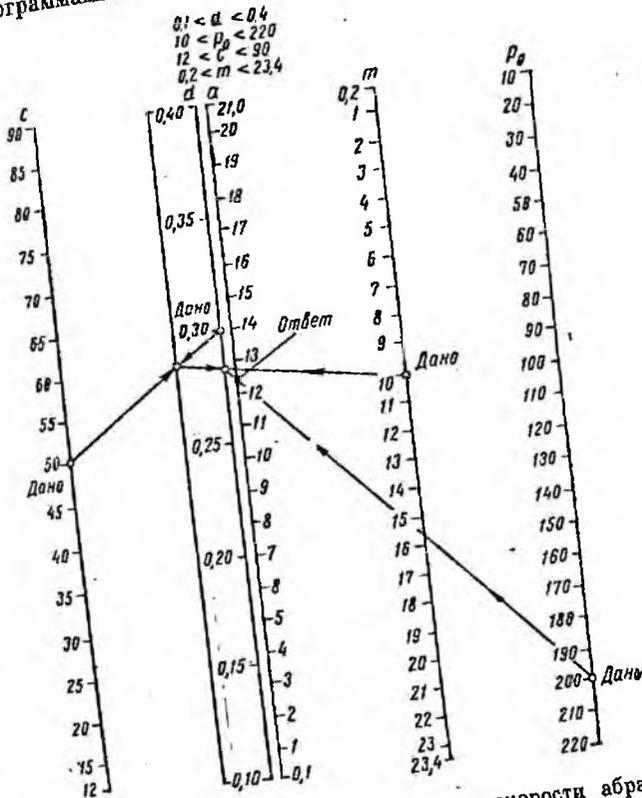


Рис. 75. Номограмма для определения скорости абразивного изнашивания стали ( $a$ ) при разрушении терригенных пород ( $N_{уд} = 1,0 \text{ Вт/мм}^2$ ).

Таким образом, существует возможность приближенной оценки скорости абразивного изнашивания материалов породоразрушающего инструмента и оценки абразивности терригенных горных пород без постановки испытаний на специальных установках.

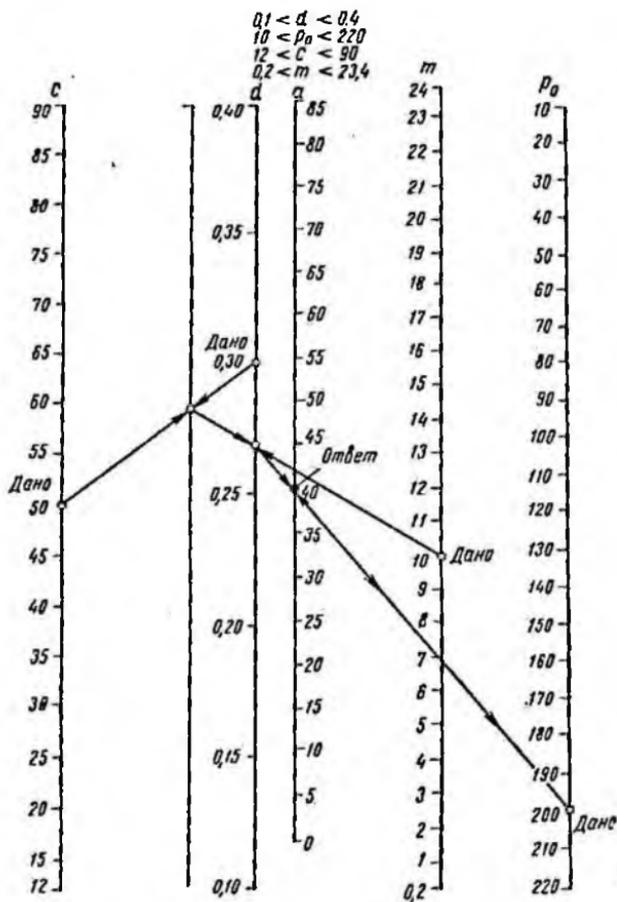


Рис. 76. Номограмма для определения скорости абразивного изнашивания стали ( $a$ ) при разрушении терригенных пород ( $N_{уд} = 5,0 \text{ Вт/мм}^2$ ).

### Особенности оценки абразивности сульфатных и карбонатных пород

В табл. 37 приведены результаты изучения абразивности сульфатных и карбонатных пород, существенно отличающихся друг от друга как по твердости, так и по строению. Из табл. 37 видно, что для каждой из групп горных пород при отсутствии в них примесей значения коэффициентов уравнения (52), а также показатели абразивности (скорости изнашивания при значениях напряженности работы 1,0 и 5,0 Вт/мм<sup>2</sup>) изменяются в весьма узкой области, скорости изнашивания незначительны по величине и не могут определять долговечность работы долота на забое. С увеличением размера зерна наблюдается лишь некоторая тенденция к увеличению показателей абразивности. Влияние же твердости горных пород неопределенно. Отсутствие влияния твердости по штампу горных пород на их абразивность, на наш взгляд, связано с тем, что этот показатель даже в совокупности с петрографическими характеристиками не отражает обстановки в области контакта металл — горная порода. Поэтому, хотя и прослеживается качественно та же картина, что и при разрушении терригенных пород, но строгой количественной связи по выполненному объему исследований установить не удается.

Существенное изменение абразивности горных пород связано с наличием в них терригенной примеси. Из табл. 37 видно, что чем темнее порода, тем выше ее абразивность. Из петрографии известно, что потемнение породы связано либо с битуминозностью, либо с наличием примесей. Однако дисперсность примеси и малое содержание не всегда позволяют охарактеризовать ее обычным петрографическим методом.

В табл. 37 приведены значения абразивности обломочных известняков с значительным содержанием терригенной примеси. Из этой таблицы видно, что порядок величины абразивности этих пород соответствует терригенным породам. Причем зависимость  $a = f(N_{уд})$  так же, как и для терригенных пород, хорошо описывается уравнением (51). Воспользуемся уравнениями (76) и (77) и вычислим значения  $a_1$  и  $a_5$  для этих пород. Результаты вычисления приведены в табл. 38, из которой следует, что вычисленные значения показателей абразивности близки

Таблица 37

Образцы №	Характеристика образца горной породы	Предел текучести $P_{\text{уд}}$ , кгс/мм <sup>2</sup>	Параметры уравнения: $a = AN_{\text{уд}}^k + B$			Показатели абразивности	
			A	B	k	$a_1$	$a_2$
<b>Ангидрит</b>							
1	Голубовато-серый, однородный, плотный, структура радиально-лучистая, незначительная примесь карбоната	112	0,037	0	0,62	0,037	0,10
2	Голубовато-серый, однородный, структура спутанно-волоконистая, незначительная примесь карбоната	139	0,066	0	0,31	0,066	0,11
3	Голубовато-серый, однородный, равнозернистый, размер зерен 0,09—0,35 мм	143	0,037	0	0,84	0,037	0,14
4	Голубовато-серый, однородный, структура радиально-лучистая	125	0,046	0	0,76	0,046	0,15
5	Светло-серый с примесками глинистого вещества, структура спутанно-волоконистая	85	0,041	0	0,83	0,041	0,16
6	Голубовато-серый, темный, структура спутанно-волоконистая	145	0,039	0	0,89	0,039	0,16
7	Голубовато-серый, с прожилками глинистого вещества, структура радиально-лучистая	115	0,041	0	1,02	0,041	0,21
8	Серый, с тонкими прожилками глинистого вещества	124	0,058	0	1,13	0,058	0,35
9	Темно-серый, однородный, структура пластинчатая	115	0,066	0	1,22	0,066	0,47
<b>Известняк</b>							
1	Светло-серый, однородный, слабопористый, пелитоморфный	100	0,016	0	0,88	0,016	0,066
2	Темно-серый, битуминозный, мелкоорганогенно-детритовый, размер зерен 0,02—0,03 мм, детрит 50%, размер зерен 0,1—0,2 мм	146	0,022	0	0,74	0,022	0,069
3	Светло-серый, однородный, плотный, пелитоморфный, ангидрит до 20%, размер зерен до 0,35 мм	135	0,032	0	0,48	0,032	0,069
4	Светло-серый, плотный, мелкозернистый, размер зерен 0,1—0,2 мм детрит размером до 2 мм	153	0,030	0	0,72	0,030	0,096
5	Светло-серый, плотный, пелитоморфный с детритом, ангидрит до 10%, размер зерен до 0,25 мм	155	0,054	0	0,36	0,054	0,096
6	Серый, плотный, органогенно-обломочный, размер обломков 0,1—0,2 мм, включения ангидрита	126	0,019	0	1,14	0,019	0,120
7	Темно-серый, плотный, микрозернистый	194	0,083	0	0,52	0,083	0,190
8	Буровато-серый, слоистый, состоит из сгустков бурого пелитоморфного карбоната и детрита	135	0,020	0	1,55	0,020	0,240
9	Коричневато-серый, битуминозный, микрозернистый ангидрит до 35%	33	0,033	0	1,28	0,033	0,260
10	Темно-серый, плотный, органогенно-детритовый, с вкраплениями шпата (3%) размером около 0,07 мм	135	0,050	0	1,46	0,050	0,520
11	Обломочный, алевролитовый, терригенная примесь около 25%, размер обломков до 0,09 мм	90	0,15	0,60	1	0,85	1,80
12	Темно-серый, плотный, песчано-алевритовый, кластический материал представлен кварцем (около 20%), размер зерен до 0,14 мм	118	0,76	1,63	1	2,39	5,43
13	Обломочный, алевролитовый, терригенная примесь около 40%, преимущественно кварц, размер зерен 0,15 мм	39	1,24	0,86	1	2,40	7,08
14	Обломочный, алевролитовый, терригенная примесь около 45%, преимущественно кварц, размер зерен до 0,12 мм	33	1,45	0,26	1	1,71	7,56
15	Темно-серый, однородный, порода переходного типа от известняка к песчанику, кварц около 50%, размер зерен до 0,21 мм	162	1,50	4,09	1	5,85	12,06

№ образца	Характеристика образца горной породы	Презент тензостресс, кгс/см <sup>2</sup>	Параметры уравнения: $a = A \cdot N^B + C$				Показатели абразивности	
			A	B	C	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	
1	Доломит							
2	Светло-серый, плотный, однородный, тонкозернистый, размер зерен 0,04—0,06 мм	310	0,027	0	1,37	0,027	0,24	
3	Светло-серый, однородный, плотный, мелкозернистый, размер зерен 0,10—0,20 мм с примесью пелитоморфного кальцита	270	0,031	0	1,38	0,031	0,28	
4	Белый, плотный, структура мозаичная, размер зерен 0,5—0,7 мм, ангидрид до 25%	190	0,020	0	1,69	0,020	0,30	
5	Серый, слабопористый, слоистый, пелитоморфный, размер зерен 0,004—0,008 мм	160	0,048	0	1,31	0,048	0,40	
6	Серый, кавернозный, структура ромбоэдрическая, размер зерен 0,12—0,18 мм	300	0,034	0	1,63	0,034	0,47	
7	Серый, однородный, плотный, размер зерен 0,015—0,025 с примесью пелитоморфного карбоната	170	0,044	0	1,65	0,044	0,63	
8	Темно-серый, плотный, размер зерен 0,1—0,2 мм, пелитоморфный материал, содержащийся в зернах, придает им мутный вид	220	0,141	0	1,20	0,141	0,98	
9	Темно-серый, однородный, плотный, размер зерен около 0,01 мм	160	0,048	0	1,88	0,048	0,99	
10	Зеленовато-серый, плотный, размер зерен 0,09—0,16 мм, ангидрид до 25%, размер около 0,4 мм	150	0,030	0	2,77	0,030	2,63	

к полученным экспериментальным значениям. Следовательно, наличие кварца определяет абразивность карбонатных пород, имеющих терригенные примеси, и оценка абразивности этих пород может быть проведена с помощью уравнений (76) и (77).

Таблица 38

№ образца (из табл. 37)	Показатели абразивности, мм/ч			
	экспериментальные		расчетные	
	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>
11	0,85	1,80	1,39	2,07
12	2,39	5,43	2,49	5,65
13	2,10	7,08	2,30	7,35
14	1,71	7,56	1,90	7,74
15	5,65	12,06	4,75	11,03

Наиболее твердые разновидности доломитов имеют повышенную абразивную способность при высокой напряженности работы (образцы 9 и 10, табл. 37). Это связано с потерей устойчивости термически разупрочненного металла рабочей поверхности стали и с высоким сопротивлением сдвигу доломитов в зоне разрушения. Такое явление скорее соответствует разрушению стали, чем ее износу и не может характеризовать абразивность горных пород. При бурении в породах такого типа турбинным способом наблюдается катастрофический износ стального вооружения долот. Это явление можно устранить изготовив вооружение долот из теплостойкой стали. Исследования на стали Р18, проведенные Л. А. Алексеевым и др. совместно с автором на установке АИ-3, показали перспективность этого направления. Позднее была изготовлена партия опытных долот типа ТЗ с зубками из стали Р18 и испытана в промышленных условиях. Испытания дали положительные результаты. Таким образом, оценка абразивности сульфатных и карбонатных пород распадается на ряд самостоятельных вопросов:

- 1) абразивность пород, не содержащих терригенной примеси и рудных минералов высокой твердости;
- 2) абразивность пород, содержащих различные примеси более твердых минералов;
- 3) изучение условий потери устойчивости рабочей поверхности металла при разрушении породы.

Классификация по абразивным свойствам осадочных горных пород, слагающих разрезы нефтяных и газовых месторождений

Осадочные горные породы, слагающие разрезы нефтяных и газовых месторождений, по возрастанию абразивной способности располагаются в том же порядке, как и рост микротвердости их образующих минералов. Это позволяет сохранить тот же принцип группировки горных пород по минералогическому признаку, который был принят ранее [192].

В табл. 39 приведена классификация осадочных горных пород по абразивности по отношению к закаленной стали 20ХНЗА. Показатели абразивности получены применительно к турбинному способу бурения шарошечными долотами при промывке водой. Однако по величине показателя  $a_1$  можно приблизительно оценить абразивность горных пород и применительно к роторному бурению.

Абразивность трех первых групп пород невелика и не может являться решающим фактором выхода вооружения долота из строя. Детализация абразивности горных пород этих групп требует постановки дополнительных исследований. Абразивность IV и V групп горных пород определяется содержанием и размером кварцевых зерен и зерен твердых минералов. Детализация абразивности этих групп горных пород может быть осуществлена с помощью уравнений (76) и (77).

Выполненные исследования показали, что имеется принципиальная возможность создания методики расчета скорости абразивного изнашивания вооружения долот. Для проведения такого расчета необходимо иметь данные об абразивности горных пород в целом по разрезу месторождения. Применяемые лабораторные методы позволяют определить необходимые коэффициенты для расчета лишь по отдельным кернам. Для характеристики разреза по абразивности необходимо иметь массовый керновый материал и проводить массовые определения. Как правило, имеющийся в наличии керновый материал ограничен и подвержен значительным изменениям. Кроме того, при проведении опытов на лабораторной установке, нельзя учесть всех особенностей, присущих износу вооружения долот на забое скважины. В связи с этим делались попытки [1, 2, 65] оценивать абразивность горных пород

Таблица 39

Группа горных пород	Вид зависимости $a = f(N_{уд})$	Показатели абразивности, мм/ч	
		$a_1$	$a_2$
I Известняки без примесей твердых минералов	$a = AN_{уд}^k$	0,02—0,08	0,07—0,26
II Ангидрит без примесей твердых минералов		0,04—0,07	0,10—0,47
III Доломиты без примесей твердых минералов		0,02—0,14	0,24—0,99*
IV Аргиллиты, известняки алевролитовые, алевролиты	$a = AN_{уд} + B$	0,36—3,68	1,48—13,34
V Известняки песчанистые, песчанники полимиктовые, песчанники кварцевые	$a = AN_{уд} + B$	3,44—22,12	8,32—73,11**

\* В таблицу не вошли значения  $a_1$ , полученные на доломитах, на которых наблюдалась потеря устойчивости поверхности стали.

\*\* Верхний предел значения  $a_2$  соответствует кварцевому песчаннику в среднем размером зерна 0,4 мм.

по результатам работы породоразрушающего инструмента. Однако эти попытки не были достаточно теоретически и экспериментально обоснованы и поэтому полученные результаты носят относительный характер и не могут быть использованы ни для сопоставления разрезов по абразивности, ни для расчета долговечности вооружения долот при различных режимах бурения.

Тем не менее, при отсутствии достаточного кернового материала отработанные долота остаются основным источником информации об абразивности горных пород. Поэтому необходимо разработать методы расшифровки этой информации и приведения ее к виду, пригодному для расчета скорости абразивного изнашивания вооружения долот при заданных режимах бурения.

Основные предпосылки разработки лабораторно-промышленного метода изучения абразивности горных пород разреза нефтяного месторождения

В процессе бурения по мере износа происходит постепенное уменьшение высоты зубьев долота. На рис. 77 показаны основные формы износа вооружения долот типа

Т в карбонатных породах. Изучение кинематики работы этих долот показало, что износ с приострением вершин характерен для зубьев венцов, формирующих рейку на забое (как правило, периферийных венцов шарошек). Скругление вершин характерно для внутренних венцов, число зубьев которых совпадает с числом зубьев периферийных венцов. Плоские вершины характерны для зубьев венцов, работающих без рейки (чаще для первых и реже для вторых венцов).

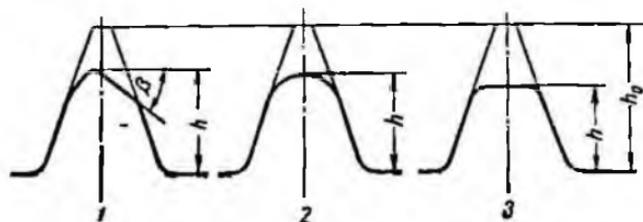


Рис. 77. Формы изношенных зубьев долот типа Т после бурения в карбонатных горных породах. 1 — износ с приострением вершины; 2 — износ со скруглением вершины; 3 — плоский износ.

Высота зубца долота в процессе бурения изменяется по закону, близкому к экспоненциальному [54, 169]

$$h = h_0 e^{-\alpha t}, \quad (78)$$

где  $h$  — текущая высота зубца;  $h_0$  — начальная высота зубца;  $\alpha$  — декремент уменьшения высоты зубца;  $t$  — время работы долота.

Скорость уменьшения высоты зубца в момент времени  $t$  равна

$$\frac{dh}{dt} = -\alpha h_0 e^{-\alpha t} = -\alpha h. \quad (79)$$

Нас интересует абсолютная скорость изнашивания, а поэтому уравнение (79) перепишем в следующем виде

$$a_3 = \alpha h \quad (80)$$

( $a_3$  — скорость уменьшения высоты зубца).

При износе зубцов по формам 2 и 3 (рис. 77) скорость уменьшения высоты зуба практически соответствует скорости износа материала вооружения в данный момент времени  $t$ . При износе вооружения по форме 1 необходимо рассматривать скорость износа для каждой из граней приострения отдельно. Например, для грани, пока-

занной на рис. 77, скорость изнашивания стали можно определить по формуле

$$a = a_3 \cos \beta.$$

На основании обмера зубьев долота до и после работы на забое можно определить декремент  $\alpha$  по формуле

$$\alpha = \frac{\ln h_0 - \ln h}{t}. \quad (81)$$

и по формуле (80) подсчитать скорость изнашивания зубьев любого венца по высоте и далее подсчитать скорость изнашивания материала зубца.

По данным проведенных нами исследований скорость изнашивания обусловлена в основном величиной мощности, реализуемой рабочей поверхностью. Влияние изменения частоты взаимодействия в небольших пределах несущественно. Таким образом, можно сделать первое допущение, что для определенного способа бурения скорость изнашивания вооружения является функцией напряженности работы (удельной мощности, реализуемой рабочей поверхностью рассматриваемого элемента), среды и абразивности разрушаемой горной породы.

Второе допущение: скорость изнашивания материала вооружения долот как функция напряженности работы описывается уравнением (52).

Третье допущение: области напряженности работы, соответствующие определенным видам изнашивания, для определенного вида бурения постоянны.

В соответствии с принятыми допущениями оценка абразивности горных пород (а точнее, определение коэффициентов  $A$ ,  $B$  и  $k$  (формула 52), зависящих от абразивности горных пород) сводится к определению скорости изнашивания элемента вооружения и напряженности работы этого элемента в конце работы на забое. Скорость изнашивания вооружения определяется на основании обмера зубьев долота, отработанного при постоянном режиме бурения по формуле (81). Напряженность работы рассматриваемых элементов вооружения определяется методом микротвердости, изложенным выше.

Таким образом, есть принципиальная возможность определения напряженности работы элементов вооружения долота в конце работы на забое. Так как напряженность работы различных венцов долота различна, то по

одному долоту можно составить систему уравнений, необходимых для определения коэффициентов  $A$ ,  $B$  и  $k$ . Эти коэффициенты для выделенного интервала разреза следует определять по ряду долот с последующей математической обработкой результатов.

Основным вопросом, который предстоит решить лабораторно-промышленным методом исследования, является оценка абразивности горных пород разреза. Однако в настоящее время нет метода определения напряженности работы элементов вооружения долот через параметры режима бурения. Для решения этой задачи можно использовать метод микротвердости. Постановка и проведение таких исследований позволят более полно увязать полученные экспериментальные данные по износу материалов породоразрушающего инструмента, влиянию различных сред и добавок к промышленным жидкостям с параметрами режима бурения и конкретизировать сделанные рекомендации. Кроме того, появится возможность перехода от заданных параметров режима бурения к определению напряженности работы, необходимой для расчета долговечности вооружения долот на основании данных по абразивности горных пород, что позволит более обоснованно проектировать режимы работы долот, анализировать работу долот, а также проводить расчеты вооружения при проектировании новых долот.

Таким образом, из изложенного в данном разделе материала можно сделать следующие основные выводы.

1. Абразивность терригенных горных пород определяется их строением и механическими характеристиками и может быть определена без постановки исследований на экспериментальных установках.
2. Абразивность сульфатных и карбонатных горных пород без терригенных примесей и твердых рудных минералов изменяется в узких пределах, незначительна по величине и не может обусловить выход долота из строй.
3. Наличие терригенной примеси и содержание твердых минералов определяют высокую абразивность карбонатных и сульфатных пород, причем абразивность таких горных пород может быть определена так же, как и для терригенных пород.
4. При разрушении твердых карбонатных пород наблюдается потеря устойчивости рабочей поверхности стали, обуславливающая катастрофический износ воору-

жения долота; применение теплостойких сталей для изготовления вооружения позволяет предотвратить это явление в исследованной области напряженности работы.

5. Существует принципиальная возможность характеристики разреза месторождений по абразивности на основе изучения износа вооружения долот, отработанных в скважинах.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование абразивности горных пород позволяет сделать краткое заключение, вытекающее из анализа изложенных выше экспериментальных и промышленных данных.

Под абразивностью горных пород следует понимать основные факторы, зависящие от типа и свойств породы и определяющие скорость изнашивания металла в данных условиях.

Поскольку абразивность горных пород оценивается по отношению к определенному эталону, то величина ее не может быть распространена на все условия и материалы, а является относительной величиной, действительной только для данных материалов и условий.

Одной из важнейших причин, обуславливающих интенсивность изнашивания пары трения, является напряженность работы. Параметрами напряженности работы являются удельное давление и скорость скольжения, которые могут рассматриваться совместно как удельная мощность, реализуемая данной парой трения.

Отличительной особенностью предложенной методики изучения абразивного изнашивания стали и твердого сплава при трении в процессе разрушения горных пород является учет напряженности и условий изнашивания рабочих поверхностей вооружения долот.

В качестве основного аргумента принята мощность, реализуемая единицей рабочей поверхности эталонного образца стали или твердого сплава (напряженность работы), т. е. предложен энергетический подход к изучению абразивного изнашивания стали и сплава и абразивности горных пород по отношению к ним.

В связи с тем что исследование выполнялось применительно к условиям работы вооружения шарошечных долот,

было изучено влияние цикличности взаимодействия элементов вооружения в процессе разрушения пород, вида и свойств среды, в присутствии которой происходит разрушение пород на забое скважины, и динамический характер взаимодействия зубьев шарошечных долот в процессе разрушения.

С использованием принципов физического моделирования абразивного изнашивания элементов вооружения шарошечных долот разработаны критерии подбора, которые легли в основу выбора схем изнашивания и проектирования экспериментальных установок.

В качестве основной была принята схема вращающегося диска, позволяющая наиболее полно воспроизвести условия изнашивания элементов вооружения долот. По этой схеме созданы три экспериментальные установки. Наиболее крупным недостатком этих установок является отсутствие динамического приложения нагрузки, который был устранен на специальной установке, позволяющей воспроизводить характер взаимодействия зубца шарошечного долота с породой в процессе ее разрушения.

Исследованиями установлено, что скорость абразивного изнашивания стали и сплава является наиболее наглядной характеристикой абразивности породы и при заданной напряженности работы зависит от характера ее разрушения (поверхностного или объемного), ее императорического состава и строения.

Механизм абразивного изнашивания закаленной стали при циклическом взаимодействии с горной породой и охлаждении водой зависит от напряженности работы и носит сложный термохимический характер. Установлено, что при разрушении карбонатных и сульфатных пород преобладает механохимическое разрушение поверхностных слоев стали, а при разрушении терригенных кварцсодержащих пород — механическое разрушение (микрорезание).

Изучение процесса абразивного изнашивания в лабораторных условиях позволило разработать метод оценки напряженности работы отдельных элементов вооружения долота.

Установлено, что на скорость абразивного изнашивания в области малой и средней напряженности работы в большей мере влияет смазочная способность сред, а в области высокой напряженности работы породоразрушающего инструмента — охлаждающая способность сред.

В условиях высокооборотного режима разрушения горных пород повышение производительности породоразрушающего инструмента (по сравнению с промывкой водой и глинистым раствором) может быть достигнуто применением промывки раствором на нефтяной основе, эмульсионным крахмальным раствором и водой с совместной добавкой ОП-10 и сульфататриевой соли. При низкооборотном режиме разрушения — применении продувки воздухом и эмульсионных глинистых растворов вместо глинистых.

Статистическая обработка результатов исследования и выполненный с помощью ЭВМ корреляционный анализ позволили выявить основные характеристики свойств и строения пород, определяющие в процессе их разрушения скорость абразивного изнашивания металла. Полученные уравнения регрессии позволяют оценивать скорость абразивного изнашивания стали и абразивность терригенных горных пород без постановки исследований на специальных экспериментальных установках.

Экспериментальный материал, полученный на большом количестве кернов пород, представляющих геологические разрезы основных нефтяных и газовых месторождений, позволил разработать классификацию пород по абразивности.

Отличительной особенностью предложенной классификации является то, что разрушаемые при бурении нефтяных и газовых скважин породы делятся на две большие группы — терригенные, обладающие наибольшей абразивностью, и сульфатно-карбонатные породы, обладающие малой абразивной способностью. Промежуточную группу составляют сульфатные и карбонатные породы, содержащие примеси твердых кварцевых, полевошпатовых и ртутных минералов.

В отличие от других исследований, в которых были сделаны попытки использовать промышленный материал для оценки абразивности горных пород, в данной работе показана принципиальная возможность оценки абразивности пород комплексным лабораторно-промышленным методом.

Полученный и обработанный экспериментальный материал позволяет наметить пути его использования в статистике разрушения пород при бурении скважин и, в частности, перейти к количественным определениям скорости абразивного изнашивания стального вооружения шарошечных долот.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев Ю. Ф. Использование данных по механическим и абразивным свойствам горных пород при бурении скважин. М., «Недра», 1968.
2. Алексеев Ю. Ф., Давлетбаев М. Г. Оценка абразивности горных пород по результатам лабораторных испытаний и обработки долот. — «Бурение», 1968, № 8.
3. Алексеев Ю. Ф. и др. Влияние водных растворов ПАВ на механические свойства пород и износостойкость опор буровых долот. — «Бурение», 1968, № 6.
4. Алексеев Л. А., Беркович М. Я. О температуре поверхности стали при трении по горной породе. — «Нефть и газ», 1965, № 2.
5. Алексеев Л. А., Беркович М. Я. Некоторые вопросы температурного режима работы шарошечных долот. — «Нефть и газ», 1963, № 12.
6. Алексеев Л. А., Беркович М. Я., Мавлютов М. Р. Тепловой износ зубьев шарошечных долот. — «Нефть и газ», 1965, № 12.
7. Алексеев Л. А. и др. К определению области применения различных инструментальных материалов для изготовления вооружения шарошечных долот. — «Труды УНИ», Уфа, 1969, вып. 7.
8. Алабужаев П. М. Лекции по основам теории подбора и моделирования. Новосибирское книжное изд-во, 1968.
9. Алехова З. Н. Исследование основных закономерностей процесса фрезерования горных пород применительно к работе проходческих комбайнов. Автореферат дисс. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук, 1964.
10. Алымкулов Ж. Физико-механические свойства пород рудных Киргизии. Фрунзе, «Илим», 1965.
11. Адам Н. К. Физика и химия поверхностей. (Пер. с англ.) М., Гостоптехиздат, 1947.
12. Барон Л. П., Кузнецов А. В. Абразивность горных пород при добычании. Изд-во АН СССР, 1961.
13. Барон Л. П., Логунов Б. М., Позин Е. З. Определение свойств горных пород. М., Госгортехиздат, 1962.
14. Барон Л. П., Глатман Л. Б. Износ инструмента при резании горных пород. М., «Недра», 1969.
15. Боуден Ф. П., Тейбор Д. Трение и смазка твердых тел. (Пер. с англ.) М., «Машиностроение», 1968.
16. Баладин П. С., Спивак А. И., Шрейнер Л. А. Установка для определения абразивных свойств горных пород. — «Нефтепромышленное дело», 1957, № 2.

17. Бабаев С. Г., Зильберман Л. И. Оценка абразивности утяжеленных буровых растворов. — «Бурение», 1967, № 9.
18. Беликов В. Г., Поставн С. А., Степанов В. А. Некоторые вопросы оценки износа вооружения шарошечных долот. — «Нефть и газ», 1966, № 9.
19. Бревдо Г. Д., Симонов В. В., Соловьев Е. М. О влиянии параметров режима бурения на скорости вращения шарошек долота. — «Нефть и газ», 1964, № 4.
20. Беркович М. Я. и др. Некоторые вопросы бурения с очисткой алмаз газообразными агентами. — «Нефть и газ», 1962, № 5.
21. Беркович М. Я. и др. Исследование энергетического баланса процесса разрушения горных пород при бурении шарошечными долотами. — «Нефть и газ», 1962, № 8.
22. Боярин П. И., Ямпольский Г. Я. Исследование смазочной способности промысловых растворов в условиях граничной смазки. — «Нефтяное хозяйство», 1968, № 4.
23. Брейтуэйт Е. Р. Твердые смазочные материалы и антифрикционные покрытия. (Пер. с англ.) М., «Химия», 1967.
24. Бадалов Р. А. Некоторые вопросы кинематики и динамики трехшарошечных долот. — «Нефть и газ», 1958, № 8.
25. Балицкий П. В. Упругие волны в буровой колонне и динамика ее взаимодействия с недеформируемым плоским забоем. — «Труды МИНХ и ГП», 1966, вып. 60.
26. Балицкий П. В. Динамическая нагрузка на долото при бурении вертикальных скважин забойными двигателями. — «Труды МИНХ и ГП», 1964, вып. 46.
27. Белов В. Т. Исследование влияния охлаждения на работу горного режущего инструмента. Автореферат дисс. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. Новочеркасск, 1966.
28. Бойко В. Г. и др. Твердость, абразивность и буримость осадочных горных пород Тюменской области. — «Нефть и газ», 1968, № 7.
29. Байдюк Б. В., Бугаев В. Н. О кинематической характеристике воздействия зуба долота на породу. — «Нефтяная и газовая промышленность», Киев, 1969, № 1.
30. Бродский А. Д., Кап В. Л. Краткий справочник по математической обработке результатов измерений. М., Стандартгиз, 1960.
31. Бровман М. Я., Додин Ю. С. Расчет температурного поля в прокатных валах. ИФЗ, 1964, № 11.
32. Виноградов В. Н., Шрейбер Г. К., Сорокин Г. М. Методы исследования изнашивания и разрушения зубьев шарошек буровых долот. — «Нефтяное хозяйство», 1964, № 7.
33. Виноградов В. Н., Шрейбер Г. К., Сорокин Г. М. Механизм разрушения зубьев шарошек буровых долот. — «Нефтяное хозяйство», 1966, № 3.
34. Виноградов В. Н. Ударно-абразивный износ долотной стали и повышение долговечности буровых шарошечных долот. Автореферат дисс. на соиск. уч. степ. д-ра техн. наук, Баку, 1969.
35. Виноградов В. Н. и др. Метод испытания на изнашивание при ударе об абразивную поверхность. — «Заводская лаборатория», 1966, № 11.
36. Виноградов В. Н. и др. Машина для испытания материалов на ударно-абразивный износ. Авт. свид. от 5/VII 1966. Бюлл. изобретений, 1968, № 4.

37. Виноградов В. Н., Сорокин Г. М., Коротков В. А. Методы испытания на изнашивание при ударе по сыпучему абразиву. — «Заводская лаборатория», 1968, № 6.

38. Виноградов В. Н. и др. О природе ударного износа металлов. — «Труды МИНХ и ГП», М., «Недра», 1968, вып. 81.

39. Волков Ю. В., Волкова З. А., Кайгородцев Л. М. Долговечность машин, работающих в абразивной среде. М., «Машиностроение», 1964.

40. Вейлер С. Я., Лихтман В. П. Действие смазок при обработке металлов давлением. Изд-во АН СССР, 1960.

41. Виноградов Г. В. Новые методы и результаты исследования противозносных и антифрикционных свойств смазочных материалов. — В сб.: «Присадки к маслам и топливам». М., Гостехтеориздат, 1961.

42. Виноградов Г. В. и др. Смазочное действие низкомолекулярных углеводородов при тяжелых режимах трения. — В сб.: «Теория смазочного действия и новые материалы». М., «Наука», 1965.

43. Виноградов Г. В. и др. Влияние окислительных процессов на граничное трение стали в углеводородных средах и критические режимы трения, при которых развиваются процессы холодного и горячего заедания (шли сварки). — В сб. «Новое о смазочных материалах». М., «Химия», 1967.

44. Васильев П. В., Кудрявцева Б. М. Некоторые закономерности изнашивания металлов при трении в агрессивных средах. В сб.: «Теория смазочного действия и новые материалы». М., «Наука», 1965.

45. Виноградова И. Э. Присадки к маслам для снижения трения и износа. М., Гостехтеориздат, 1963.

46. Воздвиженский Б. П. Буровая механика. М., Гостеолпздат, 1949.

47. Вдовин К. И. Баланс энергии и к. п. д. процесса разрушения горных пород при бурении. — «Нефть и газ», 1966, № 2.

48. Варгафтик П. Б. и др. Теплофизические свойства веществ. М., Госэнергоиздат, 1956.

49. Голубинцев О. И. Механические и абразивные свойства горных пород и их буримость. М., «Недра», 1968.

50. Голего Н. Л. Технологические мероприятия в борьбе с износом в машинах. М., Машгиз, 1961.

51. Грицаенко Ю. А. Повышение эффективности буровых долот изменением геометрии вооружения. — В сб.: «Бурение и буровое оборудование». — «Труды МИНХ и ГП». М., «Недра», 1964, вып. 46.

52. Гукова Р. В. Промышленные растворы для бурения. (Обзор иностранных патентов.) М., ВНИИОЭНГ, 1964.

53. Грозин Б. Д. Механические свойства закаленной стали. М., Машгиз, 1951.

54. Григорьев П. П. и др. О характере износа вооружения долота во время бурения. — «Нефтяное хозяйство», 1965, № 3.

55. Григорьев Л. Г. Моделирование и технические науки. М., «Знание», 1967.

56. Гухман А. А. Введение в теорию подбора. М., «Высшая школа», 1963.

57. Гутман Э. М. Взаимосвязь коррозионных процессов с механическим воздействием на металл. — «Физико-химическая механика материалов», 1967, № 5.

58. Дерягин Б. В. Что такое трение? Изд-во АН СССР, 1953.
59. Дерягин Б. В. Исследование механических свойств граничного смазочного слоя — «Труды Всесоюзной конференции по трению и износу в машинах». Изд-во АН СССР, 1949.
60. Дерягин Б. В. и др. Механизм граничной смазки и свойства граничного смазочного слоя. «Журнал технической физики», 1957, т. XXVII, вып. 5.
61. Дерягин Б. В. К теории граничного трения. — В сб.: «Развитие теории трения и изнашивания». Изд-во АН СССР, 1957.
62. Дерягин Б. В. Двух- и трехмерный аспекты поверхностных явлений. — В сб.: «Исследования в области поверхностных сил». М., «Наука», 1961.
63. Дерягин Б. В., Федякин Н. П., Галасов М. В. О полиморфных модификациях жидкостей при конденсации их паров на гидрофильных поверхностях. — В сб.: «Исследования в области поверхностных сил». М., «Наука», 1967.
64. Дубинин А. Д. Энергетика трения и износа деталей машин. М., Машгиз, 1963.
65. Духнин А. П. Относительная буримость и изменчивость горных пород нефтяных месторождений. — «Нефтяное хозяйство», 1949, № 10, 11.
66. Духнин А. П. Методы определения буримости горных пород. — «Труды МНЦ». М., Гостоптехиздат, 1953, вып. 12.
67. Ешифанов Г. П. Зависимость силы трения от нормальной нагрузки. — В сб.: «Сухое трение». Изд-во АН Латв. ССР, 1961.
68. Ешифанов Г. П. Влияние адгезии на процесс внешнего трения чистых поверхностей. — В сб.: «Сухое трение». Изд-во АН Латв. ССР, 1961.
69. Зайцев А. К. Основы учения о трении, износе и смазке машин. М., Машгиз, 1947.
70. Замоуев Г. М. — В сб.: «Повышение износостойкости и срока службы машин». М., Машгиз, 1953.
71. Зенков Ф. Д. Трехшарошечные долота. М., Гостоптехиздат, 1953.
72. Зайдель А. П. Элементарные оценки ошибок измерений. М., «Наука», 1968.
73. Ильский В. Л. Экспериментальные исследования рабочих характеристик турбодолот на турбодолотном стенде ВНИИБТ. — В сб.: «Совершенствование техники турбинного бурения». М., Гостоптехиздат, 1963, вып. 7.
74. Кузмак Е. М. К вопросу о кинетике разрушения шарошек долот на забое. — В сб.: «Буровые долота». М., Гостоптехиздат, 1952.
75. Кузмак Е. М. и др. Повышение износостойкости долот для бурения армированным твердым сплавами. — В сб. «Проблемы нефти и газа». М., Гостоптехиздат, 1959.
76. Кершенбаум Я. М., Сорокин Г. М. Износ и разрушение вооружения долот малых диаметров. — «Труды МНЦХ и ГП». М., Гостоптехиздат, 1960, вып. 29.
77. Крагельский П. В. Об условиях деформирования материала на поверхностях трения. — В сб.: «Сухое трение». Изд-во АН Латв. ССР, 1961.
78. Крагельский П. В. Трение и износ в машинах. М., Машгиз, 1968.

79. Крагельский П. В., Виноградова И. Э. Коэффициенты трения. М., Машиза, 1962.
80. Костецкий Б. И. Сопротивление изнашиванию деталей машин. М., Машиза, 1959.
81. Костецкий Б. И. и др. О физической сущности процесса шлифования закаленной стали. — В сб.: «Высокопроизводительное шлифование». Изд-во АН СССР, 1962.
82. Костецкий Б. И., Филиппчук П. К. Сущность и механизм разрушения поверхности при трении второго рода в связи с физическими, химическими и механическими процессами. — В сб.: «Контактная прочность машиностроительных материалов». «Наука», 1964.
83. Костецкий Б. И. Трение, смазка и износ в машинах. Киев, «Техника», 1970.
84. Кузнецов В. Д. Физика твердого тела, т. 4. Томское книжное издательство, 1947.
85. Кузнецов В. Д. Поверхностная энергия твердых тел. М., Гостехтеориздат, 1954.
86. Койфман М. П. Минеральные дисперсоиды в абразивных процессах. Автореферат докт. дисс., Москва, 1941.
87. Кащев В. И. Абразивное разрушение твердых тел. Автореферат докт. дисс., Томск, 1963.
88. Кащев В. И., Глазков В. М. Износ металлов в потоке абразивных частиц различной твердости. — «Машиностроение», 1960, № 8.
89. Кащев В. И., Глазков В. М. Абразивная износостойкость и силы связи решетки металлов. — «Физика», 1961, № 2.
90. Кащев В. И. О мгновенной абразивной способности минерального зерна. — «Физика», 1957, № 1.
91. Кащев В. И. Абразивное разрушение твердых тел. М., «Наука», 1970.
92. Кольченко А. В. О турбинном бурении в осложненных условиях. — «Нефтяное хозяйство», 1955, № 7.
93. Карпов В. И., Протодяконов М. М. Временная инструкция по определению твердости и абразивности горных пород прибором ПТА. — «Известия ИГД им. А. А. Скочинского», 1961.
94. Карпов В. И. Определение твердости и абразивности горных пород при вращательном бурении шпуров. — В сб.: «Физико-механические свойства, давление и разрушение горных пород». Изд-во АН СССР, 1962, вып. 1.
95. Курицына А. Д. О происхождении «белой фазы» на поверхности трения. — В сб.: «Трение и износ в машинах». Изд-во АН СССР, 1965, вып. IX.
96. Колесниченко Л. Ф. Механическое упрочнение железа в жидких средах. — В сб.: «Упрочнение деталей машин механическим наклепыванием». М., «Наука», 1965.
97. Клаусс Е. Е., Бибер Х. Е. Влияние примесей, содержащих изотоп Р<sup>32</sup> на поведение меченого по фосфору трикрезилфосфата как противоположной присадки. (Пер. с англ.) — В сб.: «Новое о смазочных материалах». М., «Наука», 1962.
98. Кистер Э. Г. Эмульсионные глинистые растворы. М., ГОСИНТИ, 1958.
99. Конессв Г. В., Сиппак А. П., Мавлютов М. Р. Абразивный износ дольной стали и твердого сплава в различных средах. —

- «Труды УНИ», уфимское книжное издательство, 1969, вып. VII.
100. Кулиев С. М., Есьман Б. Н., Габузов Г. Г. О теплоемкости глинистых растворов. — «Нефть и газ», 1967, № 1.
  101. Кудря Н. А., Липидо Г. В., Шматов И. М. Стендовые испытания шарошечных долот типа 8Н-2140К, армированных твердыми сплавами различных марок. — «Бурение», 1965, № 1.
  102. Корпсев К. Е., Палый П. А. Буровые долота. М., «Недра», 1971.
  103. Калентьев В. А. и др. Бурение глубоких нефтяных и газовых скважин. М., «Недра», 1970.
  104. Качанов Л. М. Основы теории пластичности. М., «Наука», 1969.
  105. Касаandroва О. Н., Лебедев В. В. Обработка результатов наблюдений. М., «Наука», 1970.
  106. Крист М. О., Суругин П. К. Определение буримости и абразивности пород, слагающих геологические разрезы нефтяных и газовых месторождений. — «Нефтяное хозяйство», 1958, № 1.
  107. Кобранова В. Н. Физические свойства горных пород. М., Гостехиздат, 1962.
  108. Лоладзе Т. Н. Износ режущего инструмента. М., Машгиз, 1958.
  109. Лоренц В. Ф. Износ деталей, работающих в абразивной среде. — В сб.: «Трение и износ в машинах». Изд-во АН СССР, 1939.
  110. Львов П. Н. Абразивный износ и защита от него. М., ВНИИстройдормаш, ЦБТИ, 1959.
  111. Львов П. Н. Основы абразивной износостойкости деталей строительных машин. М., «Машиностроение», 1970.
  112. Любимов Н. И. Принципы классификации и эффективного разрушения горных пород при разведочном бурении. М., «Недра», 1967.
  113. Лихтман В. П., Ребридер П. А., Карпенко Г. В. Влияние поверхностных веществ на процессы деформации металлов. Изд-во АН СССР, 1954.
  114. Лихтман В. П., Щукин Е. Д., Ребридер П. А. Физико-химическая механика металлов. Изд-во АН СССР, 1962.
  115. Механические свойства горных пород при вдавливании и их практическое использование (сборник статей под общей редакцией проф. Л. А. Шрейнера). М., ВНИИОЭНГ, 1966.
  116. Мархасин Э. Л., Виноградов В. Н. Повышение износостойкости буровых долот. — «Вестник машиностроения», 1959, № 7.
  117. Мархасин Э. Л. Повышение износостойкости нефтепромыслового оборудования и инструмента. М., Гостехиздат, 1956.
  118. Мархасин Э. Л., Антонов А. А., Людмирская Н. Г. Износ углеродистых и легированных сталей при трении об абразивный монолит. — «Труды МИНХ и ГП». Сер. «Нефтяное машиностроение», 1961, вып. 34.
  119. Маслов Е. Н. Основы теории шлифования металлов. М., Машгиз, 1951.
  120. Маслов Е. Н. Основные закономерности высокопроизводительного шлифования. — В сб.: «Высокопроизводительное шлифование». Изд-во АН СССР, 1962.
  121. Матвеев Г. П., Трабкин Г. С. Конструкция долота, улучшающая калибровку скважины. — «Нефтепромысловое дело», 1956, № 6.

122. Мотовилов Э. А., Шляпин К. Б. Методика установления оптимальной скорости резания горных пород. — «Горные машины и автоматика», 1965, № 1 (58).

123. Миджоян К. А. Роль показателей твердости при обработке природного камня. — «Труды института камня и силикатов». Изд-во АН Арм. ССР, 1965, вып. 2.

124. Михеев М. А. Основы теплопередачи. М., Госэнергоиздат, 1956.

125. Мирзаджанзаде А. Х. и др. Временное руководство по обработке и прогнозированию некоторых показателей режимов проводки скважин. Изд. АЗИНЕФТЕХИМ, Баку, 1971.

126. Пасонов И. Д. Моделирование горных процессов. М., «Недра», 1969.

127. Ошер Р. Н. Производство и применение смазочно-охлаждающих жидкостей. М., Гостехтеоретиздат, 1963.

128. Окисление металлов. Теоретические основы, т. 1. Под редакцией М. Венера. (Пер. с франц.) М., «Металлургия», 1968.

129. Попов А. Н. Некоторые вопросы абразивного износа закаленной стали и абразивности горных пород при их разрушении. Автореферат на соиск. уч. степ. канд. техн. наук, МИНХ и ГП, 1967.

130. Попов А. Н., Спивак А. П. К вопросу о распределении скоростей скольжения и удельных нагрузок по впадинам шарошек буровых долот. — «Нефть и газ», 1965, № 9.

131. Попов А. Н., Спивак А. П. Некоторые результаты изучения износа закаленных сталей при трении о горные породы. — «Машины и нефтяное оборудование», 1966, № 2.

132. Попов А. Н., Спивак А. П. Изучение износа сталей и твердых сплавов при трении о горные породы с помощью профилографа. — «Нефть и газ», 1965, № 1.

133. Попов А. Н., Спивак А. П. Абразивное изнашивание стали при трении о горные породы. — «Горный журнал», 1967, № 2.

134. Попов А. Н. и др. Влияние различных добавок к воде на износ долотной стали при разрушении горных пород. — «Нефть и газ», 1967, № 8.

135. Попов А. Н., Спивак А. П. О коэффициентах трения сталь — горная порода. — «Нефть и газ», 1967, № 3.

136. Попов А. Н., Спивак А. П., Алексеев Л. А. Исследование работы вооружения шарошечных долот по показателям микротвердости. — «Машины и нефтяное оборудование», 1970, № 2.

137. Подзей А. В. Остаточные напряжения при шлифовании и их регулирование. — В сб.: «Высокопроизводительное шлифование». Изд-во АН СССР, 1962.

138. Петрусевич А. П. Роль гидродинамической масляной пленки в стойкости и долговечности поверхностей контакта деталей машин. — «Вестник машиностроения», 1963, № 1.

139. Петросянц А. А., Мархасин Э. Л. Некоторые вопросы исследования износа и производительности зубьев шарошечных долот в зависимости от их геометрии. — В сб.: «Нефтяное машиностроение», 1961, вып. 34.

140. Проблемы буримости горных пород. (Обзор зарубежной литературы.) — «Бурение», 1966.

141. Потапов Ю. Ф., Симонов В. В. Разрушение горных пород трехшарошечными долотами малого диаметра. М., Гостоптехиздат, 1961.

142. Панчук О. Э. и др. Эмульсионные промывочные растворы для бурения скважин. — В сб.: «Промывочные растворы для бурения скважин». М., Гостоптехиздат, 1962.
143. Пустыльник Е. П. Статистические методы анализа и обработки наблюдений. М., «Наука», 1968.
144. Ровинский Б. М. О зависимости механических свойств твердых тел от атомного взаимодействия в решетке. — «Известия АН СССР, отд. техн. наук», 1956, № 9.
145. Ребиндер П. А., Еппфанов Г. П. Влияние поверхностно-активной среды на граничное трение и износ. — «Труды совещания по вопросам теории и практики». Изд-во АН СССР, 1957.
146. Ребиндер П. А., Шрейнер Л. А., Жыгач К. Ф. Показатели твердости в бурении. Изд-во АН СССР, 1944.
147. Румшинский Л. З. Математическая обработка результатов эксперимента. М., «Наука», 1971.
148. Сорокин Г. М. Исследование износа и разрушения зубьев шарошек буровых долот малых размеров и повышение их долговечности. Автореферат на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. МИНХ и ГП, 1963.
149. Спивак А. П., Попов А. П. Об оценке абразивности горных пород. — «Нефтяное хозяйство», 1968, № 1.
150. Спивак А. П., Шрейнер Л. А. Абразивность раздробленных минералов, горных пород и утяжелителей. — «Азербайджанское нефтяное хозяйство», 1958, № 4.
151. Спивак А. П. Абразивность утяжелителей, применяемых в бурении. — «Труды УФНИ». Уфимское книжное издательство, 1960, вып. III.
152. Спивак А. П. О характере износа в зависимости от соотношения между твердостью горных пород и твердостью поверхности изнашиваемых имп сталей и сплавов. — «Нефть и газ», 1963, № 8.
153. Спивак А. П. Механика горных пород. М., «Недра», 1967.
154. Спивак А. П. Влияние скорости вращения на износ долот и на энергетические затраты при бурении. — «Нефтяное хозяйство», 1962, № 9.
155. Суханов А. Ф. К вопросу о единой классификации горных пород. М., Углетехиздат, 1947.
156. Сейфи Р. Н. К вопросу разрушения долота на забое. — В сб.: «Механическое разрушение горных пород». Научные записки УкрНИИпроект, 1960, вып. 3.
157. Сократов В. Г. К вопросу о скольжении шарошечных долот. — «Труды ГрозНИИ», Грозный, 1954, вып. 13.
158. Симонович Л. Е. Разрушение горных пород и рациональная характеристика двигателей для бурения. М., «Недра», 1966.
159. Саверин М. М. Контактная прочность материала в условиях одновременного действия нормальной и касательных нагрузок. Изд. Минпостства тяжелого машиностроения, 1946.
160. Сенцова Е. П. Повышение износостойкости опоры долота регулированием физико-химических свойств водных промывочных жидкостей. Автореферат дисс. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук, Уфа, 1969.
161. Скоробогатов С. В. Влияние параметров режима резания на температуру резца. — «Горные машины и автоматика», 1964, № 56 (12).

162. Смородинов М. П. Способ определения абразивности. Авт. свид. № 181862, кл. 42к, опубликовано 23.VI. 1966 г. Бюлл. изобретений, 1966, № 10.

163. Смородинов М. П., Федоров А. Н. Новый метод определения абразивности горных пород. — В сб.: «Основания, фундаменты и подземные сооружения». Труды НИИ оснований и подземных сооружений, 1967.

164. Топеха П. К. Основные виды износа металлов. М., Машигиз, 1952.

165. Тененбаум М. М. Износостойкость деталей и долговечность горных машин. М., ГНТИ, 1960.

166. Тененбаум М. М. Абразивная износостойкость материалов. Автореферат дисс. на соиск. уч. степ. д-ра техн. наук. М., 1969.

167. Тененбаум М. М. и др. Температурный режим работы зубков врубных машин и угольных комбайнов. — «Вестник машиностроения», 1960, № 4.

168. Трушкин Б. Н. и др. О причинах вынужденных продольных колебаний и режиме динамического нагружения вооружения шарошечных долот. — «Труды УНИИ», Уфа, 1969, вып. VII.

169. Федоров В. С. Научные основы режимов бурения. М., Гостехиздат, 1951.

170. Федоров В. С. Проектирование режимов бурения. М., Гостехиздат, 1958.

171. Файлсман П. Д. Сб. «Повышение износостойкости и срока службы машин». М., Машигиз, 1953, стр. 125.

172. Филимонов Н. М., Мавлютов М. Р. Колебания нижней части бурильного инструмента при работе долота. — «Нефть и газ», 1964, № 10.

173. Филимонов Н. М., Мавлютов М. Р. Механизм процесса разрушения горных пород при динамическом вдавливании штампов. — «Нефть и газ», 1965, № 5.

174. Филимонов Н. М., Мавлютов М. Р. Некоторые особенности разрушения горных пород при динамическом вдавливании штампов. — «Горный журнал», 1965, № 10.

175. Фуке Г. П. Смазочная способность приборных масел. М., Машигиз, 1955.

176. Фуке Г. П. Механизм действия и эффективность присадок, повышающих смазочную способность. — В сб.: «Присадки к маслам и топливам». М., Гостехтеоретиздат, 1961.

177. Фуке Г. П. Влияние полимолекулярного граничного слоя на статическое трение. — В сб.: «Теория смазочного действия и новые материалы». М., «Наука», 1965.

178. Файн Р. С., Кройц К. Л. Химизм граничного трения стали в присутствии углеводородов. (Пер. с англ.) — В сб.: «Новое о скалочных материалах». М., «Химия», 1967.

179. Филатов П. Г., Климов К. И. Исследование смазывающих свойств автомобильных тормозных жидкостей. — «Химия и технология топлив и масел», 1968, № 4.

180. Хрущов М. М. Классификация условий и видов изнашивания деталей машин. — В сб.: «Трение и износ в машинах». Изд-во АН СССР, 1953, вып. VIII.

181. Хрущов М. М., Бабичев М. А. Исследование влияния твердости абразива на износ материалов. — В сб.: «Трение и износ в машинах». Изд-во АН СССР, 1956, вып. XI.

182. Хрущов М. М., Бабичев М. А. Исследование изнашивания металлов. Изд-во АН СССР, 1960.
183. Хрущов М. М., Бабичев М. А. Сопротивление абразивному изнашиванию металлов и минералов, в том числе обладающих высокой твердостью. ДАН СССР, 107, № 1, 1956.
184. Хрущов М. М., Бабичев М. А. Некоторые итоги изучения абразивного изнашивания материалов. — В сб.: «Теория трения и износа». М., «Наука», 1965.
185. Хрущов М. М., Бабичев М. А. Абразивное изнашивание. М., «Наука», 1970.
186. Хованский Г. С. Что такое номография. Изд. Вычислительного центра АН СССР. Москва, 1969.
187. Царицын В. В., Жидоацев Н. А. Бурение шарошечными долотами. Киев, ГИТЛ УССР, 1962.
188. Чертавских А. К. Трение и смазка при обработке металлов. М., «Металлургия», 1955.
189. Шрейнер Л. А. Зависимость износа режущего инструмента от твердости горных пород. «Нефтяное хозяйство», № 12, 1948.
190. Шрейнер Л. А. Абразивный износ режущего инструмента и влияние характера износа на производительность долота. «Нефтяное хозяйство», 1949, № 2.
191. Шрейнер Л. А. Физические основы механики горных пород. М., Гостоптехиздат, 1950.
192. Шрейнер Л. А. и др. Механические и абразивные свойства горных пород. М., Гостоптехиздат, 1958.
193. Шрейнер Л. А., Кузьменкова Г. Е. Влияние жидких сред на коэффициенты трения скольжения по горным породам. — В сб.: «Вопросы деформации и разрушения горных пород при бурении». М., ГОСИНТИ, 1961.
194. Шрейнер Л. А., Садиленко К. М. Влияние жидких сред на износ закаленных сталей и твердых сплавов при трении о горные породы. — В сб.: «Вопросы деформации и разрушения горных пород при бурении». М., ГОСИНТИ, 1961.
195. Швецова Е. М., Крагельский Н. В. Классификация видов разрушения поверхностей деталей машин в условиях сухого и граничного трения. — В сб.: «Трение и износ в машинах». Изд-во АН СССР, 1953, вып. VIII.
196. Шеферд Р. Физические свойства и буримость горных пород. М., Углетехиздат, 1956.
197. Шумова З. И. Практическое руководство по эксплуатации турбобуров. М., Гостоптехиздат, 1962.
198. Шлыков Ю. П., Ганин Е. А. Контактный теплообмен. М., Госэнергиздат, 1968.
199. Эпштейн Е. Ф. Износ твердых сплавов при трении по горным породам при колонковом разведочном бурении. М., Гостоптехиздат, 1952.
200. Эпштейн Е. Ф. Теория бурения — резания горных пород твердыми сплавами. М., ГОСИНТИ, 1959.
201. Эрлих Л. Б. Элементы теории и механики контактных разрушений. — «Вестник машиностроения», 1963, № 1.
202. Эйгелес Р. М. Упругое распределение напряжений в породе при вдавливании инструмента. — В сб.: «Разрушение горных пород». Труды ВНИИГТ. М., «Недра», 1968, вып. 20.

203. Belugou F., Valantin A., Guillon P. Etude des pics des machines d'abattage. — «Revue de L. Industrie minérale», 1964, vol. 46, No 10.
204. Haworth Roy. D Abrasive wear of metals. — «Metall. progress», 1949, vol. 55, No 6, p. 842.
205. Fish B. G. Studies with water and air as feshing media in rock drilling. — «Mine and Quarry Engineering», July, 1957.
206. Fish B. G., Guppy G. A., Ruden J. T. Abrasive wear effects in rotary rock drilling. — «Bulletin of the Institute of Mining Metallurgy», 1959, vol. 68.
207. King G. R. Why rock-bit bearings fail — «Oil and Gas», 1959, vol. 57, No 47.
208. Lubrication Review. — «Mechanical Engineering», 1961, No 4.
209. Shepherd R. Physical properties and drillability of mine rocks. — «Colliery Engineering», 1951, No 1, 2, 3.
210. Shepherd R. Colliery Engineering, 1952, No 29, p. 343.
211. Sievers H. Die Bestimmung des Bohrwiderstandes von Gesteinen. — «Glückauf», 1950, 86: Heft 37/38, IX.
212. Skipper R. G. S., Wootton K. J. Thermal resistance between uranium and can. «Second United Nat. Internat. Confer., on the Peaceful uses of A. E.», 1958.
213. Voropinov J. Die Optimierung des Tiefbohrprocesses (Dargestellt am Diamantbohren). Belgrad, 1970.

## СОДЕРЖАНИЕ

	<i>Стр.</i>
Предисловие . . . . .	3
Введение . . . . .	5
Основные сведения об исследованиях в области трения и изнашивания материалов . . . . .	9
Количественная оценка износа . . . . .	11
Абразивы и абразивное изнашивание металлов . . . . .	17
Физико-химические факторы влияния среды на изнашивание металлов . . . . .	26
Анализ исследований абразивности горных пород . . . . .	32
Оценка условий абразивного изнашивания вооружения шарошечных долот . . . . .	33
Особенности изнашивания вооружения шарошечных долот . . . . .	51
Анализ методов определения абразивных свойств горных пород . . . . .	54
Состояние изученности абразивности горных пород . . . . .	66
Абразивность раздробленных минералов и горных пород . . . . .	83
Экспериментальные установки и методика изучения абразивности при разрушении горных пород . . . . .	89
Особенности моделирования изнашивания элементов вооружения буровых долот . . . . .	89
Экспериментальная установка АИ-2 . . . . .	93
Экспериментальная установка АИ-3 . . . . .	97
Экспериментальная установка АИ-4 для разрушения горных пород одним зубцом . . . . .	98
Образцы металла, горных пород и промывочные жидкости . . . . .	104
Методика изучения абразивного изнашивания металла . . . . .	107
Оценка влияния варьирования критериев подобия на скорость абразивного изнашивания, определяемую по схеме вращающегося диска . . . . .	113
Основные закономерности абразивного изнашивания закаленной стали и твердого сплава при разрушении горных пород . . . . .	116
О характере разрушения горных пород и его влиянии на скорость абразивного изнашивания стали . . . . .	116
	239

203. Belugou F., Valantin A., Guillon P. Etude des pics des machines d'abattage. — «Revue de L. Industrie minerale», 1964, vol. 46, No 10.
204. Haworth Roy. D. Abrasive wear of metals. — «Metall. progress», 1949, vol. 55, No 6, p. 842.
205. Fish B. G. Studies with water and air as feshing media in rock drilling. — «Mine and Quarry Engineering», July, 1957.
206. Fish B. G., Guppy G. A., Ruden J. T. Abrasive wear effects in rotary rock drilling. — «Bulletin of the Institute of Mining Metallurgy», 1959, vol. 68.
207. King G. R. Why rock-bit bearings fail — «Oil and Gas», 1959, vol. 57, No 47.
208. Lubrication Review. — «Mechanical Engineering», 1961, No 4.
209. Shepherd R. Physical properties and drillability of mine rocks. — «Colliery Engineering», 1951, No 1, 2, 3.
210. Shepherd R. Colliery Engineering, 1952, No 29, p. 343.
211. Sievers H. Die Bestimmung des Bohrwiderstandes von Gesteinen. — «Glückauf», 1950, 86: Heft 37/38, IX.
212. Skipper R. G. S., Wootton K. J. Thermal resistance between uranium and can. «Second United Nat. Internat. Confer., on the Peaceful uses of A. E.», 1958.
213. Voropinov J. Die Optiemierung des Tiefbohrprocesses (Dargestellt am Diamantbohren). Belgrad, 1970.

## СОДЕРЖАНИЕ

	<i>Стр.</i>
Предисловие . . . . .	3
Введение . . . . .	5
Основные сведения об исследованиях в области трения и изнашивания материалов . . . . .	9
Количественная оценка износа . . . . .	11
Абразивы и абразивное изнашивание металлов . . . . .	17
Физико-химические факторы влияния среды на изнашивание металлов . . . . .	26
Анализ исследований абразивности горных пород . . . . .	32
Оценка условий абразивного изнашивания вооружения шарошечных долот . . . . .	33
Особенности изнашивания вооружения шарошечных долот . . . . .	51
Анализ методов определения абразивных свойств горных пород . . . . .	54
Состояние изученности абразивности горных пород . . . . .	66
Абразивность раздробленных минералов и горных пород . . . . .	83
Экспериментальные установки и методика изучения абразивности при разрушении горных пород . . . . .	89
Особенности моделирования изнашивания элементов вооружения буровых долот . . . . .	89
Экспериментальная установка АИ-2 . . . . .	93
Экспериментальная установка АИ-3 . . . . .	97
Экспериментальная установка АИ-4 для разрушения горных пород одним зубцом . . . . .	98
Образцы металла, горных пород и промывочные жидкости . . . . .	104
Методика изучения абразивного изнашивания металла . . . . .	107
Оценка влияния варьирования критериев подобия на скорость абразивного изнашивания, определяемую по схеме вращающегося диска . . . . .	113
Основные закономерности абразивного изнашивания закаленной стали и твердого сплава при разрушении горных пород . . . . .	116
О характере разрушения горных пород и его влиянии на скорость абразивного изнашивания стали . . . . .	116
	239

203. Belugou F., Valantin A., Guillon P. Etude des pics des machines d'abattage. — «Revue de L. Industrie minerale», 1964, vol. 46, No 10.

204. Haworth Rev. D Abrasive wear of metals. — «Metall. progress», 1949, vol. 55, No 6, p. 842.

205. Fish B. G. Studies with water and air as feshing media in rock drilling. — «Mine and Quarry Engineering», July, 1957.

206. Fish B. G., Guppy G. A., Ruden J. T. Abrasive wear effects in rotary rock drilling. — «Bulletin of the Institute of Mining Metallurgy», 1959, vol. 68.

207. King G. R. Why rock-bit bearings fail — «Oil and Gas», 1959, vol. 57, No 47.

208. Lubrication Review. — «Mechanical Engineering». 1961, No 4.

209. Shepherd R. Physical properties and drillability of mine rocks. — «Colliery Engineering», 1951, No 1, 2, 3.

210. Shepherd R. Colliery Engineering, 1952, No 29, p. 343.

211. Sievers H. Die Bestimmung des Bohrwiderstandes von Gesteinen. — «Glückauf», 1950, 86: Heft 37/38, IX.

212. Skipper R. G. S., Wootton K. J. Thermal resistance between uranium and can. «Second United Nat. Internat. Confer., on the Peaceful uses of A. E.», 1958.

213. Voropinov J. Die Optiemierung des Tiefbohrprocesses (Dargestellt am Diamantbohren). Belgrad, 1970.

## СОДЕРЖАНИЕ

	<i>Стр.</i>
Предисловие . . . . .	3
Введение . . . . .	5
Основные сведения об исследованиях в области трения и изнашивания материалов . . . . .	9
Количественная оценка износа . . . . .	11
Абразивы и абразивное изнашивание металлов . . . . .	17
Физико-химические факторы влияния среды на изнашивание металлов . . . . .	26
Анализ исследований абразивности горных пород . . . . .	32
Оценка условий абразивного изнашивания вооружения шарошечных долот . . . . .	33
Особенности изнашивания вооружения шарошечных долот . . . . .	51
Анализ методов определения абразивных свойств горных пород . . . . .	54
Состояние изученности абразивности горных пород . . . . .	66
Абразивность раздробленных минералов и горных пород . . . . .	83
Экспериментальные установки и методики изучения абразивности при разрушении горных пород . . . . .	89
Особенности моделирования изнашивания элементов вооружения буровых долот . . . . .	89
Экспериментальная установка АИ-2 . . . . .	93
Экспериментальная установка АИ-3 . . . . .	97
Экспериментальная установка АИ-4 для разрушения горных пород одним зубцом . . . . .	98
Образцы металла, горных пород и промывочные жидкости . . . . .	104
Методика изучения абразивного изнашивания металла . . . . .	107
Оценка влияния варьирования критериев подобия на скорость абразивного изнашивания, определяемую по схеме вращающегося диска . . . . .	113
Основные закономерности абразивного изнашивания закаленной стали и твердого сплава при разрушении горных пород . . . . .	116
О характере разрушения горных пород и его влиянии на скорость абразивного изнашивания стали . . . . .	116
	239

Влияние режима реализации мощности на скорость абразивного изнашивания стали при разрушении горных пород . . . . .	124
Влияние минералогического и петрографического составов горных пород на абразивное изнашивание стали и твердого сплава . . . . .	130
О механизме абразивного изнашивания закаленной стали при разрушении горных пород . . . . .	143
Сравнительные результаты изучения абразивного изнашивания стали 20ХНЗА на установках АИ-3 и АИ-4 . . . . .	151
Определение напряженности работы элементов вооружения шарошечных долот . . . . .	153
Основные закономерности абразивного изнашивания стали и твердого сплава в различных средах . . . . .	160
Основные закономерности абразивного изнашивания стали и твердого сплава при промывке глинистым раствором . . . . .	162
Основные закономерности абразивного изнашивания стали и твердого сплава при промывке эмульсионными растворами . . . . .	165
Основные закономерности абразивного изнашивания стали при промывке водой с добавками поверхностно-активных веществ . . . . .	170
О механизме влияния среды на абразивное изнашивание стали и твердого сплава . . . . .	173
Классификация осадочных горных пород по абразивности	206
Статистический анализ результатов изучения абразивности терригенных горных пород . . . . .	207
Особенности оценки абразивности сульфатных и карбонатных пород . . . . .	215
Классификация по абразивным свойствам осадочных горных пород, слагающих разрезы нефтяных и газовых месторождений . . . . .	220
Основные предпосылки разработки лабораторно-промыслового метода изучения абразивности горных пород разреза нефтяного месторождения . . . . .	222
Заключение . . . . .	225
Список литературы . . . . .	228

1 р. 27 к.

И Е Д Р А • 1972