

**МОДЕЛИ ПРОЦЕССА БУРЕНИЯ**

Синев С.В., к.т.н.  
stanislav-vs@mail.ru

*Модели бурения развиваются исторически в зависимости от физико-механических свойств горных пород, механизмов и способов разрушения породы и степени очистки забоя. Необходимо учитывать взаимодействие бурильного инструмента со скважиной, как единого механизма. Именно это является причиной существенного отличия эффективности промышленного бурения от лабораторного и бурения мелких скважин.*

*Скорость бурения и нагрузка на долото не связаны началом координат. Бурение начинается с некоторой «стартовой» скорости и «стартовой» нагрузки, создающей напряженное состояние в горных породах. Зависимость скорости бурения от нагрузки имеет скачкообразный трехступенчатый характер. В бурении используются интервалы нагрузок второй ступени. Первая и третья не применяется в силу малой эффективности и высокой аварийности долот.*

*В интервалах нагрузок интенсивного роста скорости долото отклонено от оси скважины. В турбинном способе долото находится в таком положении до остановки турбобура, которой способствует «вдавливание в соосность» долота со скважиной.*

*Согласно зависимостям скорости от нагрузки и частоте вращения долота, устанавливаемым в начале долбления, при наращивании инструмента или эксцессах скорости, оперативно корректируется режим бурения. В турбинном бурении определяется флюидонасыщенность разбуриваемых пород и состояние долота.*

*Ключевые слова : модель бурения, разрушение пород, очистка забоя, «стартовая» скорость и «стартовая» нагрузка, «вдавливание в соосность» долота со скважиной, интервал нагрузок интенсивного роста скорости бурения (ИНИРСБ), режим «плавающей пяты», объемный график зависимости скорости от нагрузки и частоты вращения, кавернозность ствола*

Особый интерес к параметрам режима бурения, как к влияющим на процесс факторам, проявлялся уже в начале 20 века при переходе на вращательное бурение.

Стремление оптимизировать процесс бурения привело к попыткам создания моделей этого процесса, базирующихся на теоретических расчетах и эмпирических закономерностях, характеризующих работоспособность долот и эффективность разрушения горных пород.

В отечественной практике модели процесса бурения сформировались после установления В.С. Федоровым зависимости механической скорости бурения

$V$  от нагрузки на долото  $G$  и частоты его вращения  $n$ . В [17] получена эмпирическая зависимость

$$V = a n^x G^y,$$

где по данным Л.И. Штурмана при турбинном бурении в породах каширской свиты  $x = 0,7$ ;  $y = 1,1$ ;  $a = 0,0024$ .

Из приведенного в [9] анализа известных данных, общепризнанной модели процесса бурения нет вообще. Представлены шестнадцать формул зависимости скорости бурения от нагрузки на долото и частоты его вращения, включая формулу В.С. Федорова (по данным Л.И. Штурмана и версии Р.А. Бадалова) и формулу бурения Ю.Ф. Потапова и В.В. Симонова. Версию модели разработали В.К. Маурер, Ван-Линген, А. Вудс, совместно Эккель, Кэннон и Бингстейн, также Вардрок и Кэннон. Свои версии предложили Кэтлин, Мюррей, Каннингхем, Brentли и Я.А. Гельфгат с соавторами. Д.С. Роули, Р.Дж. Хоу и Ф.Х. Дилли разработали совместную модель, самостоятельно Симон и А.А. Погарский. Р.М. Эйгелес разработал пятнадцать моделей для каждого из дискретных перемещений забоя за 3 - 18 оборотов долота [19].

Наиболее привлекательной по доступности измерения параметров и управления ими может быть модель  $V(G, n)$ , устанавливаемая непосредственно в процессе бурения в начале долбления, при наращивании инструмента и при эксцессах  $V$  в короткий промежуток времени без задержки бурения и, возможно, в автоматическом режиме. В каждом конкретном промежутке времени бурения  $t \rightarrow 0$  подобная модель, одна из бесконечного множества, находится в зависимости не только от сочетания модели долота и физико-механических свойств проходимых горных пород с учетом забойных условий, характеристик промывочной жидкости, гидравлической программы и т.д., но и состояния ствола скважины и компоновки бурильного инструмента.

Чтобы адекватно воспринимать текущую модель и ее изменения необходимо понимание отдельных деталей происходящего, начиная от механизмов разрушения горных пород до взаимодействия бурильного инструмента со стенками скважины, как единого процесса.

Из вышесказанного следует: модель определяет степень влияния отдельных параметров на эффективность процесса бурения. Частота вращения до-

лота оказывает влияние на количество актов разрушения в единицу времени, на скорость приложения нагрузки к разрушаемой породе, изменяя ее прочность. Расход промывочной жидкости и давление, с которым она подается, оказывает влияние на степень чистоты забоя, т.е. на подготовленность породы на забое к разрушению, причем свойства раствора влияют на устойчивость стенок скважины и возможность выравнивания давления в призабойной зоне, тем самым, влияя на эффективность разрушения горных пород, а также вынос выбуренной породы с поверхности забоя. Нагрузка на долото напрямую влияет на процесс разрушения горной породы на забое.

### **1. Влияние нагрузки на долото и частоты его вращения на скорость бурения**

До 60-х годов прошлого столетия большинством авторов приведенных выше моделей доминирующей концепцией модели бурения была принята степенная зависимость скорости бурения от нагрузки на долото с варьированием степени в широком диапазоне. В.С. Федоров [16] пришел к выводу, с подтверждением других исследователей [18, 20], что при контактных давлениях вооружения долота равных или превышающих предел прочности горных пород, показатель степени находится в диапазоне от 1 до 3 (см. рис. 1а). На рис. 1а и рис. 1б область I — режим поверхностного разрушения (истирания), II — режим усталостного разрушения и III — эффективного объемного разрушения. На рис. 1в для бурения шарошечными долотами интервал нагрузок до  $G_1$  — поверхностное разрушение породы,  $G_1 - G_2$  — объемное разрушение при многократном приложении нагрузки (явление усталости),  $G_2 - G_3$  — эффективное объемное разрушение (однократное приложение нагрузки) и  $G_{кр}$  — полное погружение вооружения в породу. По [6], начиная с нагрузки начальной скорости бурения, интервал  $G_1 - G_3$  — объемное разрушение без конкретизации числа актов взаимодействия вооружения с породой.

Степенная зависимость скорости бурения не могла быть полностью объяснена до получения данных по прочности (твердости) горных пород. Помимо прочности на абсолютную величину скорости  $V$ , существенное влияние оказывают пластические свойства горных пород. Таким образом, для установления моде-

ли разрушения пород при бурении скважин важное значение имеет информация о прочностных и пластических свойствах разбуриваемых горных пород.

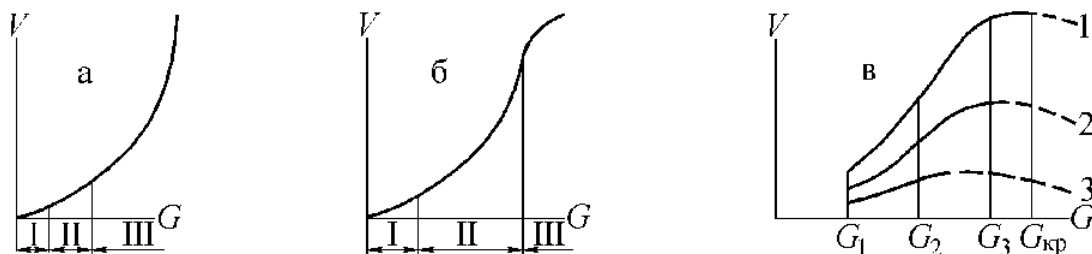


Рисунок 1. Зависимость  $V(G)$ :  
а - Л.А. Шрейнер; б - Б.А. Жлобинский; в - В.С. Федоров  
(1 - совершенная и 2, 3 - несовершенная очистка забоя)

По мнению Б.А. Жлобинского [5] прямолинейная зависимость  $V(G)$  на рис. 1б, заимствованная в [17] еще не говорит, что вид разрушения поверхностный, это усталостно-объемное разрушение. Наличие степенной зависимости в выделенном Л.И. Шрейнером и др. участке усталостно-объемного разрушения объясняется характером усталостных кривых. Более того, оспаривается вообще наличие объемного разрушения с мотивировкой ухудшения условий промывки (после точки перехода из области II в область III на рис. 1б). Утверждается, что с углублением скважины удельный вес усталостно-объемного разрушения возрастает, так как с увеличением глубины возрастает твердость и пластичность горных пород, увеличивается гидростатическое давление.

Разбивка ступенчатого графика зависимостей  $V(G)$  на интервалы по способам взаимодействия вооружения долота с породой и механизмам ее разрушения остается доминирующей точкой зрения в среде исследователей процесса бурения. Такая трактовка ошибочна, поскольку модели промышленного бурения у долот типа «М», «С-Т» и «К» совершенно идентичны по характеру (ступенчатые) и интервалам нагрузки для элементов ступени, а принцип разрушения породы на забое у всех трех групп — различен. Объемное разрушение и разрушение раздавливанием, характерное для всех типов долот делится по числу актов приложения нагрузки: одноактное при сдвиге (резании) у долот типа «М»; одноактное при сдвиге (резании) и вдавливании, а также усталостное (многоактное) при вдавливании у долот типа «С-Т»; усталостное (многоактное) при вдавливании у долот типа «К».

Исходя из изложенного разделение зависимостей, приведенных на рис. 1, на области разрушения истиранием, усталостно-объемное и объемное неправомерно. Это не значит, что такие явления отсутствуют при бурении скважин. Разрушение породы осуществляется ее раздавливанием рабочим органом (как при разрушении сжатием) и отделением целых фрагментов (объемное разрушение) при формировании под этим органом магистральных трещин с последующим их распространением. Оба процесса имеют место как при однократном воздействии инструмента на горную породу, если создаваемое напряженное состояние превосходит ее прочностные характеристики, так и при многократном воздействии с накоплением дефектов и последующим разрушением - усталостное разрушение.

Следует различать методы разрушения, присущие работе шарошечных долот: разрушение сдвигом (резанием) и вдавливанием. К первому относится и фрезерование, в частности стенки скважины. Разрушение сдвигом, в отличие от вдавливания, одноактное воздействие. В разной степени оба метода используются во всех типах долот. Именно перераспределением этой степени определяется производительность моделей долот. В разные типы долот закладывается соответствующий баланс с точки зрения сохранности его вооружения и эффективности разрушения горных пород. В простых конструкциях долот перераспределение ведется между периферийным и основным вооружением. В долотах типа «М» удерживать соотношение функций периферийного и основного вооружения очень затруднительно. Мгновенная ось вращения хаотично меняет положение между основным и периферийным вооружением, несмотря на значительное смещение осей шарошек.

В долотах «С» и «Т» основное вооружение долот разрушает породу сдвигом (резанием) за счет скольжения его по забою. Выборка горной породы под основным вооружением обеспечивает зависание периферийного вооружения и концентрацию нагрузки на нем, иногда достаточную для одноактного разрушения вдавливанием. Периферия этих типов долот заложена в плоскости «чистого качения», выполняет функцию качественного зацепления с периферией забоя и стенкой скважины для обеспечения скольжения основного вооружения и производит разрушение породы вдавливанием. Скольжение периферийного вооруже-

ния обусловленное смещением осей шарошек минимально. Здесь возможно как одноактное разрушение, так и усталостное.

В первых шарошечных долотах Говарда Хьюза (старшего) и современных долотах типа «К», «ОК» все вооружение находится в плоскости «чистого качения» и смещение осей шарошек у них, практически, нулевое (технологическое). Вооружение этих типов долот работает без скольжения, производя разрушение горных пород вдавливанием, а, в случае недостаточности нагрузки, продвижение забоя достигается усталостным разрушением.

Несоответствие результатов экспериментального (рис. 1а) и промышленного бурения (рис. 1в), а также незначительность расхождения в физико-механических свойствах разбуриваемых пород осадочного комплекса, слагаемого разрез глубоких скважин на нефть и газ, в силу воздействия забойных условий требовало более убедительного объяснения ступенчатой формы зависимости  $V(G)$ . Ответом этим требованиям стала публикация [1], которая сделала доминирующей концепцией многих исследователей концепцию стабилизации скорости бурения (в интервале  $G_3—G_{кр}$  на рис. 1в) в процессе нагружения долота вследствие ухудшения очистки забоя.

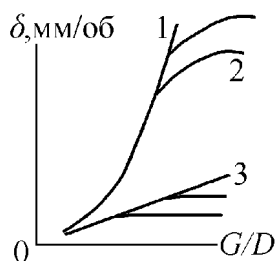


Рисунок 2. Зависимость проходки за один оборот от удельной нагрузки на долото

На рис. 2 приведен график зависимости проходки за один оборот долота от удельной (по диаметру) нагрузки на долото. График 1 (идеальная очистка), 2 (недостаточная очистка) и 3 (минимальных скоростей) получен на долоте  $4\frac{3}{4}$ " фирмы «Рид» при разбурировании цементно-песчаного блока с частотой вращения долота 5 и  $50 \text{ мин}^{-1}$  в атмосферных условиях при промывке водой с расходом 6,31 и 2,84 л/с. Относительная идентичность экспериментальных зависимостей на рис. 2 промышленным зависимостям на рис. 1в основательно подтверждается теми же кривыми, построенными более тщательно по данным Бинхема на рис. 3.

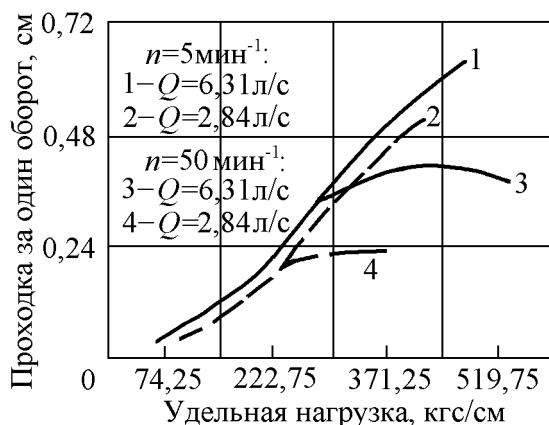


Рисунок 3. Зависимость проходки за один оборот от удельной нагрузки на долото, построенная по точкам Бингхема

прироста эффективности в пределах 20 % (в пределах «эффекта присутствия» исследователя). Изменение качества очистки происходит перемещением  $V(G)$  по ординате без перемещения по абсциссе, как это происходит при изменении качества разрушения применением разных конструкций долот, приведенного на рис. 4. Изменение расхода промывочной жидкости сопровождается смещением графика по скорости бурения и нагрузке без изменения характера взаимосвязи параметров (рис. 3 и рис. 7). Здесь правомернее говорить об изменении качества всего процесса бурения, а не о приближении к идеальной очистке забоя.

Несомненно, рост производительности процесса бурения при увеличении нагрузки должен обеспечиваться достаточной очисткой забоя. Иначе рост скорости прекратится. Примером может служить разбуривание блока породы одной твердости моделями долот различной производительности, где для них «вырабатывается» общий «потолок» скорости бурения. На рис. 4 приведены графики зависимостей  $V(n)$  при бурении с нагрузкой 20·10 КН взрывных скважин 215,9 мм долотами «Т», «М» и экспериментальными «ЗЭ» в блоке твердых пород на карьере

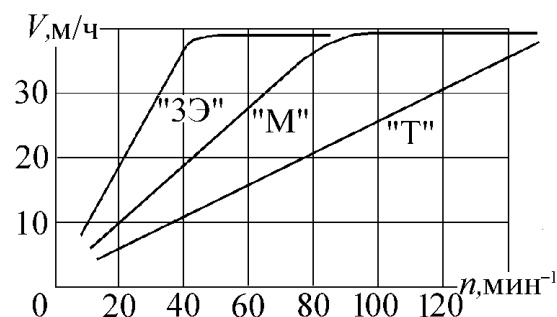


Рисунок 4. Графики зависимости  $V(n)$  для долот 215,9 мм типа «Т», «М» и экспериментального «ЗЭ»

Совпадение графиков зависимости рис. 1в и рис. 3 приводит к заблуждению в отношении значимости очистки забоя (как можно говорить о недостаточности очистки при  $V = 5$  м/ч, если в том же долблении с теми же параметрами промывки установлен неизменный характер графика  $V(G)$  при  $V = 30$  м/ч), когда последующие мероприятия по постановке и решению спровоцированной задачи не могут преодолеть

Докучаевского флюсо-доломитного комбината. Компрессорная установка станка 2СБШ-200, которым производилось бурение, рассчитана на получение максимальной скорости бурения долотом 215,9Т-ПВ при максимальной нагрузке на долото в  $20 \cdot 10$  КН и максимальной частоте вращения  $150 \text{ мин}^{-1}$ . Результат неутешителен. Из-за ограниченных возможностей станка в выносе шлама с забоя более производительные долота скованы общим «потолком» скорости бурения.

В глубоком бурении минимальная подача одного бурового насоса соответствует установленному достаточному уровню расхода промывочной жидкости в 12 л/с (и тщетные попытки в усовершенствовании системы очистки забоя разбиваются о 20 % прироста показателей, приравняемые к «эффекту присутствия» исследователя). Простое доказательство отсутствия влияния очистки забоя на формирование интервала стабилизации скорости бурения в зависимости  $V(G)$  — упомянутая скорость в 5 м/ч в одном долблении со скоростью в 30 м/ч при прохождении перемежающегося пропластка.

К заблуждению в отношении значимости очистки в ступенчатом характере зависимости  $V(G)$  приводит не только идентичность рассматриваемых зависимостей в экспериментальном и натурном бурении. Идентичность по расположению зависимостей  $V(G)$  в системе координат отмечается и внутри одного класса бурения — натурального. Например, на рис. 5 приведены графики зависимостей  $V(G)$  промышленного бурения в породах средней твердости долотами типа «С» в 200 метровом интервале глубины. График «М» получен при бурении средних пород близких по твердости к мягким, а «Т» — пород близких к твердым. Разнос кривых по оси ординат, предопределенный твердостью пород, идентичен разносу, обусловленному степенью очистки забоя на рис. 1в.

Общим для промышленного и стендового бурения является то, что продвижение забоя (бурение) начинается с некоторой «стартовой» скорости на соответствующей «стартовой» нагрузке, требуемой для

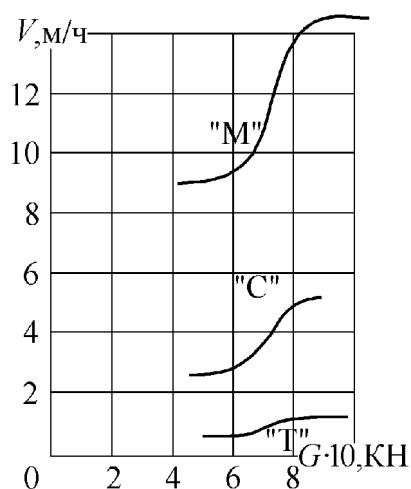


Рисунок 5.  $V(G)$  для пород «С» средней твердости в границах между мягкими «М» и твердыми «Т»



создания напряженного состояния в породе на поверхности забоя. В бурении долотами истирающе-режущего типа, например, ИСМ, этот эффект также наблюдается, что полностью исключает наличие области I (до  $G_1$ ) на рис. 1в. Разрушение породы истиранием в этой области происходит с неощутимой для исследования скоростью бурения.

Необходимо отметить, что продолжение графика  $V(G)$  в область нулевой нагрузки чаще не приводит в начало координат и принятие его (начала координат) за начало процесса ошибочно. Эта ошибка аналитиков подтверждается рис. 5, а также работами [4], и [10], где продолжение графика приводит к положительному значению  $V$ , существенно отличному от нуля.

Большинством исследователей отмечается значимое различие моделей реального бурения глубоких скважин от моделей экспериментального стендового бурения, включая модели бурения мелких (взрывных) скважин. В отличие от первого последним присуще постоянство соосности скважины и долота и относительно жесткое его нагружение. При бурении микродолотами 33 мм на стенде СВД-1000 с моделированием забойных условий, долотами 94 мм и долотами 215,9 мм на стенде ЗиФ1200, а также долотами 215,9 мм на станках БСВ и 2СБШ-200 при бурении взрывных скважин глубиной 14 - 15 м зависимость  $V(G)$  линейна начиная со «стартовой» нагрузки. При бурении глубоких скважин, где жесткость нагружения зависит от веса разгруженной части тяжелого низа и размещения его по стенке скважины с обеспечением упора в нее, а первоначальная соосность долота со скважиной нарушается с потерей продольной устойчивости тяжелого низа в процессе его разгрузки, зависимость  $V(G)$  носит ступенчатый характер.

Построение графика линейной зависимости  $V(G)$  из точки «старта» с минимальным изменением первой производной приблизительно соответствует стендовой модели бурения для данного долота в условиях рассматриваемого процесса (рис. 6). Превосходство реального бурения над стендовым достигается интенсификацией процесса ввиду качественного изменения работы бурильного

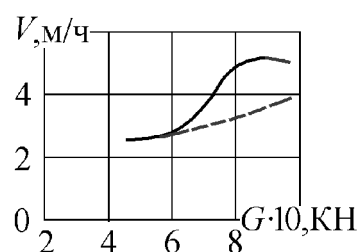


Рисунок 6. Зависимость  $V(G)$ : — натурального и --- стендового бурения

инструмента после потери устойчивости тяжелым низом и началом его взаимодействия со стенками скважины. Это превосходство характеризуется наличием интервала нагрузок интенсивного роста скорости бурения (ИНИРСБ). Начало продвижения забоя (бурение), его «стартовая» нагрузка необязательно совпадает с началом ИНИРСБ, как это часто имеет место в скважинах диаметром 190,5 мм. Нагрузки от «старта» бурения до ИНИРСБ - это режим бурения до потери устойчивости и начала взаимодействия бурильного инструмента со стенками скважины. Начало ИНИРСБ может быть смещено в сторону более высоких значений нагрузок, если порода, в силу своей твердости не разрушается даже при концентрации нагрузки на отдельных шарошках. По этой же причине первый ИНИРСБ может вообще отсутствовать. Он может искусственно устраняться применением наддолотного стабилизатора при любой твердости горных пород. Установление наличия интервала и его положения можно использовать для выбора места размещения наддолотного стабилизатора.

В общем случае, аналогия промышленного и стендового бурения соблюдается от «старта» до момента потери устойчивости бурильным инструментом в реальной скважине. Допустимое совмещение моделей в этом интервале нагрузок (рис. 6) при совмещении «стартовых» параметров позволяет легко решать задачи по установлению обобщенного коэффициента подобия в корреляции результатов экспериментального бурения при моделировании реального.

Скачкообразность процессов (ступенчатость) в физике достаточно известный эффект, обусловленный их качественным изменением. Бурение скважин не исключение. Череда критических глубин, критические скорости бурения по неизученным причинам и причинам, связанным со скоростью фильтрации флюидов и скоростью кольматации приповерхностного слоя породы на забое. Сюда же относится ступенчатый характер влияния расхода промывочной жидкости на скорость бурения [4, 3]. Сам процесс бурения уникален тем, что при нагружении долота работа бурильного инструмента может трижды претерпевать качественное изменение, определяемое по развитию в  $V(G)$  трех ступеней (рис. 7).

Количество ступеней и ее элементов в зависимости  $V(G)$  выявлялись по мере исторического увеличения длины колонны УБТ. Первая ступень (рис. 1в) выявлена с началом исследовательской деятельности в бурении. Вторая ступень,

используемая эффективно и в настоящее время, выделилась в 50 - 60 годы при форсировании роторного бурения. Апогеем установления количества ступеней стали 70-ые годы прошлого столетия, когда при переводе эксплуатационных скважин на диаметр 214 мм и форсировании роторного способа длину колонны УБТ доводили до 300 - 350 м (рис. 7). Все три ступени графика зависимости  $V(G)$  характеризуются наличием интервалов нагрузок интенсивного роста скорости бурения и интервалов нагрузок постоянной скорости бурения или даже некоторого ее спада.

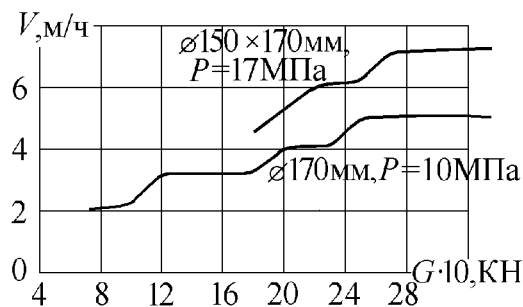


Рисунок 7. Графики  $V(G)$  на скв. 94 Карагайская ПО Куйбышевнефть

Часто, при грубом подходе в установлении зависимости  $V(G)$ , получаемые значения замеров параметров аппроксимируют в монотонную кривую, принимая эксцессы измерений, обусловленных изменением качества процесса работы бурильного инструмента, за статистический разброс данных [2, 8]. При более тщательном исследовании с минимальным шагом  $G$  интервалы нагрузок интенсивного роста скорости бурения и ее стабилизации ярко выражены и достаточно постоянны в координатах  $V(G)$ . Понимание природы ступеней, кардинально отличное от [1, 5, 16 - 18, 20], играет важную роль в выборе нагрузки на долото, поскольку отражают не столько взаимодействие долота с забоем, сколько взаимодействие всего бурильного инструмента с забоем и стенками скважины, как единого, сложного механизма.

Первая ступень развивается поэтапно по мере нагружения долота. Начиная со «старта», в интервале нагрузки незначительного роста скорости бурения, долото взаимодействует с забоем скважины в соосном с ней положении при вращении УБТ вокруг собственной оси без активного взаимодействия с ее стенками. Первый этап по условиям соосности долота и скважины соответствует бурению на стенде.

В последующем нагружении, после потери устойчивости инструментом, долото отклоняется от оси скважины, занимая положение «опертости» на две ша рошки с упором третьей в стенку скважины. Вращение УБТ принимает планетар-

ный характер без вращения вокруг собственной оси. На этом переходном этапе долото катается по забою на двух шарошках с минимальной производительностью, оставляя на забое «воротники» породы не разрушенные третьей шарошкой.

Интенсификация роста скорости бурения наступает в результате дальнейшего нагружения, когда силы трения УБТ о стенку скважины достигают такой величины, что долото из положения «опертости» на две шарошки начинает проворачиваться, а УБТ помимо планетарного вращения начинает вращаться вокруг собственной оси. При концентрации нагрузки на одной шарошке и увеличении скольжения вооружения по забою интенсивность скорости бурения возрастает.

На конечном этапе нагрузка достигает такой величины, что долото «вдавливается в соосность» со скважиной, занимая первоначальное положение и опираясь на забой всеми шарошками. Рассредоточение нагрузки между тремя шарошками и потеря дополнительного скольжения способствуют стабилизации или даже снижению скорости бурения в зависимости от моментоемкости проходимых пород.

Вторая ступень отображает изменение взаимодействия тяжелого низа со стенками скважины, полный переход на качение инструмента по стенке скважины с нарушением соосности долота и скважины, созданием дополнительного скольжения вооружения по забою и соответствующего роста скорости бурения. Качение по стенке возможно по достижению превосходства  $M_{УБТ}$  над  $M_D$ , т.е. при 2-х кратном значении крутящего момента на рабочей трубе. Дополнительным признаком качения инструмента является повышенная частота крутильных колебаний не согласованная с частотой вращения ротора, которая легко контролируется при тщательной расшифровке растянутой во времени моментограммы.

Наконец третья ступень: интенсивный рост скорости за счет продольных колебаний тяжелого низа, возбуждаемых подъемной силой, достигающей своего максимального значения. Величина подъемной силы ограничивается силами трения инструмента о стенки скважины, реакцией забоя, а также жесткостью колонны УБТ. Последний, наиболее продолжительный интервал нагрузок стабилизированной или даже падающей скорости, лимитирован длиной применяемой колонны УБТ и отражает полное зависание КНБК. Падение скорости возможно в силу снижения нагрузки на долото и изменения частоты колебаний подъемной силы.

В практике бурения от использования третьей ступени отказались из-за ее неэффективности в эксплуатации долот: шарошки раскалывались, фрезерованное вооружение ломалось, вставное крошилось.

Интервалы нагрузок интенсивного роста скорости бурения в зависимости  $V(G)$  авторы [11, 12] поспешили назвать «режимом динамического согласования», поскольку наблюдали усиленные вибрации долота. Исследования ограничивались серийными компоновками инструмента в эксплуатационных скважинах диаметром 214 мм. Были установлены достаточно стабильные по глубине и региону интервалы нагрузок  $10 - 12 \cdot 10$  КН в роторном бурении и  $6 - 8 \cdot 10$  КН — в турбинном.

Исследования, проведенные при разработке режимов турбинного бурения, показали постоянство положения интервала интенсивного роста скорости при снижении частоты вращения долота до  $200 \text{ мин}^{-1}$  на пониженной подаче насоса. Максимальное смещение составляло  $0,5 \cdot 10$  КН. Возбуждение колебаний «согласованных» с частотой вращения долота возможно только при отклонении его оси от оси скважины. Частоты, характерные для турбинного бурения, «согласуются» с  $3n$ .

При бурении скважин диаметром 190,5 мм с менее жесткими УБТ интенсивный рост скорости бурения устойчиво отмечается при величине нагрузок в  $6 - 8 \cdot 10$  КН в роторном способе и  $4 - 6 \cdot 10$  КН в турбинном. Если в турбинном способе «стартовая» нагрузка совпадала с началом интервала интенсивного роста в  $4 \cdot 10$  КН, то в роторном она колебалась от 4 до  $5,5 \cdot 10$  КН, что обусловлено изменениями твердости пород внутри категории средних.

При бурении скважин 269,9 мм с УБТ 229 мм и нагрузках в пределах  $12 \cdot 10$  КН в роторном бурении интервал интенсивного роста скорости бурения оказался недостижимым (рис. 8), в турбинном стабильно начинается с  $7 \cdot 10$  КН до остановки турбобура, в том числе и с долотами ИСМ. «Стартовая» нагрузка долот ИСМ смещалась в диапазон от 2 до  $5 \cdot 10$  КН в силу меньшей устойчивости опрокидыванию относительно шарошечных долот.

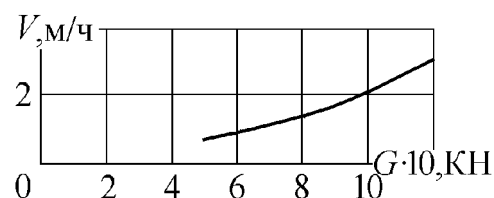


Рисунок 8.  $V(G)$  на скв. 2 Джуса, Казахстан: 269,9С-ГВ, УБТ229 - 70 м,  $n = 120 \text{ мин}^{-1}$

Из приведенных данных следует, что природа интенсивного роста скорости бурения в обособленных интервалах нагрузки обусловлена исключительно взаимодействием разгруженной части бурильного инструмента со стенкой скважины после потери им устойчивости, которая способствует концентрации нагрузки на отдельных шарошках (лопастях в долотах ИСМ).

Установленный эффект особенно ярко проявляет себя в турбинном бурении, где турбобуры, используемые для бурения скважин различного диаметра, существенно отличаются по весу. Начальная нагрузка интервала интенсивного роста скорости бурения соответствует весу турбобура и части УБТ, потерявших устойчивость. При расчете отклонения оси инструмента от оси скважины следует учитывать реальный диаметр скважины, размеры турбобура, а также диаметр УБТ и расстояние до точки соприкосновения их со стенкой скважины. Это расстояние немного меньше  $\frac{1}{4}$  волны, теряющих устойчивость УБТ, так как более жесткий турбобур несколько изменяет условия такой потери от собственного веса.

Нагрузка остановки турбобура («срыв») соответствует весу турбобура и части колонны УБТ, при которой в роторном способе завершается первый ИНИРСБ, т.е. в «срыве» не последнюю роль играет нелинейный рост крутящего момента на долоте при его «вдавливании в соосность» со скважиной. Установленные эффекты наблюдаются в паспортном режиме работы турбобура.

В турбинном способе модель бурения, в силу отсутствия жесткой связи долота со всем инструментом, определяется одной ступенью графика зависимости  $V(G)$ , разрываемого режимом «плавающей пяты», в котором  $V$  падает до 50 % разницы между  $V_{\max}$  до «плавающей пяты» и  $V$  «старта» без остановки турбобура с последующим восстановлением и дальнейшим ростом или стабилизацией по мере увеличения нагрузки. Модель ограничивается нагрузкой при которой турбобур «срывается» (останавливается) за счет, в том числе, резкого роста  $M$  на долоте при его «вдавливании в соосность» со скважиной в котором долото устанавливается на три шарошки. Интервал нагрузок постоянной или падающей скорости бурения вообще может отсутствовать, зато соотношение скоростей бурения до и после режима «плавающей пяты» может быть хорошим индикатором пористости (проницаемости) и пластичности проходимых горных пород и состояния долота..

В роторном бурении влияние размера и веса УБТ на положение начала ИНИРСБ также очевидно. Более высокая относительно турбинного способа величина нагрузки обусловлена тем, что после потери устойчивости инструментом концентрация нагрузки на одной шарошке, повышающая интенсивность роста скорости бурения, возможна только в том случае, если инструмент проворачивается вокруг собственной оси. А это возможно только после дополнительного нагружения, при котором достигается превосходство крутящего момента на УБТ от его трения о стенку скважины над моментом на долоте, опертом на забой двумя и стенку одной шарошками. В противном случае, как сказано ранее, УБТ вращается планетарно без вращения вокруг собственной оси, а долото катается по забою на двух шарошках с минимальной производительностью, оставляя на забое гребни породы, не разрушенные третьей шарошкой. Величина дополнительной нагрузки и составляет разницу в положении начал ИНИРСБ между турбинным и роторным способами, конечно с учетом разницы в жесткости и весе.

Что касается влияния частоты вращения долота на скорость бурения, трудно сомневаться в монотонности или даже линейности зависимости, поскольку скорость разрушения близка к скорости распространения упругой волны и несопоставима со скоростями приложения нагрузки при бурении. На стенде СВД-1000 при всех моделируемых условиях глубокой скважины зависимость прямо пропорциональна. На частотах свыше  $800 \text{ мин}^{-1}$  скорость бурения падает в силу зашламления межзубцового пространства, которое самоустраняется при переходе на частоту  $60 \text{ мин}^{-1}$ .

По результатам промысловых исследований при электробурении с частотным регулированием авторы [2, 8] принимают прямо пропорциональную зависимость скорости бурения от вращения долота. А.В. Орлов [8], обобщая результаты исследований в глубоком бурении, пришел к выводу, что скорость бурения имеет степенную зависимость от частоты вращения. Степень при  $n$  колеблется в пределах 0,3 - 0,7, причем меньшая величина соответствует породам большей твердости.

В указанных работах не учитывается наличие критических частот [14, 15] и состояние ствола, которые искажают общую картину моделей бурения. В промысловых условиях зависимости  $V(n)$  принимают причудливую форму. Поэтому частоту вращения следует вводить в модель бурения и для выбора параметров ре-

жима бурения использовать зависимость  $V(G, n)$ . В таких моделях увеличение частоты вращения долота смещает ступенчатые зависимости  $V(G)$  в сторону меньших нагрузок с изменением формы ступеней (Рис.9(б)).

## 2. Реализованные модели бурения

Возвращаясь к бесконечному множеству моделей бурения можно отметить, что в своем большинстве они сохраняют характер взаимосвязей параметров с изменением лишь количественных характеристик в зависимости от физико-механических свойств горных пород, забойных условий, свойств промывочной жидкости и ее расходе. Однако отдельные факторы, например, такие как кавернозность ствола коренным образом искажают этот характер. На рис. 9 приведены классические трехступенчатые модели бурения в виде объемных графиков зависимости  $V(G, n)$ . На рис. 9а график зависимости  $V(G, n)$  с полными первыми двумя ступенями и зарождающейся третьей ступенью при ярко выраженных интервалах интенсивного роста скорости бурения. На рис. 9б график с полной первой ступенью и интервалом интенсивного роста скорости бурения второй ступени.

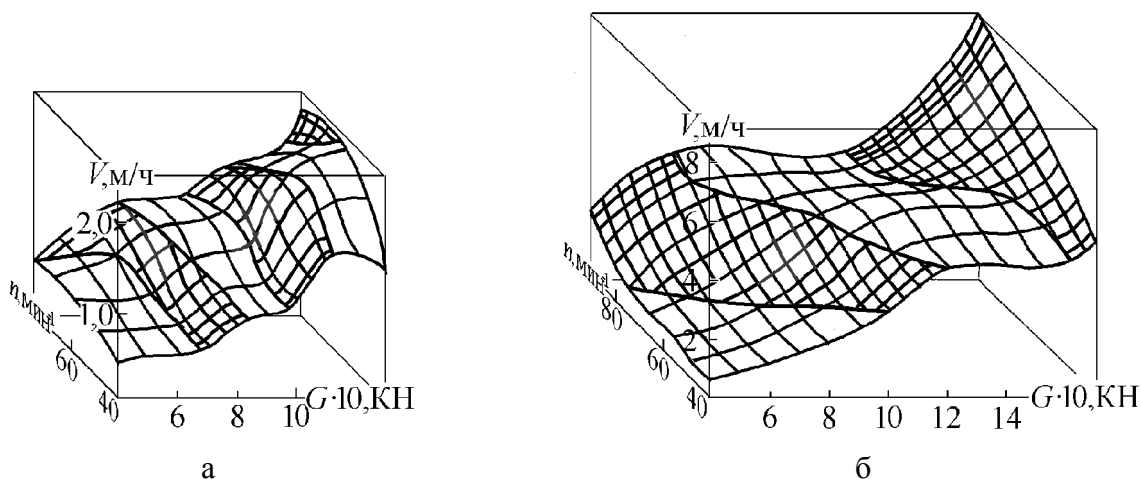


Рисунок 9. Графики  $V(G, n)$  при бурении скв.51 Вост. Колвинская Тимано-Печорской НГП роторным способом Д190,5С-ГВ, 10 · 3, УБТ146 — 200м, СБТ127 · 9 ТБПВ — остальное: а —  $L = 2039$ м; б —  $L = 2060$ м

В практике бурения установлены лишь некоторые причины искажения за-



зависимостей  $V(G, n)$ , например, недостаточное количество УБТ в компоновке инструмента. На рис. 10 приведен график такой зависимости. Длина УБТ в 100 м с использованием в нагружении долота стального инструмента показывает на достаточность компоновки в средних частотах вращения инструмента.

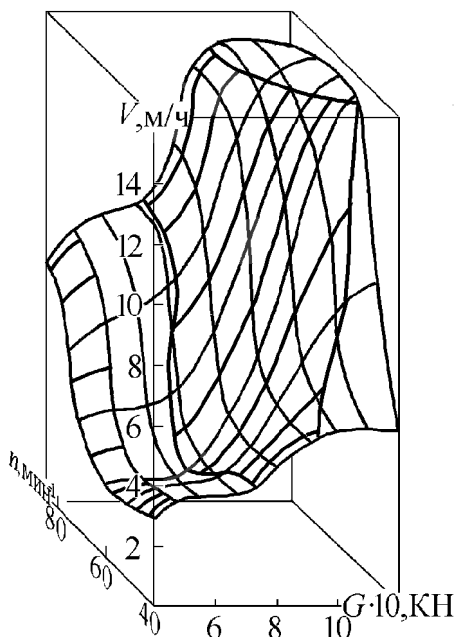


Рисунок 10. График  $V(G, n)$  на скв. 51 Вост.Колвинская ТП НГП роторным способом Д190,5С-ГВ, 10 · 3, УБТ146 — 100м, СБТ127 · 9 ТБПВ — остальное при  $L = 1930$ м

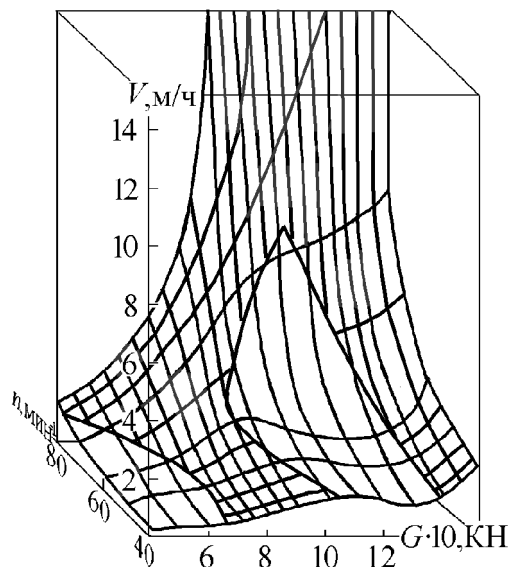
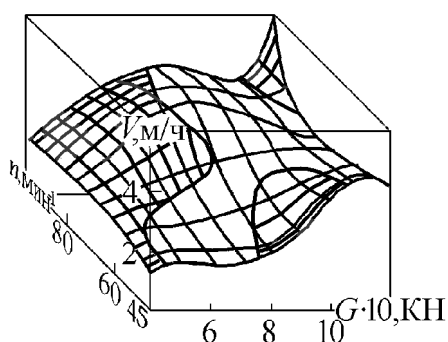
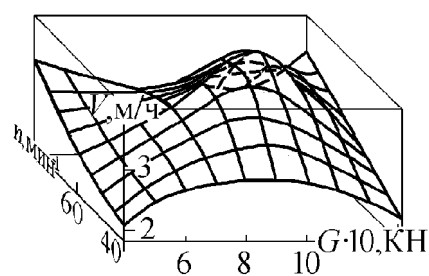


Рисунок 11. График  $V(G, n)$  на скв.51 Вост. Колвинская ТП НГП роторным способом Д190,5С-ГВ, 10 · 3, УБТ146 — 200м, СБТ127 · 9 ТБПВ — остальное при  $L = 2451$ м.



а



б

Рисунок 12. Графики  $V(G, n)$  при бурении скв.51 Вост.Колвинская Тимано-Печорской НГП роторным способом Д190,5С-ГВ, 10 · 3, УБТ146 — 200м, СБТ127 · 9 ТБПВ — остальное: а —  $L = 1990$ м; б —  $L = 2231$ м

Кавернозность ствола существенно влияет на работу инструмента, например, вибрационную составляющую, резко изменяя зависимость  $V(G, n)$ . На рис. 11 приведен график такой зависимости. В скв. 51 Вост. Колвинская Тимано-Печорской НГП на глубине 2451 м сформировались две большие каверны, соизмеримые с длиной полуволны теряющих устойчивость УБТ, которые при повышенных частотах вращения становятся причиной возбуждения низкочастотных колебаний инструмента с выходом вибраций на рабочую площадку и достижением амплитуды крутящего момента величины, приводящей к порыву роторных цепей. Если подобные каверны формируются одновременно с забоем, резко возрастает скорость бурения (возможно, обратная связь) при малых нагрузках с последующим падением на нагрузках, рекомендуемых проектом.

Отдельно следует сказать об искажениях зависимостей по не установленным причинам. На рис. 12 приведены графики таких зависимостей. В обоих случаях графики имеют ломанные поверхности, мало похожие на ступенчатые, но, тем не менее, позволяющие выбирать некую нагрузку на долото и частоту его вращения, которые обеспечивают максимальную скорость бурения.

В турбинном бурении зависимости  $V(G)$  не только позволяют выбирать нагрузку на долото, но и, опосредовано, определять некоторые физико-механические свойства проходимых пород (относительную пористость, проницаемость и пластичность), а также состояние долота. На рис. 13 приведены графики зависимостей  $V(G)$  при бурении скв. 51 Вост. Колвинская Тимано-Печорской НГП турбинным способом непроницаемых и флюидосодержащих горных пород, а также бурении изношенным долотом. Флюидосодержание определялось опосредовано по РС-диаграмме. С использованием критерия оценки состояния долота по соотношению  $V_{\max}$  «до» и «после» режима «плавающей пяты» в

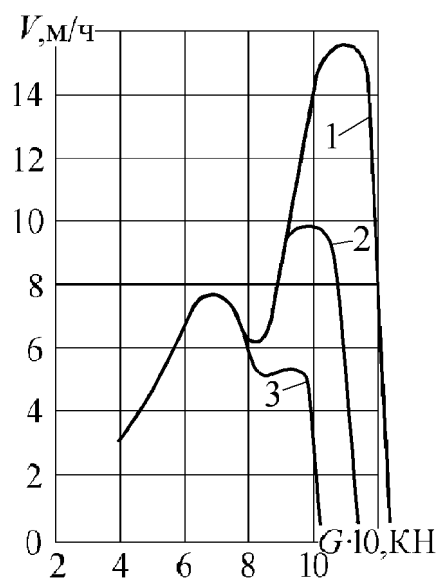


Рисунок 13.  $V(G)$  при бурении компоновкой Д190,5С-ГВ, 10 · 3, ЗТСШ1-172, УБТ146 — 100м, СБТ127 · 9 ТБПВ — остальное.

1 - непроницаемые породы; 2 - флюидосодержащие пластичные породы; 3 - изношенное долото

прекращении долбления ни одно долото не было поднято в аварийном состоянии в более чем десятилетней практике применения способа.

### Выводы

1. Степенная модель бурения  $V = a n^x G^y$  утратила свое значение в силу использования для нагружения колонны УБТ значительной длины и использования долот высокой паспортной нагрузки.

2. Наиболее продуктивными по доступности измерения параметров и управления ими являются модели  $V(G, n)$  и  $V(G)$ , устанавливаемые непосредственно в процессе бурения в начале долбления, при наращивании инструмента и при эксцессах  $V$  в короткий промежуток времени без задержки бурения и, возможно, в автоматическом режиме.

3. Разделение моделей  $V(G, n)$  и  $V(G)$  на интервалы по способам взаимодействия вооружения долота с породой и механизмам ее разрушения в современном бурении шарошечными долотами ошибочно и неправомерно.

4. Разделение моделей реального бурения глубоких скважин  $V(G, n)$  и  $V(G)$  на интервалы по степени очистки забоя ошибочно и бесперспективно в плане выбора параметров режима.

5. Применяемые буровые насосы обеспечивают вынос породы в скважинах «эталонного» диаметра долота без возникновения «потолка» очистки, выражаемого выполаживанием графиков зависимостей  $V(G, n)$  и  $V(G)$ .

6. Скорость бурения породы внутри одной категории твердости, например, средних, может изменяться кратно.

7. Продвижение забоя (бурение) начинается с некоторой «стартовой» скорости на соответствующей «стартовой» нагрузке, требуемой для создания напряженного состояния в породе на поверхности забоя.

8. Направление графика зависимости  $V(G)$  после «старта» чаще не связано с началом координат и принятие его (начало координат) за начало процесса бурения ошибочно. Как правило, продолжение графика в сторону нулевой нагрузки приводит к положительному значению  $V$ , существенно отличному от нуля.

9. Значимое различие моделей реального бурения глубоких скважин от моделей экспериментального стендового бурения определяется интенсифика-

цией процесса ввиду качественного изменения работы бурильного инструмента после потери устойчивости тяжелым низом и началом его взаимодействия со стенками скважины.

10. Превосходство реального бурения над стендовым характеризуется наличием интервалов нагрузок интенсивного роста скорости бурения (ИНИРСБ).

11. Начало ИНИРСБ непостоянно в координатах  $V(G, n)$  и  $V(G)$  и может искусственно устраняться применением наддолотного стабилизатора. Наличие ИНИРСБ позволяет выбирать местоположение установки стабилизатора.

12. Совмещение «стартовых» параметров экспериментальных и промышленных моделей позволяет решать задачи по установлению обобщенного коэффициента подобия в корреляции результатов экспериментального бурения при моделировании реального.

13. Модели современного бурения в виде зависимостей  $V(G, n)$  и  $V(G)$  имеют трехступенчатую форму. В роторном бурении используется вторая ступень. Первая применяется крайне редко («с навеса») в силу малой эффективности. Третья — в силу высокой аварийности шарошечных долот.

14. В турбинном бурении используется единственная первая ступень зависимости  $V(G)$ . При нагружении долота до «вдавливания в соосность» со скважиной происходит остановка турбобура, т.е. в «срыве» не последнюю роль играет нелинейный рост крутящего момента на долоте. В процессе бурения эффективно работает одна шарошка из трех попеременно (одна лопасть из всех попеременно).

15. Зависимость скорости бурения от частоты вращения долота в пределах используемых частот линейная или степенная со значением степени близкой единице.

16. В моделях  $V(G, n)$  увеличение частоты вращения долота смещает ступенчатые зависимости  $V(G)$  в сторону меньших нагрузок с изменением формы ступеней.

17. Трехступенчатые зависимости  $V(G, n)$  в роторном бурении претерпевают изменения по различным причинам, в том числе: из-за недостаточности длины колонны УБТ; кавернозности ствола скважины; по не установленным причинам.

18. Наибольшее искажение зависимости  $V(G, n)$  и аварийную ситуацию создает кавернозность. Разрез горных пород склонный к высокой кавернозности следует проходить на ГЗД.

19. В турбинном бурении зависимости  $V(G)$  по соотношению  $V_{max}$  «до» и «после» режима «плавающей пяты» позволяют выбрать эффективную нагрузку на долото, определить (опосредовано) некоторые физико-механические свойства проходимых пород (относительную пористость, проницаемость и пластичность), а также контролировать состояние долота.

### Литература

1. Бингхем М. Oil and Gas Journal. V.62 №45, 50, 1964, №1–3, 1965 (Бингхем М.Г. Проблемы буримости горных пород. М.: ВНИИОЭНГ, 1966. 127 с.)

2. Гельфгат Я.А., Орлов А.В., Финкельштейн Г.Э. К вопросу установления некоторых эмпирических зависимостей показателей работы долот от параметров режимов бурения в промысловых условиях // Бурение глубоких скважин. М.: Гостехиздат, 1963 («Труды ВНИИБТ», вып. IX), с. 13-23.

3. Дашевский А.С. и др. О влиянии зашламленности забоя на механическую скорость бурения // В кн.: Процессы разрушения горных пород и пути ускорения бурения скважин. Уфа : Миннефтепром, 1978 (Вторая всесоюзная научно-техническая конференция). С.143-148.

4. Дашевский А.С. и др. Влияние режимных параметров на величину шламовой подушки как фактора, определяющего показатели работы долота // В кн.: Разрушение горных пород. Уфа : Миннефтепром, 1982 (Третья всесоюзная научно-техническая конференция). С. 208 — 211.

5. Жлобинский Б.А. Динамическое разрушение горных пород при вдавлении. М.: Недра, 1970. 152 с.

6. Каменских С.В. Развитие методики оптимизации режимов бурения скважин трехшарошечными долотами. Автореферат дис. ... канд. техн. наук. Ухта, 1998.

7. Методы выбора рациональных способов и режимов бурения. Обзор зарубежной литературы. М.: ЦНИИТЭнефтегаз, 1964. 74 с.

8. Орлов А. В. Установление оптимального сочетания осевой нагрузки на долота и скорости его вращения при глубоком бурении // Труды ВНИИБТ, вып. XIII. М.: «Недра», 1964, С. 113 -129.
9. Потапов Ю.Ф., Махонько В.Д., Шевалдин П.Е. и др. М.: ОНТИ ВНИИО-ЭНГ, 1971. 63 с.
10. Потапов Ю.Ф. и др. Проектирование режимов турбинного бурения. М.: Недрa, 1974. 240 с.
11. Рогоцкий Г.В., Кузнецова З.В. Выбор оптимальных режимов роторного бурения и компоновки бурильной колонны для проводки скважин на площадях объединения "Оренбургнефть". РИТС "Бурение", вып.10, 1982. С. 3 — 4.
12. Соломенников С.В. Исследования закономерностей искривления скважин и разработка технических средств и мероприятий по бурению стволов в заданном направлении. Автореферат дис. ... канд. техн. наук. ВНИИБТ, 1981, 27 с.
13. Спир Дж.В. Выбор оптимального режима бурения. ГОСИНТИ, 1959. 15с.
14. Саркисов Г.М. Расчеты бурильных и обсадных колонн. М.: Недрa, 1971. 205 с.
15. Сароян А.Е. Бурильные колонны в глубоком бурении. М.: Недрa, 1979. 231 с.
16. Федоров В.С. Научные основы режимов бурения. М.: Гостоптехиздат, 1951, 248 с.
17. Федоров В.С. Проектирование режимов бурения. М.: Гостоптехиздат, 1958, 215 с.
18. Шрейнер Л.А. Физические основы механики горных пород. М.: Гостоптехиздат, 1950. 211с.
19. Эйгелес Р.М., Стрекалова Р.В. Расчет и оптимизация процессов бурения скважин. М.: Недрa, 1977, 200 с.
20. Noble W.B. Rock bit design and experimental data // The Oil and Gas Journal, 46, №24, 1947.