

В.А. ЯНОВЛЕВ

РАЦИОНАЛЬНАЯ
ОТРАБОТКА
ДОЛОТ
УМЕНЬШЕННОГО
И МАЛОГО
ДИАМЕТРОВ

В. А. ЯКОВЛЕВ

РАЦИОНАЛЬНАЯ ОТРАБОТКА
ДОЛОТ УМЕНЬШЕННОГО
И МАЛОГО ДИАМЕТРОВ



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НЕ ДРА»
Москва 1970

**Рациональная отработка долот уменьшенного и
малого диаметров.**

В. А. ЯКОВЛЕВ, М., изд-во «Недра»,
1970, стр. 136.

В книге дан анализ и выявлена степень приемлемости существующих методов и критериев отработки долот для условий бурения глубоких скважин малого диаметра. Рассматриваются вопросы выбора и определения эффективности способов и режимов бурения, а также режима подачи долота из условий рациональной эксплуатации названных долот.

Излагается методика отработки шарошечных долот, разработанная на основании опыта бурения скважин уменьшенного и малого диаметров и результатов промысловых и стендовых исследований. Приводятся результаты стендовых и промысловых испытаний шарошечных долот, проведенных по предложенной методике.

ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ ОТРАБОТКИ ДОЛОТ

Рациональной отработке долот в нашей стране начали уделять особенное внимание в период бурного послевоенного развития буровой техники и внедрения форсированных режимов бурения. В 1949 г. на страницах журнала «Нефтяное хозяйство» развернулось обсуждение этой проблемы в связи со статьей А. А. Минина¹, в которой он достаточно убедительно в аналитической форме обосновал положение, что время эффективной работы долота на забое должно быть ограничено некоторым пределом — достижением максимума рейсовой скорости.

До этого продолжительное время считалось, что долото следует обрабатывать до тех пор, пока оно дает проходку. Такая отработка долот не обеспечивала получения высоких скоростей на относительно небольших глубинах, однако она соответствовала существовавшему в то время уровню буровой техники и поэтому широко применялась.

С внедрением форсированных режимов бурения увеличилась механическая скорость, значение которой тем выше, чем меньше долото работает на забое, что привело в некоторых нефтяных районах страны к излишнему расходу долот и увеличению затрат времени на самые трудоемкие работы в бурении — спуско-подъемные операции. «Стопроцентная» же отработка долот уже не соответствовала возросшему уровню буровой техники.

¹ А. А. Минин. Время долбления как условие максимума технической скорости проходки. Нефт. хоз., № 3, 1949.

Такое положение создало необходимость ставить время работы долота в зависимость от продолжительности всего рейса.

Дискуссия на страницах журнала «Нефтяное хозяйство» была закончена статьей проф. Н. И. Шацова в 1951 г., но практически обсуждение проблемы рациональной отработки долот продолжается до настоящего времени.

Большинство исследователей [4, 47 и др.] сходятся на том, что рациональное время работы долота на забое должно определяться моментом достижения максимума рейсовой скорости.

А. П. Духнин [10, 11] предложил определять рациональное время подъема долота с забоя по падению мгновенной механической скорости в процессе рейса долота. Н. Н. Ядуллаев [48, 49], Е. И. Стетюха [33] и другие принимали за критерий подъема долота достижение определенного соотношения значений средней или конечной механической скорости проходки с начальной. Н. А. Гаджиев, Н. Н. Ядуллаев и А. С. Шарутин [6] предложили поднимать долото для его замены в момент, когда средняя механическая скорость проходки, снижаясь, станет равной скорости приработки долота.

М. И. Корнев, М. М. Андреев, Н. И. Шацов и другие установили совместный критерий максимума рейсовой скорости и минимума себестоимости 1 м проходки. А. А. Чефрас провел большую исследовательскую работу [43] по определению рациональной продолжительности пребывания долота на забое на площадях Азербайджана при условии достижения максимума рейсовой скорости и минимума себестоимости проходки.

Н. И. Шацов, А. П. Духнин [11], Г. И. Бланк [4], Е. Ф. Эпштейн и Г. П. Попов [47] и другие указывали на необходимость обрабатывать долота по критерию минимума стоимости 1 м проходки. Такого же мнения придерживается ряд зарубежных исследователей [56, 57].

А. П. Духнин и И. Ф. Толстых [13, 14] предложили обрабатывать долота по максимуму произведения пройденной проходки на среднюю механическую скорость ($h\nu_{ср}$); М. М. Зубков [17] — по максимуму произведения текущего значения механической скорости на время

от начала рейса долота (v_{it_0}); Г. Н. Успенский и Л. Г. Воинов [36] — по максимуму произведения проходки на рейсовую скорость (hv_p); А. А. Турко [35] — по максимуму произведения рейсовой на среднюю механическую скорость ($v_p v_{cp}$).

Остановимся на некоторых из перечисленных методов.

А. А. Минин, как указывалось выше, предложил определять время рейса долота по максимуму рейсовой скорости проходки. Формула, по которой он предлагает определять «экономическое время рейса», имеет следующий вид:

$$t_э = \sqrt{\frac{1,3T_{c.п.}}{k}},$$

где $T_{c.п.}$ — время, затрачиваемое на спуско-подъемные операции и смену долота, в ч; k — коэффициент часового износа долота.

Для определения значения коэффициента k А. А. Минин предложил устанавливать средневзвешенное его значение по скважине в целом вне зависимости от глубины бурения. В этом случае эффективная продолжительность работы долота на забое по указанной формуле ставится в зависимость только от продолжительности спуско-подъемных работ, являющихся вспомогательными, не связанными с работой долота на забое.

В результате этого предложения и других упрощений, не соответствующих действительным условиям бурения, на что указывали Н. И. Шацов, А. П. Духнин, Л. А. Шрейнер, В. С. Федоров, М. И. Корнев и М. М. Андреев, Г. И. Бланк, данная формула для практического применения оказалась непригодной.

Некоторые неточности допускаются А. А. Мининим и при выборе рационального режима нагрузок на долото. Он считает, что задача получения наибольшей скорости проходки требует возможно более интенсивной и продуктивной сработки той первоначальной части ресурсов долота, которая ограничивается экономическим временем рейса и составляет относительно небольшую часть полного срока службы долота.

С этой точки зрения целесообразно в самом начале рейса установить ту наибольшую осевую нагрузку, которая допускается характером породы или конструктив-

ными возможностями долота, колонны труб и оборудования, и придерживаться этой величины до истечения экономического времени рейса долота.

Ниже нами будет показано, что в некоторых случаях совершенно необходим дифференцированный подход к выбору нагрузки на долото как при подборе ее в начале очередного рейса, так и на протяжении всей работы долота. Особенности современной техники бурения, обеспечивающие высокие скорости проводки скважин, заставляют изменять режимные параметры в зависимости от конкретных условий. К этому выводу приходят и некоторые другие исследователи [10, 11].

Г. И. Бланк [4], Е. Ф. Эпштейн и Г. П. Попов [47], В. С. Федоров [37, 38, 44] строгим математическим анализом убедительно доказали, что необходимо отрабатывать долота из расчета получения максимума рейсовой скорости.

В. С. Федоров подразделяет все используемые в практике долота на три группы: у одних он считает долговечность рабочей поверхности T_z ниже долговечности опор T_f , т. е. $T_z < T_f$; у других $T_z > T_f$ и, наконец, у третьей группы $T_z \approx T_f$.

В зависимости от соотношения между T_z и T_f он предлагает различные методики определения момента подъема долота для замены, т. е. рационального времени его работы на забое.

Так, если долговечность рабочей поверхности T_z ниже долговечности опор T_f , то время эффективной работы долота на забое будет соответствовать максимуму рейсовой скорости. Если $T_z > T_f$, то время рациональной работы долота $T_{\text{рац}}$ равняется T_f . Если $T_z \approx T_f$, то $T_{\text{рац}}$ соответствует максимуму рейсовой скорости.

Во всех случаях при определении времени подъема долота В. С. Федоров рекомендует пользоваться механической скоростью проходки [44], причем долото следует поднимать после того, как механическая скорость, уменьшаясь с течением времени, достигнет значения

$$v_m = k_0 v_{m, \text{ср}},$$

где k_0 — коэффициент, определяемый опытным путем.

Г. С. Баршай, В. Г. Шульгин, Н. И. Буяновский и Я. А. Гельфгат предложили конструкцию специального прибора, названного ими индикатором рейсовой скоро-

сти (ИРС), предназначенного для определения экстремумов рейсовой скорости [3].

Наши наблюдения за обработкой долот на площадях Харьковнефтегазразведки показали, что в большинстве случаев при бурении на значительных глубинах (после спуска промежуточных колонн) долота уменьшенного диаметра полностью изнашиваются по опоре до наступления максимума рейсовой скорости. Это наблюдается особенно часто в турбинном бурении, где износ долота наступает достаточно быстро, долота оказываются доведенными до предельного износа прежде, чем достигается максимум рейсовой скорости.

Если же иногда долото поднималось преждевременно, несмотря на достигнутый максимум рейсовой скорости, то оказывалось, что перед подъемом механическая скорость оставалась на достаточно высоком уровне, незначительно отличалась от первоначальной и, следовательно, подъем долота был нецелесообразным.

Бурение в неоднородных по крепости породах приводит к неправильному определению момента подъема долота по максимуму v_p . Так, если в начале рейса были мягкие породы, а затем крепкие, то долото поднимали преждевременно. И, наоборот, если после продолжительного бурения крепких пород уже значительно изношенное долото попадало в породы мягкие, рейсовая скорость увеличивалась и при продолжении бурения возникала опасность аварии долота.

Кроме того, на больших глубинах обработка долот по максимуму рейсовой скорости затрудняет управление процессом обработки долота.

Изложенное подтверждается проведенными в 1954—1955 гг. широкими испытаниями метода обработки долот по максимуму рейсовой скорости с использованием индикатора рейсовой скорости в Саратовнефти, Куйбышевнефти и Краснодарнефти [1].

На несостоятельность рейсовой скорости как самостоятельного критерия обработки долот указывали еще в 1949 г. А. П. Духнин и Р. А. Иоаннесян [10]. Это фактически признали Г. С. Баршай и Н. И. Буяновский [3], утверждая, что «...и при бурении в совершенно однородных породах длительность долбления нельзя установить только по рейсовой скорости, так как величина рейсо-

вой скорости не отражает состояния долота, работающего на забое».

По нашему мнению [15, 51, 52], роль рейсовой скорости в рациональной обработке сводится к выбору оптимального сочетания параметров режима бурения в начале рейса долота и оценке эффективности их применения в процессе бурения. Обрабатывать долота следует по какому-то иному, чем рейсовая скорость, критерию, хорошо увязывающему время пребывания долота на забое с его износом и применяемыми параметрами режима бурения.

Из других методик обработки долот следует отметить методику, предложенную П. А. Голяковым.

Эта методика основана на получении предельной проходки на долото, для чего кривые уменьшения механической скорости проходки от износа долота совмещаются с кривыми, характеризующими экономию времени по смене долота при проходке каждого лишнего метра. Точки пересечения этих кривых определяют экономический предел использования долота на забое.

Формула для определения предельной проходки в этом случае имела вид:

$$n = \frac{A}{\frac{a_n + a_{n-1}}{2} - T_{n-2}},$$

где n — предельное количество метров проходки на долото; A — время, затраченное на спуско-подъем инструмента и смену долота, в ч; a_n и a_{n-1} — время на бурение последнего и предпоследнего метров проходки в ч; T_{n-2} — среднее время на бурение 1 м проходки до бурения последнего и предпоследнего метров в ч.

Для ускорения расчетов в производственных условиях П. А. Голяков предложил специальную счетную линейку, облегчающую определение предельного числа метров проходки в процессе рейса долота.

Указанная методика не нашла практического применения по многим причинам, основной из которых является то, что положенная в ее основу формула определения предельной проходки не дает точного значения. Искомая величина предельной проходки меняет свое значение в зависимости от того, в какой момент от начала рейса ее измеряют. Кроме того, для построения

исходных кривых требуется затратить много труда, иметь большое число данных, характеризующих уменьшение механической скорости в связи с затуплением долот разного типа в породах различной крепости.

На несостоятельность методики П. А. Голякова указывали Н. И. Шацов и Г. И. Бланк. Однако указанная методика сыграла и свою положительную роль, так как до некоторой степени упорядочила принятую в то время в нефтяной промышленности методику установления нормативов проходки на долото.

За последние годы начали появляться работы с предложением методик отработки долот, ставящих время пребывания долота на забое в зависимость от его износа, причем износ работающего долота в этих работах определяется косвенно, по характеру изменения выбранных критериев отработки долот.

А. П. Духнин и И. Ф. Толстых [13, 14] предложили определять продолжительность эффективной работы долота на забое по максимуму критерия hv_{cp} , т. е. произведения проходки h и средней механической скорости v_{cp} , определяемой как частное от деления проходки h на время t_b , отсчитываемое от начала рейса.

А. П. Духнин и И. Ф. Толстых полагают, что изменение произведения hv_{cp} во времени, отражая физическое состояние долота, меняющееся в результате износа, дает возможность устанавливать целесообразную продолжительность рейса.

Они нашли, что максимум функции hv_{cp} достигается, когда соотношение между текущей и средней механическими скоростями определяется выражением

$$v_t = 0,5v_{cp}, \quad (1)$$

т. е. механическая скорость бурения v_t к моменту подъема долота должна равняться половине средней скорости бурения данным долотом.

Как справедливо заметил В. С. Федоров [37], А. П. Духнин и И. Ф. Толстых нашли частное решение поставленной ими задачи, так как соотношение (1) справедливо только для случая, когда время работы долота равно времени, задалживаемому на спуско-подъемные операции. В. С. Федоров определил, что в общем случае это соотношение будет иметь вид:

$$v_t = kv_{cp}$$

и в каждом конкретном случае различаться только величиной коэффициента k .

Указанный метод определения рационального времени пребывания долота на забое не нашел широкого применения на практике потому, что максимум произведения hv_{cp} так же, как и максимум v_p , в большинстве случаев при обработке долот на больших глубинах не отбивается. Долота, как правило, срабатываются до наступления максимума hv_{cp} [1, 6].

М. М. Зубков [17] считает, что произведение мгновенной механической скорости проходки v_t на время работы долота на забое t_b имеет максимум и в каждый момент времени характеризует текущую работоспособность долота. Наступление максимума произведения $v_t t_b$, по М. М. Зубкову, указывает момент подъема долота для его смены.

Задача сводится к определению текущего значения параметра A по формуле

$$A = \frac{\Delta h}{\Delta t} t_b,$$

где A — параметр обработки долот; Δh — малый интервал проходки в m ; Δt — время, затраченное на разбуривание отрезка Δh , в $ч$; t_b — время работы долота на забое, исчисляемое от начала рейса, в $ч$.

По достижении A_{max} отработанное долото поднимают для замены.

Для удобства вычислений М. М. Зубков предложил специальные номограммы, счетную линейку и вычислительный круг, построенные на основе рассмотренной выше зависимости. Совместно с В. С. Неклюдовым и А. И. Дряхловым он разработал автоматический регистрирующий прибор.

Применение данной методики в Краснодарнефти позволило упорядочить до некоторой степени обработку долот в этом районе. Эта методика в данном районе в большинстве случаев дает положительные результаты, но требует проведения вычислительных работ, с которыми бурильщик, выполняя свою основную работу, справиться не может. Автоматический же регистрирующий прибор пока не нашел широкого применения.

Обработка долот по описанной методике в других районах Советского Союза [6, 18] часто приводила к

отрицательным результатам, так как параметр $v_1 t_6$ не отображает полностью в каждый данный момент времени изменение мгновенной механической скорости v_1 , которая более полно, чем ее произведение на время t_6 , характеризует процесс, происходящий на забое скважины.

Н. А. Гаджиев, Н. Н. Ядуллаев и А. С. Шарутин [6] предложили методику обработки трехшарошечных долот при роторном и турбинном способах бурения глубоких скважин, заключающуюся в подъеме долота в момент, когда средняя механическая скорость проходки станет равной скорости приработки долота.

Отрицательная сторона этой методики заключается в неправильном выборе ее исходных параметров. Скорость приработки долота является самым неопределенным показателем всего рейса долота, по своей величине она может резко меняться в зависимости от состояния забоя скважины и других причин. Средняя механическая скорость проходки, кроме того, не характеризует в достаточной мере процесс в каждый данный момент времени.

В целом рассматриваемая методика не отражает реальный процесс, происходящий на забое скважины, характер которого во многом зависит от применяемых параметров режима бурения, состояния работающего долота, свойств проходимых пород и т. п.

В Советском Союзе и за рубежом в последнее время начал исследоваться и применяться оптимальный экономический критерий обработки долот — минимум стоимости проходки. Последний определяется по формуле

$$C = \frac{(t_6 + t_n) a + b}{h}, \quad (2)$$

где C — стоимость 1 м проходки в руб.; t_6 — продолжительность работы долота на забое в ч; t_n — продолжительность спуско-подъемных операций в ч; a — себестоимость 1 ч бурения в руб.; b — себестоимость одного долота в руб.; h — проходка долота за рейс в м.

Как показал Н. И. Шацов, максимум рейсовой скорости и минимум стоимости проходки в процессе бурения не совпадают. Как правило, рейсовая скорость при минимуме стоимости проходки несколько ниже своего максимального значения. Поэтому при обработке долот

по минимуму стоимости проходки происходит некоторая экономия долот.

Из формулы (2) следует, что чем выше себестоимость бурения и применяемого долота, тем дольше следует держать долото на забое для получения максимально допустимой проходки и тем самым снижения себестоимости 1 м проходки. При применении дорогостоящих долот (гидромониторных, штыревых и в особенности алмазных) в качестве критерия эффективного использования долота многие исследователи рекомендуют применять экономическую скорость бурения, т. е. механическую скорость, обеспечивающую минимальную стоимость 1 м проходки.

Интересно при этом отметить, что в США при применении дорогих долот стремятся получить как можно большую проходку на долото даже за счет сокращения механической скорости бурения.

Многие зарубежные исследователи усиленно ищут пути и методы отработки долот из расчета получения наименьшей стоимости бурения. Они считают, что большая механическая скорость не всегда обеспечивает минимальную стоимость 1 м проходки, особенно при бурении на больших глубинах.

Е. М. Галле и Н. В. Вудс с помощью счетно-вычислительной машины разработали математическую систему для определения оптимального сочетания режимных параметров для заданного района, обеспечивающих минимальную стоимость единицы проходки в предстоящем рейсе с учетом износа ранее отработанных долот.

Ими разработаны методы расчетов оптимальных значений нагрузки на долото и скорости его вращения как меняющихся в процессе рейса, так и постоянных. Расчеты показали, что если в процессе рейса нагрузка и скорость вращения долота увеличиваются по мере износа его вооружения, экономия составляет 2—6% по сравнению с применением постоянных значений этих параметров.

Для успешного применения указанной методики необходимо предварительный тщательный анализ следующих фактических данных по уже пробуренным в сходных условиях скважинам: времени механического бурения и проходки на долото, нагрузки на долото, скорости вра-

щения долота, величины и характера износа зубьев и опоры долота.

После соответствующего усреднения этих величин по номограммам определяют оптимальные значения нагрузки на долото и скорости его вращения, которые применяют при очередном рейсе долота.

Расчеты носят различный характер в зависимости от того, чем лимитируется срок службы долота — износом вооружения, износом опор или резким снижением механической скорости проходки.

После того как найдены искомые значения нагрузки на долото и скорости его вращения, определяют продолжительность рейса, проходку на долото и стоимость 1 м проходки по следующим формулам:

$$T_f = \frac{A_f S_n L}{n};$$
$$F_f = \frac{A_f C_f}{k} \left(A_n + \frac{S_n L}{n} \right); \quad C' = \frac{kQ}{C_f},$$

где T_f — продолжительность рейса долота в ч; F_f — проходка на долото за рейс; C' — стоимость 1 м проходки в руб.; A_f — показатель, зависящий от абразивности пород; S_n — показатель, зависящий от качества промывочной жидкости; L — оптимальное значение постоянной нагрузки на долото в T ; n — оптимальное значение постоянной скорости вращения долота в мин; C_f — показатель, зависящий от буримости пород; k — показатель, зависящий от стоимости; A_n — параметр, зависящий от продолжительности рейса; Q — часовая стоимость работы буровой установки.

Все перечисленные показатели, кроме L и n , определяются по фактическим данным уже пробуренных в сходных условиях скважин.

Стоимость 1 м проходки C , собранная информация по которому использована для подсчетов, определяется по формуле (2). Теоретическая экономия равна разности $C' - C$. С помощью расчетов можно также быстро определить, оправдываются ли дополнительные капиталовложения, связанные с применением нового бурового оборудования.

Приводятся данные результатов применения описанной методики при бурении четырех скважин в Венесуэле и Западном Техасе. В среднем по четырем скважинам

получена экономия порядка 10% по сравнению с ранее пробуренными скважинами в этих районах.

Подводя итоги обзора имеющихся методик рациональной отработки долот, необходимо отметить следующее.

Почти все авторы упомянутых работ при теоретических обоснованиях предлагаемых ими методик отработки долот принимают, что при постоянстве параметров режима бурения в одной и той же породе механическая скорость проходки v_m , а также процесс износа долота μ в функции времени изменяются по кривым, близким к экспоненте.

Впервые экспоненциальные зависимости для определения $v_m = f(t)$ были приняты без обоснования их выбора много лет назад А. А. Мининым, затем они были выведены аналитически В. С. Федоровым [37] и фактически признаны другими ведущими специалистами в бурении [5, 42, 44]. А. П. Духнин [12], Т. Ф. Иванов [19], Р. А. Бадалов [2] дали другие аналитические, более сложные зависимости, однако они с известной точностью могут быть заменены экспоненциальными.

Экспоненциальный закон, отражающий многие явления в природе и технике, в данном случае неприемлем по ряду причин, основной из которых является неравномерность износа во времени шарошечного долота, конструктивно представляющего собой сложный механизм.

Это привело к упрощению анализа такого сложного процесса, как бурение глубоких скважин. Отсюда ошибочный вывод, что мгновенная механическая скорость бурения не может самостоятельно являться показателем отработки долот. Однако еще в 1949 г. А. П. Духнин и Р. А. Иоаннесян [10] написали: «Об этом (правильной отработке долота) нужно судить только по самому процессу разрушения породы, характеризующемуся изменением механической скорости проходки». Развивая это положение, А. П. Духнин [11] утверждал, что «необходимость смены долота на новое есть следствие его износа, и поэтому интенсивность этого износа во времени и должна определять в каждом конкретном случае ту или иную продолжительность работы долота на забое».

Изменяя режимные параметры бурения, мы можем регулировать работоспособность долота на забое, что

очень важно при отработке долот. «Эффективность работы данного долота на забое, а следовательно, и вполне конкретная интенсивность его износа, являются в основном функцией параметров режима бурения», — писал А. П. Духнин [11].

Наблюдения показывают [41], что долота больших, уменьшенных и малых диаметров бурильщики отработывают по механической скорости. Критерии времени подъема долота принимаются самые разнообразные, зависящие от местных условий. На ряде промыслов Украины, Татарии, Башкирии долота поднимают для замены в тот момент, когда механическая скорость v_m , уменьшаясь, станет равной 30—40% начального (после приработки) ее значения. На промыслах Грознефти устанавливается определенное значение v_m в момент подъема долота. Для глубин 3000 м оно примерно равно 2 м/ч, на бакинских промыслах — 4 м/ч и т. д. Сработка зубьев шарошек при этом составляет, как правило, 60—80%, а осевой люфт шарошек на цапфах лап долота 2,5—4,0 мм.

В турбинном бурении очень часто момент подъема долота определяется на основании того, как воспринимает турбобур осевую нагрузку на долото. После того как турбобур перестает работать при осевой нагрузке, меньшей первоначальной, долото заменяют. Некоторые бурильщики о необходимости подъема долота судят по работе турбобура. Если бурят при параметрах режима бурения, соответствующих области тормозных режимов работы турбобура, и при этом турбобур часто останавливается, то считают, что долото нужно заменить.

В роторном бурении момент подъема долота наступает при резком увеличении мощности, требуемой для бурения. При наличии электропривода этот момент можно заметить по показаниям амперметров электродвигателей буровой установки.

В то же время многие специалисты указывают на малую эффективность бурения при постоянном удельном давлении на поверхности контакта рабочих элементов долота с породой. В самом деле, в конце работы долота рабочая поверхность зубьев увеличивается во много раз по сравнению с первоначальной. Чтобы сохранить постоянным удельное давление на породу, необходимо во столько же раз увеличить нагрузку на долото, т. е.

необходимо начинать бурить при минимальной нагрузке и продолжать, увеличивая нагрузку, с таким расчетом, чтобы только в конце рейса она стала оптимальной. При этом большую часть рейса долото будет работать при заниженной нагрузке и, естественно, показатели его работы будут низкими.

Наши исследования, приведенные ниже, свидетельствуют, что при оптимальном сочетании параметров режима бурения износ долота в период установившейся его работы умеренный и для поддержания постоянной мгновенной механической скорости в одной и той же породе в этот период требуется незначительно увеличить осевую нагрузку на долото. Опыты показывают, что увеличение нагрузки в этот период работы долота на 10—15% первоначальной обеспечивает постоянство механической скорости в заданной породе.

Зарубежные исследователи установили, что бурение с постепенным увеличением нагрузки на долото в течение рейса при роторном бурении снижает стоимость 1 м проходки по сравнению с бурением при постоянной нагрузке на долото на 2—6%.

Исследованиями Г. Н. Успенского и Л. Г. Воинова [36] показано, что при бурении на незначительной глубине (до 850 м) долота большого диаметра, как правило, изнашиваются в момент наступления максимума рейсовой скорости или позже.

Совершенно другое положение наблюдается при отработке долот уменьшенного и малого диаметров, обладающих меньшей износостойкостью по сравнению с долотами больших размеров и к тому же используемых, как правило, при разбурировании глубинных интервалов. Получение максимальной рейсовой скорости при отработке таких долот возможно только при предельно полной их отработке [7, 23, 24, 30, 50].

Отсюда вытекает очень важное условие рациональной отработки долот, заключающееся в том, что параметры режима бурения при их отработке должны обеспечивать получение от долота полностью заложенных в нем потенциальных возможностей. Это можно достигнуть только при дифференцированном подходе к выбору параметров режима бурения, включая осевую нагрузку, как при подборе их в начале каждого рейса долота, так и в процессе его работы [15, 18, 51, 52].

Таким образом, в понятие рациональной отработки долот следует вкладывать более широкий смысл, нежели выбор только $T_{\text{рац}}$. Долота обрабатываются рационально только в том случае, если правильно выбраны все факторы, оказывающие влияние на эффективность разрушения горных пород и интенсивность износа долота. В то же время рациональная отработка невозможна, если нет критерия для определения $T_{\text{рац}}$.

Выводы

1. На различных этапах развития техники и технологии бурения вопрос о продолжительности работы долота на забое решался по-разному.

2. Долгое время за критерий отработки долот принимали так называемую «стопроцентную» отработку долот, рассчитанную на получение максимальной проходки за рейс.

3. В период бурного послевоенного развития буровой техники и внедрения форсированных режимов бурения за критерий отработки долот принимали максимумы вначале механической, а затем рейсовой скоростей бурения. Внедрение критерия отработки долот по максимуму рейсовой скорости на небольших глубинах (до 850 м) в то время давало положительные результаты.

4. С ростом глубин бурения за критерий отработки долот наряду с максимумом рейсовой скорости стали принимать максимумы произведений $h v_{\text{ср}}$ и $v_{\text{тб}}$ и минимум себестоимости 1 м проходки с учетом износа долота.

Применение на больших глубинах рейсовой скорости как критерия подъема отработавшего долота часто приводило к передержке последнего с опасностью оставления шарошек на забое. Это вызвало необходимость ставить продолжительность работы долота на забое в зависимость от его износа, но так как непосредственно в условиях скважины определять износ работающего долота пока невозможно, то о его состоянии стали судить косвенно — по характеру изменения произведений $h v_{\text{ср}}$, $v_{\text{тб}}$ и $h v_{\text{р}}$; при достижении максимума этих параметров наступает момент подъема долота.

Недостатком указанных параметров является то, что они хуже, чем входящие в них показатели, в отдельности отражают в каждый данный момент процесс, про-

исходящий на забое, связанный, с одной стороны, с разрушением породы, а с другой — с износом породоразрушающего инструмента. В связи с этим они не исключают ошибок и поэтому не нашли широкого применения в практике бурения глубоких скважин.

5. Положительной стороной отработки долот по критерию минимума себестоимости единицы проходки с учетом износа долота является то, что выбранное оптимальное сочетание режимных параметров в предстоящем рейсе обеспечивает при полной отработке долот минимальную себестоимость проходки.

6. Широкое применение в бурении глубоких скважин долот уменьшенного и малого диаметров требует, чтобы критерии отработки долот более полно отражали процесс, происходящий на забое скважины.

Каждая ошибка в определении момента подъема отработанных долот малого диаметра, как правило, приводит к оставлению шарошек на забое в результате малой износостойкости их опор.

Перечисленные методы отработки долот не исключают этих ошибок и поэтому не могут удовлетворять требованиям рациональной отработки долот малого диаметра на больших глубинах.

7. А. П. Духнин и В. С. Федоров предлагали в качестве критерия времени подъема долота снижение текущего значения механической скорости. Исследования, приведенные в книге, являются дальнейшей разработкой этого вопроса применительно к долотам уменьшенного и малого диаметров.

АНАЛИЗ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ДАННЫХ ОТРАБОТКИ ДОЛОТ НА ПЛОЩАДЯХ ВОСТОЧНОЙ УКРАИНЫ

§ 1. Общие сведения

По характеру и свойствам разбуриваемых пород в Восточно-Украинском нефтегазоносном районе различаются две группы площадей: 1) с наличием хемогенной толщи в геологическом разрезе; 2) без наличия хемогенных пластов в разрезе, сложенном в основном каменноугольными отложениями.

Площади первой группы слагаются преимущественно терригенными и хемогенными породами. Хемогенные отложения в пластовом залегании (нижняя пермь) представлены чередованием ангидритов, солей, известняков с характерным для данных площадей циклом осадко-накопления. Соляные штоки девонского возраста представлены массивным залеганием только каменной соли очень большой мощности.

Так, на Алексеевской, Рябухинской, Крестищенской и других площадях Шебелинско-Полтавского района Днепровско-Донецкой впадины (рис. 1) многие скважины вошли в соль на глубинах 420—1800 м и не вышли из нее, достигнув проектных глубин порядка 3000—3500 м.

По крепости каменная соль относится обычно ко II категории твердости по Л. А. Шрейнеру. При залегании на большой глубине (свыше 2000 м) она обладает значительной пластичностью, легко разбуривается и относится (по принятой местной классификации) к мягким породам.

Терригенные породы имеют различную твердость в зависимости от степени метаморфизма (от мягких до крепких по местной классификации).

Площади второй группы располагаются в прибортовых частях Днепровско-Донецкой впадины и на окраинах

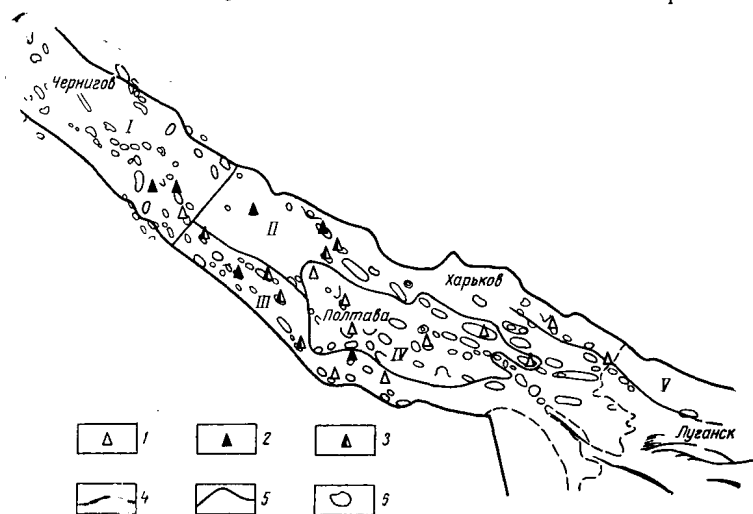


Рис. 1. Обзорная карта районов глубокого бурения Днепровско-Донецкой впадины.

I — Черниговско-Гнединцевский район; *II* — Глинско-Качановский район; *III* — Южно-Прибортовой район; *IV* — Шебелинско-Полтавский район; *V* — Преддонецкий район; 1 — газоподнятия; 2 — нефтяные месторождения; 3 — нефтегазовые месторождения; 4 — локальные поднятия; 5 — границы нефтегазоносных районов.

Донбасса (Южно-Прибортовой, Преддонецкий район, см. рис. 1).

Геологический разрез площадей второй группы представлен отложениями палеозоя, перекрытых отложениями мезо-кайнозоя.

Отложения палеозоя представлены нижним, средним и верхним карбоном, сложенным чередующимися песчаниками, аргиллитами, алевролитами, известняками и каменными углями. Прослой известняков и каменных углей имеют подчиненное значение и составляют в разрез от 1 до 2,5%.

По отдельным горизонтам породы имеют различную буримость и определены по местной классификации как

мягкие, средние, твердые, а порой и крепкие. По твердости они находятся обычно в пределах I—V категорий. В некоторых случаях имеются пласты песчаников до VIII категории твердости, весьма абразивных. Мощность пропластков от III до IX категории твердости по Л. А. Шрейнеру увеличивается в нижней части среднего карбона и нижнем карбоне.

Крепость указанных пород обуславливает применение в основном шарошечных долот типа М, МС, С, СТ и Т. Хорошие показатели получены при применении шарошечных долот дробяще-скальвающего действия со значительным скольжением зубцов при перекачивании шарошек и гидромониторных долот.

Конструкция скважин определяется глубиной залегания соленосных отложений на площадях первой группы, а на площадях с каменноугольным разрезом (вторая группа) — из условий перекрытия зон возможных осложнений в виде обвалов и осыпей стенок скважин.

По типу конструкции все скважины можно разделить на три большие группы.

К I группе относятся глубокие скважины с проектными глубинами свыше 4000 м. Эти скважины бурятся по трехколонной конструкции. Первой промежуточной колонной в большинстве случаев служат обсадные трубы диаметром 299 мм. В качестве второй промежуточной колонны часто используются 219-мм хвостовики. Эксплуатационные колонны обычно применяются комбинированные 146×158 мм, спускают их двумя секциями. Первая секция из 146-мм обсадных труб подвешивается на «голове» 219-мм хвостовика.

Ко II группе относятся скважины, бурящиеся по наиболее распространенной двухколонной конструкции 325—219—146 мм.

В скважинах этого типа с проектной глубиной 3000—3200 м промежуточные 219-мм колонны спускают на глубину 1700—2000 м, в скважинах с проектной глубиной 2000—2800 м промежуточные колонны спускают на глубину 700—1000 м. Наряду с использованием 325-мм кондукторов часто спускают 299-мм кондукторы. При этом под промежуточную колонну бурят долотами № 11 (269 мм).

К III группе относятся глубокие скважины малого диаметра с типовой конструкцией:

1) кондуктор диаметрами 219, 273 или 299 мм на глубину 100—200 м;

2) промежуточная колонна диаметром 146 или 168 мм на глубину 600—1200 м;

3) эксплуатационная колонна диаметром 89 мм на глубину 2000 м и более.

В рассматриваемом районе скважины бурят в основном турбинным способом. Роторный способ применяется при бурении скважин малого диаметра, а также при бурении в осложненных условиях с применением утяжеленного глинистого раствора.

Скважины первых двух групп бурят с помощью установок Уралмаш-ЗД, 5Д, 4Э, 6Э.

При бурении под кондуктор и промежуточные колонны производительность двух насосов составляет 60—40 л/сек, давление на выкидах насосов достигает 120—160 кг/см² и более, нагрузка на долота № 12, 16, 18 — до 20 Т.

Под эксплуатационные колонны чаще всего бурят турбобурами типа ТС4-6⁵/₈" (двумя секциями) с долотами № 8 (190 мм). Промывают скважину одним (реже двумя) насосами при производительности 18—25 л/сек. Нагрузка на долото до 14 Т. Применяются бурильные трубы диаметрами 114 и 127 мм с установкой над турбобурами 50-м УБТ диаметром 146 мм. При бурении роторным способом используют УБТ длиной до 100 м.

Скважины малого диаметра бурят в основном станками УБШ-1.

При бурении под кондуктор и промежуточные колонны производительность насосов 9МГр с втулками диаметром 127 мм составляет 16—18 л/сек, нагрузка на долота № 8, 10, 12, 14 — 8 Т, применяются бурильные трубы диаметром 114 мм с УБТ диаметром 146 мм.

После спуска промежуточных колон бурят шарошечными долотами № 4, 5, 6, а в интервалах отбора керна — ребриковыми коронками диаметрами 118 и 140 мм. Промывают скважину двумя насосами 9МГр с втулками диаметром 115 мм. Общая производительность насосов 7—8 л/сек, давление на выкидах 45—60 кг/см². Осевая нагрузка на долота № 4, 5 — до 3,5 Т, на долота № 6 — до 6 Т. Скорость вращения ротора 152 об/мин.

При турбинном бурении используются турбобуры ТС4-5" (две и три секции).

Как указывалось выше, по геологическому строению все площади второй группы (без наличия в геологическом разрезе хемогенных пластов) сходны между собой, поэтому отработку долот анализировали в основном на этих площадях.

§ 2. Анализ производственных данных отработки долот

Чтобы детально изучить характер изменения текущего значения механической скорости в процессе работы долота и влияние на нее чередования разбуриваемых пород, а также выявить приемлемость различных методов отработки долот для условий бурения скважин уменьшенного и малого диаметров, автором книги был проанализирован механический каротаж отработки 860 долот по 38 глубоким скважинам, пробуренным на Североголубовской, Краснооскольской, Боровской, Славяносербской, Вергунской, Краснопоповской, Кружиловской и Изюмской площадях в 1960—1965 гг. По своему геологическому строению эти площади относятся ко второй группе площадей Днепровско-Донецкой впадины.

Конструкция скважин, при бурении которых проанализирована отработка долот, не отличалась от конструкций других скважин, бурящихся в Восточно-Украинском нефтегазоносном районе. Анализировали отработку долот преимущественно после спуска промежуточных колонн диаметрами 219, 168 и 146 мм.

Бурение ниже этих колонн осуществлялось как турбинным, так и роторным способами. Производительность насосов, осевые нагрузки на долото, скорость его вращения, качество промывочной жидкости, компоновка бурильной колонны аналогичны используемым при бурении других однотипных скважин в рассматриваемом районе.

При проведении механического каротажа фиксировались следующие данные:

1) время Δt бурения каждого малого отрезка проходки Δh ; одновременно подсчитывали механическую скорость проходки по каждому Δh , т. е. $\frac{\Delta h}{\Delta t}$ (для замера Δh за Δt производили специальное хронометриро-

вание или использовали записи газокаротажных станций);

2) осевую нагрузку на долото, производительность насосов, давление на их выкиде, а при роторном бурении — скорость вращения ротора (по показаниям приборов, установленных на буровой);

3) основные параметры промывочной жидкости (удельный вес, вязкость, водоотдача);

4) физико-механические свойства проходимых пород (по данным геологической службы);

5) степень износа отработанных долот.

Особое внимание уделялось характеру износа вооружения и опор отработанных долот. Считалось, что если у поднятого долота вершины зубьев шарошек имеют плоскую сработку, то долото работало при недостаточных осевых нагрузках и больших скоростях вращения. Показатели работы таких долот, как правило, низкие.

Если зубья шарошек отработанных долот имели заостренные вершины и срабатывалась вся поверхность зуба, то считалось, что долото работало при достаточно правильном соотношении осевой нагрузки и скорости вращения.

Показатели работы таких долот обычно наиболее высокие.

Промежуточной считалась округлая сработка зубьев шарошек. Показатели работы долот с округлой сработкой зубьев обычно имели средние значения.

При определении износа опор шарошек у отработанных долот замеряли диаметр при сдвинутых отработанных шарошках, осевой и радиальный люфты. На основании этих данных оценивали степень износа или сохранившейся работоспособности поднятых с забоя долот.

По степени износа все долота отнесены к трем группам.

К первой группе отнесены долота с разрушенной опорой, выпавшими телами качения, заклиненными шарошками в опорах или с полностью сработанной рабочей поверхностью, а также аварийные долота, у которых остались на забое одна или несколько шарошек, т. е. долота, передержанные на забое.

Ко второй — долота с начинающимся обнажением

роликов большого подшипника у козырька лап, износом тел качения, допускающим их незначительный перекося без заклинивания шарошек, с вооружением шарошек, сработанным не более чем на $\frac{2}{3}$ высоты зуба, т. е. нормально сработанные долота.

К третьей — долота, поднятые с забоя с сохранившейся в известной степени их работоспособностью, т. е. недоработанные.

Анализ указанных данных показывает, что $\frac{1}{3}$ всех отработанных долот поднята из скважин недоработанными. Показатели работы таких долот обычно ниже средних данных по геологическим горизонтам.

С ростом глубины бурения и переходом на долота малых размеров число недоработанных долот уменьшается, в то же время число аварий с поломкой долот на забое в результате их передержки увеличивается. Это можно объяснить стремлением к наиболее полному использованию таких долот с ростом глубины, а также меньшей их стойкостью по сравнению с долотами больших размеров.

Анализ аварий в глубоком бурении с поломкой долот в результате их передержки на забое по конторе бурения № 3 Харьковнефтегазразведки за 1963—1964 гг. показывает, что если принять за единицу количество аварий с поломкой долот на глубинах до 1000 м, то относительная аварийность по глубинам и диаметрам долот представится в следующем виде.

Относительная аварийность	Глубина, м			
	0—1000	1000—2000	2000—2800	Свыше 2800
С долотами № 8 и меньшего диаметра	1	2	3,6	5,2
С долотами № 9 и большего диаметра	1	1,2	1,5	—

Для анализа аварийных случаев обработки долот (с оставлением шарошек) были использованы записи механического каротажа газокаротажных станций. По данным механического каротажа строили кривые изменения во времени параметров $v_{тб}$, $h v_{ср}$, мгновенной v_t и средней механической $v_{ср}$, а также рейсовой v_p ско-

ростей. По графикам определяли, какой из перечисленных параметров наиболее четко отбивает период, предшествующий поломке долота, т. е. момент, когда необходимо было поднять долото, чтобы не допустить аварии с ним.

На скв. 8 Славяносербской площади долото 1В-8СТ после проработки призабойной зоны в интервале 2072—2075 м, продолжавшейся 20 мин, пробурило 7 м за 2 ч 17 мин в интервале 2075—2082 м, представленном чередованием песчаников и аргиллитов. В конце рейса долото начало клинить. После подъема оказалось, что в скважине остались все три шарошки долота.

Предыдущим долотом был проработан интервал 2062—2071 м в течение 1 ч и пробурено 4 м в интервале 2071—2075 м за 2 ч 5 мин. Зубья этого долота сработаны полностью, люфт в опорах составил 3—4 мм. Параметры режима бурения в процессе этих рейсов выдерживались постоянными. Нагрузка на долото составляла 8—10 Т, производительность насосов 34—36 л/сек.

На рис. 2 изображены графики отработки аварийного долота. Текущие значения v_t , v_{cp} , $v_t t_b$, $h v_{cp}$ и v_p определяли через каждые 0,5 м. Результаты, полученные при отработке этого долота на скв. 8 Славяносербской площади, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Δh , м	Δt , мин	t_b , мин	v_{cp} , м/ч	v_t , м/ч	$\frac{\Delta h}{\Delta t} t_b$	$h v_{cp}$	v_p , м/ч
Интервал бурения 2075—2082 м (аварийный износ долота)							
0,5	10	10	3,0	3,0	0,5	1,5	0,11
0,5	7	17	3,5	4,3	1,2	3,5	0,21
0,5	8	25	3,7	3,7	1,6	5,6	0,31
0,5	14	39	3,1	2,1	1,4	6,1	0,39
0,5	9	48	3,1	3,3	2,7	7,8	0,47
0,5	7	55	3,3	4,3	3,9	9,9	0,56
0,5	8	63	3,5	3,7	3,9	12,2	0,64
0,5	8	71	3,4	3,7	4,4	13,6	0,7
0,5	9	80	3,4	3,3	4,5	15,2	0,78
0,5	11	91	3,5	2,7	4,1	17,4	0,83
0,5	10	101	3,5	3,0	5,0	19,2	0,89
0,5	11	112	3,2	2,7	5,1	19,2	0,95
0,5	12	124	3,15	2,5	5,2	20,5	0,99
0,5	13	137	3,05	2,3	5,3	21,4	1,03

Из табл. 1 и рис. 2 можно сделать следующие выводы.

1. Текущее значение механической скорости за время рейса (до поломки долота) падало несколько раз.

Первое снижение механической скорости продолжалось 22 мин, после чего она увеличивалась. Второе, более

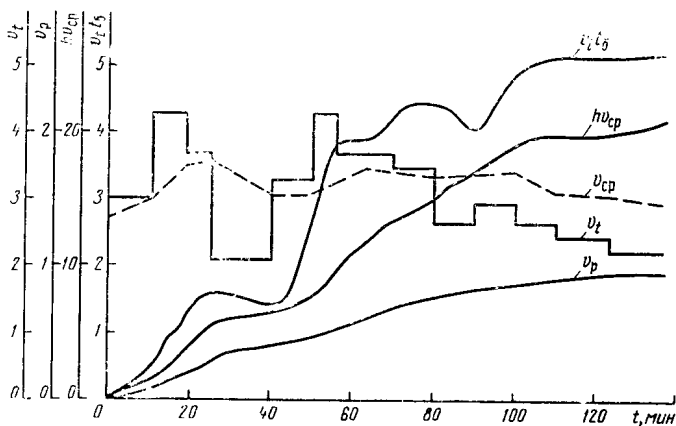


Рис. 2. Обработка долота 1В-8СТ на скв. 8 Славяносербской площади (аварийный износ долота).

продолжительное падение, вызванное интенсивным износом долота в крепких абразивных песчаниках, закончилось незначительным ростом механической скорости, что было вызвано переходом уже изношенного долота в более мягкие породы — аргиллиты, в которых наблюдалось устойчивое падение механической скорости.

Долото в результате работы при устойчивом падении механической скорости сверх допустимого безопасного времени (37 мин) разрушалось (все три шарошки оставлены в скважине).

2. Выявленные локальные максимумы параметра $v_t t_b$ не отражают полностью изменения механической скорости в каждый данный момент времени, в результате устойчивое падение механической скорости перед поломкой долота не было отмечено максимумом параметра $v_t t_b$. В этот период этот параметр возрастал, хотя и незначительно.

3. Рейсовая скорость бурения и параметр $h v_{cp}$ воз-

растали на всем протяжении рейса долота, включая и момент его поломки.

4. Средняя механическая скорость бурения, уменьшаясь в конце рейса, стала примерно равной скорости приработки только в момент поломки долота.

На скв. 20 Североголубовской площади долото 2В-190СТ после проработки в интервале 2070—2092 м

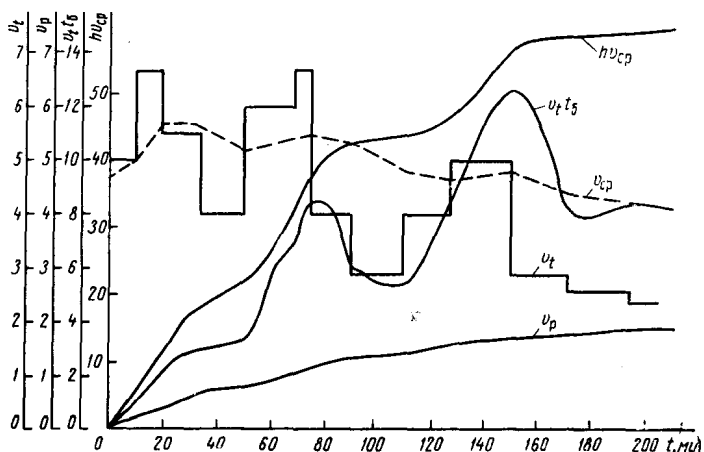


Рис. 3. Отработка долота 2В-190СТ на скв. 20 Североголубовской площади (аварийный износ долота).

турбинным способом в течение 1 ч пробурило 14,4 м в интервале 2092—2106,4 м за 3 ч 25 мин. Бурение в течение этого времени проходило нормально, в последующий период времени углубление долота прекратилось. На забое остались три шарошки с телами качения опор; одна из шарошек сломалась по основанию цапфы. Параметры режима бурения в процессе всего рейса выдерживались постоянными.

На рис. 3 приведены графики отработки этого долота. Текущие значения показателей, изображенных на рисунке, определяли через каждый 1 м проходки. В табл. 2 приведены результаты отработки долота при бурении скв. 20 Североголубовской площади.

Из табл. 2 и рис. 3 можно заключить следующее.

1. Текущее значение механической скорости в процессе рейса долота падало 3 раза, что было вызвано

Таблица 2

Δh , м	Δt , мин	$t_{\text{б}}$, мин	$v_{\text{ср}}$, м/ч	v_t , м/ч	$\frac{\Delta h}{\Delta t} t_{\text{б}}$	$h v_{\text{ср}}$	v_p , м/ч
Интервал бурения 2092—2106 м (аварийный износ долота)							
1	12	12	5,0	5,0	1,0	5,0	0,21
1	9	21	5,7	6,7	2,35	11,4	0,41
1	11	32	5,7	5,5	2,9	17,0	0,60
1	15	47	5,2	4,0	3,12	20,8	0,76
1	10	57	5,3	6,0	5,7	26,4	0,92
1	10	67	5,4	6,0	6,7	32,5	1,06
1	9	76	5,5	6,7	8,5	38,4	1,20
1	15	91	5,3	4,0	6,05	42,4	1,33
1	21	112	4,8	2,85	5,3	43,0	1,40
1	15	127	4,7	4,00	8,5	47,0	1,53
1	12	139	4,75	5,0	11,6	52,5	1,54
11	12	151	4,8	5,0	12,6	57,5	1,72
1	21	172	4,5	2,85	8,2	58,8	1,77
1	23	195	4,3	2,6	8,5	60,5	1,80
0,4	10	205	4,2	2,4	8,2	60,5	1,83

чередованием пород по буримости. Только последнее падение, вызванное интенсивным износом долота, было устойчивым и в результате передержки долота закончилось поломкой последнего. Падение механической скорости перед поломкой долота продолжалось 54 мин.

2. Первое падение механической скорости в процессе рейса долота не было отмечено локальным максимумом параметра $v_t t_{\text{б}}$. Наблюдался лишь перегиб кривой $v_t t_{\text{б}}$. Второе падение механической скорости четко выражено максимумом параметра $v_t t_{\text{б}}$, после чего этот параметр продолжал расти. Начало устойчивого падения механической скорости отмечено максимумом параметра $v_t t_{\text{б}}$, значение которого после максимума установилось на одном уровне, в то время как мгновенная механическая скорость продолжала падать.

3. Рейсовая скорость бурения и параметр $h v_{\text{ср}}$ возрастали на всем протяжении рейса долота. Заметное снижение роста этих параметров, особенно $h v_{\text{ср}}$ в конце рейса, свидетельствует о приближении их максимального значения.

4. Средняя механическая скорость стала равной скорости приработки по истечении 1 ч 31 мин (от начала бурения). Если в этот момент поднять долото, то

получили бы следующие показатели: $h=8$ м, $v_{ср}=5,3$ м/ч, $v_p=1,33$ м/ч (долото явно недоработано). По-видимому, долото следовало бы поднять через 15—20 мин после начала устойчивого падения механической скорости (по истечении 2 ч 52 мин от начала бурения). В этом случае при нормальной работе долота были бы достигнуты следующие показатели: $h=13$ м, $v_{ср}=4,5$ м/ч, $v_p=1,77$ м/ч.

На скв. 1 Боровской площади долотом Б-269С пробурено 20 м за 3 ч 54 мин в интервале 1848—1868 м в отложениях среднего карбона, представленных чередованием песчаников и аргиллитов. При бурении следующих 0,5 м наблюдались остановки турбобура при заданном режиме, механическая скорость при этом резко упала. В результате передержки долота тела качения подшипников высыпались из опор, шарошки слетели с цапф и все три остались на забое скважины. Нагрузка на долото создавалась в пределах 9—10 Т.

На рис. 4 и в табл. 3 приведены результаты отра-

Т а б л и ц а 3

Δh , м	Δt , мин	t_0 , мин	$v_{ср}$, м/ч	v_t , м/ч	$\frac{\Delta h}{\Delta t} t_0$	$h v_{ср}$	v_p , м/ч
Интервал бурения 1848—1868,5 м (аварийный износ долота)							
1	12	12	5,0	5,0	1,0	5,0	0,24
1	12	24	5,0	5,0	2,0	10,0	0,45
1	10	34	5,3	6,0	3,4	15,9	0,65
1	10	44	5,4	6,0	4,4	21,6	0,85
1	10	54	5,6	6,0	5,4	28,0	1,02
1	10	64	5,6	6,0	6,4	33,6	1,10
1	10	74	5,7	6,0	7,4	39,9	1,34
1	12	86	5,6	5,0	7,2	44,8	1,46
1	12	98	5,5	5,0	8,2	49,5	1,58
1	10	108	5,5	6,0	10,8	55,0	1,72
1	12	120	5,5	5,0	10,0	60,5	1,84
1	12	132	5,4	5,0	11,0	65,0	1,94
1	10	142	5,5	6,0	14,2	72,0	2,03
1	8	150	5,6	7,5	18,8	78,5	2,16
1	8	158	5,7	7,5	19,8	85,6	2,26
1	10	168	5,7	6,0	16,8	91,0	2,36
1	17	185	5,5	3,5	10,9	93,5	2,40
1	15	200	5,4	4,0	13,4	97,0	2,46
1	16	216	5,3	3,7	13,5	103,0	2,50
1	18	234	5,2	3,3	13,0	104,0	2,53
0,5	10	244	5,0	3,0	12,2	102,0	2,57

ботки этого долота при работе его на скв. 1 Боровской площади.

Из рис. 4 и табл. 3 видно следующее.

1. Механическая скорость бурения в процессе рейса долота изменялась мало. Через 158 мин от начала бурения, когда долото прошло 15 м, она резко упала, что

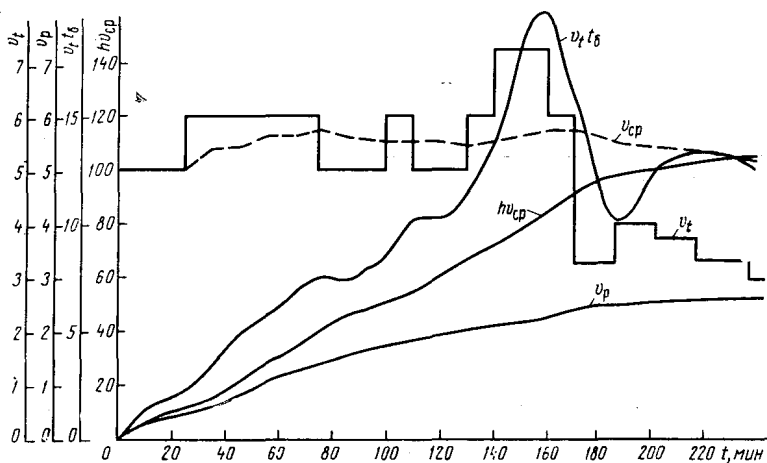


Рис. 4. Отработка долота Б-269С на скв. 1 Боровской площади (аварийный износ долота).

отмечено максимумом параметра $v_{tб}$. Падение механической скорости продолжалось 27 мин, затем она незначительно повысилась, после чего устойчиво снижалась в течение 44 мин до поломки долота. Этот период отмечен ростом параметра $v_{tб}$ с последующим незначительным его падением.

2. Параметр $h v_{cр}$ достиг максимума в момент поломки долота. Рейсовая скорость возрастала на протяжении всего рейса долота, включая и момент его поломки.

3. Средняя механическая скорость бурения стала равной скорости приработки долота в момент его поломки.

На скв. 10 Боровской площади долотом 1В-8СТ с отбором керна пройдено 5,5 м в интервале 1184—1189,5 м в отложениях среднего карбона, представленных песчаником мелкозернистым, плотным, крепким. Первые 4 м

были пройдены без осложнений за 1 ч 32 мин, после чего механическая скорость начала падать. Пробурился весь пятый метр и половину шестого метра, долото, работая в фазе интенсивного износа в абразивной среде (песчанике) 43 мин, разрушилось в опоре и все четыре шарошки остались на забое. Нагрузка на долото составляла 9—10 Т. Бурили турбодолотом КТДЗ-6⁵/₈". Аварийным долотом был поднят керн—30 см песчаника.

В процессе отработки долота были получены данные, приведенные на рис. 5 и в табл. 4.

Таблица 4

Δh , м	Δt , мин	t_b , мин	v_{cp} , м/ч	h_t , м/ч	$\frac{\Delta h}{\Delta t} t_b$	$h v_{cp}$	v_p , м/ч
Интервал бурения 1184—1189,5 м (аварийный износ долота)							
0,5	15	15	2,0	2,0	0,5	1,0	0,18
0,5	10	25	2,4	3,0	1,24	2,24	0,34
0,5	10	35	2,6	3,0	1,74	3,9	0,49
0,5	12	47	2,6	2,5	1,95	5,2	0,62
0,5	12	59	2,6	2,5	2,45	6,5	0,72
0,5	10	69	2,6	3,0	3,45	7,8	0,82
0,5	11	80	2,6	2,7	3,62	9,1	0,92
0,5	12	92	2,6	2,5	3,83	10,4	0,99
0,5	13	105	2,6	2,3	4,0	11,6	1,08
0,5	14	119	2,5	2,1	4,2	12,5	1,10
0,5	16	135	2,4	1,87	4,2	13,2	1,15

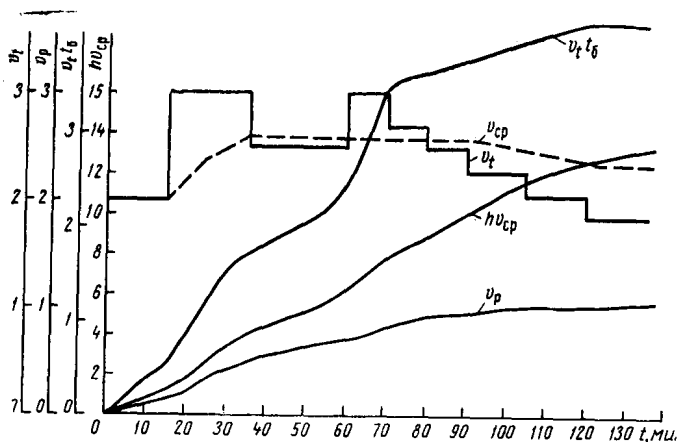


Рис. 5. Отработка долота 1В-8СТ на скв. 10 Боровской площади (аварийный износ долота).

Из табл. 4 и рис. 5 можно вывести следующее.

1. Устойчивое падение механической скорости началось при бурении четвертого метра через 1 ч 9 мин от начала бурения. Падение механической скорости с этого момента протекало равномерно в течение 1 ч 6 мин до поломки долота.

2. Кривая изменения параметра v/v_0 в процессе рейса долота не имела максимумов. Этот параметр непрерывно увеличивался, только в конце в момент поломки долота его значение установилось на одном уровне.

3. Рейсовая скорость и значение параметра $h v_{\text{ср}}$ возрастали непрерывно в процессе всего рейса долота.

4. Средняя механическая скорость, уменьшаясь, не достигла уровня скорости приработки долота. В момент поломки долота ее значение было выше значения скорости приработки.

На скв. 16 Североголубовской площади долотом 1У-295С было пробурено 22 м в юрских отложениях в интервале 759—781 м, сложенном вязкими глинами. В процессе рейса в результате недостаточной промывки на долоте был намотан глинистый сальник, заклиненные шарошки работали на истирание и две из них были оставлены на забое. У поднятого долота оставшаяся шарошка сработана истиранием до опор. Бурили турбобуром типа Т12МЗ-9" при производительности двух буровых насосов — 42 л/сек, нагрузка на долото равнялась 12—15 Т.

В процессе обработки долота на скв. 16 Североголубовской площади были получены данные, приведенные в табл. 5. На основании этих данных построен рис. 6. Из анализа табл. 5 и рис. 6 находим следующее.

1. Устойчивое падение механической скорости наблюдалось при разбуривании 19-го и последующих метров через 2 ч 7 мин от начала бурения и продолжалось до поломки долота, вызванной работой последнего с заклиненными шарошками.

2. Рейсовая скорость достигла своего максимума при разбуривании 16-го м и удерживалась на одном уровне при разбуривании последующих трех метров, только после этого она начала падать.

3. Средняя механическая скорость стала равной скорости приработки долота несколько позже — при разбуривании 18-го м.

Таблица 5

$\Delta h, \text{ м}$	$\Delta t, \text{ мин}$	$t_b, \text{ мин}$	$v_{\text{ср}}, \text{ м/ч}$	$v_t, \text{ м/ч}$	$\frac{\Delta h}{\Delta t} t_b$	$h v_{\text{ср}}$	$v_p, \text{ м/ч}$
Интервал бурения 759—781 м (аварийный износ долота)							
1	7	7	8,6	8,6	1,0	8,6	0,62
1	7	14	8,6	8,6	2,0	17,2	1,15
1	6	20	9,0	10,0	3,3	27,0	1,64
1	5	25	9,6	12,0	5,0	38,2	2,08
1	5	30	10,0	12,0	6,0	50,0	2,50
1	6	36	10,0	10,0	6,0	60,0	2,85
1	6	42	10,0	10,0	7,0	70,0	3,17
1	10	52	10,4	6,0	5,2	83,0	3,38
1	5	57	9,5	12,0	11,4	85,0	3,68
1	5	62	9,7	12,0	12,4	97,0	3,95
1	6	68	9,7	10,0	11,4	106,7	4,18
1	8	76	9,5	7,5	9,5	114,0	4,34
1	5	81	9,6	12,0	16,2	125,0	4,56
1	8	89	9,5	7,5	11,2	133,0	4,7
1	8	97	9,3	7,5	12,2	140,0	4,8
1	6	103	9,9	10,0	17,2	158,0	4,97
1	13	116	8,8	4,6	8,6	149,2	4,97
1	11	127	8,5	5,5	11,6	153,0	4,97
1	12	139	8,2	5,0	11,6	155,6	4,97
1	14	153	7,7	4,3	10,9	154,0	4,95
1	15	168	7,5	4,0	11,2	157,5	4,9
1	16	184	7,2	3,7	11,5	158,0	4,82

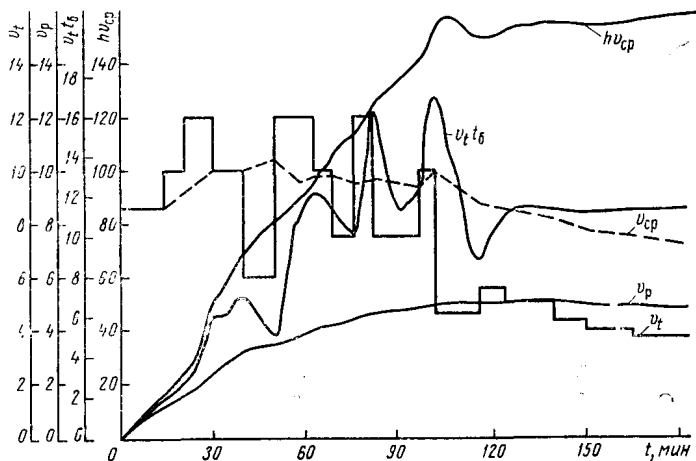


Рис. 6. Отработка долота 1У-295С на скв. 16 Северо-голубовской площади (аварийный износ долота).

По-видимому, в этот момент и следовало поднять долото для замены. При этом были бы достигнуты следующие показатели: $h=18$ м; $v_{ср}=8,5$ м/ч; $v_p=4,97$ м/ч. Если поднять долото после начала устойчивого падения механической скорости, то показатели были бы равны: $h=19$ м; $v_{ср}=8,2$ м/ч; $v_p=4,97$ м/ч.

4. В процессе рейса долота наблюдалось пять максимумов параметра $t_iv_б$, каждый из них заканчивался ростом параметра $v_{it_б}$. Указанные максимумы отражали изменение текущего значения механической скорости, однако в период устойчивого падения механической скорости перед поломкой долота наблюдался рост параметра $v_{it_б}$, хотя и незначительный.

5. Максимум параметра $hv_{ср}$ был получен на 16-м метре, однако при разбурировании последующих метров параметр $hv_{ср}$ возрастал и в момент поломки долота достиг максимума.

Из приведенного анализа обработки долот с аварийным износом следует, что во всех случаях поломке долота, вызванной продолжительной работой последнего в фазе интенсивного разрушения, предшествует устойчивое падение механической скорости.

Продолжительность устойчивого падения от начала интенсивного износа долота до его поломки различна.

Другие исследованные параметры: $v_{it_б}$, $hv_{ср}$, $v_{ср}$, v_p , как правило, не отбивают период, предшествующий поломке долота, поэтому обработка по этим параметрам не может предотвратить аварии в случае его передержки. Исключение составляет последний разобранный случай обработки долота большого диаметра (295 мм) на незначительной глубине (781 м), когда максимум рейсовой скорости совпал с началом устойчивого падения текущей механической скорости, а средняя механическая скорость в этот момент стала равной скорости приработки долота.

Параметр $v_{it_б}$ хотя в большинстве случаев и характеризует изменение текущего значения механической скорости, однако очень часто начало устойчивого падения механической скорости не отбивается его максимумом, а период устойчивого падения механической скорости не сопровождается снижением параметра.

Параметр $hv_{ср}$ и рейсовая скорость обычно (за исключением последнего случая) возрастают на протя-

жении всего рейса долота, включая и момент его поломки.

Анализ данных по отработке только шарошечных долот № 8 (диаметром 190 мм), отработанных ниже башмака промежуточных колонн до глубины 3000—3500 м, показывает, что из 420 анализируемых долот 242 (или 57,6%) были подняты своевременно, 146 (или 34,8%) преждевременно и 32 долота (или 7,6%) передержано.

В табл. 6 приводятся данные о причинах подъема этих долот.

Т а б л и ц а 6

Результаты отработки долот	Причина подъема долот							
	неустойчивая работа турбобура		после резкого падения v_m		после установленного времени		по другим причинам	
	количество долот	%	количество долот	%	количество долот	%	количество долот	%
Турбинное бурение								
Недоработано . . .	42	50	12	11,1	45	57	24	63,2
Передержано . . .	8	9,5	7	6,5	7	8,8	2	5,3
Поднято своевременно	34	40,5	89	82,4	27	34,2	12	31,5
Всего	84	100,0	108	100,0	79	100,0	38	100
Роторное бурение								
Недоработано . . .	—	—	5	8,9	8	21,0	10	59
Передержано . . .	—	—	3	5,4	5	13,1	—	—
Поднято своевременно	—	—	48	85,7	25	65,9	7	41
Всего	—	—	56	100,0	38	100,0	17	100

Приведенные в табл. 6 данные показывают, что наиболее рационально поднимать долота после резкого снижения механической скорости. В этом случае большинство долот поднимаются своевременно (82,4% в турбинном и 85,7% в роторном бурении). Как правило, у долот, поднятых после резкого снижения механиче-

ской скорости, более высокие показатели работы на больших глубинах.

Наши данные хорошо согласуются с результатами отработки долот на Аралсорской сверхглубокой скважине. При бурении этой скважины турбинным способом в интервале 3114—4287 м 81,6% поднятых долот после резкого снижения v_m имеют нормальную сработку (подняты своевременно), а при роторном бурении в интервале 4287—4968 м 75% долот поднято своевременно после резкого падения v_m .

Тщательный анализ 146 недоработанных долот позволил установить, что долота за время работы в установившемся периоде срабатываются всего на 15—20%, в основном же они срабатываются в последний период работы долота на забое. Это относится как к долотам, изнашивающимся по опорам, так и к долотам, изнашивающимся по вооружению. Продолжительность периода интенсивного износа различна и зависит от характера разбуриваемой породы, способа и режима бурения, а также от типоразмера и конструктивных особенностей долота. Интенсивный износ долота сопровождается резким падением механической скорости.

В табл. 7 приводятся данные о продолжительности безаварийного времени работы долота на участке резкого снижения механической скорости для долот уменьшенного и малого диаметров при турбинном и роторном бурении. Данные таблицы получены на основании ана-

Таблица 7

Диаметр долота, мм	Продолжительность безопасного времени работы долот на забое (в мин) с момента начала резкого падения v_m			
	Турбинный способ бурения		Роторный способ бурения	
	при сработке долота по опоре	при сработке долота по вооружению	при сработке долота по опоре	при сработке долота по вооружению
76	—	—	15—20	20—30
97	—	—	15—20	20—30
118	—	—	15—20	20—30
145	7—15	10—25	20—30	30—45
161	7—15	10—25	20—30	30—45
190	10—15	15—30	20—35	40—50
214	10—15	15—30	20—35	40—50

лиза большого материала по отработке долот и наблюдений, проведенных непосредственно при бурении скважин. При этом долота с разрушенной опорой, выпавшими телами качения, заклиненными шарошками в опорах с вооружением шарошек, сработанным не более чем на $\frac{2}{3}$ высоты зуба, относились к группе долот, сработанных по опоре. Долота же, поднятые с забоя с сохранившейся работоспособностью опор и износом вооружения более чем на $\frac{2}{3}$ высоты зуба, относились к группе долот, сработанных по вооружению.

Количество недоработанных долот в турбинном бурении больше, чем в роторном (см. табл. 6). Преждевременный подъем долот в турбинном бурении можно объяснить не столько стремлением получить более высокие значения механической скорости, сколько неудовлетворительной характеристикой работы турбобуров, особенно тех, которые неоднократно ремонтировались. В ряде случаев на больших глубинах такие турбобуры после непродолжительной работы на забое не воспринимают нагрузок, необходимых для эффективного разрушения горных пород подработанными долотами, потребляющими большую мощность, чем новые.

Имеются также случаи неудовлетворительной очистки промывочных растворов от выбуренной и осыпающейся со стенок скважины породы, что приводит к забивке турбобуров (особенно малогабаритных) и преждевременному подъему долот. Поэтому 155 долот, отнесенных в табл. 6 к графе поднятых по другим причинам, нами из дальнейшего анализа исключены. В это число вошли долота, поднятые с забоя в результате забивки турбобуров или выхода их из строя, а также в связи с необходимостью отбора керна, ремонтных, аварийных работ и т. д.

По этой причине отработку долот по максимуму рейсовой скорости проверили на 705 шарошечных долотах из 860, подвергнутых анализу, причем 340 долот № 12 (диаметром 295 мм) и № 11 (диаметром 269 мм) были отработаны при бурении под промежуточные колонны на глубину до 2000 м. Остальные 365 долот № 8 (диаметром 190 мм) отработаны при бурении под эксплуатационные колонны ниже башмака промежуточных колонн до глубины 3000—3500 м.

В табл. 8 приводятся данные проверки совпадения

Таблица 8

Степень износа долота	При максимуме v_p		До максимума v_p		После максимума v_p	
	количество долот	%	количество долот	%	количество долот	%
Турбинное бурение шарошечными долотами № 8 (диаметром 190 мм)						
Передержано . . .	18	32,8	3	1,4	1	50
Нормально сработано	23	41,8	126	59,0	1	50
Недоработано . .	14	25,4	85	39,6	—	—
Всего	55	100	214	100	2	100
Роторное бурение шарошечными долотами № 8 (диаметром 190 мм)						
Передержано . . .	5	14,7	1	2,0	2	22,3
Нормально сработано	26	76,5	40	78,5	7	77,7
Недоработано . .	3	8,8	10	19,5	—	—
Всего	34	100	51	100	9	100
Турбинное бурение шарошечными долотами № 11 и 12 (диаметрами 269 и 295 мм)						
Передержано . . .	6	3,4	—	—	9	17,3
Нормально сработано	112	63,3	16	35,0	32	61,7
Недоработано . .	59	33,3	30	65,0	11	21,0
Всего	177	100	46	100	52	100
Роторное бурение шарошечными долотами № 11 и 12 (диаметрами 269 и 295 мм)						
Передержано . . .	2	7,1	—	—	2	8,0
Нормально сработано	18	64,4	4	33,2	17	68,0
Недоработано . .	8	28,5	8	66,8	6	24,0
Всего	28	100	12	100	25	100

максимума рейсовой скорости с моментом подъема долот с забоя.

Из табл. 8 видно, что из 365 долот № 8 (190 мм), поднятых с забоя в результате резкого падения механической скорости, неустойчивой работы турбобура и после установленного для данного района времени, только 100 долот имели максимум v_p (57 в турбинном и 43 в роторном бурении), что составляет 27,4%.

Большинство долот, имеющих максимум v_p , отработано сразу ниже башмака промежуточных колонн, до достижения скважиной значительной глубины.

Из 100 долот 89 были подняты в момент наступления максимума v_p (55 в турбинном и 34 в роторном бурении), у остальных 11 долот максимум наступил ранее. При этом 23 долота из 89 оказались передвижными и частично в аварийном состоянии, 17 долот недоработано и лишь 49 поднято своевременно (23 в турбинном и 26 в роторном бурении). Из 365 долот 265 (или 72,6%) были подняты с забоя, когда рейсовая скорость продолжала расти (214 в турбинном и 51 в роторном бурении). Из 265 долот четыре передержано, 166 нормально сработано и 95 недоработано.

Тщательный осмотр последних 95 долот показал, что лишь 47 долот (37 в турбинном и 10 в роторном бурении) смогли быть доработаны до максимума v_p , дальнейшее пребывание остальных 48 долот (50%) на забое привело бы к их поломке до наступления максимума v_p .

После наступления максимума v_p было поднято 11 долот, из которых три передержано и восемь нормально сработано (одно в турбинном и семь в роторном бурении).

Из изложенного следует, что из 365 шарошечных долот № 8 (диаметром 190 мм), отработанных в турбинном (271 долото) и роторном (94 долота) бурении, максимум рейсовой скорости v_p совпал или мог совпасть с нормальным износом только у 104 долот (61 в турбинном и 43 в роторном бурении), что составляет 28,5% общего числа долот (22,5% в турбинном и 45,8% в роторном бурении).

Из 340 анализируемых долот № 12 (диаметром 295 мм) и № 11 (диаметром 269 мм) 282 имели максимум (229 в турбинном и 53 в роторном бурении), что составляет 83%.

Из 282 долот 205 (или 72%) были подняты в момент наступления максимума v_p , у остальных 77 долот максимум v_p наступил ранее, причем 8 долот из 205 оказались передержанными, 67 недоработанными и 130 нормально сработанными.

До наступления максимума v_p было поднято 58 долот, из них 20 нормально сработанных и 38 недоработанных. Из 38 недоработанных долот 20 могли быть доработаны до максимума v_p .

После наступления максимума v_p было поднято 77 долот. Тщательный осмотр этих долот показал, что 50% из них (38 долот) лучше было бы поднять в момент наступления максимума.

Из изложенного следует, что из 340 шарошечных долот № 12 и 11 максимум v_p совпал или мог совпасть с нормальным износом только у 188 долот, что составляет 55,3%.

Обработка долот по параметру $h v_{cp}$ показала, что в некоторых случаях в силу наличия перегибов кривой изменения параметра $h v_{cp}$ во времени трудно определить, достиг параметр максимума или нет. После максимума часто параметр $h v_{cp}$ продолжает расти, а иногда имеется несколько максимумов.

В результате изложенного при анализе обработки долот по параметру $h v_{cp}$ нами было принято следующее:

1) если после достижения максимума наблюдался значительный рост параметра $h v_{cp}$ и в момент подъема долота значение параметра было выше абсолютной величины максимума, то считалось, что параметр не достиг максимума при обработке долота;

2) если долото поднято сразу же после того, как значение параметра начало уменьшаться, то считалось, что долото поднято при максимуме произведения $h v_{cp}$;

3) если максимум параметра $h v_{cp}$ наступил в начале или в середине рейса долота и после этого не наблюдался значительный рост параметра, то считалось, что долото поднято после максимума.

В табл. 9 приводятся данные проверки совпадения максимума параметра $h v_{cp}$ с моментом подъема долот с забоя.

Из табл. 9 следует, что параметр $h v_{cp}$ достиг максимума в 94 рейсах (58 в турбинном и 36 в роторном бурении), что составляет 25,8% общего количества от-

Таблица 9

Степень износа долота	Поднято шарошечных долот диаметром 190 мм					
	при максимуме $h_{v_{cp}}$		до максимума $h_{v_{cp}}$		после максимума $h_{v_{cp}}$	
	количество	%	количество	%	количество	%
Турбинное бурение						
Передержано . . .	14	30,4	1	0,4	7	58,4
Нормально сработано	28	60,9	117	55,0	5	41,6
Недоработано . . .	4	8,7	95	44,6	—	—
Всего	46	100	213	100	12	100
Роторное бурение						
Передержано . . .	6	21,4	—	—	2	25,0
Нормально сработано	20	71,5	47	81,0	6	75,0
Недоработано . . .	2	7,1	11	19,0	—	—
Всего	28	100	58	100	8	100

рабочих долот (365 шт.). Из 94 долот 74 были подняты в момент наступления первого или второго максимума параметра $h_{v_{cp}}$ (два максимума наблюдались у шести долот), у остальных 20 долот максимумы наступали ранее, а в момент подъема долота параметр либо незначительно возрастал (в большинстве случаев), либо снижался. Из 94 долот, имевших максимум параметра $h_{v_{cp}}$, 29 оказались передержанными, 6 недоработанными и 59 нормально сработанными.

Из 365 долот 271 (или 74,2%) было поднято с забоя, когда параметр $h_{v_{cp}}$ продолжал расти, так и не достигнув максимума. Из 271 долота одно передержано, 164 нормально сработано и 106 недоработано. Из последних 106 долот лишь 50% смогли быть доработаны до максимума параметра $h_{v_{cp}}$.

Из изложенного следует, что из 365 анализируемых долот только 112 (30,7%) были подняты или могли быть подняты с забоя при нормальной работе сразу после наступления максимума параметра $h_{v_{cp}}$.

При анализе обработки долот по методике, предложенной М. М. Зубковым, учитывалось, что в процессе

отработки долота в связи с прохождением различных по буримости пород параметр v_{it_6} может иметь несколько локальных максимумов.

Обычно при достаточном навыке отработки долот по параметру v_{it_6} это не приводит к осложнениям при условии, если снижение значения параметра после локальных максимумов не носит затяжной характер или не является слишком кратковременным после абсолютного максимума.

В связи с изложенным при анализе отработки долот по параметру v_{it_6} нами было принято:

1) если в процессе рейса долота наблюдалось несколько максимумов и снижение значения параметра после их наступления продолжалось менее 25 *мин* при турбинном и 40 *мин* при роторном способах бурения (менее продолжительности допустимой передержки долот после максимума, установленной М. М. Зубковым), то считалось, что долото поднято до наступления максимума параметра;

2) если наблюдался только один максимум и долото поднято сразу же после начала уменьшения параметра v_{it_6} , то считалось, что долото поднято при максимуме параметра;

3) если в процессе рейса долота наблюдался один или несколько максимумов со спадом значения параметра, продолжавшимся более 25 *мин* при турбинном и 40 *мин* при роторном способах бурения, то считалось, что долото поднято после максимума параметра.

В табл. 10 приводятся данные проверки отработки долот по параметру v_{it_6} .

Из таблицы находим, что из 365 отработанных долот один или несколько максимумов параметра v_{it_6} наблюдались при отработке 185 долот, что составляет 50,7%. В это число не вошли долота, при отработке которых имелись кратковременные спады параметра. 104 долота подняты с забоя сразу же после достижения первого максимума, остальные 81 долото поднято после снижения значения параметра v_{it_6} , продолжавшегося более 25 *мин* в турбинном и более 40 *мин* в роторном бурении при наличии одного и более максимумов.

Из 185 долот, имевших максимумы параметра v_{it_6} , 22 оказались передержанными, 39 недоработанными и 124 нормально сработанными.

Таблица 10

Степень износа долота	Поднято шарошечных долот диаметром 190 мм					
	при максимуме v_{it6}		до максимума v_{it6}		после максимума v_{it6}	
	количество	%	количество	%	количество	%
Турбинное бурение						
Передержано . . .	6	8,6	7	5,1	9	12,5
Нормально сработано	42	60,9	68	49,2	40	62,5
Недоработано . .	21	30,5	63	45,7	15	25,0
Всего	69	100	138	100	64	100
Роторное бурение						
Передержано . . .	2	5,7	1	2,4	5	29,4
Нормально сработано	30	85,7	31	73,8	12	70,6
Недоработано . .	3	8,6	10	23,8	—	—
Всего	35	100	42	100	17	100

Из 365 долот 180 (или 49,5%) были подняты, когда параметр v_{it6} продолжал расти. В это число вошли долота, при обработке которых наблюдались кратковременные спады параметра. Из 180 долот 99 нормально сработано, 73 недоработано и 8 передержано. Установлено, что у последних восьми долот параметр v_{it6} возростал, хотя и незначительно, в то время как текущее значение механической скорости устойчиво снижалось.

Тщательный осмотр 73 недоработанных долот показал, что только 50% из них (36 долот) могли бы быть доработанными до максимума параметра v_{it6} .

Таким образом, из 365 подвергнутых анализу долот, только 160 (44%) дали или могли бы дать положительный результат при обработке их по параметру v_{it6} .

Обработка долот по методике, предложенной Н. А. Гаджиевым и другими, показала следующее.

1. Скорость приработки долота зависит от многих факторов (состояния забоя, продолжительности прора-

ботки ствола скважины, режима подачи долота за время приработки и т. д.) и не имеет определенного значения до момента, когда механическая скорость проходки не примет установившееся значение. Поэтому при анализе за скорость приработки мы принимали среднюю механическую скорость за первые 20 мин при роторном и за 10 мин при турбинном способах бурения (20 и 10 мин — время приработки, установленное авторами рассматриваемой методики).

2. Средняя механическая скорость большую часть времени рейса обычно остается примерно на одном уровне, сглаживая колебания мгновенной механической скорости в каждый данный момент; только в конце работы долота, когда оно работает в фазе интенсивного износа, значение ее снижается.

3. Как правило, средняя механическая скорость отбивает момент начала интенсивного износа долота, но менее четко, чем мгновенная механическая скорость.

В табл. 11 приводятся данные проверки совпадения момента подъема долота с моментом, когда средняя механическая скорость становится равной скорости приработки долота.

Из табл. 11 следует, что совпадение моментов подъема долота с равенством $v_{\text{ср}} = v_{\text{прир}}$ наблюдалось при отработке 90 долот (64 в турбинном и 26 в роторном бурении), что составляет 24,7% общего количества долот.

Из 90 долот девять передержано, 50 нормально сработано и 31 недоработано.

При отработке 118 долот не установлено равенство $v_{\text{ср}} = v_{\text{прир}}$. Несмотря на это, 53 из них сработаны нормально, восемь оказались передержанными и только 57 недоработанными. Из последних 57 долот, как показал их осмотр, только 20, вероятно, могли бы быть доработаны до совпадения равенства $v_{\text{ср}} = v_{\text{прир}}$.

С забоя подняты 157 долот после того, как в процессе их отработки имелись одно или несколько равенств $v_{\text{ср}} = v_{\text{прир}}$.

Таким образом, момент, когда средняя механическая скорость стала равной скорости приработки долота, совпал или мог совпасть с моментом подъема нормально отработанных долот в 70 рейсах, что составляет 19,2% общего числа (365) проанализированных долот.

Таблица 11

Степень износа долота	Поднято шарошечных долот диаметром 190 мм					
	в момент, когда $v_{ср} = v_{прир}$		до момента, когда $v_{ср} = v_{прир}$		после момента, когда $v_{ср} = v_{прир}$	
	коли- чество	%	коли- чество	%	коли- чество	%

Турбинное бурение

Передержано	7	10,9	6	6,5	9	7,8
Нормально сработано	30	47,0	35	38,1	85	74,0
Недоработано	27	42,1	51	55,4	21	18,2
Всего	64	100	92	100	115	100

Роторное бурение

Передержано	2	7,7	2	7,7	4	9,4
Нормально сработано	20	77,0	18	69,3	35	83,4
Недоработано	4	15,3	6	23,0	3	7,2
Всего	26	100	26	100	42	100

Примечание. Все долота, в процессе обработки которых наблюдалось несколько равенств $v_{ср} = v_{прир}$, отнесены к долотам, поднятым после наступления равенства $v_{ср} = v_{прир}$.

Выводы

1. Параметры обработки долот $v_{тб}$, $h v_{ср}$, $v_{ср}$, v_p в большинстве случаев не отмечают период, предшествующий поломке долота при его чрезмерном износе, т. е. не отбивают момент, когда необходимо поднять долото, чтобы предотвратить аварию с ним. В то же время во всех случаях поломке долота, если она была вызвана чрезмерным износом, обязательно предшествует устойчивое снижение величины текущего значения механической скорости.

2. Обрабатывать долота уменьшенного и малого диаметров в данном районе по максимуму v_p на больших глубинах (свыше 2000 м) нецелесообразно, так как

совпадение максимума v_p с нормальным износом долот в этом случае составляет всего 28,5%. Процент совпадения максимума v_p с нормальным износом долота при роторном бурении больше (45,8%), чем при турбинном бурении (22,5%).

Положительные результаты при отработке долот большого диаметра (295, 269 мм) по максимуму v_p на глубинах до 2000 м составили 55,3%.

3. Невозможно рационально обрабатывать долота уменьшенного диаметра по максимуму произведения $h v_{cp}$ на больших глубинах, так как в большинстве случаев этот максимум не отбивается (совпадение максимума $h v_{cp}$ с нормальным износом долота составляет всего 30,7%).

4. Положительные результаты при отработке долот по параметру $v t_b$ составили 44%, в остальных случаях наблюдалось либо несколько локальных максимумов с замедленным снижением значения параметра, либо после абсолютного максимума спад параметра был кратковременным.

5. Методика, основанная на подъеме долота в момент равенства значений средней механической скорости и скорости приработки долота, для практического применения непригодна, так как положительные результаты при отработке долот по этой методике составили лишь 19,2%.

6. Наиболее рационально поднимать долота уменьшенного и малого диаметров после резкого снижения текущего значения механической скорости. В этом случае большинство долот поднято своевременно (82,4% в турбинном и 85,7% в роторном бурении).

7. Долота за время работы в установившемся периоде изнашиваются всего на 15—20%, основной же износ происходит в конце работы долота на забое.

8. За время установившейся работы долота в однородной породе текущее значение механической скорости изменяется мало. Интенсивный износ долота в конце рейса сопровождается резким падением текущего значения механической скорости.

9. Установлено, что механическая скорость в период установившейся работы долота при неизменных параметрах режима бурения колеблется в результате изменения буримости проходимых пород.

Глава III

ВЫБОР СПОСОБА БУРЕНИЯ ДОЛОТАМИ УМЕНЬШЕННОГО И МАЛОГО ДИАМЕТРОВ

§ 1. Анализ методов оценки эффективности способов бурения

Выбор способа бурения при отработке долот малых диаметров приобретает важное значение, так как недостаточная износостойкость опор, а иногда и вооружения в отдельных случаях требуют облегченных условий для работы таких долот.

Известно, что турбинный способ бурения имеет относительно большой коэффициент передачи мощности на забой, что позволяет форсировать режим турбинного бурения, а следовательно, и получать высокие механические скорости.

В роторном бурении степень форсирования режима бурения ограничивается опасностью поломок бурильных труб и большими потерями мощности на трение вращающейся колонны труб о стенки скважины.

Большие механические скорости при турбинном бурении сопровождаются сокращением длительности пребывания долота на забое, что вызывает ускорение общего ритма ведения буровых работ и позволяет добиться значительной эффективности при бурении скважин.

Однако с ростом глубин и переходом на бурение долотами малого диаметра наблюдается снижение эффективности турбинного способа бурения, механические скорости по величине приближаются к механическим скоростям роторного бурения, а проходка на долото иногда значительно уступает проходке при роторном бурении.

Р. А. Иоаннесян, Г. И. Булах [20, 21], М. Т. Гусман [9] при исследовании причин понижения показателей турбинного бурения с ростом глубины пришли к выводу, что основной причиной является снижение мощности на валу турбобура. Даже при переходе на долота малых диаметров с ростом глубины уменьшается удельная забойная мощность, т. е. мощность, приходящаяся на единицу площадки забоя.

Г. И. Булах указывает, что для долот диаметром 190 мм и бурильных труб диаметром 114 мм глубина наиболее эффективного применения турбобуров Т12М1-6 5/8" составляет 418 м, ТС4-6 5/8" — 1120 м, ЗТС-6 5/8" — 1920 м. Последними двумя типами турбобуров на практике бурят до глубины 3500 м и более.

За последние годы благодаря усилиям многих исследователей создан ряд малогабаритных турбобуров, обладающих достаточной мощностью и вращающим моментом для бурения на больших глубинах.

Вместе с этим за последние годы во многих районах Советского Союза, в том числе и на Украине, получил распространение комбинированный способ бурения, сущность которого заключается в том, что одну часть скважины (преимущественно верхнюю) бурят турбинным, а другую часть (преимущественно нижнюю) — роторным способами.

Для разработки наиболее приемлемой методики оценки эффективности способов бурения глубоких скважин уменьшенного и малого диаметров нами рассмотрены работы С. М. Кулиева, Н. Н. Победоносцевой, Б. А. Гулиева, Т. А. Кирия, Н. Н. Мамедова, Н. А. Жидовцева и Н. В. Щукина и др.

Б. А. Гулиев [8], оценивая эффективность работы турбобуров и долот различных типоразмеров в районе о. Песчаный, сопоставлял средние значения проходки, механической и рейсовой скоростей при турбинном и роторном бурении. Им был рассмотрен фактический материал по 17 глубоким скважинам, в которых было отработано около 2500 долот.

Н. А. Жидовцев и Н. В. Щукин провели анализ результатов бурения 86 скважин глубиной до 3500 м в северо-западной части Днепровско-Донецкой впадины. При оценке эффективности турбинного и роторного спо-

совов бурения они сопоставляли средние значения рейсовой скорости бурения.

Т. А. Кирия при оценке способов бурения сверхглубоких скважин на площадях Гоусаны и Зыря сопоставлял средние показатели только механической скорости и проходки на долото. Сделанные Т. А. Кирия выводы о том, что при бурении турбобурами средняя механическая скорость в 1,67 раза выше, а проходка на долото в 1,56 раза ниже, чем при роторном способе бурения, не говорят об эффективности того или иного способа бурения без учета времени, затрачиваемого на спуско-подъемные операции $t_{с.п.}$.

Однако, кроме времени $t_{с.п.}$, необходимо также учитывать вспомогательное время, затрачиваемое на проверку и опробование турбобура над ротором $t_{опр.}$, его замену $t_{зам.}$, расхаживание турбобура на забое $t_{расх.}$ и дополнительное время на ремонт насосов $t_{рем.}$, которое часто значительно превосходит затраты времени при роторном бурении, т. е. $t_{рем.} = t_{рем. турб} - t_{рем. ротор}$.

В работах Б. А. Гулиева, Н. А. Жидовцева, Н. В. Щукина, Т. А. Кирия не учитывалось это дополнительное время, что является их недостатком. Кроме этого, как справедливо отмечают некоторые исследователи, при оценке эффективности способов бурения обязательно должна учитываться себестоимость бурения.

Исследованиями С. М. Кулиева и его сотрудников [26] установлено, что себестоимость бурения находится в прямой зависимости от коммерческой скорости v_k и v_k является основным экономическим показателем при оценке рентабельности способов бурения.

Однако коммерческая скорость бурения, кроме производительного времени, учитывает все непроизводительное время, куда входят затраты времени на холостые спуско-подъемы в случае отказа турбобура в работе $t_{хол.}$, простои, связанные с отсутствием турбобуров на буровых $t_{ост.}$, аварии с поломкой турбобуров $t_{ав.}$ и т. д. Это непроизводительное время в значительной мере связано с организацией турбинного хозяйства, глинозаящества и с общей организацией буровых работ на предприятии, но менее всего зависит от эффективности турбинного способа бурения.

Поэтому более правильно при выборе способов бурения пользоваться технической скоростью бурения, кото-

рая полнее, чем рейсовая скорость отражает объем вспомогательных работ и не менее полно, чем коммерческая скорость, отражает технические и технологические особенности того или иного способа бурения.

А. Н. Победоносцева, сопоставляя технические скорости бурения, достаточно убедительно обосновала области эффективного с технической точки зрения применения турбинного и роторного способов бурения на месторождениях Кянизадаг и Зыря в Азербайджане.

Анализ методов оценки эффективности способов бурения позволяет сделать следующие выводы.

1. Механическая и рейсовая скорости бурения и проходка за рейс в отдельности или вместе взятые не могут характеризовать эффективность способов бурения.

2. При оценке эффективности способов бурения с технической точки зрения следует сравнивать технические показатели буровых работ (техническую и механическую скорости бурения).

3. При оценке рентабельности способов бурения следует сравнивать экономические показатели (коммерческую скорость и себестоимость 1 м проходки).

§ 2. Разработка методики оценки эффективности турбинного и роторного способов бурения и определения рациональных границ их применения

Техническая скорость бурения v_t выражается следующей зависимостью

$$v_t = \frac{h}{t_6 + t_{c.п} + t_{осн}}, \quad (3)$$

где h — проходка на долото в м; t_6 — время механического бурения в ч; $t_{c.п}$ — продолжительность работ, связанных со сменой долота и наращиванием, в ч; $t_{осн}$ — продолжительность всех производительных работ, кроме t_6 и $t_{c.п}$, в ч.

Механическая скорость проходки выражается формулой

$$v_m = \frac{h}{t_6}. \quad (4)$$

Для оценки степени использования долота за рейс

при том или ином способе бурения возьмем отношение зависимостей

$$\frac{v_M}{v_T} = 1 + \frac{t_{c.п} + t_{осн}}{t_б} \quad (5)$$

Приравняем соотношение (5) некоторому коэффициенту η , названному нами коэффициентом недоиспользования долота за рейс, и получим:

$$\eta = 1 + \frac{t_{c.п} + t_{осн}}{t_б} \quad (6)$$

или

$$\eta = 1 + \frac{v_M(t_{c.п} + t_{осн})}{h} \quad (7)$$

Из уравнения (7) следует, что величина η принимает наибольшее значение при холостом рейсе долота на забой и минимальное (приближающееся к единице), когда $t_б$ значительно превосходит $t_{c.п}$ и $t_{осн}$. Для уменьшения η с ростом глубины необходимо стремиться к увеличению h , хотя это связано с некоторым снижением v_M , а также к снижению времени $t_{c.п}$ и $t_{осн}$.

Таким образом, коэффициент η является величиной, характеризующей соотношение двух основных показателей бурения — v_M и v_T и наиболее полно отражает эффективность принятого способа бурения.

Бурение забойными двигателями можно считать эффективным, если дополнительные затраты времени на спуско-подъемные и подготовительно-вспомогательные работы полностью перекрываются сокращением времени механического бурения сопоставимого интервала, т. е. если $v_{T_{турб}} \geq v_{T_{ротор}}$, то турбинное бурение скважины эффективнее роторного¹.

Продолжительность бурения при турбинном способе

$$t_{бТ} = \frac{h_T}{v_{MT}}$$

продолжительность бурения при роторном способе

$$t_{бР} = \frac{h_P}{v_{MP}}$$

¹ Здесь приводится оценка эффективности способов бурения с технической точки зрения.

а технические скорости соответственно равны:

$$v_{\text{турб}} = \frac{h_{\text{т}} v_{\text{мт}}}{h_{\text{т}} + v_{\text{мт}} (t_{\text{с.п}} + t_{\text{оснт}})}$$

и

$$v_{\text{ротор}} = \frac{h_{\text{р}} v_{\text{мр}}}{h_{\text{р}} + v_{\text{мр}} (t_{\text{с.п}} + t_{\text{оснр}})}.$$

Рациональная глубина бурения турбинным способом определится из условия равенства $v_{\text{турб}} = v_{\text{ротор}}$ или

$$\frac{h_{\text{т}} v_{\text{т}}}{h_{\text{т}} + v_{\text{мт}} (t_{\text{с.п}} + t_{\text{оснт}})} = \frac{h_{\text{р}} v_{\text{мр}}}{h_{\text{р}} + v_{\text{мр}} (t_{\text{с.п}} + t_{\text{оснр}})}. \quad (8)$$

Обозначив через λ удельное время спуско-подъемных операций, получим:

$$\lambda = \frac{t_{\text{с.п}}}{H}. \quad (9)$$

Приняв время $t_{\text{с.п}}$ для турбинного и роторного бурения равным и заменив $t_{\text{с.п}}$ в уравнении (8) его значением, вытекающим из зависимости (9), решим уравнение (8) относительно H :

$$H = \frac{\Delta v h_{\text{т}} h_{\text{р}} - v_{\text{т}} v_{\text{р}} (h_{\text{р}} t_{\text{оснт}} - h_{\text{т}} t_{\text{оснр}})}{\Delta h v_{\text{т}} v_{\text{р}}}, \quad (10)$$

где H — максимальная глубина, до которой эффективно бурить турбинным способом; λ — удельное время спуско-подъемных операций; $t_{\text{оснт}}$ — затраты времени на подготовительно-вспомогательные операции при турбинном способе бурения, включающие $t_{\text{опр}}$, $t_{\text{зам}}$, $t_{\text{расх}}$, $t_{\text{рем}}$; $t_{\text{оснр}}$ — затраты времени на подготовительно-вспомогательные операции при роторном бурении;

$$\Delta v = v_{\text{т}} - v_{\text{р}};$$

$$\Delta h = h_{\text{р}} - h_{\text{т}}.$$

Средние значения величин, входящих в формулу (10), определяем по специально разработанной нами методике. При ее разработке рассмотрены работы по определению средних показателей буровых работ В. С. Федорова и С. М. Кулиева и его сотрудников.

Метод В. С. Федорова [38, 39] по определению средних показателей буровых работ более точен, но гро-

моздок и требует проведения большого объема сложных вычислительных работ. Метод С. М. Кулиева [26, 27] более прост, однако позволяет с достаточной для практических целей точностью определять средние значения показателей буровых работ.

Метод С. М. Кулиева частично здесь используется. Опираясь на установленное С. М. Кулиевым положение, что величина $\Delta_{\text{пред}}$ с уменьшением среднего арифметического значения проходки на долото h и времени t уменьшается, предельные значения h_{T} , h_{P} , t_{T} , t_{P} , $t_{\text{оснT}}$, $t_{\text{оснP}}$ можно найти из выражений

$$\begin{aligned} h_{\text{пред}} &= \pm (0,8 - 0,86) h_{\text{ср}} + h_{\text{ср}}; \\ t_{\text{пред}} &= \pm (0,54 - 0,6) t_{\text{ср}} + t_{\text{ср}}; \\ t_{\text{оснпред}} &= \pm (0,8 - 0,84) (t_{\text{оснср}} + t_{\text{оснср}}). \end{aligned} \quad (11)$$

Если индивидуальные значения h_{T} , h_{P} , t_{T} , t_{P} , $t_{\text{оснT}}$, $t_{\text{оснP}}$ лежат вне пределов, обусловленных выражениями (11), то их нужно исключить из общего числа данных.

После исключения дефектных данных определяют средние значения h_{T} , h_{P} , t_{T} , t_{P} , $t_{\text{оснT}}$, $t_{\text{оснP}}$ по стратиграфическим горизонтам для каждой скважины, а затем по сопоставимым горизонтам группы скважин.

Мощность стратиграфических горизонтов должна быть не более 200 м, если она превышает 200 м, то ее необходимо разбить на несколько нормативных пачек.

Разница в глубине залегания нормативных пачек не должна превышать величину, определяемую по формуле

$$\Delta h = \frac{5H}{100}, \quad (12)$$

где H — фактическая глубина скважины в м.

Нормативные пачки группы скважин аналитически обосновываются по литологическому строению и условиям бурения, способам бурения, типоразмерам долот и турбобуров; параметрам режима бурения; параметрам глинистого раствора.

Разница в удельных весах глинистого раствора не должна превышать $\pm(0,02-0,05) \text{ Г/см}^3$, а вязкости $\pm 30 \text{ сек}$.

После того как найдены средние значения h_{T} , h_{P} , t_{T} , t_{P} для сопоставимых интервалов группы скважин, по формуле (4) находим $v_{\text{мT}}$ и $v_{\text{мP}}$

Для определения λ можно воспользоваться следующей формулой:

$$\lambda = \frac{t_2 - a(t_2 - t_1)}{H}, \quad (13)$$

где t_1 и t_2 — время, затрачиваемое на спуск и подъем, смену долота и наращивание в начале и в конце рассматриваемого интервала, в ч; H — средняя глубина залегания сопоставимого интервала

$$H = \frac{H_1 + H_2}{2}, \quad (14)$$

a — коэффициент, определяющий характер кривой $t_{\text{сп}} = f(H)$, постоянный для данной буровой установки. Исследованиями С. М. Кулиева и его сотрудников установлено, что для установки Уралмаш-4Э $a = 0,501$, для лебедки Л7-4МЗ $a = 0,509$ и т. д.

Пример обработки данных бурения турбинным способом скв. 14 Североголубовской площади по приведенной методике показан в табл. 12.

Таблица 12

Интервал бурения, м	Проходка на долото, м	Время механического бурения, ч	$t_{\text{осн}}$	$t_{\text{с. п}}$	Рейсовая скорость v_p , м/ч
2826—2834	8	3,75	Данные значения отбракованы как несоответствующие одному уровню значимости глубин		
2834—2844	10	5,50			
2844—2848	4	3,25			
2848—2860	12	5,00			
2860—2867	7	6,25	2,25	6,25	0,56
2867—2883	16	5,25	1,75	7,25	0,95
2883—2904	21	4,25	1,50	6,75	1,95
2904—2913	9	4,00	6,75	6,75	Отбракованы
2913—2918	5	2,50	7,25	6,75	То же
2918—2924	6	8,75	2,25	6,50	0,49
2924—2932	8	8,25	0,25	6,75	0,66
2932—2939	7	3,75	1,75	6,50	0,68
2939—2949	10	4,25	1,75	6,50	0,93
2949—2959	10	5,00	2,25	6,75	0,91
2959—2966	7	4,25	2,25	6,75	0,63
2966—2974	8	6,50	1,75	6,50	0,62
2974—2982	8	6,25	2,25	6,50	0,63
2982—2990	8	5,75	2,25	6,75	0,64
2990—2995	5	2,75	6,25	6,50	0,54
Итого . . .	121	65,25	41,50	86,25	10,19
Среднее . . .	9,3	5,02	3,20	6,63	0,78

$$h_{\text{пред}} = \pm 0,85 \times 9,3 + 9,3 = \pm 7,9 + 9,3;$$

$$t_{\text{пред}} = \pm 0,55 \times 5,02 + 5,02 = \pm 2,76 + 5,02.$$

$$1,4 < h_{\text{пред}} < 17,2 \text{ м}; \quad 2,26 < t_{\text{пред}} < 7,78 \text{ ч};$$

$$T_{\text{осн,пред}} = \pm 0,8 \times 3,2 + 3,2 = \pm 2,56 + 3,2.$$

$$H = \frac{2860 + 2995}{2} = 2927 \text{ м.}$$

$$0,64 \text{ ч} < t_{\text{осн,пред}} < 5,76 \text{ ч};$$

$$\lambda = \frac{6,5 - 0,501(6,5 - 6,25)}{2927} = 0,00218.$$

Следовательно, в дальнейшем анализировали рейсы долота с $h=1,4-17,2 \text{ м}$, $t=2,26-7,78 \text{ ч}$, $t_{\text{осн}}=0,64-5,76$, $\lambda=0,00218$.

Найденные средние значения искомым величин подставляют в формулу (10) и находят максимальную глубину, до которой эффективно бурить турбинным способом по анализируемой группе скважин или по району в целом.

Применение формулы (10) покажем на следующем примере.

При разбуривании сопоставимой пачки пород мощностью 200 м в интервале 3100—3300 м шарошечными долотами № 8 типа 1В190Т при турбинном способе бурения с применением турбобуров ЗТСШ-6 3/8" получены следующие средние показатели: $h_{\text{т}}=8 \text{ м}$, $v_{\text{т}}=2,3 \text{ м/ч}$, $t_{\text{осн,т}}=2,6 \text{ ч}$.

При роторном способе бурения однотипными долотами: $h_{\text{р}}=16 \text{ м}$, $v_{\text{р}}=0,84 \text{ м/ч}$, $t_{\text{осн,р}}=2,1 \text{ ч}$, $\lambda=0,0028$ для обоих способов бурения

$$H = \frac{1,46 \times 8,16 - 2,3 \times 0,84(16 \times 2,6 - 8,2 \times 1)}{8 \times 2,3 \times 0,84 \times 0,0028} = 3200 \text{ м.}$$

Следовательно, в данном конкретном случае турбинный способ эффективно применять до глубины 3200 м.

§ 3. Исследование эффективности способов бурения в рассматриваемом районе при бурении глубоких скважин долотами уменьшенного и малого диаметров

Эффективность турбинного и роторного способов бурения в рассматриваемом районе оценивали по описанной выше методике. При этом был проанализирован

фактический материал по двум группам скважин. Конструкция и условия бурения этих скважин подробно описаны в главе II.

Проанализирован фактический материал по 22 скважинам первой группы и 16 скважинам второй. Проводка каждой группы скважин осуществлялась в аналогичных условиях.

При бурении шарошечными долотами № 8 и 9 скважин первой группы удельный вес глинистого раствора в пределах сопоставимых стратиграфических горизонтов отличался не более чем на $\pm 0,02 \div 0,03$ Г/см³ и поэтому во внимание не принимался.

При бурении шарошечными долотами № 5 и 6 скважин второй группы удельный вес глинистого раствора в сопоставимых горизонтах также отличался незначительно и во внимание не принимался.

После обработки и систематизации фактического материала автор располагал данными о 1253 рейсах, из которых 826 были произведены турбинным и 427 — роторным способами бурения.

По размерам долот рейсы распределились следующим образом: 956 рейсов было сделано долотами № 8 и 9 и 297 рейсов долотами № 5 и 6.

По типоразмерам долот рейсы распределились следующим образом (табл. 13).

Анализ данных показал, что при турбинном бурении долотами № 5 и 6 до глубины 1800—2000 м, а долотами № 8 и 9 до глубины 3200—3400 м механические скорости во всех горизонтах значительно выше скоростей роторного бурения. С углублением скважин механические скорости быстро убывают и на указанных глубинах приближаются по величине к скоростям роторного бурения.

Проходка на долото в мягких породах верхних интервалов при турбинном бурении выше, чем при роторном. С увеличением плотности пород по мере нарастания глубины разница в проходке уменьшается и на глубинах порядка 1500—1600 м при бурении долотами № 5 и 6 и на глубинах 2800—3000 м при бурении долотами № 7, 8 и 9 становится примерно равной проходке при роторном бурении. Ниже указанных глубин проходка при роторном бурении выше проходки при турбинном бурении.

Таблица 13

Диаметр долота, мм	Шифр долота	Тип долота	Максимально допустимая нагрузка на долото (по Н554-61), Т	Количество рейсов
214	3Б-9С	С	18	25
190	2В-8С	С	14	75
	М-8С	С	14	68
	1В-190МСГ	С	14	132
	2В-190СГ	СТ	14	85
	ОМ-585-190Т	Т	14	62
	1В-8СТ	СТ	14	72
	2В-8Т	Т	14	131
	1В-190Т	Т	14	143
	СДС2-8Т	Т	14	125
	1В-190МГЛ	М	14	38
140	4В-140С	С	7	35
	4В-140Т	Т	7	20
118	2В-118С	Т	3,5	56
	2В-118Т	Т	3,5	70
112	1В-112МГ	М	3,5	116

В табл. 14 сравниваются данные результатов бурения глубинных интервалов по скважинам на площадях Днепровско-Донецкой впадины турбинным и роторным способами.

В табл. 14 приведены средние технико-экономические показатели и параметры режима бурения, выведенные после отбраковки дефектных данных и группировки полученных значений по стратиграфическим горизонтам.

Как видно из табл. 14, при разбуривании глубинных интервалов (свыше 3400 м) проходка на долото при роторном способе бурения в 1,65—1,73 раза выше, чем при турбинном, а механическая скорость либо остается на уровне турбинного бурения, либо уменьшается в 2—4 раза. Тем не менее рейсовая и техническая скорости бурения во всех случаях при роторном способе бурения выше, чем при турбинном.

Кроме того, как показал опыт бурения на больших глубинах, при роторном способе можно повысить производительность буровых насосов, что позволяет улучшить очистку скважины от выбуренных и осыпающихся пород. При этом значительно сокращаются интервалы

Таблица 14

№ скважины и площадь	Стратиграфический горизонт	Интервал залегания, м		Пробурено шарошечными долотами, м		Расход долот, шт.		Время на бурение, ч		Средняя проходка на долото, м		Механическая скорость, м/ч		Техническая скорость, м/ч	
		от	до	турбинное	рооторное	турбинное	рооторное	турбинное	рооторное	турбинное	рооторное	турбинное	рооторное	турбинное	рооторное
302 Шевченко-Близнецовская	С ₂ ⁵	3478	3900	48	74	9	8	38,25	66,5	5,34	9,27	1,26	1,11	0,42	0,48
		Алмазное долото		190	—	2	—	209,08	—	95	—	0,91	—	0,66	—
	С ₂ ⁴	3900	4200	—	57	—	10	—	62,25	—	5,7	—	0,92	—	0,34
27 Солоховская 200 Шебелинская	С ₁	3316	3932	308	308	122	74	167	534	2,52	4,16	1,84	0,53	0,149	0,187
	С ₃ ²	2600	3020	247	158	47	17	98,75	170	5,25	9,3	2,5	0,93	0,50	0,51
	С ₂ ³	4285	4500	—	104	—	15	—	182,25	—	6,93	—	0,57	—	0,43
Алмазное долото		—	92	—	1	—	173,5	—	92,0	—	0,53	—	0,43		
300 Шебелинская	С ₃ ²	2509	3002	40	435	5	32	14,5	611,75	8,0	13,6	2,76	0,715	0,88	0,535
	С ₃ ¹	3002	3532	—	431	—	35	—	836,35	—	12,3	—	0,515	—	0,347
	С ¹	2987	3276	276	—	16	—	81,5	—	17,3	—	3,37	—	0,38	—
—		—	146	—	—	8	—	—	83,5	—	18,2	—	2,28	—	0,4

проработок, резко уменьшается время на восстановление циркуляции и выравнивание параметров промывочной жидкости перед началом бурения.

Так, при бурении скв. 302 регионального профиля Шевченко-Близнецы на глубине порядка 3600 м при турбинном способе бурения возникли осложнения, связанные с недостаточной очисткой забоя от выбуренной породы, что обусловило переход с глубины 3753 м на роторный способ бурения.

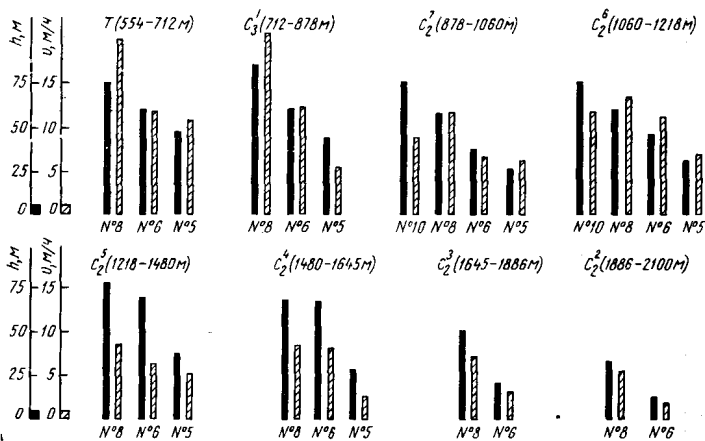


Рис. 7. Сравнение проходки h и механической скорости v_M при бурении долотами различных диаметров турбинным способом.

Значительное сокращение интервалов проработки, облегчение восстановления циркуляции в результате улучшения очистки забоя скважины от выбуренной и осыпающейся породы позволило довести эту скважину роторным способом до проектной глубины 4200 м.

При бурении скв. 27 Солоховская в интервале 3316—3624 м общее время на выравнивание глинистого раствора перед началом бурения турбинным способом составило 362 ч, при роторном бурении в интервале 3624—3932 м оно составило 42,0 ч, несмотря на значительное увеличение глубины. Время на проработку сократилось с 214 ч до 28,5 ч.

На рис. 7 сравниваются проходка на долото и механическая скорость при бурении долотами разных диаметров.

Как видно из рисунка, эффективность бурения по мере перехода от долот большего диаметра к меньшему меняется следующим образом. Если при бурении скважин долотами № 8 с турбобурами ТС4-6 5/8" механическая скорость на глубинах до 2000 м достигает 16—32 м/ч, то при бурении долотами № 6 с турбобурами ТС4-5" она не превышает 9—12 м/ч, отставание же по проходке за рейс не менее чем в 2 раза.

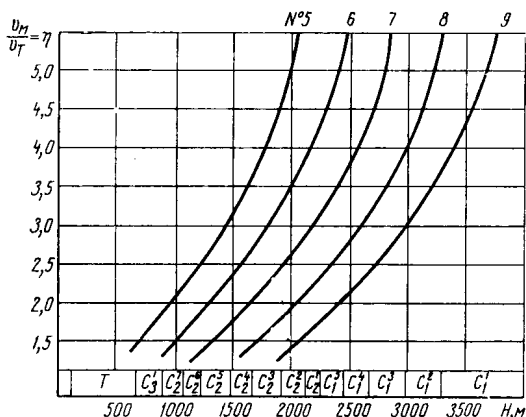


Рис. 8. Зависимости $\eta=f(H)$ для долот различных диаметров

Очевидно, что при данном уровне соотношений показателей работы долот, турбинным способом долотами малого диаметра (№ 5, 6) можно бурить скважины только на средние глубины (до 2000 м).

На рис. 8 приведены зависимости $\eta=f(H)$, построенные на основании формул (7) и (10) для рассматриваемого района глубокого бурения.

Кривые, изображенные на рисунке, соответствуют оптимальным значениям η для турбинного способа бурения долотами различного диаметра (№ 5, 6, 7, 8, 9).

Графиками пользуются для оценки эффективности турбинного способа бурения при непосредственном бурении скважин в рассматриваемом районе. Ими рекомендуется пользоваться и в других районах со сходными условиями бурения.

Для этого периодически по мере углубления скважины по формулам (9) и (14) определяют средние зна-

чения $\eta_{\text{факт}}$ и H , а по рис. 8 — значения η , соответствующие данной глубине H .

В случае, если $\eta_{\text{факт}} \approx \eta$, то эффективно турбинное бурение при заданном режиме.

Если $\eta_{\text{факт}} < \eta$, то следует усилить режим турбинного бурения для повышения v_m .

Если же $\eta_{\text{факт}} > \eta$, то следует переходить на роторное бурение.

Пример. I. При бурении в интервале 2900—3100 м шарошечными долотами № 8 турбинным способом средние показатели работы долот составили:

$$v_m = 1,8 \text{ м/ч}; \quad v_T = 0,56 \text{ м/ч};$$

$$\eta_{\text{факт}} = \frac{1,8}{0,56} = 3,22.$$

По рис. 8 для глубины 3000 м $\eta = 4$, следовательно,

$$\eta_{\text{факт}} < \eta.$$

После усиления режима турбинного бурения в следующем интервале 3100—3200 м механическая скорость увеличилась и ее среднее значение стало равным $v_m = 2,2 \text{ м/ч}$,

$$\eta_{\text{факт}} = \frac{2,2}{0,56} = 3,9;$$

$$\eta_{\text{факт}} \approx \eta.$$

Следовательно, бурение следует продолжать турбинным способом, выдерживая достигнутые режимные параметры.

II. При бурении шарошечными долотами № 6 турбинным способом в интервале 1900—2100 м средние показатели составили

$$v_m = 3,6 \text{ м/ч}, \quad v_{\text{гех}} = 0,51 \text{ м/ч},$$

$$\eta_{\text{факт}} = \frac{3,6}{0,51} = 7,06.$$

По рис. 8 находим, что для глубины 2000 м $\eta = 3,5$,

$$\eta_{\text{факт}} > \eta.$$

Следовательно, в данном случае следует переходить на роторный способ бурения.

**ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА БУРЕНИЯ
И МЕТОДИКИ РЕГУЛИРОВАНИЯ ОСЕВОЙ
НАГРУЗКИ НА ДОЛОТО ПРИ БУРЕНИИ
ГЛУБОКИХ СКВАЖИН
УМЕНЬШЕННОГО И МАЛОГО ДИАМЕТРОВ**

**§ 1. Сравнение влияния различных сочетаний осевой
нагрузки на долото и скорости его вращения
на эффективность обработки долот уменьшенного
и малого диаметров**

В проектировании режимов бурения существуют два направления. Одно направление ориентируется на применение высокооборотных режимов бурения (скорость вращения долота 500—1000 об/мин), другое — на невысокие скорости вращения долота (до 300 об/мин) и повышенные осевые нагрузки. В выборе того или иного направления при обработке долот уменьшенного и малого диаметров до сих пор отсутствуют научно обоснованные решения.

Так, установлено, что долота уменьшенного и малого диаметров при турбинном бурении выходят из строя в большинстве случаев из-за износа опор. Рассмотрим влияние P_{oc} и n на долговечность опор t_f .

В зависимости от P_{oc} и n t_f может быть выражена следующей эмпирической формулой

$$t_f = \frac{A}{n^x P_{oc}^y}, \quad (15)$$

где A — опытный коэффициент пропорциональности; x

и y — показатели степени, зависящие от характера разрушаемых пород.

В. С. Федоров [38], приводя результаты ряда исследований, согласно которым $x=0,3 \div 0,8$; $y=0,02 \div 0,5$, делает вывод, что при объемном разрушении горных пород $x > y$ и, следовательно, скорость вращения влияет на долговечность опор долота больше, чем осевая нагрузка.

А. А. Минин и А. А. Погарский [27, 29], опираясь на стендовые исследования высокооборотного (до 4500 об/мин) бурения шарошечными долотами малого диаметра (до 140 мм) с малыми осевыми нагрузками (100—500 кг), приходят к прямо противоположному выводу о том, что высокие скорости вращения в значительно меньшей степени, чем осевые нагрузки, влияют на срок службы опор долот.

Н. С. Тимофеев и М. Т. Гусман [34], согласно данным зарубежных исследований, отмечают иное, чем у В. С. Федорова, соотношение x и y , а именно $x=1 < y$, что подтверждает второе положение.

Ю. Р. Иоаннесян [22], исследуя возможности увеличения проходки на долото при турбинном бурении, принимает значения $x=1$, $y=1,5 \div 3,3$, т. е. соответствующие $x=1 < y$.

На наш взгляд, такие противоречивые данные можно объяснить только очень сложным влиянием параметров режима бурения на долговечность опор долот в зависимости от изменяющегося в каждом случае конкретного сочетания долото — забой.

Сочетание долото — забой, как известно, определяется большим многообразием факторов: конструктивными особенностями, размером и износостойкостью долота, степенью его износа; характером разрушаемой породы с учетом гидравлического и горного давлений, а также упрочнения забоя; свойствами промывочной жидкости и степенью очистки забоя от шлама; режимом разрушения забоя и т. д.

Зависимость $v_M = f(P_{oc}, n)$ может быть представлена в виде эмпирической формулы

$$v_M = B n^{x_1} P_{oc}^{y_1}. \quad (16)$$

По данным А. В. Орлова [28], в этой формуле $y_1 = 1,0$, $x_1 = 0,2 \div 0,7$.

Л. И. Штурман [46] определил, что при турбинном бурении в породах каширской свиты $x_1=0,7$, $y_1=1,1$. В. С. Федоров [38] рекомендует принимать $x_1=0,45$. В среднем значения показателей степени в выражении (16) можно принять равными $x_1=0,2 \div 0,7$, $y_1=1,0 \div 1,1$.

По выражениям (15) и (16) сравним влияние параметров режима бурения на величину проходки h при обработке долот уменьшенного и малого диаметров, которые срабатываются по опорам:

$$h = t_{\nu_m} = ABn^{x_1-x} P_{oc}^{y_1-y}, \quad (17)$$

или, объединив постоянные выражения (17), получим:

$$h = cn^{x_2} P_{oc}^{y_2}. \quad (18)$$

По В. С. Федорову, $x_1 - x < 0$, $y_1 - y > 0$, следовательно, $x_2 < y_2$. Из этого следует, что для повышения проходки за рейс выгоднее увеличивать P_{oc} за счет уменьшения n .

Такого же мнения придерживается Г. И. Булах, утверждая, что при равном значении мощности турбобур, характеризующийся большим отношением M/n , обеспечивает более эффективное разрушение пород. Но так как $M \equiv P_{oc}$, то большему отношению M/n соответствует большее значение P_{oc} .

Данное положение справедливо при объемном разрушении горных пород и подтверждается практикой турбинного бурения пластичных, не дающих хрупкого разрушения пород либо упругопластичных пород глинистого происхождения с применением современных турбобуров, для которых характерна низкая скорость вращения, а также практикой роторного бурения.

Однако не всегда удается создать условия для объемного разрушения горных пород, особенно для долот уменьшенного и малого диаметров.

В самом деле, при переходе на бурение шарошечными долотами меньшего диаметра осевая нагрузка на долото должна изменяться пропорционально диаметру долота, тогда

$$P_{oc_2} = P_{oc_1} \frac{D_2}{D_1},$$

где P_{oc_1} и P_{oc_2} — осевые нагрузки на долота соответственно большего и меньшего диаметров.

Если предположить, что при бурении шарошечными долотами № 10 (243 мм) режим объемного разрушения пород обеспечивается при $P_{oc1} = 23 T$, со согласно приведенной формуле, при переходе на бурение долотами № 6 (140 мм) для обеспечения объемного разрушения пород осевая нагрузка должна составлять 13,3 T, долотами № 5 (118 мм) — 11,2 T, № 4 (97 мм) — 9,2 T, но максимально допустимая нагрузка для долот № 6 составляет 7 T, № 5 — 3,5 T, № 4 — 3 T.

Ю. Ф. Потапов и В. С. Симонов [31], исследуя разрушение горных пород шарошечными долотами малого диаметра, установили, что при разбурировании пород твердостью свыше 280 кг/мм^2 долотами 1В6Т (140 мм) даже при первоначальной форме зубьев и осевых нагрузках около 8000 кг не обеспечивается режим объемного разрушения.

Исследованиями А. Ф. Замятиной [16] установлено, что для объемного разрушения многих пород с временным сопротивлением на вдавливание более 130 кг/мм^2 нагрузку на долота малого диаметра (140 и 118 мм) следует создавать от 12 T и выше, в то время как допустимая максимальная нагрузка на эти долота значительно ниже. В этих условиях увеличение P_{oc} сверх допустимой величины приводит к резкому снижению t_f и h , а иногда и к поломке долота.

В. С. Федоров [38] отмечает, что увеличение P_{oc} в случае, если не обеспечивается объемное разрушение породы, ведет к значительному снижению t_f , т. е. выражение (18) справедливо при $x_2 > y_2$.

Исходя из конкретной мощности $N = Mn$ и учитывая, что $M \equiv P_{oc}$, получаем:

$$N \equiv P_{oc} n. \quad (19)$$

Из выражения (19) следует, что если повышать P_{oc} невыгодно, то для реализации N нужно увеличить n . В скальных, плотных породах, твердость которых не превышает 120 кг/мм^2 , при этом будут достигнуты достаточно высокие проходки h , особенно если промывать скважину малоабразивной жидкостью (водой).

В более крепких породах качество опор шарошечных долот малого диаметра ограничивает возможность эффективного их применения. В этих случаях следует переходить на бурение безопорными долотами.

При разбурировании крепких абразивных пород долота малого диаметра очень часто изнашиваются по вооружению. Долговечность вооружения при этом в общем виде можно принять равной

$$t_z = \frac{D}{n^{x_3} P_{oc}^{y_3}}, \quad (20)$$

где D — постоянная, зависящая от типа и конструкции вооружения долота; x_3 и y_3 — показатели степени, зависящие от абразивной характеристики породы.

Значения x_3 и y_3 могут меняться в пределах 1,0—1,5, но во всех случаях $x_3 > y_3$.

По аналогии с (17) запишем:

$$h_1 = t_z v_m = BDn^{x_1 - x_3} P_{oc}^{y_1 - y_3};$$

$$h_1 = \epsilon n^{x_4} P_{oc}^{y_4}. \quad (21)$$

В этом случае $x_1 - x_3 < 0$, а $y_1 - y_3 > 0$, следовательно, $x_4 < y_4$. Из зависимостей (19) и (21) можно сделать вывод, что если стойкость опор не лимитирует время работы долота на забое, увеличение забойной мощности N приведет к увеличению проходки h , при увеличении нагрузки на долото P_{oc} и снижении скорости вращения n .

При заданной мощности N также выгоднее реализовать ее значение, увеличивая P_{oc} .

Наши исследования показали, что разбурирование гранита долотами 1У-97Г на малых скоростях ($n = 67; 128$ об/мин) с повышенными осевыми нагрузками (до 5500 кг) не вызывает снижения стойкости опор, долота при этом срабатываются, как правило, по вооружению. С повышением же скоростей вращения значительно возрастает интенсивность абразивного износа вооружения шарошек. Так, при увеличении скорости вращения с 67 до 346 об/мин долговечность долот, лимитируемая износом вооружения, сокращается в 2—3 раза, а проходка в 1,5 раза.

Увеличивая осевую нагрузку на долото, при бурении твердых абразивных пород можно добиться равностойкости опор и вооружения шарошек и тем самым получить максимальные проходки.

Таким образом, для различных условий бурения долотами уменьшенного и малого диаметров соотноше-

ние между $\dot{P}_{ос}$ и n должно быть различным и зависеть от того, что лимитирует их долговечность: износ опор или вооружения.

Если долговечность долот лимитируется износом опор, то при бурении в пластичных породах на больших глубинах необходимо стремиться к возможно большему значению $P_{ос}$, при бурении же в скальных породах, дающих хрупкое разрушение, значение $P_{ос}$ может иметь несколько меньшее значение.

Если долговечность долот лимитируется износом вооружения, то во всех случаях разрушение горных пород эффективнее при повышенных осевых нагрузках и низких скоростях вращения долота.

Чтобы определить оптимальное сочетание $P_{ос}$ и n , В. А. Яковлев произвел 18 экспериментов обработки долот малого диаметра на стенде. При этом было отработано на граните 54 долота 1У-97Т. Нагрузка на долото менялась от 1000 до 5500 кг при скоростях вращения долота 67, 128, 238 и 346 об/мин.

Отработать все долота при $n=67$ и 128 об/мин и осевой нагрузке свыше 5500 кг, при $n=238$ об/мин и осевой нагрузке свыше 4500 кг, а также при $n=346$ об/мин и осевой нагрузке свыше 3500 кг не удалось. Как правило, опоры шарошек долот не выдерживали данных нагрузок, наблюдалось заклинивание одной, двух, а иногда всех трех шарошек в самом начале обработки долот.

Разбуривание же гранита при заданных скоростях вращения и нагрузках ниже указанных максимальных значений приводило к преимущественному разрушению вооружения долот. Опоры шарошек сохраняли свою работоспособность до конца рейса.

Для анализа зависимостей $v_m=f(P_{ос}, n)$ и $\omega=\varphi(P_{ос}, n)$ и нахождения оптимальных значений P и n , для работы долота в стендовых условиях необходимо было выбрать критерий. Таким критерием нами было выбрано отношение

$$\frac{dh}{dx} = \frac{v_t}{\omega} \quad (22)$$

Критерий выражает элемент проходки, приходящийся на каждую единицу износа долота, и наиболее полно отражает эффективность разрушения породы в связи с износом долота.

На рис. 9 показана зависимость $\frac{v_t}{\omega}$ от P и n . Как видно из рис. 9, во всех случаях функция $\frac{v_t}{\omega} = f(P_{oc}, n)$ имеет максимумы, т. е. в каждом конкретном случае существует оптимальное значение P , при котором проходка на каждую единицу износа долота имеет максимум.

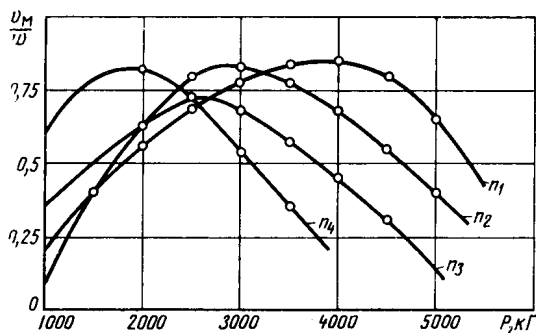


Рис. 9. Зависимость отношения $\frac{v_M}{\omega}$ от осевой нагрузки P_{oc} при скорости вращения долота $n_1=67$; $n_2=128$; $n_3=238$; $n_4=346$ об/мин.

Таким образом, изменяя режимные параметры, можно поддерживать износ долота на уровне, соответствующем получению максимума проходки на долото при достаточно высокой механической скорости. Как видно из рис. 9, максимумы зависимости $\frac{v_t}{\omega} = f(P_{oc}, n)$ находятся примерно на одном уровне, т. е. при правильном выборе осевой нагрузки при всех скоростях вращения долота в принятом диапазоне можно поддерживать износ вооружения при разбурировании упруго-хрупких пород на уровне, обеспечивающем эффективное разрушение породы.

В твердых упруго-хрупких породах типа гранит при разбурировании их долотами 1У-97Т в стендовых условиях такой нагрузкой для $n=128$ об/мин является 3,0 Т; для $n=238$ об/мин — 2,5 Т, для $n=346$ об/мин — 2 Т. При соблюдении указанных соотношений осевой нагрузки и скорости вращения долота достигается максималь-

ная продолжительность наиболее эффективного периода работы долота. На всем протяжении этого периода долото сохраняет свою работоспособность на достаточно высоком уровне, на каждый элемент износа приходится максимальная проходка и в итоге достигается макси-

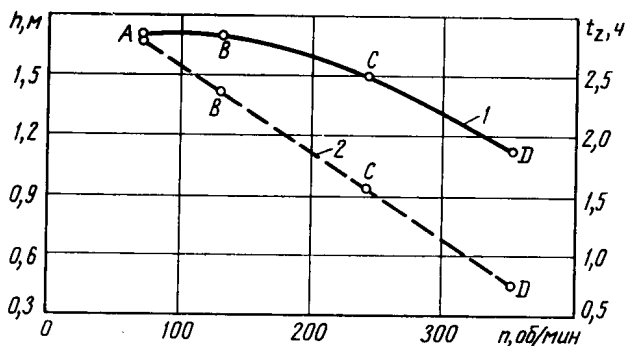


Рис. 10. Графики функциональных зависимостей.
1 — $h=f(n)$; 2 — $t_z=f(n)$.

мальная проходка при достаточно высокой механической скорости.

Если при оптимальном сочетании P и n обрабатывать долота, укладываясь в безаварийное время работы, то продолжительность рейса при преимущественном абразивном износе вооружения шарошечных долот малого диаметра в упругохрупких породах по данным экспериментов может быть выражена эмпирической формулой (20). При этом x_3 и y_3 имеют следующие значения:

$$1 < x_3 \leq 1,5; \quad 1 < y_3 < 1,5.$$

На рис. 10 изображены зависимости $h=f(n)$ и $t_z=f(n)$. Как видно из рисунка, проходка h и долговечность вооружения долота t_z значительно (особенно t_z) снижаются с увеличением скорости вращения долота. Буквами A, B, C, D на рисунке обозначены рациональные предельные значения проходки и продолжительности рейса долота.

§ 2. Разработка методики выбора режимных параметров при обработке долот уменьшенного и малого диаметров в производственных условиях

Если нагрузку на долото и скорость его вращения, при которых $h=h_{\max}$, обозначить P_{oc_h} и n_h , а нагрузку и скорость вращения долота, при которых $v_m=v_{m\max}$ через P_{oc_v} и n_v , то из выражений (16), (17) и (21) нетрудно установить, что $P_{oc_h} < P_{oc_v}$ и $n_h < n_v$. Следовательно, в конкретном районе бурения с определенным характером и свойствами разбуриваемых пород для достижения $v_{m\max}$ и h_{\max} требуются различные сочетания параметров режима бурения.

Как уже было сказано, отличительной особенностью выбора режимных параметров при обработке долот малых размеров является тот факт, что вследствие меньшей стойкости опор этих долот по сравнению с долотами больших размеров, получение максимальной рейсовой скорости проходки в большинстве случаев обеспечивается при предельно полной (безаварийной) обработке этих долот. В этом случае параметры режима бурения должны выбираться из расчета получения от долота полностью заложенных в нем потенциальных возможностей.

В связи с этим рассмотрим, в каких случаях с точки зрения получения максимальной рейсовой скорости выгоднее бурить при v_{\max} и в каких при h_{\max} .

Рейсовая скорость в первом случае будет равна

$$v_{p_v} = \frac{h v_{m\max}}{h + v_{m\max} t_b};$$

во втором

$$v_{p_h} = \frac{h_{\max} v_m}{h_{\max} + v_m t_b}.$$

Если соотношение рейсовых скоростей $\frac{v_{p_v}}{v_{p_h}} \geq 1$, то применение режимных параметров, обеспечивающих получение v_{\max} , всегда эффективнее применения параметров, обеспечивающих получение h_{\max} .

Момент изменения режимных параметров с ростом

глубины бурения для получения h_{\max} за рейс долота определится при условии, когда $v_p = v_{p_h}$ или

$$\frac{hv_{M\max}}{h + v_{M\max} t_b} = \frac{h_{\max} v_M}{h_{\max} + v_M t_b}. \quad (23)$$

Заменяв t_b в уравнении (23) его значением

$$t_b = \lambda L,$$

решим это уравнение относительно L :

$$L = \frac{\Delta v h h_{\max}}{\Delta h v_M v_{M\max} \lambda}, \quad (24)$$

где L — максимальная глубина, до которой эффективно бурить при v_{\max} ; λ — удельное время спуско-подъемных операций $\lambda = \frac{t_b}{L}$; $\Delta v = v_{\max} - v_M$; $\Delta h = h_{\max} - h$.

Следовательно, оптимальным режимом бурения, при котором достигается максимальная механическая скорость v_{\max} , следует считать режимы только до определенной глубины L . Ниже этой глубины следует применять режимы бурения, при которых достигается максимальная проходка за рейс h_{\max} .

При определении средних значений величин, входящих в формулу (24), воспользуемся выражениями (11) — (14).

Найденные средние значения h , h_{\max} , v_M , $v_{M\max}$, подставляют в формулу (24) и находят максимальную глубину эффективного применения параметров режима бурения, при которых достигается максимальная механическая скорость проходки.

Для оценки степени использования долота за рейс при том или ином режиме бурения возьмем отношение

$$\frac{v_p}{v_M} = \frac{t_b}{t_b + t_n}. \quad (25)$$

Запишем равенство (25) в следующем виде:

$$\frac{v_M}{v_p} = 1 + \frac{t_n}{t_b}. \quad (26)$$

Приравняем соотношение (26) некоторому коэффициенту ϵ , характеризующему степень использования

долота за рейс при данном сочетании параметров режима бурения

$$\varepsilon = 1 + \frac{t_n}{t_0} \quad (27)$$

или

$$\varepsilon = 1 + \frac{v_M t_n}{h} \quad (28)$$

Из выражений (27) и (28) следует, что степень использования долота во всех случаях больше единицы. Чем больше ε приближается к единице, тем выше степень использования долота за рейс.

На основании формул (24) и (28) по данным пробуренных скважин с лучшими показателями строятся графики зависимости $\varepsilon = f(L)$ для данного района буровых работ. Кривые, изображаемые на графиках, должны соответствовать оптимальным значениям ε для данных глубин в зависимости от размера применяемых долот.

Графики используются для оценки и выбора параметров режима бурения в рассматриваемом районе глубокого бурения.

Применение формулы (24) покажем на следующем примере.

При разбурировании сопоставимой пачки пород мощностью 200 м в интервале 1800—2000 м долотами № 5 роторным способом на одной группе скважин применяли режимные параметры, обеспечивающие получение максимальной механической скорости, среднее значение которой равно $v_{M_{\max}} = 0,82$ м/ч, и соответствующей проходки $h = 14,2$ м.

При другом сочетании режимных параметров обеспечивалось получение максимальной проходки, среднее значение которой равно $h_{\max} = 20$ м при $v_M = 0,75$ м/ч; в обоих случаях $\lambda = 0,003$ ч/м.

По формуле (24) находим

$$L = \frac{0,07 \times 14,2 \times 20}{5,8 \times 0,82 \times 0,75 \times 0,003} = 1850 \text{ м.}$$

Таким образом, в данных конкретных условиях рационально применять режимные параметры, обеспечивающие получение v_{\max} только до глубины 1850 м, а ниже следует изменить режимные параметры для получения h_{\max} .

§ 3. Оценка и выбор параметров режима бурения при проводке глубоких скважин уменьшенного и малого диаметров в рассматриваемом районе

Для оценки эффективности режимов бурения, применяемых при проводке глубоких скважин уменьшенного и малого диаметров в рассматриваемом районе бурения, установлены зависимости $h=f(v_m)$ по данным бурения 38 скважин.

Зависимости $h=f(v_m)$ устанавливали по отдельным горизонтам глубинных интервалов. Разница в глубине залегания горизонтов по всем скважинам не превышала величины, определяемой по формуле (12). Показатели бурения в этих горизонтах группировались по одинаковым параметрам режима бурения. Предельные значения $h_{пр}$ и $t_{пр}$ по группам определяли по формулам (11). После исключения неточных данных определяли средние значения $h_{ср}$ и $t_{ср}$. Значения $v_{ср}$ находили как частное от деления $h_{ср}$ на $t_{ср}$.

Обработка данных отработки 216 шарошечных долот № 8 (190 мм) в отложениях намюрского и визейского ярусов нижнего карбона (2420—3000 м) привела к идентичным результатам, приведенным на рис. 11.

Восходящая кривая $h=f(v_m)$, изображенная на рисунке, показывает, что при турбинном бурении глубинных интервалов максимальной проходке h_{max} соответствует максимальная механическая скорость v_{max} . Особенность турбинного бурения, характеризующаяся снижением скорости вращения долота по мере увеличения осевой нагрузки $P_{ос}$, привела в данном случае к оптимальному сочетанию режимных параметров при повышенных значениях $P_{ос}$.

Кривая зависимости $h=f(v_m)$ обрывается сразу после некоторого выполаживания вследствие интенсивного торможения и остановок турбобуров при чрезмерной их нагрузке. Следовательно, за оптимальный режим турбинного бурения при разбуривании глубинных интервалов следует принимать такой, при котором достигается максимальная механическая скорость v_{max} .

Обработка данных отработки 82 шарошечных долот № 8 (190 мм) в отложениях намюрского, визейского и турнейского ярусов нижнего карбона (2420—3200 м)

роторным способом, привела к результатам, приведенным на рис. 12.

Рабочая часть кривой $h=f(v_M)$, начиная с v_M , примерно равной 1 м/ч (рис. 12), показывает, что усиление режима роторного бурения приводит к росту v_M . Однако с ростом v_M наблюдается некоторое снижение h .

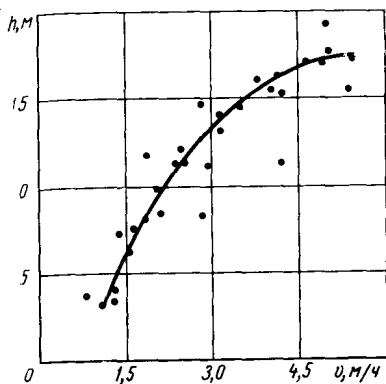


Рис. 11. Зависимость $h=f(v_M)$ при турбинном способе бурения.

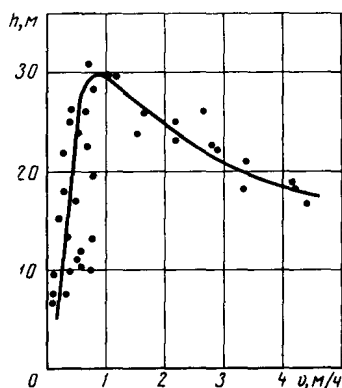


Рис. 12. Зависимость $h=f(v_M)$ при роторном бурении.

Данные при турбинном и роторном бурении алмазными долотами глубинных интервалов наиболее глубоких скважин, пробуренных на площадях Восточной Украины, приведены в табл. 15 и иллюстрируются на рис. 13.

Применение алмазных долот показывает, что высокие проходки, характерные для алмазных долот, обеспечиваются как при турбинном, так и при роторном способах бурения. Поэтому предпочтительно бурить алмазными долотами при максимальной механической скорости $v_{M, \max}$, что можно достичь при турбинном способе бурения.

Рабочая часть кривых, изображенных на рис. 11—13, качественно близка зависимости

$$h = kv^n,$$

где k и n — некоторые постоянные величины.

Величина k зависит от конструктивных особенностей долота и характера разбуриваемой породы, n принимает

№ скважины и площадь	Типоразмер долота, заводской номер	Количество рейсов	Интервал бурения, м	Показатели работы алмазных долот			
				проходка на долото, м	время механического бурения, ч	механическая скорость, м/ч	рейсовая скорость, м/ч
7 Левенцовская	АДС-8, № 222	3	1928—2112	110	119	0,92	—
То же	АДС-8, № 229	5	1808—2122	234	170	1,32	—
18 Гнединцевская	АДС-8, № 15	3	3230—3342	112	74,9	1,5	0,7
302 Балаклейская (КРБ)	АДС-8, № 174	2	3440—3563	123	133	0,92	0,69
11 Краснопоповская	АДС-8, № 48	3	2380—2529	149	149,5	0,99	—
301 Балаклейская (КРБ)	АДС-8, № 132	4	2927—3177 2573—2607	169	215	0,79	0,62
3 Мироновская	ДРЕС-1, № 67	1	1900—2117	217	202,75	1,07	—
1 Кобзевская	ДРВС-1, № 67	2	2825—3002	177	208	0,85	0,79
5 Павловская	ДРВС-1, № 67	1	2585—2660	75	72,5	1,04	—
3 Кобзевская	ДТ8-С1, № 211	7	2824—3030	196	169	1,16	0,59
3 Мироновская	ДТ8-С1, № 215	6	2125—2787	470	458	1,03	0,78
1 Старо-Покровская	АДС-8, № 41	2	2867—2934	67	—	0,85	0,713

№ скважины и площадь	Типоразмер долота, заводской номер	Количество рейсов	Интервал бурения, м	Показатели работы алмазных долот			
				проходка на долото, м	время механического бурения, ч	механическая скорость, м/ч	рейсовая скорость, м/ч
200 Шебелинская (роторное бурение)	АДС-8, № 53	1	4408—4500	92	—	0,53	0,43
300 Шебелинская	ДТ8-С1, № 185	2	4254—4352	98	514,5	0,2	—
48 Глинско-Розбышевская	АДС-8, № 60	3	3063—3338	192,5	200,5	0,96	0,8
50 »	АТ9-С1, № 13	4	3007—3303	189,4	186,4	1,03	0,4
То же	ДТ9-С1, № 15	2	3046—3406	209	163,9	1,28	1,02
11 Кегичевская	ДТ-8С, № С-75	6	2727—3018	291	227	1,28	—
47 Глинско-Розбышевская	ДТ9-С1, № 24	3	3093—3631	376	411,7	0,9	—
То же	ДТ9-С1, № 10	6	3057—3660	223	235	0,8	—
36 Качановская	ДТ8С-2, № 72	8	3155—3428	122	105,25	1,1	—
То же	ДТ8С-2, № 75	6	3194—3396	151	89,4	1,6	—
1 Адамовская (роторное бурение)	ДТ8С-2, № 188		2574—2794	100	173	0,578	—
1 Рослашновская	ДТ8С-2, № 35	3	3607—4004	397	296	1,3	—

различные значения, зависящие от способа и режима бурения и типа долота (шарошечные, алмазные).

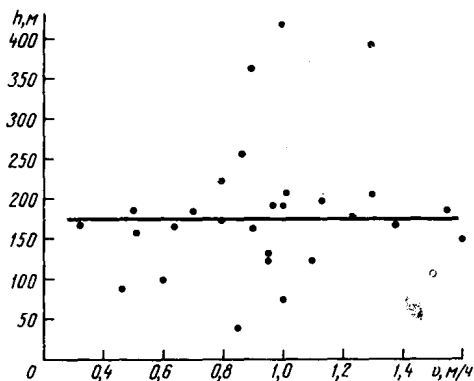


Рис. 13. Зависимость $h=f(v_M)$ при бурении алмазными долотами.

При $n < 0$ получаются кривые гиперболического вида (рис. 14, кривая 1). В этом случае увеличение v_M влечет снижение h (соответствует роторному бурению).

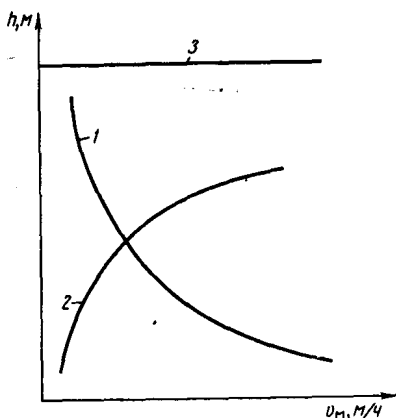


Рис. 14. Рабочая часть кривых $h=f(v_M)$. 1 — роторное бурение; 2 — турбинное бурение; 3 — алмазное бурение.

При $0 < n < 1$ зависимость $h=f(v_M)$ имеет вид кривой 2 (рис. 14). В этом случае увеличение v_M влечет увеличение h (соответствует турбинному способу бурения).

При $n=0$, $h=k$ графиком зависимости $h=f(v_M)$ является прямая, параллельная оси абсцисс v_M . В этом случае изменение v_M не влияет на h (соответствует алмазному бурению).

Из изложенного следует, что при бурении глубоких скважин долотами уменьшенного и малого диаметров турбинным способом следует придерживаться максимальной механической скорости, вы-

держивая режим бурения ближе к тормозному. Выбор параметров режима бурения при этом будет подчиняться условию получения максимальной механической скорости за время установившейся работы долота, т. е.

$$v_t = v_{n_{\max}} \approx \text{const.}$$

Алмазными долотами рационально бурить турбинным способом при максимально допустимой механической скорости, так как при этом достигается большая

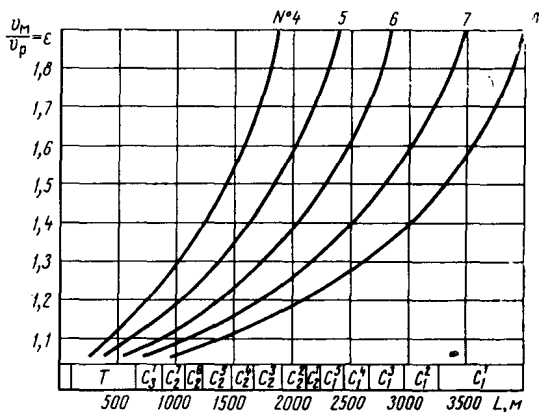


Рис. 15. Зависимость $\epsilon=f(L)$ для долот различных размеров.

эффективность по сравнению с роторным бурением благодаря техническим возможностям турбобуров.

При бурении роторным способом шарошечными долотами уменьшенного и малого диаметров, исходя из получения максимальной рейсовой скорости, следует до определенной глубины выдерживать параметры режима бурения, обеспечивающие получение максимальной механической скорости, а ниже этой глубины режимные параметры, обеспечивающие получение максимальной общей проходки на долото.

Нами разработаны графики (рис. 15), дающие возможность определять рациональную глубину перехода на режимные параметры, обеспечивающие получение h_{\max} при роторном бурении для рассматриваемого района. Кривые $\epsilon=f(L)$, изображенные на графике, соот-

ветствуют оптимальным значениям для данных глубин в зависимости от размера применяемых долот. Графики составлены на основании формул (24) и (28) по данным пробуренных скважин с лучшими показателями.

При составлении графиков по формуле (24) находили максимальную глубину, до которой эффективно бурить при v_{\max} и по формуле (28) соответствующее v_{\max} значение ε .

Из графиков видно, что значение коэффициента ε с увеличением глубины возрастает, т. е. нижний предел проходки на долото при v_{\max} , после которого необходим переход на режимные параметры, обеспечивающие h_{\max} , с увеличением глубины возрастает. Например, если v_{\max} на шарошечное долото № 5 равно 2 м/ч, то по рис. 15 и формуле (28) легко определить, что при глубине 500 м применение режимных параметров, обеспечивающих v_{\max} , будет эффективно, если проходка на долото не менее 5,7 м, а при глубине 1500 м — 23,5 м.

С увеличением глубины ε возрастает более интенсивно по мере перехода от долот большего диаметра к долотам меньшего диаметра, т. е. нижний предел проходки на долото при v_{\max} по мере перехода от долот большего диаметра к долотам меньшего диаметра уменьшается. Например, чтобы эффективно бурить при v_{\max} , равном 1,5 м/ч, на глубине 2000 м долотами № 6 необходимо иметь проходку на долото не менее 25 м, при бурении долотами № 5 — не менее 16 м, а при бурении долотами № 4 — не менее 10 м.

Чем меньше диаметр долота, тем на меньшей глубине следует переходить на бурение при режимных параметрах, обеспечивающих получение h_{\max} .

Кривыми, приведенными на рис. 15, пользуются для оценки и выбора параметров режима роторного бурения при непосредственном бурении скважин в рассматриваемом районе. Ими рекомендуется пользоваться и на других площадях с аналогичными данному району геолого-техническими условиями бурения.

Периодически по мере углубления скважины по формуле (28) определяют $\varepsilon_{\text{факт}}$. По графикам рис. 15 находят $\varepsilon_{\text{расч}}$, соответствующее данной глубине.

Если $\varepsilon_{\text{факт}} \approx \varepsilon_{\text{расч}}$, то бурение при заданных параметрах режима роторного бурения эффективно. Если $\varepsilon_{\text{факт}} < \varepsilon_{\text{расч}}$, то следует увеличить осевую нагрузку и

скорость вращения ротора для повышения v_m . Если $\epsilon_{\text{факт}} > \epsilon_{\text{расч}}$, то скорость вращения ротора несколько снижают при сохранении забойной мощности для облегчения условий работы долота и увеличения проходки за рейс.

Пример. 1. При бурении роторным способом шарошечными долотами № 8 в интервале 2900—3100 м средние показатели работы долот составили:

$$v_m = 0,8 \text{ м/ч}; \quad h = 25,5 \text{ м}; \quad t_b = 7 \text{ ч};$$

$$\epsilon_{\text{факт}} = 1 + \frac{v_m t_b}{h} = 1 + \frac{0,8 \times 7}{25,5} = 1,22.$$

По рис. 15 для глубины 3000 м находим $\epsilon_{\text{расч}} = 1,4$, т. е. $\epsilon_{\text{факт}} < \epsilon_{\text{расч}}$.

Следовательно, следует увеличить нагрузку на долото и скорость вращения для увеличения $v_{\text{мах}}$.

После увеличения нагрузки на долото показатели работы долот изменились, при этом $v_m = 1,2 \text{ м/ч}$; $h = 18,6 \text{ м}$; $t_b = 7 \text{ ч}$,

$$\epsilon_{\text{факт}} = 1 + \frac{1,2 \times 7}{18,6} = 1,45, \text{ т. е. } \epsilon_{\text{факт}} \approx \epsilon_{\text{расч}}.$$

Бурение следует продолжать, выдерживая параметры режима бурения на данном уровне.

II. При бурении роторным способом шарошечными долотами № 6 в интервале 2400—2600 м средние показатели работы долот составили:

$$v_m = 1,8 \text{ м/ч}, \quad h = 10 \text{ м}, \quad t_b = 5 \text{ ч},$$

$$\epsilon_{\text{факт}} = 1 + \frac{1,8 \times 5}{10} = 1,9.$$

По рис. 15 для глубины 2500 м находим, что $\epsilon_{\text{расч}} = 1,6$, т. е. $\epsilon_{\text{факт}} > \epsilon_{\text{расч}}$.

После снижения скорости вращения долота при сохранении забойной мощности показатели вследствие увеличения проходки на долото составили:

$$v_m = 1,67 \text{ м/ч}, \quad h = 15,2 \text{ м}, \quad t_b = 5 \text{ ч},$$

$$\epsilon_{\text{факт}} = 1 + \frac{1,67 \times 5}{15,2} = 1,55, \text{ т. е. } \epsilon_{\text{факт}} \approx \epsilon_{\text{расч}}.$$

Бурение следует продолжать, выдерживая параметры режима бурения на данном уровне.

Для ускорения и облегчения вычислительных работ при нахождении L нами сконструирована специальная счетная линейка для рассматриваемого района буровых работ.

Счетная линейка состоит из корпуса и движка (рис. 16). Движок может свободно выдвигаться в пазах корпуса влево. На корпусе и движке нанесены различные функциональные шкалы (*A, B, C, D, E, F, G*). Шкалы *A* и *B* устроены одинаково. Целые числа на них обозначают часы, затраченные на механическое

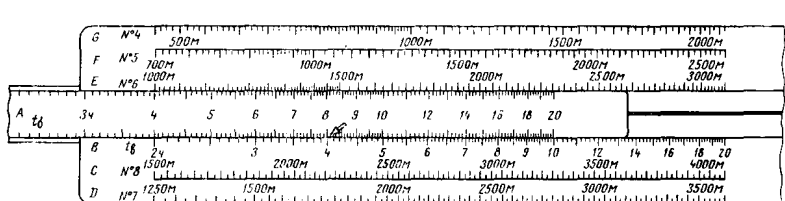


Рис. 16. Счетная линейка для определения $L=f(t)$.

бурение (шкала *A*), спуско-подъемные операции (шкала *B*). Штрихи между целыми числами обозначают десятые доли часа.

На шкалах *C, D, E, F, G* нанесены числа, обозначающие глубины (в м), оптимальные для определенного соотношения между v_m и v_p при бурении шарошечными долотами различного диаметра (для долот № 8 шкала *C*, для долот № 7 шкала *D* и т. д.).

На обратной стороне линейки указывается геологическая характеристика района ведения буровых работ, для которого составлена данная счетная линейка.

При пользовании линейкой на шкале *B* находят число, соответствующее затраченному времени на спуско-подъемные операции в законченном рейсе долота, и против него устанавливают число, соответствующее времени механического бурения. Против конца шкалы *A* (точка 20) находят ответ — глубину L — эффективного бурения при данном сочетании режимных параметров, обеспечивающих определенную продолжительность $t_{\text{раб}}$ до полного (безаварийного) износа долота, а следовательно, и определенное соотношение между v_m и v_p .

В примере, указанном стрелкой на рис. 16, при $t_b=8$ ч и $t_v=4$ ч для долота № 8 $L=3300$ м, для долот № 7 $L=2800$ м, долот № 6 $L=2300$ м, для долот № 5 $L=1875$ м и для долот № 4 $L=1476$ м.

§ 4. Выбор режима подачи долота

Так как проходка
$$h = \int_0^t v_l dt, \quad (29)$$

то из формулы (29) легко показать, что наиболее высокая проходка будет получена при условии, если $v_l = v_0 = \text{const}$.

Следовательно, приняв режим подачи долота, обеспечивающий постоянство $v_l = v_0$ на протяжении всего рейса, можно получить наиболее высокие показатели бурения.

Однако на практике выдержать это условие не представляется возможным по следующим причинам:

1) в первоначальный момент работы долота необходимо для приработки забоя и рабочих поверхностей долота некоторое время (5—10 мин) работать при пониженной осевой нагрузке;

2) в конце рейса, когда долото интенсивно изнашивается, v_l снижается даже при возрастании осевой нагрузки.

Только в период установившейся работы долота постоянство v_l можно выдержать путем плавного увеличения осевой нагрузки в одной и той же породе. Наши исследования показали, что при бурении в однородной породе для поддержания $v_l \approx \text{const}$ за время работы в установившемся периоде осевую нагрузку на долото следует увеличить всего лишь на 10—15%.

При выбранном режиме подачи долота, обеспечивающем $v_l \approx \text{const}$, наступление периода интенсивного износа долота в конце рейса обычно характеризуется снижением v_l .

Анализ режимов подачи долота в конторе бурения № 3 Харьковнефтегазразведки показал, что большинство бурильщиков этой конторы, начиная рейс новым долотом, за время приработки его опорных элементов пытаются увеличить нагрузку на долото до максимума, определяемого приемлемостью турбобура. Дальнейшее бурение производят при поддержании $v_l \approx \text{const}$. Нагрузку на долото при этом плавно увеличивают.

Если при этом турбобур не принимает нагрузки, то ее оставляют постоянной на протяжении всего рейса или даже снижают в конце его.

Во всех случаях бурильщики исходят из наиболее полной загрузки турбобура в течение всего рейса до-

лота. Момент подъема долота в большинстве случаев определяют по резкому падению механической скорости.

При бурении в перемежающихся по крепости породах выбранный режим подачи долота обеспечивает правильный переход из мягких пород в твердые; при переходе же из твердых пород в мягкие нагрузку на долото следует несколько уменьшить.

В новых породах выбранный режим подачи долота должен обеспечивать постоянство v_t , но уже в новом значении.

Изложенное справедливо в случае, если долото изнашивается по вооружению. Если же оно изнашивается по опоре при сохранившейся работоспособности вооружения, то на протяжении большей части рейса в однородной по крепости породе наблюдается постоянство v_t .

Период же начала разрушения опоры долота в конце рейса характеризуется резким увеличением момента сопротивления на долоте M_d . Если бурят при постоянной забойной мощности N_T , то принимая во внимание, что в турбинном бурении имеет место равенство $N_T = N_d$ и $M_T = M_d$, легко установить, что с возрастанием M_d скорость вращения n будет уменьшаться и, следовательно, уменьшаться v_t .

Начавшееся разрушение опоры долота протекает быстро (особенно в турбинном бурении), поэтому очень важно, чтобы бурильщик уловил этот момент и своевременно начал подъем инструмента из скважины. Для этого каждая буровая должна быть оснащена комплексом контрольно-измерительных приборов для оперативного контроля основных технологических параметров процесса бурения и прежде всего для замера текущего значения механической скорости бурения с сигнализацией момента ее резкого падения.

Важное значение при этом отводится анализу продолжительности работы и износа долота в предыдущих рейсах.

Таким образом, режим подачи долота должен обеспечивать постоянство v_t в однородной по крепости породе за время установившейся работы при износе долота как по вооружению, так и по опоре. Разница заключается в том, что при износе долота по опоре обеспечить постоянство v_t легче за время установившейся работы, чем при износе долота по вооружению.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗНОСА ДОЛОТА И ИЗМЕНЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ СКОРОСТИ БУРЕНИЯ ВО ВРЕМЕНИ

Зависимость механической скорости от времени бурения характеризуется различными формулами. Так, А. А. Минин и В. С. Федоров для определения текущего значения механической скорости бурения предложили однотипные формулы:

по А. А. Минину

$$v_t = v_0 e^{-kt}; \quad (30)$$

по В. С. Федорову

$$v_t = v_0 e^{-\frac{t}{\theta f}}. \quad (31)$$

Несколько иные формулы предложены Н. И. Шацовым [44]:

$$v_t = v_0 (1 + \alpha t)^{-x} \text{ и } v_t = v_0 (1 + \beta t)^{-m}, \quad (32)$$

где v_0 — начальное значение механической скорости; k , x , β — коэффициенты, характеризующие темп падения механической скорости бурения с течением времени в результате износа долота; α , m — постоянные коэффициенты, не зависящие от свойств горных пород.

Предлагались формулы и другими авторами [2, 12]:

$$v_t = \frac{v_0}{(t+1)^{m_1}}; \quad v_t = \frac{v_0}{(1+m't)^{m_0}},$$

где m_1 , m' , m_0 — числовые коэффициенты.

Функциональные зависимости, выраженные формулами (30)—(32), принято изображать графически, как показано на рис. 17. Кривая гиперболического типа, изображенная на этом рисунке, характеризует падение механической скорости бурения во времени и имеет начальные условия при $t=0$, $v_t=v_0$. Кривая монотонно убывает, асимптотически приближаясь к оси абсцисс t тем быстрее, чем больше коэффициенты k , x или m .

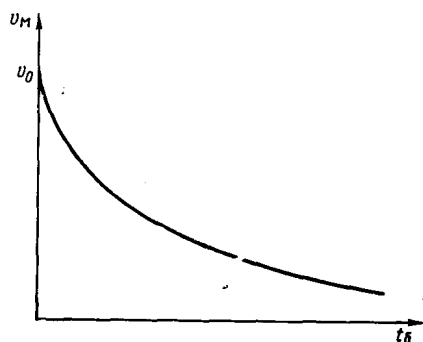


Рис. 17. Теоретическая кривая функции $v_t=f(t)$.

Приведенная кривая изменения механической скорости бурения в однородной по крепости породе может быть справедлива при условии постоянства параметров режима бурения. Однако непосредственно при бурении глубоких скважин выдержать постоянными параметры режима бурения за время всего рейса, начиная от $t=0$, не представляется возможным. Так, за время приработки нагрузка на долото постепенно увеличивается от нуля до заданной величины, изменение v_t при этом во многом зависит от состояния забоя, режима подачи долота и других факторов. Следовательно, в начальной стадии рейса долота v_t изменяется без определенной закономерности (пунктирные линии $v_{0r}A$ и $v_{0p}A_1$, рис. 18), а v_0 не может служить отправной величиной всего процесса.

Кроме того, в конце рейса, когда долото начинает терять свою работоспособность в результате интенсивного износа, изменение v_t носит неопределенный характер и во многом зависит от способа и режима бурения, износостойкости долота, физико-механических свойств

породы и т. п. Следовательно, последний период так же, как и первый, непродолжительный и непоказательный для всего рейса долота.

Наиболее стабильным и самым продолжительным является период работы долота, когда v_t поддерживается на уровне своего установившегося значения v_y , незначительно и равномерно снижающегося во времени.

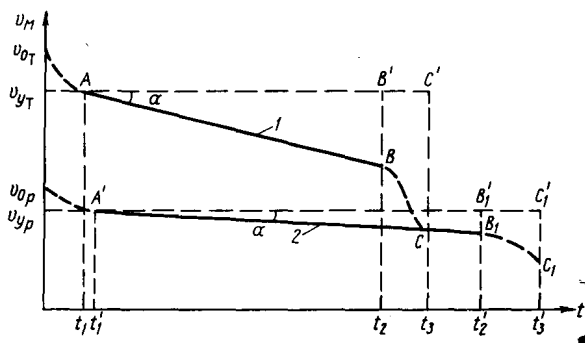


Рис. 18. Изменение механической скорости износа долота.
1 — турбинное бурение; 2 — роторное бурение.

Так как при бурении глубоких скважин долото прирабатывается при минимальных осевых нагрузках и углубление долота при этом практически отсутствует, то кривая $v_t = f(t)$ будет иметь свое начало не при $t=0$, а по истечении некоторого фиктивного времени работы $t_{ф}$ 40.

Если принять во внимание начальное (заданное) притупление зубьев шарошек, что обеспечивается при технологии их изготовления, и дополнительное притупление, полученное после приработки долота, начальная скорость бурения $v_{нач}$, естественно, будет несколько меньше v_0 , т. е. $v_{нач} = v_y$.

Если при фиктивном времени бурения начальные условия бурения принять равными $v_{нач} = v_0 e^{-kt_{ф}}$ и дальнейший процесс бурения во времени описывать таким же уравнением, но с начальной скоростью v_y , то получится менее интенсивное падение скорости во времени.

В идеальном случае, когда параметры режима бурения и твердость разбуриваемых пород остаются постоянными, а износ долота после его приработки отсутствует,

v_y будет постоянной на всем протяжении установившейся работы долота на забое, а проходка h будет расти прямо пропорционально t_0 (пунктирные линии AB' и A_1B_1 на рис. 18), что можно записать в виде

$$v_t = v_y = \text{const}; \quad (33)$$

$$h = qt, \quad (34)$$

где q — коэффициент пропорциональности ($q = v_y = \text{const}$).

Рассмотрим реальные условия бурения.

Износ долота в однородной породе, характеризующийся значением показателя k , зависит от режима и способа бурения. Для роторного способа бурения характерны малые значения k , при этом прямая зависимости $v_t = f(t)$ проходит почти параллельно оси абсцисс t . Для турбинного способа бурения характерны более высокие значения k (см. рис. 18).

Кроме износа долота, углубление скважины в реальных условиях сопровождается изменением крепости проходимых пород и параметров режима бурения. Если замерять проходку за равные малые промежутки времени, то прохождение примерно равных отрезков проходки за эти промежутки времени будет свидетельствовать о нормальной работе долота в однородной по крепости породе. Выражения (33) и (34) являются предельными для v_t и h , поэтому в реальных условиях по мере притупления долота бурильщик стремится поддерживать значения v_t и h на уровне, соответствующем выражениям (33) и (34), путем изменения параметров режима бурения. При этом зависимости $v_t = f(t)$ и $h = \varphi(t)$ стремятся к величинам (33) и (34) как к своим пределам.

Проходка за эти промежутки времени может измениться в результате либо изменения крепости проходимых пород, либо сработки долота.

Предположим, что долото из одного пласта вошло в другой, v_t при этом изменится. В новом пласте v_t примет какую-то новую, характерную для этого пласта величину, которая не будет изменяться на всем его протяжении, если не сработается долото. Лишь при износе долота v_t будет снижаться непрерывно в течение последующих промежутков времени.

Момент наступления последнего периода работы долота наступает по-разному в зависимости от того, как

изнашивается долото — по опоре или вооружению. Если долото изнашивается по опоре, то момент наступления периода износа характеризуется резким падением механической скорости проходки с нарушением плавности кривой $v_t = f(t)$ (рис. 18, кривая 1).

Начавшееся разрушение опоры долота развивается сравнительно быстро, поэтому механическая скорость в этом случае продолжает резко падать.

Если же долото изнашивается по вооружению, то переходный период обычно характеризуется более умеренным снижением механической скорости проходки без нарушения плавности кривой (рис. 18, кривая 2).

При турбинном способе бурения долота в большинстве случаев срабатывают интенсивно и наблюдается более резкое падение механической скорости проходки, чем при роторном бурении. Известно, что сработавшее долото потребляет мощность, в среднем в 1,4—2 раза большую, чем новое, поэтому в конце рейса турбобур начинает останавливаться при осевой нагрузке, иногда значительно меньшей первоначальной.

Если же бурят при параметрах режима бурения, соответствующих области тормозных режимов работы турбобуров, то нарушение плавности кривой v_t в момент наступления интенсивной сработки долота отбивается достаточно четко.

При роторном способе бурения долото срабатывает в большинстве случаев по вооружению, поэтому момент наступления интенсивной сработки долота обнаруживается труднее. Однако если некоторое допустимое время продолжить рейс на падающем по скорости участке, то и в этом случае падение скорости проходки и заметное увеличение мощности, потребляемой долотом, укажут на то, что долото работает с предельным износом.

Для выявления характера изменения механической скорости проходки v_t и особенностей износа долота μ во времени рейса t_6 В. А. Яковлевым были проведены стендовые исследования процесса отработки долот малого диаметра.

Базой для проведения экспериментальных исследований явился буровой стенд, представляющий собой полный комплект бурового агрегата ЗИФ-1200А.

Гидросистема станка обеспечивала плавную подачу

долота и позволила с большой точностью выдерживать на заданном уровне осевую нагрузку на протяжении всего рейса. Кинематическая схема станка обеспечивала четыре скорости вращения долота в диапазоне от 67 до 346 об./мин.

Промывка осуществлялась двумя насосами ЗИФ-200/40. Производительность одного насоса при 81 ходе в 1 мин и 85-мм цилиндрических втулках 200 л/мин. Максимальное давление на выкиде насосов 40 кг/см².

В процессе проведения исследований фиксировали осевую нагрузку на долото; скорость его вращения; производительность буровых насосов; проходку в единицу времени (механическая скорость бурения); износ долота в единицу времени.

Осевую нагрузку на долото регистрировали по указателю давления гидросистемы подачи долота.

Скорость вращения долота определяли на основании кинематической схемы бурового станка. При проведении экспериментальных работ обеспечивалось постоянство скорости вращения электродвигателя станка выдерживанием постоянным напряжения в токоподводе.

Производительность буровых насосов измеряли объемным методом. При проведении экспериментальных работ скважину промывали водой.

Для исключения влияния расхода воды на показатели бурения при проведении исследований предусматривалось установление для каждого сочетания осевой нагрузки и скорости вращения долота достаточной производительности насосов для эффективной очистки забоя. Было установлено, что расход воды 180 л/мин (3 л/сек) вполне достаточен для эффективной очистки забоя, поэтому этот расход и был принят при проведении всех экспериментов в данной работе.

Лабораторные условия исследований позволили периодически останавливать процесс бурения на время, необходимое для замера износа долота. После замера процесс бурения продолжался при заданных режимных параметрах.

Шарошечные долота обрабатывали на блоках серого гранита размером в среднем 1,0×1,0×1,0 м. По классификации Л. А. Шрейнера [45] указанный гранит относится к категории упруго-хрупких пород и имеет твердость по штампу до 280 кг/мм².

Выбор гранита в качестве разбуриваемой породы был обусловлен поставленной программой задачей.

Стеновой обработке подвергались серийные шарошечные долота 1У-97Т для твердых пород. Для опытов отбирались долота только одной партии изготовления.

Согласно техническим условиям, зубья и тыльную часть шарошек указанных долот наплавляли твердым зерновым сплавом — релитом. Толщина наплавки составляла 0,75—1,25 мм на зубьях и 2—5 мм на тыльной части. Наплавляли твердым сплавом газовым способом или токами высокой частоты, а также комбинированным способом.

Шарошки и цапфы лап цементировали на глубину 1,0—1,2 мм и калили до твердости HRC 58—62. Концентрация углерода в цементованном слое для лап — 0,90—1,10%, для шарошек — 0,70—0,85%.

Отдельные секции (лапы) долота сваривали электродуговой сваркой электродами УОНИИ-13/45 или ОММ-5. Осевой люфт в опорах шарошек новых долот достигал 0,26 мм, радиальный — до 0,1 мм.

Была принята следующая методика обработки долот.

Опыты производились на одной и той же породе при постоянных в процессе опыта осевых нагрузках, скоростях вращения и производительности буровых насосов. Долота обрабатывали до полного износа (безаварийного), на что указывало отсутствие углубления долота в конце рейса и визуальная проверка состояния долота. Режимные параметры измеряли только перед обработкой очередного долота.

Для замера износа долота периодически останавливали бурение на необходимое для замера время, после чего продолжали обрабатывать при заданных режимных параметрах.

Нагрузку на долото после каждой остановки доводили до заданной величины при соответствующей скорости вращения долота и восстановленной циркуляции в минимально допустимый промежуток времени (обычно не более 15 сек), поэтому влиянием остановок на последующий процесс бурения можно было пренебречь. Было проведено четыре эксперимента с обработкой в каждом по пять долот с изменением скорости вращения от 67 до 346 об/мин при постоянной нагрузке $P = 3000$ кг.

Эксперимент № 1

1. Нагрузка на долото $P=3000$ кг.
2. Скорость вращения долота $n=67$ об/мин.
3. Производительность насосов $Q=3$ л/сек.
4. Число обработанных долот 1У-97Т — 5 шт.

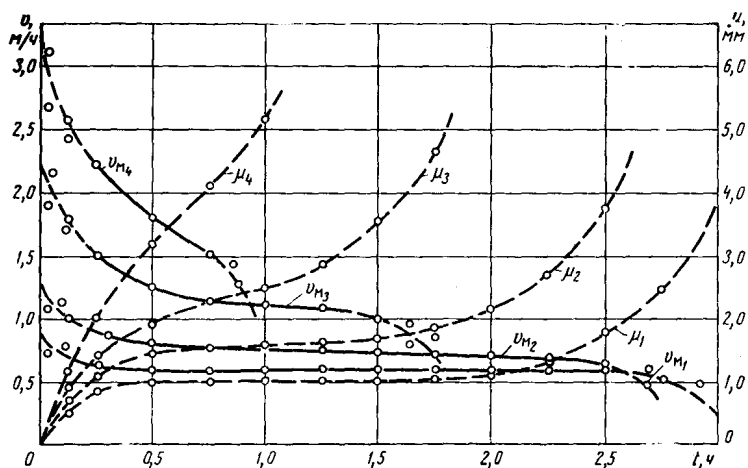


Рис. 19. Функциональные зависимости $v_t=f(t)$ и $\mu=f(t)$ при постоянной нагрузке $P_{OC}=3000$ кг и различных скоростях вращения долота: $n_1=67$; $n_2=128$; $n_3=238$ и $n_4=346$ об/мин.

Механическая скорость v_m и износ долота μ во времени при проведении эксперимента № 1 представлены кривыми v_{m_1} и μ_1 на рис. 19.

Как видно из рис. 19, механическая скорость бурения v_m находится в прямой зависимости от износа вооружения долота.

Начальная стадия работы долота (приработка) продолжалась 15 мин. За это время произошла приработка отдельно выступающих частей зубьев шарошек. В процессе изготовления долот на многих зубьях оставались каплевидные наплывы, образовавшиеся во время армирования поверхности зубьев твердым сплавом, особенно часто это явление наблюдалось при газовой наплавке. Кроме этого, фрезерование зубьев при ручной подаче не обеспечило получения требующейся точности изготовления, часто встречались зубья с полностью заостренной

вершиной (по техническим условиям вершина зубьев должна оканчиваться площадкой шириной 1 мм). Такие зубья в процессе термической обработки получили сквозную прокаливаемость и обладали повышенной хрупкостью.

Во время приработки выступающие наплывы твердого сплава и вершины полностью заостренных зубьев, оказавшиеся более хрупкими, разрушились в результате хрупкого выкрошивания и сколов. Крупные сколы и поломки зубьев в период приработки при проведении эксперимента № 1 наблюдались в единичных случаях.

Экспериментальные точки v_m периода приработки долота были достаточно разбросанными, и, следовательно, изменение v_m во времени происходило без определенной закономерности (пунктирная линия в начале кривой v_{m_1} на рис. 19).

Приработка зубьев по высоте и выравнивание удельных давлений на рабочих поверхностях зубьев обеспечили начало установившейся работы долота, характеризующейся малой разбросанностью экспериментальных точек. Это наиболее продолжительное и производительное время работы долота равно 2,4 ч. За это время происходил в основном абразивный износ зубьев шарошек долота. Процесс износа протекал относительно спокойно, выкрошивание и сколы наблюдались незначительные, долото сохранило свою работоспособность почти на одном уровне до конца рейса. Механическая скорость проходки снизилась мало, осталась в пределах 0,6 м/ч до конца периода установившейся работы (прямолинейный участок кривой v_{m_1} , рис. 19). Износ зубьев по высоте достиг 2 мм (кривая μ_1 на рис. 19).

За время установившейся работы твердосплавная оболочка зубьев почти полностью изнашивалась, подготовленные таким образом зубцы в конце рейса подвергались интенсивному усталостному разрушению. Очаги разрушения зарождались в виде трещин и быстро распространялись по всему зубу. Вместе с усталостным разрушением лишенных твердосплавной поверхности зубьев в этот период происходил интенсивный абразивный износ. Следы усталостного разрушения быстро сглаживались абразивным истиранием.

Долото быстро потеряло свою работоспособность. Падение механической скорости в конце рейса носило

неопределенный характер в виду разбросанности экспериментальных точек (пунктирная линия в конце кривой $v_{м_1}$ на рис. 19). Вооружение долота изнашивалось до основания зубьев.

Во всех пяти случаях наблюдалось преимущественное разрушение вооружения долот что явилось следствием

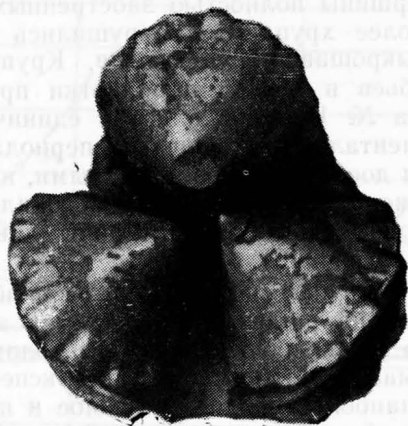


Рис. 20. Долото IV-97Т № 142, отработанное на стенде при $P_{ос}=3000$ кг и $n=67$ об/мин.

большой твердости и значительной абразивности разбуриваемой породы. Опоры шарошек сохранили свою работоспособность до конца рейса. Случаев поломки или заклинивания элементов качения подшипников опор не отмечалось. Для наглядного представления о характере износа долот на рис. 20 показано долото IV-97Т № 142, отработанное при проведении эксперимента № 1.

Эксперимент № 2

1. Нагрузка на долото $P=3000$ кг.
2. Скорость вращения долота $n=128$ об/мин.
3. Производительность насосов $Q=3$ л/сек.
4. Число отработанных долот — 5 шт.

Механическая скорость бурения и износ долота во времени при проведении эксперимента № 2 представлены соответственно кривыми $v_{м_2}$ и μ_2 (см. рис. 19).

Как видно из рис. 19, картина изменения механической скорости v_{m_2} и износа долота μ_2 во времени t_0 по эксперименту № 2 аналогична полученной по эксперименту № 1. Однако продолжительность всего рейса несколько сократилась до 2 ч 45 мин при более высокой средней механической скорости проходки.

Приработка долота продолжалась 15 мин (пунктирная линия в начале кривой v_{m_2} , см. рис. 19). Изменение механической скорости при этом характеризовалось большой разбросанностью экспериментальных точек.

Вооружение долота изнашивалось более интенсивно, чем в эксперименте № 1; к концу периода износ составил 1,5 мм.

Период установившейся работы долота характеризовался незначительным снижением v_m — от 0,9 до 0,6 м/ч и малой разбросанностью экспериментальных точек. Износ зубьев по высоте достиг 3 мм. Продолжительность периода равна 2 ч 05 мин (прямолинейный участок кривой v_{m_2} , см. рис. 19).

Третий период так же, как и в эксперименте № 1, характеризовался неопределенностью изменения v_m и интенсивным усталостным износом зубьев.

В конце периода долото перестало давать проходку. Характер износа вооружения долота во всех трех периодах аналогичен износу в эксперименте № 1, но

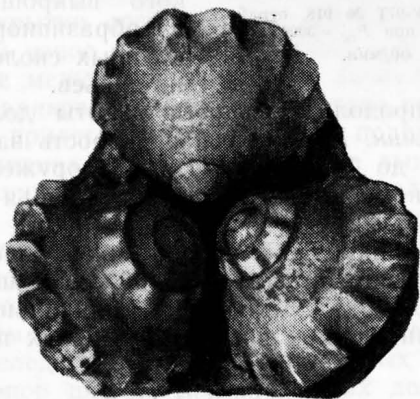


Рис. 21. Долото 1У-97Т № 145, отработанное на стенде при $P_{oc} = 3000$ кг и $n = 128$ об/мин.

протекал более интенсивно. Износ опор шарошек незначителен, опоры сохранили свою работоспособность до конца рейса, вооружение шарошек изнашивалось до основания зубьев. На рис. 21 показано долото 1У-97Т № 145, с типичным износом вооружения для эксперимента № 2.

Эксперимент № 3

1. Нагрузка на долото $P=3000$ кг.
2. Скорость вращения долота $n=238$ об/мин.
3. Производительность насосов $Q=3$ л/сек.
4. Число отработанных долот — 5 шт.



Рис. 22. Долото 1У-97Т № 918, отработанное на стенде при $P_{ос}=3000$ кг и $n=238$ об/мин.

Механическая скорость и износ долота во времени при проведении эксперимента № 3 представлены кривыми v_m и μ_z на рис. 19.

В этом эксперименте резко сократилась продолжительность периода установившейся работы долота. Вооружение долота интенсивно изнашивалось на протяжении всей работы долота в результате не только хрупкого выкрошивания, но и абразивного износа, крупных сколов и поломки зубьев.

Средняя продолжительность работы долота составила 1 ч 45 мин. Механическая скорость за это время упала с 2,3 до 0,75 м/ч. Износ вооружения долота протекал равномерно и к концу рейса зубья изнашивались полностью (рис. 22).

Износ опор шарошек у отработанных долот большой, чем в предыдущих опытах. Осевой люфт шарошек отработанных долот достиг 2 мм, радиальный — 1 мм. Случаев заклинивания шарошек в опорах не наблюдалось.

Эксперимент № 4

1. Нагрузка на долото $P=3000$ кг.
2. Скорость вращения долота $n=346$ об/мин.
3. Производительность насосов $Q=3$ л/сек.

4. Число отработанных долот — 5 шт.

Механическая скорость и износ долота во времени при проведении эксперимента № 4 представлены кривыми v_m и μ_4 на рис. 19.

Увеличение скорости вращения долота до 346 об/мин в этом эксперименте привело к интенсивному абразивному износу вооружения долота, сопровождавшемуся поломками и крупными сколами зубьев на протяжении всего периода отработки, что резко сократило время работы долота до 1 ч. Механическая скорость при этом снизилась с 3,4 м/ч в начале отработки долота до 1,3 м/ч в конце.

Значительно изнашивались опоры шарошек отработанных долот. У одного долота произошло заклинивание всех трех шарошек (результаты отработки этого долота не учитывались).

При вскрытии опор у этого долота оказалось, что наибольший износ имели шариковые подшипники, расположенные между подшипниками скольжения, и сами шарики. Шариковая дорожка сработана по поверхности полусферы, прилегающей к большому подшипнику скольжения. Величина разрушения в виде выкрошивания и сколов максимальна в нижней части полусферы и достигла 1,5 мм. По всей шариковой дорожке имелись очаговые выкрошивания и отслаивания пленок металла по поверхности. Разрушения, возникшие в результате трения в подшипниках скольжения, имели вид шлифованных выемок в нижней части цапф. Шарошки заклинивались вследствие сработки шариковых подшипников.

Износ опор шарошек у остальных долот составил: осевой люфт 2—2,5 мм, радиальный — 1,5—2 мм. Зубья изношены полностью за исключением периферийного ряда, где до некоторой степени зубья сохранили свою форму (рис. 23).

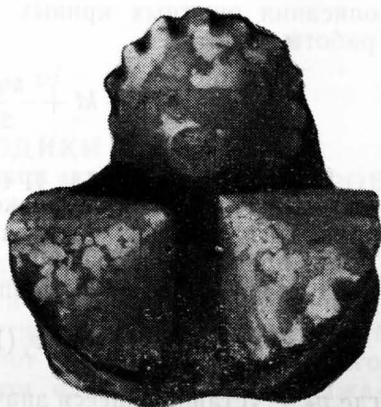


Рис. 23. Долото 1У-97Т № 1465, отработанное на стенде при $P_{ос} = 3000$ кг и $n = 346$ об/мин.

Анализируя полученные экспериментальные данные, приходим к выводу, что функциональная зависимость $v_M = f(t)$ имеет более сложный вид, чем изображенная на рис. 17.

Так как теоретическая и опытная кривые не соответствуют друг другу, приведем степенной ряд e^{-kt} и определим необходимое количество членов ряда для описания опытных кривых на участке установившейся работы долота:

$$e^{-kt} = 1 - kt + \frac{k^2 t^2}{2} - \frac{k^3 t^3}{6} + \dots$$

С достаточной для практических целей точностью можно ограничиться только двумя первыми членами ряда. Тогда изменение механической скорости во времени после приработки до конца установившейся работы долота на забое может быть описано в виде

$$v_t = v_y (1 - kt), \quad (35)$$

где v_y — установившееся значение механической скорости после приработки долота; k — показатель снижения механической скорости бурения в результате износа долота.

Изменение механической скорости в начальном и конечном периодах работы долота не может быть описано аналитически, так как трудно установить характер износа долота в эти периоды.

Результаты проведенных стендовых исследований отработки долот свидетельствуют о том, что механическая скорость бурения v_M находится в прямой зависимости от износа долота μ .

В этом случае можно записать

$$\mu_t = \mu_y (1 + k't), \quad (36)$$

где μ_t — износ вооружения долота во времени; μ_y — притупление зубьев шарошек долота после приработки, включая притупление, обеспечиваемое технологией их изготовления; k' — коэффициент, характеризующий износостойкость долота, разбуриваемую породу и другие свойства этих взаимодействующих тел при воздействии определенного режима; t — время работы долота.

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОТРАБОТКИ ДОЛОТ УМЕНЬШЕННОГО И МАЛОГО ДИАМЕТРОВ

Как было показано во II главе, отработка долот, базирующаяся на характере изменения текущего значения механической скорости проходки за время рейса, в большей степени, чем другие критерии, удовлетворяет требованиям отработки долот уменьшенного и малого диаметров, так как при этом наиболее полно отражаются все процессы, происходящие на забое, связанные как с разрушением породы, так и с износом породоразрушающего инструмента.

Опираясь на формулы (35) и (36), приходим к выводу, что установившееся значение механической скорости может быть поддержано примерно на одном уровне на протяжении большей части рейса долота в однородной по крепости породе. За время работы в установившемся периоде долото дает основную часть проходки. В начальной же стадии (приработке), а также в конечной стадии (периоде интенсивного износа) работа долота малоэффективна.

Если применяемый способ бурения выбран из расчета получения максимума технической, а параметры режима бурения — рейсовой скорости, то момент наступления малоэффективной работы долота в конце рейса будет соответствовать рациональному времени пребывания долота на забое.

На основании приведенных исследований разработана следующая методика отработки долот и управления технологическим процессом бурения глубоких скважин уменьшенного и малого диаметров.

1. Определяется эффективность турбинного способа бурения на данной глубине H . Для этого по формуле (7) находят $\eta_{\text{факт}}$, а по графикам рис. 8, составленным для данной площади, значение η , соответствующее глубине H .

Если $\eta_{\text{факт}} \approx \eta$, то эффективно турбинное бурение при заданном режиме в данных условиях.

Если $\eta_{\text{факт}} < \eta$, то следует усилить режим турбинного бурения, увеличив Q и $P_{\text{ос}}$.

Если же $\eta_{\text{факт}} > \eta_{\text{расч}}$, то переходят на роторное бурение.

2. Если бурят роторным способом, то по данным предыдущих рейсов определяют эффективность с точки зрения получения максимальной рейсовой скорости, применяемых параметров режима бурения.

Для этого по формуле (28) находим $\epsilon_{\text{факт}}$, а по рис. 15 $\epsilon_{\text{расч}}$, соответствующее данной глубине.

Если $\epsilon_{\text{факт}} \approx \epsilon_{\text{расч}}$, то эффективно бурение при заданных параметрах режима роторного бурения.

Если $\epsilon_{\text{факт}} < \epsilon_{\text{расч}}$, то следует увеличить осевую нагрузку и скорость вращения ротора для повышения v_m .

Если $\epsilon_{\text{факт}} > \epsilon_{\text{расч}}$, то скорость вращения ротора несколько снижают при сохранении забойной мощности для облегчения условий работы долота и увеличения проходки за рейс. В некоторых случаях при этом наблюдается незначительное снижение v_m .

3. После достижения долотом забоя скважины осевую нагрузку за время проработки долота плавно увеличивают до выбранной величины. Затем ее несколько снижают; если при этом механическая скорость уменьшается, то нагрузку на долото повышают до первоначальной величины или несколько большей.

Дальнейшее управление процессом бурения сводится к поддержанию прохождения примерно равных отрезков проходки за малые равные промежутки времени Δt в однородной по крепости породе варьированием параметрами режима бурения (в основном изменением осевой нагрузки), т. е. поддерживается постоянным параметр обработки долот:

$$\frac{\Delta h}{\Delta t} \approx \text{const.} \quad (37)$$

Если изменится крепость разбуриваемой породы, то изменится значение параметра (37), которое поддержи-

вается в новом значении до следующего изменения крепости породы или до конца рейса, если крепость пород не меняется.

Резкое снижение Δh за Δt укажет на начало интенсивной сработки долота (третьего периода отработки).

4. Чтобы в процессе рейса можно было убедиться в наступлении третьего периода работы долота, задаются

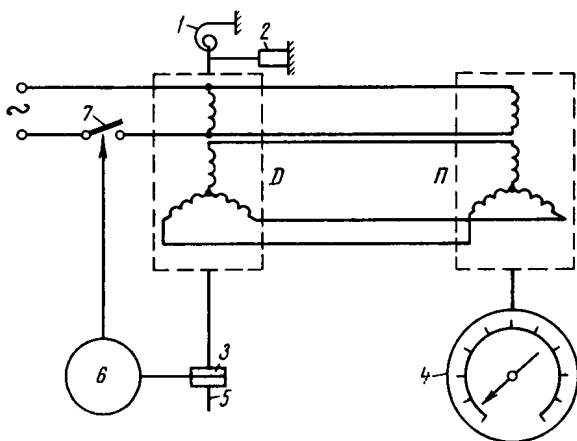


Рис. 24. Схема прибора для замера v_t .

дополнительно двумя-тремя промежутками времени Δt и некоторое безаварийное время продолжают бурение на падающем по скорости участке. Продолжительность безаварийного времени для долот разного диаметра при бурении турбинным и роторным способами указана в табл. 7.

Если за это время не произойдет стабилизации Δh за Δt , т. е. если параметр (37) не примет новое значение, а будет продолжать снижаться, то долото поднимают для замены.

В качестве прибора для замера текущего значения механической скорости и, следовательно, косвенного контроля за состоянием долота может служить следующее устройство (рис. 24). Вал 5 приводится во вращение от ролика кронблока и на 2,5 мин периодически подключается электромагнитной муфтой 3 к сельсину Д. В момент подключения вала ротор сельсина Д прижат к

упору 2 спиральной пружиной 1. После включения муфты 3 вал 5 поворачивает сельсин Д, закручивая пружину 1. За 2—3 сек до окончания цикла измерения таймер 6 включает контакт 7, подающий питание к сельсинам. При этом приемный сельсин П мгновенно согласовывается с сельсином Д и указывает по шкале 4 среднюю скорость вала за 2,5 мин. Затем таймер 6 включает контакт 7 и размыкает электромагнитную муфту 3, после чего сельсин Д возвращается пружиной 1 в начальное положение, а сельсин П остается на делении, соответствующем измеренному значению механической скорости. После паузы в 2 сек измерение повторяется снова в том же порядке.

Таймер 6 представляет собой синхронный двигатель, ось которого через редуктор поворачивает два кулачка, срабатывающих контакт муфты 3 и контакт 7 в определенной последовательности.

Если стрелка на шкале прибора за смежные промежутки времени, равные 2,5 мин, показывает одинаковые значения скорости, — это свидетельствует о нормальной работе долота в однородной породе.

Устойчивое снижение механической скорости, отмечаемое прибором, укажет, что долото работает в стадии интенсивного износа. Если за время безаварийной работы в этой стадии механическая скорость не возрастает, следует поднять долото для замены.

РЕЗУЛЬТАТЫ СТЕНДОВЫХ И ПРОМЫСЛОВЫХ ИСПЫТАНИЙ ОТРАБОТКИ ДОЛОТ

ПО ПАРАМЕТРУ $\frac{\Delta h}{\Delta t} \approx \text{const}$

§ 1. Результаты стендовых испытаний

Стендовые испытания проводились при отработке долот малого диаметра (1У-97Т) на граните при выбранных ранее оптимальных сочетаниях P_{oc} и n для данных долот. При $n=128$ об/мин оптимальной нагрузкой на долото считалось $P=3000$ кг; при $n=238$ об/мин, $P=2500$ кг и при $n=346$ об/мин, $P=2000$ кг. Промывка осуществлялась водой при производительности насосов 3 л/сек.

Первое долото 1У-97Т для твердых пород № 26 было отработано по параметру $\frac{\Delta h}{\Delta t} \approx \text{const}$ при $n=128$ об/мин и $P=3000$ кг. Осевая нагрузка P в процессе рейса долота изменялась следующим образом. В начале рейса при заданной скорости вращения (128 об/мин) и заданной производительности насосов (3 л/сек) долоту была сообщена нагрузка 1000 кг. Затем ее в течение 10 мин (время приработки) плавно увеличивали до заданной величины 3000 кг.

Дальнейшее бурение производилось при постоянстве параметра $\frac{\Delta h}{\Delta t} \approx \text{const}$, для чего нагрузку на долото плавно увеличивали до конца рейса. Режим увеличения нагрузки был принят следующий: за каждые 0,5 ч бурения нагрузка плавно увеличивалась на 40 кг, при этом в конце рейса она составила 3300 кг. При заданном

режиме подачи долота обеспечивалось постоянство параметра $\frac{\Delta h}{\Delta t}$ в течение 190 мин. Затем проходка Δh за малые промежутки времени Δt начала снижаться. В этот период бурили при заданном режиме подачи в течение 30 мин.

Диаграмма обработки долота 1У-97Т № 26 приведена на рис. 25, результаты обработки в табл. 16.

Таблица 16

№ долота 1У-97Т	Проходка, см	Время бурения, мин	Средняя механическая скорость, м/ч	Параметры режима бурения			
				нагрузка на долото, кг		n, об/мин	Q, л/сек
				в начале второго периода	в конце рейса		
26	220	230	0,55	3000	3300	128	3
27	187	225	0,50	2500	2750	238	3
28	175	210	0,50	2000	2300	346	3

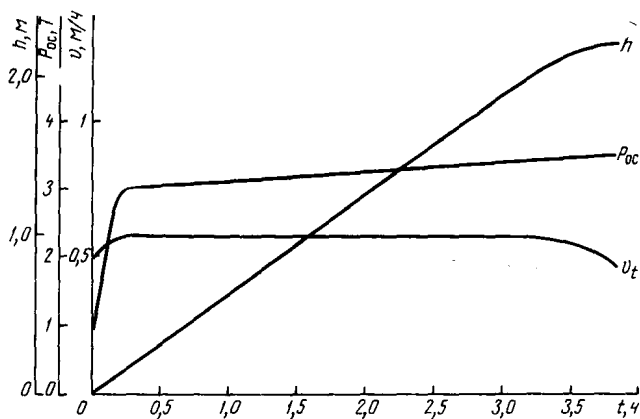


Рис. 25. Диаграмма обработки долота 1У-97Т № 26 на стенде по параметру $\frac{\Delta h}{\Delta t} \approx \text{const.}$

Второе долото 1У-97Т для твердых пород было обработано при $n=238$ об/мин и $P=2500$ кг. Нагрузка в

конце рейса составила 2750 кг. Параметр $\frac{\Delta h}{\Delta t}$ выдерживался постоянным до конца второго периода в течение 185 мин.

Диаграмма обработки долота представлена на рис. 26, результаты обработки в табл. 16.

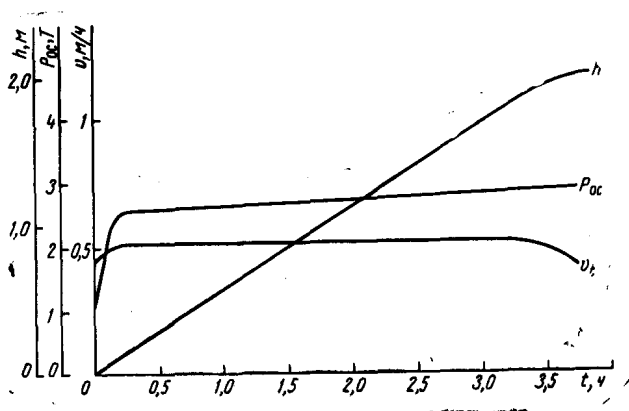


Рис. 26. Диаграмма обработки долота 1У-97Т № 27 на стенде по параметру $\frac{\Delta h}{\Delta t} \approx \text{const}$.

Третье долото 1У-97Т для твердых пород № 28 было отработано при $n=346$ об/мин и $P=2000$ кг. Параметр $\frac{\Delta h}{\Delta t}$ выдерживался постоянным на протяжении 185 мин, в результате нагрузка на долото в конце рейса составила 2300 кг. Бурение на участке снижения Δh за Δt производилось в течение 25 мин.

Диаграмма обработки долота представлена на рис. 27, результаты обработки — в табл. 16.

Стендовые испытания показали, что при определенном сочетании параметров режима бурения для поддержания постоянным значения механической скорости за время установившейся работы долота требуется увеличить осевую нагрузку до 15% ее значения в начале периода установившейся работы долота. В однородной породе можно обрабатывать долота по параметру $\frac{\Delta h}{\Delta t} \approx \text{const}$ при условии правильного выбора параметров режима бурения.

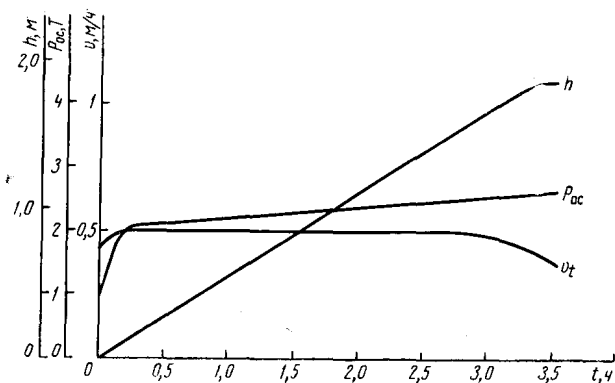


Рис. 27. Диаграмма обработки долота 1У-97Т № 28 на стенде по параметру $\frac{\Delta h}{\Delta t} \approx \text{const}$.

§ 2. Промысловые испытания обработки долот по параметру $\frac{\Delta h}{\Delta t} \approx \text{const}$

Методику обработки долот по параметру $\frac{\Delta h}{\Delta t} \approx \text{const}$ опробовали при бурении скв. 7 Североголубовской площади.

Первый рейс был проведен роторным способом в интервале 2276—2293 м в отложениях свиты C_2^6 московского яруса, представленном аргиллитами с прослойками песчаников и известняков. Долото 2В-8С № 349 прошло 17 м за 14 ч бурения и было поднято в результате устойчивого снижения Δh за последующие 5 мин. Проходка за последние шесть интервалов в этом рейсе составила соответственно 19, 18, 16, 10, 7 и 4 см. Во время рейса долота проходка за принятый промежуток времени снижалась 2 раза, но снижение проходки при этом продолжалось лишь в течение двух промежутков времени, после чего она снова увеличивалась.

Применялись следующие параметры режима бурения: $P_{ос} = 6,2$ Т; $n = 84$ об/мин; $Q = 60$ л/сек; $p = 100$ кг/см². Осевая нагрузка на долото после приработки выдерживалась постоянной на протяжении всего рейса.

При бурении применялись следующие параметры промывочной жидкости: $\gamma = 1,16$ Г/см³; $T = 17$ сек; $V = 6$ см³ за 30 мин; $k = 1$ мм.

У поднятого долота вооружение сработалось на 25%, опоры на 85%. Вершины зубьев шарошек имели плоскую сработку, что свидетельствует о применении явно недостаточной осевой нагрузки, соответствующей малоэффективному режиму поверхностного истирания пород на забое.

Второй рейс было решено провести турбинным способом в интервале 2310—2329 м в отложениях свиты S_2^6 и S_2^5 московского яруса, сложенном аргиллитами и известняками.

Бурили долотом 2В-8С с турбобуром ТС4А-6⁵/₈'' при следующих параметрах режима бурения: $P=8 T$, $Q=35 л/сек$, $p=100 кг/см^2$. Было пройдено 19 м за 6 ч 45 мин. Долото поднято после устойчивого снижения проходки за последовательные 5-мин интервалы.

Зубья шарошек отработанного долота имеют округлую форму и сработаны на 30%, одна шарошка заклинена.

Третий рейс был произведен долотом 2В-8С № 315 с турбобуром ТС4А-6⁵/₈'' в интервале 2337—2359 м в отложениях свиты S_2^5 московского яруса.

Осевая нагрузка по мере износа долота увеличивалась от 8,5 Т в начале установившегося периода работы долота до 9,5 Т в конце его. Вследствие слабого падения параметра (28, 32, 27, 20 и 15 см за каждые 5 мин) и для проверки новой методики долото передерживали при резком падении Δh не 15 мин установленного безаварийного времени, а 25 мин. Долото прошло 22 м за 7 ч. У поднятого долота появились лыски на шарошках и выпали ролики у одной из опор.

Следующий рейс по предлагаемой методике был проведен долотом ОМ-575-190Т № 3361 турбинным способом в интервале 2960—2969 м в отложениях свиты S_2^2 башкирского яруса, представленном песчаниками и аргиллитами. Этим долотом пройдено 9 м за 3 ч 15 мин при следующих параметрах режима бурения: $P=8-9,6 T$, $Q=23 л/сек$, $p=115 кг/см^2$. На протяжении рейса наблюдались незначительные отклонения $\frac{\Delta h}{\Delta t}$ от установившегося значения. Долото поднято в результате трехкратного снижения проходки за последующие 10 мин. В конце рейса перед подъемом долота было дано допол-

нительное время 5 мин, в течение которого Δh продолжало снижаться.

Диаграмма отработки долота представлена на рис. 28.

На диаграмме текущее значение механической скорости за время установившейся работы долота меняется,

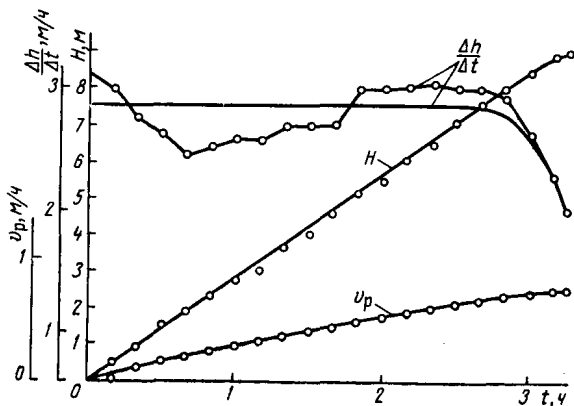


Рис. 28. Диаграмма отработки долота ОМ-575-190Т № 3361 в скв. 7 Североголубовской площади в интервале 2960—2969 м.

что объясняется изменением крепости пород в процессе бурения. При переходе долота из одних пород в другие происходят колебания механической скорости даже при поддержании плавного увеличения нагрузки за время установившейся работы долота.

Очередное долото типа 2В-8С № 127 прошло 11 м в интервале 2969—2980 м за 5 ч (турбобур ТС4-6⁵/₈"). Бурили в свите S_2^2 башкирского яруса. Параметры режима бурения выдерживались аналогичными предыдущему рейсу. Нагрузку на долото изменяли в пределах 6,4—9,6 Т, постепенно увеличивая к концу рейса.

Долото поднято в результате устойчивого снижения проходки Δh за Δt . Снижение текущего значения механической скорости в период установившейся работы долота происходило дважды, однако это снижение наблюдалось в течение двух (не более) промежутков времени подряд, после чего оно снова увеличивалось. Сработка вооружения у поднятого долота до 30%, опор до 80%. Износ вершин зубьев шарошек имеет заострен-

ный характер, что свидетельствует о наиболее удачном сочетании режимных параметров для разрушения пород в данном интервале.

Данные изменения показателей бурения скв. 7 Североголубовской площади и осевой нагрузки на долото во времени представлены в табл. 17.

Очередное долото типа ОМ-575-190Т № 3945 за 3 ч 15 мин прошло 7 м в интервале 2987—2994 м в отложениях свиты С₂ башкирского яруса нижнего карбона. Применялся турбобур ТС4-6⁵/₈". Производительность одного бурового насоса составляла 22 л/сек. Нагрузка на долото в период установившейся работы долота менялась от 6,4 Т в начале рейса до 8 Т в конце его.

Долото было поднято также из-за резкого падения механической скорости проходки. Сработка вооружения поднятого долота 30%, опор 80%.

Данные обработки долота приведены в табл. 17.

Таблица 17

Отрезок времени, мин	Общее время бурения, ч	Проходка за время Δt , см	Общая проходка, м	v_t , м/ч	Рейсовая скорость, м/ч	Нагрузка на долото Р, Т	Производительность Q, л/сек
Интервал бурения 2960—2969 м							
10	0—10	50	0,50	3,00	0,06	8,0	23
10	0—20	46	0,96	2,76	0,11	8,0	23
10	0—30	44	1,40	2,64	0,15	8,0	23
10	0—40	41	1,81	2,46	0,19	8,0	23
10	0—50	42	2,23	2,52	0,24	8,0	23
10	1—00	43	2,66	2,58	0,28	8,5	23
10	1—10	43	3,09	2,58	0,32	8,5	23
10	1—20	45	3,54	2,70	0,36	8,5	23
10	1—30	45	3,99	2,70	0,40	8,5	23
10	1—40	45	4,44	2,70	0,43	8,5	23
10	1—50	51	4,95	3,06	0,48	9,0	23
10	2—00	50	5,45	3,00	0,52	9,0	23
10	2—10	52	5,97	3,12	0,56	9,0	23
10	2—20	53	6,50	3,18	0,60	9,0	23
10	2—30	51	7,01	3,06	0,64	9,0	23
10	2—40	51	7,52	3,06	0,67	9,6	23
10	2—50	49	8,01	2,94	0,71	9,6	23
10	3—00	44	8,45	2,64	0,73	9,6	23
10	3—10	38	8,83	2,28	0,76	9,6	23
5	3—15	17	9,00	2,03	0,77	9,6	23

Отрезок времени, мин	Общее время бурения, ч	Проходка за время Δt , с.м	Общая проходка, м	v , м/ч	Рейсовая скорость, м/ч	Нагрузка на долото Р, Т	Производительность Q, л/сек
Интервал бурения 2969—2980 м							
15	0—15	61	0,61	2,44	0,77	6,4	24
15	0—30	61	1,22	2,44	0,15	6,4	24
15	0—45	64	1,86	2,56	0,22	8,0	24
15	1—00	60	2,46	2,40	0,28	8,0	24
15	1—15	53	2,99	2,12	0,33	8,0	24
15	1—30	60	3,59	2,40	0,39	8,5	24
15	1—45	63	4,22	2,52	0,44	8,5	24
15	2—00	63	4,85	2,52	0,50	8,5	24
15	2—15	58	5,43	2,32	0,54	8,5	24
15	2—30	58	6,01	2,32	0,59	9,0	24
15	2—45	58	6,59	2,32	0,63	9,0	24
15	3—00	56	7,15	2,24	0,66	9,0	24
15	3—15	61	7,76	2,44	0,70	9,0	24
15	3—30	61	8,37	2,44	0,74	9,0	24
15	3—45	58	8,95	2,32	0,78	9,6	24
15	4—00	55	9,50	2,20	0,81	9,6	24
15	4—15	55	10,05	2,20	0,84	9,6	24
15	4—30	47	10,52	1,88	0,84	9,6	24
15	4—45	32	10,84	1,28	0,85	9,6	24
15	5—00	15	11,00	0,76	0,86	9,6	24
Интервал бурения 2987—2994 м							
10	0—10	36	0,35	2,16	0,04	6,4	22
10	0—20	40	0,76	2,40	0,08	7,0	22
10	0—30	40	1,16	2,40	0,13	7,0	22
10	0—40	40	1,56	2,40	0,17	7,0	22
10	0—50	40	1,96	2,40	0,21	7,0	22
10	1—00	35	2,31	2,10	0,24	7,0	22
10	1—10	36	2,67	2,16	0,27	7,5	22
10	1—20	36	3,03	2,16	0,31	7,5	22
10	1—30	36	3,39	2,16	0,34	7,5	22
10	1—40	29	3,68	2,04	0,36	7,5	22
10	1—50	37	4,05	2,22	0,39	7,5	22
10	2—00	37	4,42	2,22	0,42	7,5	22
10	2—10	41	4,83	2,46	0,45	8,0	22
10	2—20	43	5,26	2,58	0,47	8,0	22
10	2—30	38	5,64	2,28	0,51	8,0	22
10	2—40	38	6,02	2,28	0,54	8,0	22
10	2—50	33	6,35	1,98	0,56	8,0	22
10	3—00	30	6,65	1,80	0,58	8,0	22
10	3—10	25	6,90	1,50	0,59	8,0	22
5	3—15	10	7,00	1,20	0,60	8,0	22

Диаграмма отработки долота представлена на рис. 29.

Текущее значение механической скорости за время установившейся работы колеблется, как и в предыдущем рейсе, вследствие изменения крепости пород.

После внедрения предлагаемой методики отработки долот при бурении глубинных интервалов на скв. 7

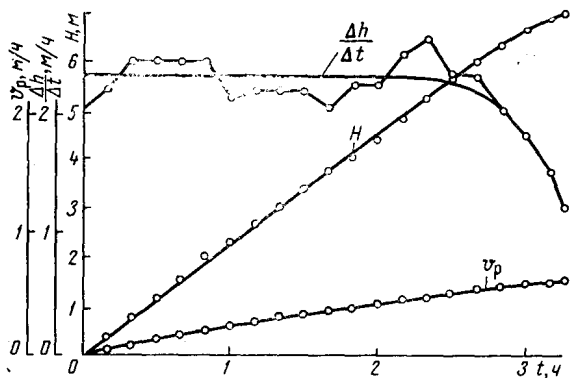


Рис. 29. Диаграмма отработки долота ОМ-575-190Т № 3945 в скв. 7 Североголубовской площади в интервале 2987—2994 м.

Североголубовской площади шарошечные долота № 8 (190 мм) стали работать на забое до 5 ч вместо 2,5—3,5 ч, что дало соответствующее увеличение проходки на долото. Показатели работы долот в интервале 2800—3000 м по скв. 7 с применением предлагаемого метода отработки долот и по скв. 6 без его применения приводятся в табл. 18.

Таблица 18

Показатели	Североголубовская площадь	
	скв. 6	скв. 7
Пробурено, м	187	192
Израсходовано долот, шт.	21	16
Общее время бурения, ч	68,4	60,0
Проходка на долото, м	8,9	12,0
Долговечность долот, ч	3,25	3,76
Механическая скорость проходки, м/ч	2,73	3,2

Из табл. 18 видно, что средняя проходка при обработке долот по данной методике увеличилась с 8,9 до 12 м, т. е. почти на 35%.

Опробование методики подтвердило стендовые испытания. Варьирование режимными параметрами (изменением осевой нагрузки при турбинном и роторном способах бурения и скорости вращения долота при роторном бурении) в период установившейся работы долота в однородной по крепости породе позволяет добиться прохождения примерно равных отрезков проходки за равные малые промежутки времени. При правильном выборе режима и способа бурения данным долотом это приводит к получению наилучших показателей до наступления полного (безаварийного) износа долота.

Опробование методики также показало, что наступление периода малоэффективной работы долота при правильном выборе параметров режима бурения довольно четко отбивается в процессе рейса, причем чем форсированнее применяются режимы бурения, тем четче отбивается момент наступления последнего периода.

Бурильщики легко осваивают и охотно применяют описанную методику, так как при наличии в буровой прибора, замеряющего механическую скорость проходки в процессе рейса, не требуется вести вычислительные работы; необходимо только внимательно следить за показаниями этого прибора, что намного облегчает труд бурильщика. Правильно выбрать способ бурения и режимные параметры в этом случае помогает наличие графиков и номограмм, составленных для данного района ведения буровых работ по рекомендациям, приведенным в настоящей работе.

После получения положительных результатов опробования предлагаемая методика была широко внедрена в конторе бурения № 3 Харьковнефтегазразведки. В институте УкрНИИгипронефть при участии авторов в соответствии с предложенной методикой разработана временная инструкция по отработке долот уменьшенного и малого диаметров при бурении глубоких скважин.

В табл. 19 приведены данные отработки шарошечных долот № 8 (190 мм) по предлагаемой методике в отложениях среднего карбона в скв. 6 Боровской площади.

Отработанные долота показаны на рис. 30, 31.

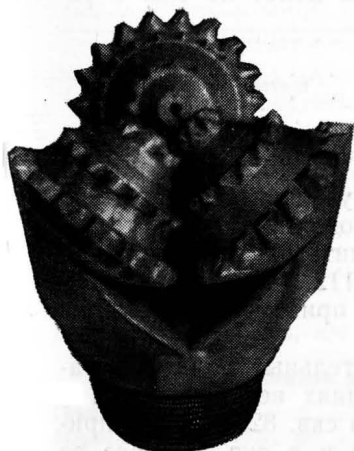


Рис. 30. Долото 1В-190МГ № 537, обработанное турбинным способом в скв. 6 Боровской площади в интервале 1928—1947 м.

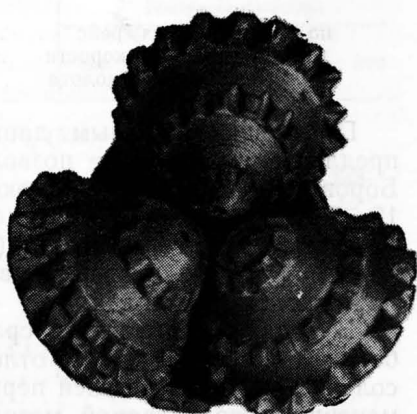


Рис. 31. Долото 2В-190СТ № 617, обработанное турбинным способом в скв. 6 Боровской площади в интервале 2011—2026 м.

Таблица 19

Показатели	Боровская площадь	
	скв. 5	скв. 6
Средний карбон (950—2100 м)		
Пробурено, м	875	912
Израсходовано долот, шт.	52	44
Общее время бурения, ч	162	147,5
Проходка на долото, м	16,8	20,7
Время на один рейс, ч	3,1	3,35
Механическая скорость, м/ч	5,4	6,2

Данные сравниваются по результатам обработки однотипных долот без применения предлагаемой методики в скв. 5 той же площади. Эта скважина пробурена ранее в аналогичных со скв. 6 условиях одной буровой бригадой.

Увеличение показателей работы долот по скв. 6 составило (в %):

по проходке за рейс	23
» механической скорости	15
» времени работы долота	8

По предварительным данным обработка долот по предлагаемой методике позволит увеличить в целом по Боровской площади среднюю проходку на долото до 15—20% и соответственно уменьшить расход долот.

Долота малого диаметра (97, 112, 140 мм) по предлагаемой методике обрабатывали при бурении скважин на Изюмской площади.

В табл. 20 приводятся сравнительные данные обработки долот 1В-112МГ в отложениях верхней перми и соленосной свиты нижней перми в скв. 825 и 826 с применением предлагаемой методики и в скв. 824 без ее применения. Отработанные долота 1В-112МГ в скв. 825 и 826 показаны на рис. 32, 33.

Увеличение показателей работы долот в скв. 825 и 826 составило:

в отложениях верхней перми по проходке за рейс на 26% (скв. 825), 18% (скв. 826); по механической ско-



Рис. 32. Долото 1В-112МГ № 425, отработанное роторным способом в скв. 825 Изюмской площади в интервале 1141—1157 м.

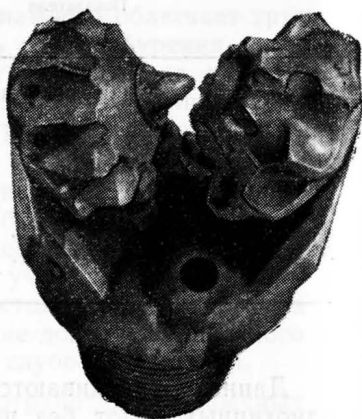


Рис. 33. Долото 1В-112МГ № 523, отработанное роторным способом в скв. 826 Изюмской площади в интервале 1125—1139 м.

Показатели	Изюмская площадь		
	скв. 824	скв. 825	скв. 826
Верхняя пермь P_2 (532—970 м)			
Пробурено, м	251	190	148
Израсходовано долот, шт.	20	12	10
Общее время бурения, ч	228	152	125
Проходка на долото, м	12,5	15,8	14,8
Время на один рейс, ч	11,8	12,6	12,5
Механическая скорость, м/ч	1,10	1,26	1,18
Нижняя пермь P_1 (190—1201 м)			
Пробурено, м	78	33	41
Израсходовано долот, шт.	17	6	8
Общее бурение, ч	178	66	86
Проходка на долото, м	4,6	5,5	5,3
Время на один рейс, ч	10,5	11,0	10,8
Механическая скорость, м/ч	0,44	0,5	0,49

рости на 16,1% (скв. 825), 7,1% (скв. 826); по времени работы долота на 10,3% (скв. 825), 9,3% (скв. 826);

в соленосной свите нижней перми: по проходке за рейс на 19% (скв. 825), 15,2% (скв. 826); по механической скорости на 12% (скв. 825), 10,8% (скв. 826); по времени работы долота на 11,4% (скв. 825), 11,1% (скв. 826).

При проведении отработки долот по предлагаемой методике в качестве прибора для замера текущего значения механической скорости v_t широко использовалось устройство для замера v_t автоматических газокаротажных станций. Описание этого прибора приведено в главе VI. При выборе режимов и способов бурения использовались формулы и графики, предлагаемые в настоящей работе.

Общие выводы

1. В связи с меньшей износостойкостью шарошечных долот уменьшенного и малого диаметров, в особенности их опорных элементов, отработка таких долот имеет ряд отличительных особенностей по сравнению с отработкой долот больших диаметров.

Получение максимальной рейсовой скорости бурения при обработке долот уменьшенного и малого диаметров на больших глубинах обеспечивается только при предельно полной их обработке. Отсюда вытекает важнейшее условие рациональной обработки долот уменьшенного и малого диаметров, заключающееся в том, что способ и режим бурения, а также режим подачи должны обеспечивать получение от долота полностью заложенных в нем потенциальных возможностей.

Долота уменьшенных и малых диаметров должны при этом обрабатываться по механической скорости, наиболее полно характеризующей процесс, происходящий на забое скважины, и хорошо увязывающей износ долота с применяемыми параметрами режима бурения.

2. Существующие методы обработки долот по критериям v_p , $v_{тб}$, $h v_{ср}$, $h v_p$, минимуму себестоимости проходки и др., неприемлемы для обработки долот уменьшенного и малого диаметров на больших глубинах по той причине, что они не отражают полностью процесс, происходящий на забое скважины и, следовательно, не исключают ошибок при определении времени подъема изношенного долота для его замены.

3. Исследованиями, проведенными на стенде и непосредственно при бурении глубоких скважин, установлено, что долото за время работы в установившемся периоде (после приработки) изнашивается незначительно (на 15—20%), основной же износ происходит в конце работы долота на забое. В силу особенностей износа долота механическая скорость бурения большую часть времени работы долота на забое в однородных породах изменяется мало. Интенсивный износ долота в конце долбления сопровождается резким падением величины текущего значения механической скорости.

4. Разработанная методика оценки эффективности способов бурения и определения рациональных границ применения турбинного и роторного способов бурения позволяет наиболее полно использовать технические и технологические особенности того или иного способа бурения и тем самым рационально обрабатывать долота уменьшенного и малого диаметров.

Выведенные расчетные формулы определения рациональных границ применения турбинного и роторного способов бурения рекомендуется использовать при со-

ставлении режимно-технологических карт и ГТН.

Для оценки эффективности применяемых способов бурения при непосредственном бурении скважин разработаны графики оптимального значения коэффициента η в зависимости от глубины для рассматриваемого района буровых работ.

5. Разработанная методика выбора режимных параметров при обработке долот уменьшенного и малого диаметров позволяет определять рациональную глубину перехода на режимные параметры, обеспечивающие h_{\max} из расчета получения максимальной рейсовой скорости по мере роста глубины скважины при роторном бурении.

При турбинном способе бурения параметры режима рекомендуется выбирать из условия получения максимальной механической скорости за время установившейся работы долота, т. е. $v_t = v_{m_{\max}} \approx \text{const}$.

Составленные графики оптимального значения коэффициента ϵ для рассматриваемого района буровых работ позволяют оценивать и выбирать параметры режима роторного бурения непосредственно в процессе проводки скважины.

Предлагаемый режим подачи долота, обеспечивающий постоянство v_t в период установившейся работы долота, исходит из условия получения наиболее высоких показателей и возможности управления отработкой долот.

6. На основании стендовых исследований отработки долот малого диаметра (97 мм) установлено, что функциональные зависимости $v_t = f(t)$ и $\mu = \varphi(t)$ имеют сложный вид, причем в начальной и конечной стадиях работы долота на забое изменение механической скорости бурения во времени носит неопределенный характер. Эти периоды являются непоказательными для всего процесса отработки долота. Наиболее продолжительным и самым производительным является период установившейся работы долота на забое.

Выведенные формулы (36) и (37) изменения механической скорости и износа долота во времени в период установившейся работы долота вошли в основу разработанного метода отработки долот и управления технологическим процессом бурения глубоких скважин уменьшенного и малого диаметров.

7. Найдены оптимальные сочетания P_{oc} и n для ша-

рошечных долот малого диаметра (97 мм) в стендовых условиях: для $n=128$ об/мин оптимальная нагрузка на долото составляет $P_{oc}=3000$ кг, для $n=238$ об/мин $P_{oc}=2500$ кг и для $n=346$ об/мин $P_{oc}=2000$ кг.

8. Разработанная в результате проведенных исследований методика обработки шарошечных долот уменьшенного и малого диаметров по параметру $\frac{\Delta h}{\Delta t} \approx \text{const}$ предусматривает предельно полную (безаварийную) обработку долот; более полно, чем критерии v_p , $h_{v_{cp}}$, $v_{it\sigma}$, отражает процесс в каждый данный момент времени; обеспечивает возможность управления процессом и увязывает время пребывания долота на забое с применяемыми параметрами режимов бурения; позволяет регулировать процесс износа долота на забое.

Предлагаемая методика обработки шарошечных долот вошла в составленную автором инструкцию по обработке долот уменьшенного и малого диаметров при бурении глубоких скважин, которая приведена в конце книги. Эта методика внедрена на площадях Восточно-Украинского нефтегазоносного района и дает положительные результаты.

ИНСТРУКЦИЯ ПО ОТРАБОТКЕ ШАРОШЕЧНЫХ ДОЛОТ УМЕНЬШЕННОГО И МАЛОГО ДИАМЕТРОВ ПРИ БУРЕНИИ ГЛУБОКИХ СКВАЖИН

Бурильщик, приступая к очередному рейсу, должен знать, как нужно отработать долото, какие применить режимные параметры при данном способе бурения, как их менять или оставлять неизменными на протяжении рейса, чтобы получить наилучшие показатели работы долота. В процессе работы долота бурильщик должен внимательно следить за текущим значением механической скорости, чтобы при наступлении периода малоэффективной работы долота в конце рейса поднять его для замены, ориентируясь при этом на продолжительность предыдущих рейсов.

1. Выбор типа долота

1. Выбор типа долота предусматривает:

а) выбор конструкции долота (одно-, двух-, трех-, четырехшарошечные, гидромониторные долота и т. д.), дающей наилучшие показатели при бурении в данной породе и данным способом;

б) выбор типа долота в зависимости от крепости разбуриваемых пород (долота типа К, Т, СТ, С, М и т. д.).

2. На достаточно изученных бурением площадях конструкция и тип долот выбираются на основании обобщения опыта с учетом характера износа долот в однотипных породах.

3. На малоизученных (разведочных) площадях при выборе типа долота бурильщик должен исходить из анализа отработки долот в данных условиях с учетом рекомендаций геолого-технического наряда.

4. Выбранное долото должно быть технически исправным, не иметь трещин и изломов в деталях и сварных швах, смятия резьбы и забитости промывочных отверстий.

Шарошки долота должны свободно вращаться на цапфах, а зубья не должны цепляться друг за друга. Максимальные люфты опор шарошек нового долота не должны превышать — осевой 0,7 мм; радиальный 0,2 мм.

Кольцевым шаблоном проверяется также диаметр долота. Долото должно иметь клеймо завода-изготовителя и паспорт.

II. Выбор способа бурения

5. Бурение забойными двигателями данного интервала можно считать экономически эффективным, если:

а) дополнительные затраты времени на спуско-подъемные и подготовительно-вспомогательные операции полностью перекрываются сокращением времени механического бурения;

б) материальные затраты не больше, чем в роторном бурении.

Во всех остальных случаях необходимо предпочитать роторный способ бурения.

6. Бурение долотами малых диаметров турбинным способом обычно сопровождается снижением проходки за рейс, а иногда и механической скорости по сравнению с долотами больших диаметров.

Следовательно, переходить на роторное бурение долотами малых диаметров следует на меньшей глубине, чем при бурении долотами больших диаметров.

7. Для определения области эффективного применения турбинного способа бурения в зависимости от глубины рекомендуется пользоваться формулой (10).

8. Для проверки эффективности турбинного способа бурения непосредственно при бурении скважины рекомендуется строить диаграммы $\eta - H$ для каждой конкретной площади или группы площадей с однотипными условиями бурения по данным скважин, пробуренных с лучшими показателями.

Периодически по мере углубления скважины по формуле (7), определяют $\eta_{\text{факт}}$, а по диаграмме $\eta - H$ находят η , соответствующее данной глубине H .

Если $\eta_{\text{факт}} \approx \eta_{\text{расч}}$, то при заданном режиме турбинное бурение эффективно; если $\eta_{\text{факт}} < \eta_{\text{расч}}$, то следует усилить режим турбинного бурения для повышения v_m ; если $\eta_{\text{факт}} > \eta_{\text{расч}}$, то переходят на роторное бурение.

III. Выбор основных режимных параметров бурения

9. Режимные параметры должны подбираться из расчета получения максимальной рейсовой скорости за рейс при предельно полной (безаварийной) отработке долота.

10. Для этого до определенной глубины следует подбирать режимные параметры, обеспечивающие получение максимальной механической скорости проходки за каждый рейс.

11. После достижения указанной глубины режимные параметры следует изменить для получения максимальной проходки за каждый рейс.

Примечание. Если максимальная механическая скорость соответствует максимальной проходке на всем протяжении бурения скважины, то бурят при максимальной механической скорости до проектной глубины скважины.

12. При бурении на незначительной глубине следует в самом начале рейса (после приработки долота) установить ту наибольшую нагрузку на долото, которая допускается его конструктивными особенностями и требованиями качественной проводки скважины, и придерживаться этой нагрузки до конца рейса. При этом при соответствующих скоростях вращения будет достигнута максимальная механическая скорость проходки, а долото будет изнашиваться интенсивно.

13. С ростом глубины степень использования долота следует увеличивать, т. е. подбирать режимные параметры из расчета получения максимальной проходки при достаточно высокой механической скорости.

Нагрузка и скорость вращения долота при этом должны соответствовать оптимальному значению для работы долота и разрушения горной породы.

14. Режимные параметры в соответствии с приведенными выше указаниями выбираются на основании обоб-

шения передового опыта бурения или опытных данных.

15. Для определения области эффективного бурения при режимных параметрах, обеспечивающих получение максимальной скорости проходки, можно воспользоваться формулой (24).

16. Для проверки правильности выбора режимных параметров при роторном способе бурения непосредственно на буровой рекомендуется пользоваться диаграммой $\varepsilon - L$, составленной для конкретных условий бурения.

Периодически по мере углубления скважины определяют $\varepsilon_{\text{факт}}$ по формуле (28), а по диаграмме $\varepsilon - L$ находят $\varepsilon_{\text{расч}}$, соответствующее данной глубине.

Если $\varepsilon_{\text{факт}} \approx \varepsilon_{\text{расч}}$, то эффективно бурение при заданных параметрах режима роторного бурения; если $\varepsilon_{\text{факт}} < \varepsilon_{\text{расч}}$, то следует увеличить осевую нагрузку и скорость вращения ротора; если $\varepsilon_{\text{факт}} > \varepsilon_{\text{расч}}$, то скорость вращения ротора несколько снижают для облегчения условий работы долота на забое.

17. Для выбора турбобура и установления наивыгоднейшего расхода промывочной жидкости в каждом конкретном случае необходимо строить диаграммы НТС (насос — турбобур — скважина).

IV. ОТРАБОТКА ДОЛОТ УМЕНЬШЕННОГО И МАЛОГО ДИАМЕТРОВ НА ЗАБОЕ

18. Долото после спуска инструмента должно быть доведено до забоя при восстановленной циркуляции. При наличии посадок инструмента этот интервал должен быть проработан.

19. Бурение новым долотом следует начинать, плавно увеличивая нагрузку с доведением ее до оптимальной величины в зависимости от применяемого способа бурения в течение 5—10 мин (время приработки долота).

20. Оптимальную осевую нагрузку устанавливают следующим образом. Сначала нагрузку доводят до максимальной, установленной на основании рекомендаций данной инструкции, затем несколько снижают ее. Если при снижении нагрузки механическая скорость уменьшается, нагрузку следует вновь повысить до первоначальной или несколько большей величины.

21. Величина осевой нагрузки не должна превышать максимального допустимого значения, указанного в паспорте долота.

22. При турбинном бурении следует избегать даже кратковременных работ долота «на весу» или при малых нагрузках, так как в этом случае турбобур развивает большую скорость вращения, что вызывает интенсивный износ долота.

23. По мере износа рабочей части долота для поддержания текущего значения механической скорости на достигнутом уровне в однородной породе осевая нагрузка на долото должна незначительно увеличиваться. Текущее значение механической скорости может отличаться от установившегося значения только в результате изменения крепости проходимых пород или износа долота.

24. При изменении крепости пород, при входе в новые породы бурильщик обязан соответственно изменить параметры режима бурения (осевую нагрузку, скорость вращения ротора и т. д.), обеспечивая поддержание текущего значения механической скорости на новом уровне, оптимальном для новых пород.

25. Необходимость подъема сработанного долота для его замены определяется по устойчивому падению механической скорости, когда долото не дает проходки в результате износа рабочей поверхности, опор, потери диаметра и т. д.

26. Момент подъема долота определяется при тщательном наблюдении за характером изменения текущего значения механической скорости как при наличии для этого приборов, так и без них.

27. При отсутствии приборов замеряют проходку Δh за равные малые промежутки времени Δt . Прохождение примерно равных отрезков Δh за время Δt ($\frac{\Delta h}{\Delta t} \approx \text{const}$) свидетельствует о нормальной работе долота.

28. Величину равных малых промежутков времени Δt для замера Δh выбирают в зависимости от интенсивности углубления скважины: при турбинном бурении — от 5 до 15 мин, при роторном — от 5 до 25 мин.

Правильный выбор промежутков времени Δt для замера Δh имеет очень важное значение, так как в случае принятия слишком больших промежутков времени мо-

жет не быть замечен момент начала резкого падения механической скорости. В этом случае может сложиться ошибочное впечатление, что долото срабатывается без резкого падения механической скорости.

29. Если параметр обработки долот $\frac{\Delta h}{\Delta t} \approx \text{const}$ не выдерживается и дальнейшая работа долота на забое дает устойчивое уменьшение Δh за Δt , то долото подлежит замене.

30. За допустимое безопасное время работы долота после наступления резкого падения $\frac{\Delta h}{\Delta t}$ бурильщик обязан убедиться, что долото действительно сработалось, а не произошло изменение пород по крепости или режима бурения. Для этого он должен сравнивать продолжительность проводимого рейса с предыдущими.

31. Продолжительность безопасного времени работы долота на забое после резкого падения $\frac{\Delta h}{\Delta t}$ зависит от типоразмера долота, стойкости его опор, подводимой к долоту мощности. В табл. 7 приведены данные о продолжительности безопасного времени работы шарошечных долот в зависимости от их размера, способа бурения и стойкости опор, составленные на основании опыта бурения на площадях восточной части Украины.

V. ОСМОТР ОТРАБОТАННОГО ДОЛОТА

32. Поднятое из скважины долото должно быть тщательно осмотрено бурильщиком или буровым мастером. При этом устанавливают степень и характер его сработки (замеряют осевой и радиальный люфты шарошек, диаметр долота, износ вооружения, наличие заеданий шарошек и т. д.). Результаты заносят в буровой журнал и суточный рапорт.

33. Характер сработки зубцов шарошек отработанных долот тесно связан с применявшимися режимными параметрами и характеризует в известной степени процесс разрушения горных пород.

34. Плоская сработка зубцов свидетельствует о работе долот при недостаточных осевых нагрузках и боль-

ших скоростях вращения и соответствует неэффективному режиму поверхностного истирания пород на забое.

35. Острая сработка зубцов шарошек свидетельствует о работе долот при достаточно правильно выбранных осевых нагрузках и скоростях вращения, обеспечивающих объемно-усталостное разрушение пород на забое.

36. Округлая сработка зубцов шарошек свидетельствует о менее эффективном разрушении пород на забое при недостаточных осевых нагрузках и сравнительно высоких скоростях вращения.

37. Характер сработки долота должен учитываться при выборе последующих типоконструкций, а также способа и режима бурения.

VI. УЧЕТ ОТРАБОТКИ ДОЛОТ МАЛЫХ РАЗМЕРОВ

38. Учет и наблюдение за отработкой долот малых размеров обязательны для всех буровых предприятий. Для этого все данные по отработке долот заносят в буровой журнал и долотную карточку.

39. Паспорт завода-изготовителя, прилагаемый к каждому долоту, с заполненными данными о его отработке должен направляться буровым предприятием заводу-изготовителю.

ЛИТЕРАТУРА

1. Адамов А. Н. К вопросу о рациональном времени подъема долота с забоя. Нефт. хоз., № 4, 1956.
2. Бадалов Р. А. Кривая изменения механической скорости проходки и ее аналитическое выражение. Изв. МВССО СССР, Сер. Нефть и газ, № 1, 1958.
3. Баршай Г. С., Буяновский Н. И. Теория и практика турбинного бурения. Гостоптехиздат, 1961.
4. Бланк Г. И. Об оптимальной отработке долот. Нефт. хоз., № 2, 1959.
5. Владиславлев В. С. Разрушение пород при бурении скважин. Гостоптехиздат, 1958.
6. Гаджиев Н. А., Ядуллаев Н. Н., Шарутин А. С. Отработка шарошечных долот. ВНИИОЭНГ, Сер. Бурение, № 5, 1965.
7. Глебов В. А. Опыт бурения глубоких скважин малого диаметра. Нефт. хоз., № 5, 1960.
8. Гулиев Б. А. Об эффективности работы турбобуров и долот в районе о. Песчаный. Азерб. нефт. хоз., № 2, 1959.
9. Гусман М. Т. О бурении турбобурами малого диаметра. Нефт. хоз., № 6, 1958.
10. Духнин А. П., Иоаннесян Р. А. О рациональной отработке трехшарошечных долот. Нефт. хоз., № 6, 1949.
11. Духнин А. П. Пути повышения технической скорости и достижения эффективной продолжительности долбления шарошечными долотами. Нефт. хоз., № 3, 1952.
12. Духнин А. П. Аналитическое выражение проходки и механической скорости долбления по промысловым данным. Нефт. хоз., № 8, 1953.
13. Духнин А. П., Толстых И. Ф. Критерий эффективности работы долота, обусловленной его износом. Нефт. хоз., № 7, 1954.
14. Духнин А. П., Толстых И. Ф. О продолжительности работы долота, обусловленной его износом. Нефт. хоз., № 4, 1956.
15. Еремenco Т. Е., Яковлев В. А. К вопросу о выборе методики отработки долот. Изв. МВССО СССР, сер. Нефть и газ, № 3, 1965.
16. Замятина А. Ф. Технология и техника бурения скважин малого диаметра в Башкирии. Сб. «Технология и техника бурения нефтяных скважин малого диаметра». ЦНИИТЭнефтегаз, 1963.
17. Зубков М. М. Опыт эффективной отработки долот на забое при бурении глубоких скважин. Нефт. хоз., № 10, 1960.
18. Зубков Я. С. и др. О рациональной отработке долот. Нефт. хоз., № 11, 1963.
19. Иванов Т. Ф. Типичная кривая изменения механической скорости при бурении шарошечными долотами и ее аналитическое выражение. Нефт. хоз., № 7, 1954.
20. Иоаннесян Р. А., Булах Г. И. Пути повышения технико-экономических показателей турбинного бурения сверхглубоких скважин. Нефт. хоз., № 6, 1958.
21. Иоаннесян Р. А. Пути повышения показателей турбинного бурения на больших глубинах. Нефт. хоз., № 11, 1963.
22. Иоаннесян Ю. Р. Условия, определяющие проходку за долбление и возможности ее увеличения в турбинном бурении. Нефт. хоз., № 1, 1963.
23. Караев А. К., Ковтунов Г. А. Опыт бурения скважин долотами уменьшенного и малого диаметров. Нефт. хоз., № 4, 1960.
24. Касум-Заде Д. С. и др. Анализ работы и эффективность применения уменьшенных размеров долот на площадях банка Дарвина-море. Азерб. нефт. хоз., № 12, 1961.
25. Кулиев С. М. и др. О методике определения средних показателей буровых работ. Азерб. нефт. хоз., № 10, 1961.
26. Кулиев С. М., Мамедов Н. Н., Мдивани А. Г. Эффективность бурения глубоких скважин. Изд-во «Недра», 1964.

27. Минин А. А., Погарский А. А. Форсирование механической скорости беструбного электробура. Нефт. хоз., № 3, 1956.
28. Орлов А. В. Установление оптимального сочетания осевой нагрузки на долото и скорости его вращения при глубоком бурении. Труды ВНИИБТ, вып. 13. Изд-во «Недра», 1964.
29. Погарский А. А. О режиме бурения шарошечными долотами малого диаметра. Нефт. хоз., № 11, 1958.
30. Польшаков И. С. Опыт бурения скважины малого диаметра. Нефт. хоз., № 4, 1959.
31. Потапов Ю. Ф., Симонов В. С. Разрушение горных пород трехшарошечными долотами малого диаметра. Гостоптехиздат, 1961.
32. Соловьев Е. М. Еще раз о критерии эффективности работы долота. Нефт. хоз., № 2, 1955.
33. Стетюха Е. И. Закономерности изменения проходки на долото и времени механического бурения в зависимости от глубины скважины. Вопросы нефтепромыслового дела. Грозный, 1955.
34. Тимофеев Н. С., Гусман М. Т. Бурение скважин в США. Гостоптехиздат, 1960.
35. Турко А. А. Критерий эффективной отработки долот на забое. Нефт. хоз., № 6, 1966.
36. Успенский Г. Н., Воинов Л. Г. Об отработке долот № 11 на девонских скважинах. Труды КуйбышевНИИ НП, вып. 2, 1960.
37. Федоров В. С. Методы определения времени эффективной работы долот на забое. Нефт. хоз., № 7, 1955.
38. Федоров В. С. Проектирование режимов бурения. Гостоптехиздат, 1958.
39. Федоров В. С., Беликов В. Г. Методы обобщения передового опыта в бурении. Гостоптехиздат, 1962.
40. Царицын В. В. Технологическое разрушение горных пород. Гостехиздат УССР, Киев, 1965.
41. Царицын В. В., Жидовцев Н. А. Бурение шарошечными долотами. Гостехиздат УССР, Киев, 1962.
42. Чефранов К. А. Автоматизация процесса бурения. Гостоптехиздат, 1962.
43. Чефрас А. А. Технико-экономическое исследование продолжительности пребывания долота на забое. Труды АзНИИ, вып. 5, 1957.
44. Шацов Н. И. и др. Бурение нефтяных и газовых скважин. Гостоптехиздат, 1961.
45. Шрейнер Л. А. и др. Механические и абразивные свойства горных пород. Гостоптехиздат, 1958.
46. Штурман Л. И. Лучше использовать возможности турбинного бурения. Нефт. хоз., № 9 и 10, 1953.
47. Эпштейн Е. Ф., Попов Г. П. Метод определения длительности бурения в один рейс, обеспечивающий минимум стоимости проходки. Нефт. хоз., № 2, 1950.
48. Ядуллаев Н. Н. О рациональной отработке долот в сверхглубоком бурении. Азерб. нефт. хоз., № 1, 1954.
49. Ядуллаев Н. Н. и др. О наиболее выгодном времени работы долота на забое. Труды АзНИИ, вып. 9, 1960.
50. Яковлев В. А. О качестве шарошечных долот № 8 сплошного бурения. Азерб. нефт. хоз., № 10, 1960.
51. Яковлев В. А. Управление отработкой долот уменьшенного и малого диаметров на больших глубинах. Изв. МВССО СССР, Сер. Нефть и газ, № 10, 1963.
52. Яковлев В. А. Рациональная отработка долот при бурении глубоких скважин уменьшенного и малого диаметров. Нефтяная и газовая промышленность, № 3, Киев, 1964.

ОГЛАВЛЕНИЕ

<i>Глава I. Обзор существующих методов отработки долот . . .</i>	3
Выводы	17
<i>Глава II. Анализ производственных данных отработки долот на площадях Восточной Украины</i>	19
§ 1. Общие сведения	19
§ 2. Анализ производственных данных отработки долот	23
Выводы	46
<i>Глава III. Выбор способа бурения долотами уменьшенного и малого диаметров</i>	48
§ 1. Анализ методов оценки эффективности способов бурения	48
§ 2. Разработка методики оценки эффективности турбинного и роторного способов бурения и определения рациональных границ их применения	51
§ 3. Исследование эффективности способов бурения в рассматриваемом районе при бурении глубоких скважин уменьшенного и малого диаметров	56
<i>Глава IV. Выбор параметров режима бурения и методики регулирования осевой нагрузки на долото при бурении глубоких скважин уменьшенного и малого диаметров</i>	63
§ 1. Сравнение влияния различных сочетаний осевой нагрузки на долото и скорости его вращения на эффективность отработки долот уменьшенного и малого диаметров	63
§ 2. Разработка методики выбора режимных параметров при отработке долот уменьшенного и малого диаметров в производственных условиях	71
§ 3. Оценка и выбор параметров режима бурения при проводке глубоких скважин уменьшенного и малого диаметров в рассматриваемом районе	74
§ 4. Выбор режима подачи долота	83
<i>Глава V. Исследование процесса износа долота и изменения механической скорости бурения во времени</i>	85

<i>Глава VI. Разработка методики отработки долот уменьшенного и малого диаметров</i>	99
<i>Глава VII. Результаты стендовых и промысловых испытаний отработки долот по параметру $\frac{\Delta h}{\Delta t} \approx \text{const}$</i>	103
§ 1. Результаты стендовых испытаний	103
§ 2. Промысловые испытания отработки долот по параметру $\frac{\Delta h}{\Delta t} \approx \text{const}$	106
Общие выводы	115
Приложение	119
Литература	126

Яковлев Виталий Аркадьевич

**Рациональная отработка долот
уменьшенного и малого диаметров**

Редактор издательства *Т. А. Чопорова*
Техн. редактор *Л. Д. Агапонова*
Обложка художника *Ю. Н. Якунинского*
Корректор *Г. Г. Большова*

Сдано в набор 16/IX 1969 г. Подписано в печать 6/III 1970 г. Т-02796
Формат 84×108¹/₃₂ Печ. л. 4,0 Усл. печ. л. 6,72 Уч.-изд. л. 6,95
Бумага № 1 Индекс 1-3-1 Заказ 507/95-5 Тираж 2500 экз. Цена 37 коп.

Издательство «Недра». Москва, К-12, Третьяковский проезд, д. 1/19.
Московская типография № 6 Главполиграфпрома Комитета по печати
при Совете Министров СССР. Москва, Ж-88, 1-й Южно-портовый пр., 17.