

УДК 624.19

**Ш. Х. Бекиров<sup>1</sup>, Р. А. Гасанов<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>ООО «SOCAR-AQS», г. Баку, Азербайджан

<sup>2</sup>Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности, г. Баку

### **ВЛИЯНИЕ ИЗБЫТОЧНОГО ДИНАМИЧЕСКОГО ПЕРЕПАДА ДАВЛЕНИЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД**

*Рассмотрены вопросы процесса разрушения горных пород в условиях избыточного перепада давления. Поставлена и решена задача определения величины угнетающих усилий и моментов при наличии избыточного перепада давления. Для расчета подъемной силы (крутящего момента) струи жидкости вытекающей из промывочных каналов долота использована теория гидравлических турбин. Для моделирования движения промывочной жидкости в процессе бурения в системе промывки долота использована теорема изменения ее кинетического момента. Установлено, что процесс бурения в условиях избыточного угнетающего давления зависит от трех групп параметров, определяющих промывочную жидкость, конструкции скважины и системы промывки долота. Разработан номографический метод проектирования указанных групп параметров, обеспечивающих эффективность производства буровых работ.*

**Ключевые слова:** разрушение пород, избыточный перепад, струя жидкости, подъемная сила, кинетический момент, группа факторов, номограмма.

При бурении подаваемая на забой скважины промывочная жидкость или ее фильтрат преодолевают сопротивление шлама, скопившегося в призабойной зоне.

В зависимости от направления и режима подачи промывочной жидкости могут возникать усилия, угнетающие разбуренные породы. Действие угнетающих усилий на забой скважины можно значительно уменьшить как регулированием параметров бурового раствора, так и управлением режима бурения, а также созданием породоразрушающих инструментов со специальной промывочной системой.

Изучение процесса разрушения горных пород в условиях избыточного перепада давления из-за отсутствия эффективной расчетной схемы системы промывки долот не всегда приводит к желаемому уровню показателей бурения [1; 2].

В серийно выпускаемых долотах промывочная жидкость направляется на забой скважины либо вертикально, либо под определенным углом. При этом струя, выходящая из промывочных каналов долот ударяется о забой и изменяет направление, в результате чего не только теряет кинетическую энергию, но и значительно уменьшает вращательный эффект затопленной струи, который крайне необходим в условиях угнетающего перепада давления для создания крутящего момента струи на поверхности забоя [3].

В процессе разрушения горных пород при наличии избыточного перепада давления большую роль играет скорость фильтрации жидкости сквозь забой скважины. Действие перепада давления в полном масштабе проявляется именно в том случае, если скорость проходки все время опережает скорость фильтрации жидкости в зонах разрушения и предразрушения. Если скорость внедрения породоразрушающего инструмента равна или меньше скорости фильтрации жидкости, в этом случае эффект перепада давления действует частично.

В статье поставлена задача определения угнетающих усилий и моментов при наличии избыточного перепада давления.

Так как при проводке скважин в качестве промывочного агента применяется вязкопластичная жидкость, то поток вытекающей из сопла долота для подъема частиц из зоны

разрушения должен преодолеть усилие предельного напряжения сдвига или соответствующий момент сопротивления, то есть [4; 6]

$$R_1 = \tau_{\text{дин}} F_1 = F_1 \left( \tau_0 + \eta \frac{dv}{dr} \right);$$

$$M_1 = R_1 r_{\text{cp}} = F_1 \left( \tau_0 + \eta \frac{dv}{dr} \right) r_{\text{cp}}. \quad (1)$$

где  $F_1$  – обтекаемая промывочной жидкостью поверхность забоя;  $\tau_{\text{дин}}$  – динамическое напряжение сдвига;  $\tau_0$  – предельное напряжение сдвига;  $\eta$  – коэффициент вязкости;  $dv/dr$  – градиент скорости на поверхности забоя;  $r_{\text{cp}}$  – средний радиус трения. Для забоя скважины приближенно можно принять, что  $\tau_{\text{cp}} = \frac{D_c}{3}$ , где  $D_c$  – диаметр ствола скважины.

При наличии в зонах разрушения горных пород избыточного перепада давления струей жидкости, выходящей из промывочных каналов долота должно быть преодолено угнетающее усилие или момент:

$$\left. \begin{aligned} R_2 &= F_2 \cdot \Delta P \\ M_2 &= F_2 \cdot \Delta P \cdot r_{\text{cp}} \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

где  $F_2$  – фильтрационная поверхность забоя скважины;  $\Delta P$  – избыточный перепад давления в зонах разрушения и предразрушения.

Отметим, что до начала процесса разрушения на забое скважины действует статический перепад давления, а после начала разрушения – перепад давления динамического характера.

Таким образом, суммарное угнетающее усилие или момент угнетающих усилий определяем по формуле

$$\left. \begin{aligned} R &= F_1 \tau_{\text{дин}} + F_2 \cdot \Delta P \\ M &= (F_1 \tau_{\text{дин}} + F_2 \cdot \Delta P) \cdot r_{\text{cp}} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

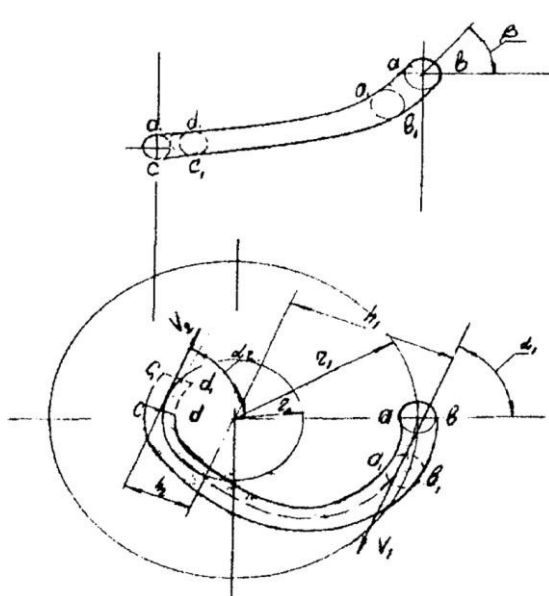


Рис. 1. Схема промывочного канала системы промывки долота. Проекции траектории промывочного канала соответственно на вертикальной и горизонтальной плоскостях

Для расчета подъемной силы (крутящего момента) струи жидкости вытекающей из промывочных каналов долота, использовали теорию гидравлических турбин, согласно которой жидкость с входным углом  $\alpha_1$  и выходным углом из канала  $\alpha_2$  ведет себя как вал гидравлической турбины (рис. 1). Долото, в полости которого протекает жидкость, вращается вокруг вертикальной оси скважины с постоянной угловой скоростью. Абсолютная скорость частиц воды во входном сечении равна  $v_1$  и составляет с касательной угол  $\alpha_1$ .

В выходном сечении скорость частиц жидкости равна  $v_2$  и составляет с касательной угол  $\alpha_2$ . Расстояние от центров входного и выходного сечений до оси вращения, соответственно, равны  $r_1$  и  $r_2$ .

Определим изменение кинетического момента, протекающей через отверстия жидкости относительно оси вращения скважины:

$$\frac{dL_z}{dt} = M_z^E. \quad (4)$$

Внешними силами, действующими на систему, являются сила тяжести, не имеющая момента относительно оси вращения. Из формулы (4) следует, что главный момент внешних сил  $M_z^E$  представляет собой главный момент реакций стенок отверстий.

Предположим, что в некоторый момент времени  $t$  в одном из промывочных каналов долот находится объем жидкости « $ab\ c\ d$ ». В момент времени  $t + \Delta t$  этот же объем занимает положение – « $a_1\ b_1\ c_1\ d_1$ ». При этом элементарные объемы жидкостей, вытекающих за время  $dt$  в канал и вытекающих из него за тоже время равны. Масса жидкости, протекающей через один канал за время  $dt$  будет равна:

$$m_1 = m_2 = m \frac{\gamma Q}{N_g} dt = \frac{\rho Q}{N} dt, \quad (5)$$

где  $\rho$  – плотность бурового раствора;  $Q$  – подача насоса;  $N$  – количество промывочных каналов.

Определим изменение главного момента количества движения объема « $a\ b\ c\ d$ » относительно оси  $z$  за время  $dt$ , считая направление вращения долота положительным. Это изменение равно разности моментов количества движения объемов  $d\ c\ c_1\ d_1$  и  $ab\ b_1\ a_1$

$$dL_{iz} = mv_2 h_2 - mv_1 h_1, \quad (6)$$

где  $h_1$  и  $h_2$  – соответственно плечо вектора  $mv_1$  и  $mv_2$  от оси вращения, определяются по формуле:

$$\left. \begin{aligned} h_1 &= r_1 \cos \alpha; \\ h_2 &= r_2 \cos \alpha; \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

где  $r_1$  и  $r_2$  – соответственно расстояния центра входа и выхода промывочных каналов от оси вращения.

Подставляя (5), (6), (7) в (4), получаем:

$$M_z^E = \frac{dL_z}{dt} = \rho Q (v_2 r_2 \cos \alpha_2 - v_1 r_1 \cos \alpha_1). \quad (8)$$

Изменение кинетического момента всех промывочных каналов за время  $t$

$$dL_z = [\rho Q (v_2 r_2 \cos \alpha_2 - v_1 r_1 \cos \alpha_1)] dt \quad (9)$$

Силы давления жидкости на стенки промывочных каналов равны по модулю и противоположны по направлению реакциям стенок каналов. Следовательно, к долоту со стороны жидкости приложен вращающий момент  $M_{вр}$ , равный по величине и противоположный по знаку моменту  $M_z^E$ , т. е.

$$M_{вр} = -M_z^E = -\rho Q (v_1 r_1 \cos \alpha_1 - v_2 r_2 \cos \alpha_2) \quad (10)$$

Таким образом, вращающий момент жидкости, выходящей из промывочного канала прямо пропорционален плотности, расходу жидкости и разности произведения скоростей на кратчайшие расстояния от оси вращения. Для увеличения вращающего момента, выходящего из канала долота жидкости, следует максимальный выход канала жидкости перевести на периферийную часть долота и повернуть канал с таким расчетом, чтобы скорость струи жидкости выходящей касательно из сопла была направлена под углом  $\alpha_2 = 180^\circ$ . В этом случае

вращающий момент выходящей из сопла жидкости суммируется с моментом входящей жидкости.

Для совершенной очистки забоя в условиях избыточного перепада давления и наилучшего охлаждения долота вращающий момент промывочной жидкости, вытекающей из сопла долота, должна превышать момент угнетающих усилий:

$$\rho Q(v_2 r_2 \cos \alpha_2 - v_1 r_1 \cos \alpha_1) > (F_1 \tau_{\text{дин}} + F_2 \Delta P) \cdot r_{\text{ср}} \quad (11)$$

Полагая, что  $v_1 = \frac{Q}{Nf_1}$ ;  $v_2 = \frac{Q}{Nf_2}$  и  $F_1 = F_2 = \frac{\pi D_c^2}{4}$ ,

где  $f_1$  и  $f_2$  – соответственно, площади промывочных каналов на входе и выходе жидкости и учитывая  $v_1$  и  $v_2$  (11) получим:

$$\frac{\rho Q^2}{N} \left( \frac{r_1}{f_1} \cos \alpha_1 - \frac{r_2}{f_2} \cos \alpha_2 \right) > \frac{\pi D_c^3}{12} (\tau_{\text{дин}} + \Delta P). \quad (12)$$

Определим динамический перепад давления в зонах разрушения по закону Дарси, согласно которому

$$v_{\text{ср}} = \frac{K_{\text{пр}}}{\eta} \frac{d\Delta P}{dz}, \quad (13)$$

где  $v_{\text{ср}}$  – средняя скорость фильтрации жидкости в зонах разрушения забоя;  $K_{\text{пр}}$  – интегральная проницаемость забоя;  $\eta$  – коэффициент вязкости фильтрата;  $\frac{d\Delta P}{dz}$  – градиент перепада давления

в зонах разрушения.

Согласно изложенному действие угнетающего давления проявляется тогда, когда скорость проходки опережает скорость фильтрации жидкости.

Представляет определенный интерес решение уравнения (13) для случая равенства скорости фильтрации и механической скорости проходки.

За глубину фильтрации жидкости примем углубление забоя за один оборот бурильного инструмента:

$$\frac{K_{\text{пр}}}{\eta} \cdot \frac{d\Delta P}{dS} = \phi S n = V_m, \quad (14)$$

где  $\phi$  – постоянный коэффициент  $\phi = 2$ ;  $S$  – углубление забоя за один оборот бурильного инструмента;  $n$  – количество оборотов бурильного инструмента;  $V_m$  – механическая скорость проходки.

Интеграл дифференциального уравнения (14) представляется в виде:

$$\Delta P = C + \frac{\eta}{2K_{\text{пр}}} \cdot \phi S^2 n = C + \frac{\eta}{K_{\text{пр}}} S^2 n, \quad (15)$$

где  $C$  – постоянная интегрирования, которая определяется из граничных условий  $\Delta P = \Delta P_{\text{ст}} = C$  при  $S = 0$ , тогда окончательно уравнение (15) можно записать так:

$$\Delta P = \Delta P_{\text{ст}} = \frac{\eta}{K_{\text{пр}}} \cdot S \cdot V_m = \Delta P_{\text{ст}} + \Delta P_{\text{дин}} \quad (16)$$

Так как статическая составляющая перепада давления действует только в начале долбления до сопротивления долота с забоем, то в непосредственном процессе разрушения горных пород, как указано ранее, будут действовать динамические составляющие перепада давления. Согласно (14), переходя от глубины разрушения за один оборот к механической скорости проходки и подставляя значение динамической составляющей давления в (12), после решения полученного уравнения относительно механической скорости проходки получим

$$\frac{V_M}{V_Q} = \sqrt{\frac{3\phi \cdot K_{пр} \cdot \rho n}{2N \cdot \eta} \pi D \left( \frac{r_1 \cos \alpha_1}{f_1} - \frac{r_2 \cos \alpha_2}{f_2} \right)}, \quad (17)$$

где  $V_Q = \frac{Q}{F_{заб}}$  – удельный расход промывочной жидкости;  $F_{заб}$  – площадь забоя скважины.

При выводе формул влиянием динамического напряжения сдвига пренебрегаем, как малой величиной по сравнению с избыточным давлением.

Принимая число промывочных каналов  $N=3$ , коэффициент  $\phi = 2$  и учитывая, что ,

$$n = \frac{30\omega}{\pi}$$

тогда формулу (17) можно представить в виде

$$F_M = \frac{Q}{F_{заб}} \sqrt{\frac{30 K_{пр} \cdot \rho \omega}{\eta} D \left( \frac{r_1 \cos \alpha_1}{f_1} - \frac{r_2 \cos \alpha_2}{f_2} \right)}, \quad (18)$$

где  $\omega$  – частота вращения бурильного инструмента.

Как видно из формул (17) и (18) процесс бурения в условиях избыточного угнетающего давления зависит от трех параметров:

$$X_1 = \frac{V_M}{V_Q}; \quad X_2 = \frac{K_{пр} \cdot \rho \omega}{\eta}; \quad X_3 = D \left( \frac{r_1 \cos \alpha_1}{f_1} - \frac{r_2 \cos \alpha_2}{f_2} \right).$$

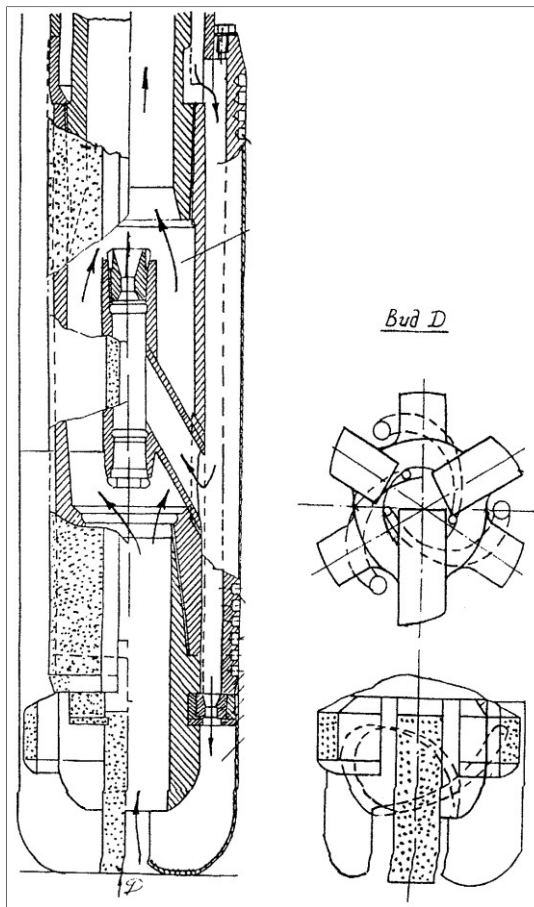


Рис. 2. Схема расположения каналов промывочной системы.

Первый из них  $X_1$  представляет собой отношение секундного объема разрушенной породы к удельному расходу промывочной жидкости и характеризует непосредственно процесс разрушения в условиях угнетающего усилия; второй  $X_2$  – отношение подъемных сил, облегчающих процесс разрушения к силе вязкости, препятствующей процессу очистки и выносу частиц выбуренной породы из зоны разрушения и характеризует коркообразующую способность бурового раствора. Третий параметр  $X_3$  – характеризует диаметр ствола скважины и гидравлические параметры входящего и выходящего из промывочных каналов долота потоков жидкости. Анализ формулы (18) показывает, что эффективность процесса бурения обеспечивается тогда, когда долото будет иметь специальные каналы, переводящие поток жидкости максимально к периферийной части струи при входе  $\alpha_1 = 0^\circ$  и выходе  $\alpha_2 = 180^\circ$  по касательной относительно радиуса долота (рис. 2).

Интересным является то, что уравнение (18) объединяет как технологические параметры, так и параметры промывочной жидкости, а также конструктивные особенности системы промывки породоразрушающего инструмента [5; 6]. Следовательно, оно может быть использовано основой для разработки регламентов при

проектировании строительства скважин. Эта возможность, в свою очередь, обеспечивает высокие показатели буровых работ в условиях действия избыточного перепада давления.

На основании формулы (18), используя методы практической номографии, построена номограмма для проектирования параметров производства буровых работ с учетом характера разрушаемых пород, конструктивных свойств системы промывки долот и реофизических свойств промывочной жидкости (см. рис. 3). С этой целью согласно существующего метода номографирования введены промежуточные параметрические комплексы нижеприводимого содержания:

$$A = \frac{r_1 \cos \alpha_1}{f_1}; A_1 = r_1 \cos \alpha_1; A_2 = \frac{1}{f_1} A_1;$$

$$B = \frac{r_2 \cos \alpha_2}{f_2}; B_1 = r_2 \cos \alpha_2; B_2 = \frac{1}{f_2} B_1;$$

$$X_4 = \rho x_3; X_5 = \frac{1}{\eta} x_4; X_6 = 30 x_5 K_{\text{пр}};$$

$$X_1 = A - B; X_2 = D_c X_1; X_3 = \omega X_2 X_5;$$

$$X_7 = \sqrt{x_6} Q; X_8 = \frac{1}{F_{\text{заб}}} X_7 = V_m.$$

Для расчета промежуточных комплексов использовали следующие интервалы изменения параметров, входящих в (18):

$$\alpha_1 = (0 - 30)^\circ; \alpha_2 = (90 - 270)^\circ; r_1 = (10 - 15) \cdot 10^{-3} \text{ м}; r_2 = (5 - 10) \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$D_c = (100 - 310) \cdot 10^{-3} \text{ м}; n = (500 - 1200) \text{ об./мин};$$

$$\rho = (1,2 - 2,7) \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3; \eta = (10 - 60) \text{ Па} \cdot \text{с}; Q = (1 - 7) \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}; K_{\text{пр}} = (10 - 130) \cdot 10^{-15} \text{ м}^2;$$

Пример пользования номограммой приведен на рис. 3 для следующих значений параметров:

$$\alpha_1 = 15^\circ; \alpha_2 = 15^\circ; r_1 = 12 \text{ мм}; r_2 = 10 \text{ мм}; D_c = 190 \text{ мм}; \omega = 120 \text{ с}^{-1};$$

$$\rho = 2,7 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3; \eta = 20 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}; Q = 70 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}; K_{\text{пр}} = 1300 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2.$$

При указанных значениях параметров промывочной жидкости, режимов бурения и конструкции системы промывки бурильного инструмента, как видно из номограммы, будет обеспечена скорость бурения 26,6 м/ч. Путем изменения одного из факторов как системы промывки бурильного инструмента, так и режима бурения при соответствующих свойствах промывочной жидкости, может быть достигнуто более высокое значение показателя бурения, т. е.  $V_m$ .

Таким образом, разработанный метод, представленный на рис. 3 номограммой, позволяет количественно оценивать (прямая задача) эффективность процесса бурения с учетом параметров его реализации. Так как в исходную модель включены параметры, определяющие компоновку конструкции бурильного инструмента, свойства бурового раствора и режим бурения, имеется также возможность (обратная задача) определения их совместимого набора на уровне проектирования процесса бурения.

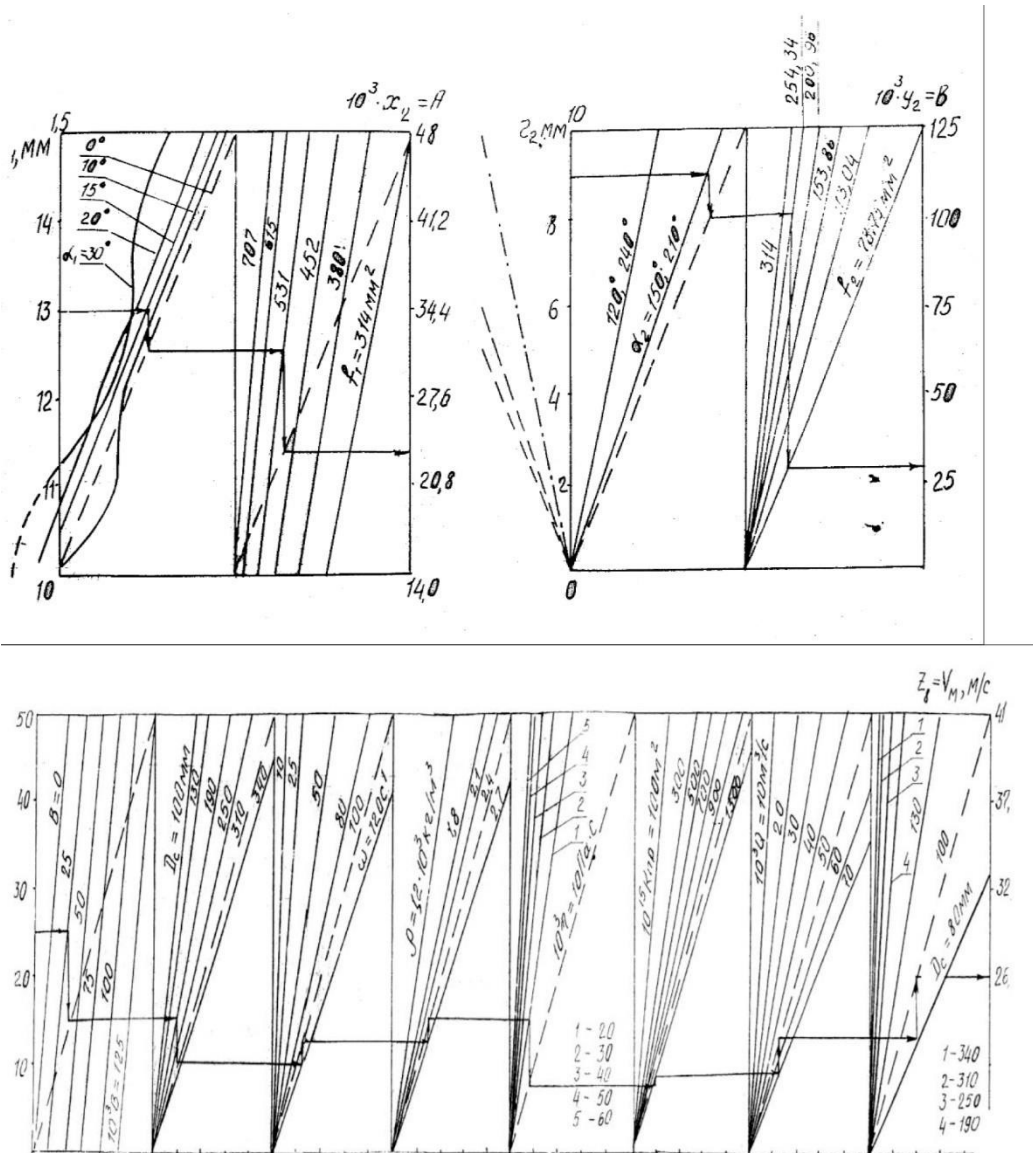


Рис. 3. Номограмма для проектирования параметров процесса бурения

### Выводы

1. Установлено, что при динамическом избыточном давлении эффективность производства буровых работ определяется группой факторов, объединяющих как технологические параметры, так и параметры промывочной жидкости и конструктивные характеристики системы промывки породоразрушающего инструмента

2. Разработан номографический метод проектирования совместимых сочетаний указанных групп факторов, обеспечивающих эффективность производства буровых работ в условиях динамического перепада давления.

*Розглянуто питання процесу руйнування гірських порід в умовах надлишкового перепаду тиску. Поставлено та розв'язано задачу визначення величини зусиль пригнічення і моментів при наявності надлишкового перепаду тиску. Для розрахунку підйомної сили (крутного моменту) струменя рідини витікає з промивних каналів долота використана теорія гідравлічних турбін. Для моделювання руху промивної рідини в процесі буріння в системі промивки долота використана теорема зміни її*

кінетичного моменту. Встановлено, що процес буріння в умовах надлишкового тиску пригнічення залежить від трьох груп параметрів, що визначають промивну рідину, конструкції свердловини і системи промивки долота. Розроблено номографічний метод проектування зазначених груп параметрів, що забезпечують ефективність виробництва бурових робіт.

**Ключові слова:** руйнування порід, надлишковий перепад, струмінь рідини, підйомна сила, кінетичний момент, група чинників, номограма.

#### **INFLUENCE OF THE EXCESSIVE DYNAMIC PRESSURE DROP DEPENDENCE ON THE EFFICIENCY OF DESTRUCTION OF ROCKS**

*The article deals with the process of destruction of rocks in conditions of excessive pressure drop. The problem of determining the magnitude of the depressing forces and moments in the presence of an excess pressure drop has been set and solved. The theory of hydraulic turbines is used to calculate the lifting force (torque) of the liquid jet flowing from the flushing channels of the bit. To simulate the motion of the drilling fluid during the drilling process, the theorem of changing its kinetic moment is used in the bit washing system. It has been established that the drilling process under conditions of excessive depressurizing pressure depends on three groups of parameters that determine the washing fluid, the well design and the flushing system of the bit. The nomographic method of designing the specified group of parameters that ensure the efficiency of drilling operations is developed.*

**Key words:** Rock failure, excess drop, fluid jet, lift, kinetic moment, group of factors, nomogram.

#### **Литература**

1. Бурение наклонных и горизонтальных скважин: Справочник/ А. Г. Калинин, Б. А. Никитин, К. М. Солодкий, Б. З. Султанов. – М.: Недра, 1997. – 357 с.
2. Вадецкий Ю. В. Бурение нефтяных и газовых скважин. – М.: Недра, 2000. – 424 с.
3. О кинетике процесса очистки забоя скважины от выбуренных пород / Р. А. Гасанов, Г. Н. Меджидов, А.С. Гюльгазли, Н.А. Меджидов // Нефтепромысловое дело. – № 9. – 2002. – С. 36–38.
4. Процессы разрушения горных пород и резервы повышения скоростей бурения / Н. А. Колесников, А. К. Рахимов, А. А. Брыков, А. И. Булатов. – Ташкент: Фан, 1989. – 188 с.
5. Масленников И. К. Усовершенствование бурового инструмента для нефтяных скважин. – М.: Издательство ЦИНТИхимнефтемаш, 1984. – 70 с.
6. Сеид-Рза М. К., Фараджев Т. Г., Гасанов Р. А. Предупреждение осложнений в кинетике буровых процессов. – М.: Недра, 1991. – 480 с.

*Поступила 05.06.17*