

УДК 622.666. 97

Б. В. Федоров, Б. Т. Ратов, А. Б. Шарауова

*Казахский национальный исследовательский технический университет
им. К.И. Сатпаева, г. Алматы*

МОДЕЛЬ УГЛУБЛЕНИЯ ЗАБОЯ СКВАЖИН PDC-ДОЛОТАМИ

Рассмотрена модель буримости для долот PDC, включающая три константы идентификации: начальную скорость, темп падения скорости из-за износа алмазно-твердосплавного вооружения во времени, и показатель степени, в которой возводится время.

Определена математическая зависимость начальной скорости бурения, PDC-долотами, включающая технологический режим, твердость буримой породы по штампу и конструктивные параметры долота (количество лопастей и пластин, размещенных на торце, их угол наклона к вертикали).

Для бурения скважин PDC-долотами на месторождении Узень (Казахстан) путем хронометража и статистической обработки данных установлены все константы идентификации и общая математическая модель процесса. Последняя графически представляет две сопряженные кривые, причем начальный участок кривой имеет вогнутую форму, а последующий участок – выпуклую, с крутым падением на заключительной стадии использования долота.

Установлена степень износа долота, зависящая от отношения минимальной скорости в конце буримого интервала к её максимальной величине в начале последнего. Стойкость PDC-долота составляет в среднем 4500 м, что в 7 раз выше, чем у применявшихся ранее шарошечных долот.

Ключевые слова: модель, забой, бурение скважин, долота, идентификация.

Для оценки эффективности процесса углубления скважины разрабатываются модели буримости.

Нами показано, что наиболее приемлемой моделью для долот PDC будет следующая зависимость скорости $\vartheta(t)$ углубления забоя скважины [1]:

$$\vartheta(t) = \vartheta_0 - \Delta\vartheta t^m, \quad (1)$$

где ϑ_0 – начальная скорость бурения за время, принятая в качестве базового кратковременного периода; $\Delta\vartheta$ – темп падения скорости бурения, главным образом, из-за износа вооружения долота; t – время бурения; m – показатель степени, характеризующий форму функции $\vartheta(t)$ (вогнутая или выпуклая).

Обычно начальная скорость ϑ_0 зависит от параметров технологического режима бурения и свойств породы. Для установления влияния этих параметров на скорость ϑ_0 рассмотрим первоначально процесс вдавливания элемента вооружения долота PDC, представляющего пластинку с тонким слоем поликристаллического алмаза, прочно сцепленного с твердосплавной основой (рис. 1). Пластинка наклонена под отрицательным углом γ к вертикали. Под действием силы C_0 , происходит её внедрение в забой на глубину h . В результате возникнут силы нормального давления N_1, N_2 и силы трения $F_1 = fN_1, F_2 = fN_2$ (f – коэффициент трения на контакте «пластинка – порода забоя»).

Решение уравнений равновесия (сумма проекция всех сил на оси x и y) дает формулы для сил N_1, N_2 [2]:

$$N_1 = \frac{f \sin \gamma - \cos \gamma}{f^2} C_0 ; N_2 = \frac{f \cos \gamma - \sin \gamma}{f^2} C_0 . \quad (2)$$

При перемещении резца влево (рис. 1) действие силы N_2 будет уравновешиваться нормальной составляющей контактной прочности породы $H_{вн}$, действующей перпендикулярно к алмазному слою пластины.

$$N_2 = H_{вн1} S_2 = H_b \sin \gamma l b = H_b \sin \gamma l \frac{h}{\cos \gamma}, \quad (3)$$

где S_2 – площадь, на которой действуют внутренние напряжения; H_b – контактная прочность породы; $H_b = 0,62 P_{ш}$ [3] ($P_{ш}$ – твердость породы по штампу); l – длина линии контакта пластины с забоем;

Остальные обозначения в (3) показаны на рис. 1.

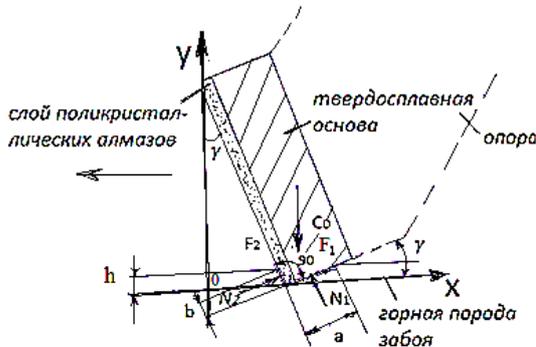


Рис. 1. Взаимодействие алмазно-твердосплавного резца с забоем

С учетом формул (2) для N_2 и (3) глубина внедрения алмазно-твердосплавного резца в забой будет:

$$h = \frac{(f \cos \gamma - \sin \gamma) C_0}{f^2 0,62 P_{ш} t g \gamma}. \quad (4)$$

Суммарная длина контакта пластинок, устанавливаемых на торцевой части лопасти долота, с забоем ориентировочно $l = K_1 R_g$ (R_g – радиус долота, K_1 – уменьшающий коэффициент, учитывающий размещение пластинок на лопасти с зазором; $K_1 \approx 0,7-0,9$).

Обозначив в (4) дробь $\frac{f \cos \gamma - \sin \gamma}{f^2 0,62 t g \gamma} = K_0$, число лопастей долота – m , чистоту его вращения – n , получим с учетом вышеупомянутых соображений следующую зависимость для скорости бурения:

$$v = \frac{K_0 m n}{K_1 R_g P_{ш}} C_0 \text{ [м/с]}. \quad (5)$$

Для определения зависимости скорости бурения от времени в течении длительного периода взаимодействия долота с забоем необходимы хронометражные наблюдения за изменением скорости и степенью износа инструмента в течение рейса, которые были проведены на крупном нефтегазовом месторождении Узень (Казахстан). Глубина продуктивных пластов на месторождении составляет 1200–1400 м, вмещающие породы представлены глинами, небразивными известняками, мергелями, песчаниками, относящимися к категории мягких и частично средней твердости пород. Наблюдения осуществляли при формировании скважины диаметром долота PDC 220,7 мм под эксплуатационную колонну диаметром 168 мм (интервал 220–1340 мм, занимающий 85% от общего метража скважины). Режим бурения под эксколону: осевая нагрузка – 40-50 кН, частота вращения долота PDC – 1–1,5 с⁻¹, для вращения использовался винтовой забойный двигатель 1330–1720; расход бурового раствора – 28–32 л/с.

Полученные данные были разделены на 4 группы в соответствии с принципом: количество интервалов бурения под эксколону, разбуреную долотом PDC. В результате обработки методами математической статистики массива из 116 скважин определили изменение скорости и средневзвешенная скорость бурения в каждой группе скважин, время бурения интервала и корреляционное отношение между упомянутыми величинами (см. таблицу).

**Показатели статистической обработки скорости бурения
долотами PDC по группам скважин**

№ группы скважин	Количество скважин в группе	Изменение скорости бурения, м/ч	Средневзвешенная скорость бурения $V_{ср}$, м/ч	Время бурения t , час	Корреляционное отношение τ
1	21	19–14	17,0	64,6	0,93
2	60	14–12	13,05	78,1	0,92
3	20	12–8	10,5	97,6	0,94
4	15	8–6,5	6,98	133,6	0,94

Установлено, что в результате последовательного бурения в группах скважин происходит постепенный износ долот PDC и снижение скорости бурения в соответствии с зависимостью

$$\sum_1^n A_{ин} = \left[\sum_1^n \left(1 - \frac{V_{минn}}{V_{максn}} \right) \right] \cdot 100\%, \quad (6)$$

где $A_{ин}$ – износ долота после бурения скважин в группе с номером n ; $U_{минn}$, $U_{максn}$ – соответственно минимальная и максимальная скорости бурения интервала под эксколону в группе скважин с номером n .

Расчет по формуле (6) показал, что после бурения интервала в скважинах 4-х групп износ долота составил 94%, т. е. почти полностью выработан: Всего долотом пройдено 4480 м, что в целом подтверждается практикой.

Время бурения интервала под эксколону в каждой группе скважин определялось по формуле:

$$t_n = \frac{S_{инт}}{v_{срn}}, \quad (7)$$

где $S_{инт}$ – средняя длина интервала, пробуренного под эксколону: для условий месторождения $S_{инт} \approx 1120$ м; $v_{срn}$ – средневзвешенная скорость бурения упомянутого интервала в группе скважин под номером n .



Рис. 2. Зависимости скорости U бурения долотом PDC (Казахстан) и шарошечным долотом III–215,9 НАТ (Китайская Народная Республика) в зависимости от времени t работы инструмента на забое скважин (1 – кривая с применением долот PDC; 2 – кривая с применением шарошечных долот).

Вычисленные величины времени t_n и t_n при $n = 1; 2; 3; 4$ приведены в таблице, что позволило получить зависимость $U(t)$, изображенную на рис. 2. В верхней части рис. 2 показаны время бурения интервала в зависимости от степени использования долота.

Модель буримости будем искать в виде уравнения (1). Так как кривая 1 имеет точку перегиба (точка А на рис. 2), то модель буримости будет представлена двумя уравнениями.

Константы ΔV и m определены по методике, изложенной в [7] и для рассмотренных условий:

– для верхней части БА кривой $\vartheta = f(t): \Delta V = 0,107$ м/ч; $m=0,83$; $V_0=18$ м/ч; – для нижней части АС кривой $\vartheta_1=f(t): \Delta V=0,037$ м/ч; $m=0,87$; $V_0=10,4$ м/ч.

Соответствующие модели буримости выглядят следующим образом:

$$\vartheta = 18 - 0,107t^{0,83}, \quad (0 \leq t \leq 170 \text{ ч}); \quad (8)$$

$$\vartheta_t = 10,4 - 0,037t^{0,87} \quad (170 \text{ ч} \leq t \leq 370 \text{ ч}). \quad (9)$$

Из (8) и (9) следует, что темп снижения механической скорости ΔV при бурении новым долотом интервала под эксколону в первой группе скважин значительно выше. Очевидно, это связано с конфигурацией алмазно-твердосплавных пластин, которыми армировано долото PDC.

До использования долот PDC бурение на месторождении Узень осуществлялось роторным способом. Формирование скважины под эксплуатационную колонну проводилось с применением шарошечных долот III-215,9 НАТ китайского производства.

Модель буримости для применявшихся долот III-215,9 НАТ (КНР) приведена ниже.

$$\vartheta_t = 8 - 0,018t^{1,3} \text{ м/ч}. \quad (10)$$

На рис. 2. приведена кривая 2, графически отображающая модель буримости (10).

Выводы

1. Установлена математическая модель начальной скорости бурения PDC-долотами, которая технологический режим твердость буримой породы по штампу и конструктивные особенности PDC-долот: число торцевых лопастей, угол установки алмазно-твердосплавных пластин и их количество на каждой лопасти.

2. Процесс взаимодействия PDC-долота с забоем скважины наиболее целесообразно моделировать математической зависимостью, включающую начальную скорость бурения, темп падения последней вследствие износа долота и показатель степени, в которой возводится время бурения.

3. Установлена количественная оценка степени износа долота PDC по отношению скоростей бурения в конце интервала углубления скважины к начальной скорости бурения этого интервала. Суммарный износ долота PDC равен сумме износов, которым долото подвергается при последовательном бурении интервалов. В конкретных условиях бурения интервала под эксколону (220–1340 м) в 4-х скважинах суммарный износ долота составил 94%.

4. Сравнительный анализ показателей бурения шарошечными долотами и долотами PDC показал, что последние по стойкости превышают шарошечные долота в 7 раз, а по производительности – в 1,8–2 раза.

Розглянуто модель буримості для долот PDC, що включає три константи ідентифікації: початкову швидкість, темп падіння швидкості через зношування алмазно-твердосплавного озброєння в часі, і показник ступеня, в якій зводиться час.

Визначено математичну залежність початкової швидкості буріння, PDC-долотами, що включає технологічний режим, твердість породи по штампу і конструктивні параметри долота (кількість лопатей і пластин, розміщених на торці, їх кут нахилу до вертикалі).

Для буріння свердловин PDC-долотами на родовищі Узень (Казахстан) шляхом хронометражу і статистичної обробки даних встановлено всі константи ідентифікації і загальну математичну модель процесу. Остання графічно являє собою дві поєднані криві, причому початкова ділянка кривої має увігнуту форму, а наступна ділянка – опуклу, з крутим падінням на заключній стадії використання долота.

Встановлено ступінь зносу долота, що залежить від відношення мінімальної швидкості в кінці буріння інтервалу до її максимальної величини на початку. Стійкість PDC-долота становить в середньому 4500 м, що в 7 разів вище, ніж у шарошкових долот, що застосовувалися раніше.

Ключові слова: модель, забій, буріння свердловин, долота, ідентифікація.

MODEL OF DEEP REFINING WELLS OF PDC WELLS WITH BIT

A model of drillability for PDC bits is considered, including for the identification constant: the initial speed, the speed drop rate due to wear of diamond-carbide weapons in time, and the exponent in which time is being built.

The mathematical dependence of the initial drilling speed, PDC-bits, including the technological regime, the hardness of the drilled rock on the die and the design parameters of the bit (the number of blades, the number of plates placed at the end of their angle of inclination to the vertical) is determined.

For the drilling of PDC chisels at Uzen (Kazakhstan), all the identification constants and the general mathematical model of the process are established by timing and statistical data processing. The latter graphically represents two conjugate curves, with the initial portion of the curve having a concave shape, and the subsequent portion convex, with a steep drop at the final stage of bit usage.

The degree of bit wear is determined, which depends on the ratio of the minimum speed at the end of the drill interval to its maximum value at the beginning of the latter. The durability of the PDC-bit averages 4500 m, which is 7 times higher than that of the previously used roller bits.

Key words: model, slaughter, well drilling, chisels, identification.

Литература

1. Федоров Б. В., Шарауова А., Аубакиров М. Т. О модели буримости нефтегазовых скважин долотами PDC на месторождении Узень // Вестн. КазНИТУ. – 2017. – № 1. – с. 84–90.
2. Породоразрушающий инструмент для геологоразведочных скважин / Н. И. Корнилов, В.С. Травкин и др. – М.: Недра. – 1979.
3. Спивак А. И., Попов А. Н. Разрушение горных пород при бурении скважин. – М.: Недра. – 1994.
4. Справочник по механическим и абразивным свойствам горных пород нефтяных и газовых месторождений / М. Г. Абрамсон и др. – М.: Недра. – 1984.
5. Буровой породообразующий инструмент / В. И. Балаба, И. К. Бикбулатов, Г. Н. Вышегородцева и др. – М.: изд-во центр РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина. – 2013.
6. Танатаров Т. Т., Билецкий М. Т. Основы научных исследований и оптимизация в бурении. – Алматы: РИК, 1998.
7. Левицкий А. З. Использование данных геологотехнического контроля для оптимизации бурения. – М: ВНИИОЭНГ, 1987.

Поступила 14.06.17

УДК 622.24.084:622.243.054.3-82:622.24.5.72:552.578

А. И. Вдовиченко^{1,2}, акад. АН Украины

¹Академия технологических наук Украины, г. Киев,

²Союз буровиков Украины, г. Киев

РЕКОРДНЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ В АЛМАЗНОМ БУРЕНИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИХ РЕАЛИЗАЦИИ

Исследованы результаты научно-производственного эксперимента по достижению рекордных показателей алмазного бурения, осуществленного в Олевской ГРП в августе 1977 года при разведке Пержанского месторождения бериллия, которые показали, что возможности традиционных технических и технологических средств, а также организации производства, далеко не исчерпаны, и при умелом использовании, они могут стать высоко конкурентно способными в современных условиях.