

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ГОРНОЙ ПОРОДЫ ПРИ РЕЗАНИИ-СКАЛЫВАНИИ РЕЗЦАМИ PDC

А.Н. Гаврилин, Б.Б. Мойзес, Ю.Б. Червач, В.Л. Рубцов, К.И. Борисов, К.В. Мельнов, А.Р. Хайруллин

Цель работы – изучение динамики и повышение надежности буровых машин. Описаны направления исследований в аспекте применения долот с композитными PDC резцами. Обоснована актуальность продолжения данных исследований. Рассмотрена установка для определения динамической твердости горной породы. Разработан план и методика проведения эксперимента. Проведен эксперимент по исследованию характеристик горной породы.

Ключевые слова: надежность оборудования, горная порода, бурение, долото PDC, прочностная характеристика, установка для проведения исследований, моделирование процессов разрушения.

ВВЕДЕНИЕ

При бурении в промышленном масштабе скважин различного назначения практически для всех типов горных пород в настоящее время широко используются долота с композитными (polycrystalline diamond compact). PDC резцы, работающие по принципу резания-скалывания, хорошо себя зарекомендовали вследствие положительных результатов их применения [1, 2]. Поэтому исследования схем установки резцов в долоте, их геометрических и размерных характеристик, параметров режима бурения PDC остаются актуальными, особенно в аспекте повышения эффективности разрушения горной породы, экономии ресурсов [3].

Во многих отечественных источниках информации, посвященных строительству скважин, представление о разрушении твердого тела базируются на утверждении, что образец, находящийся под действием нагрузки, не превышающей критического значения, не разрушается, в противном случае происходит разрушение [4].

Опыт показывает [5–7], что возможна другая точка зрения. В работах [5, 6] экспериментальные результаты при строгании-резании горной породы продемонстрировали зависимость осевой реакции от линейной скорости перемещения резца. При этом глубина срезаемого слоя оставалась постоянной. Такое поведение горных пород, по мнению автора, свидетельствует зависимости свойств прочности твердых тел от времени.

В работе [7] продемонстрировано, что твердость горной породы зависит от времени ее нахождения под действием разрушающей нагрузки.

Проведенные исследования и аналитические расчеты [8] также указывают на зависи-

мость уровня прочности твердого тела от времени действия силовых факторов. В практическом аспекте это означает, что количественное значение свойств прочности горной породы представляет собой функцию времени:

$$\sigma_i = \sigma(t). \quad (1)$$

Вышесказанное (1) идет в разрез с макроскопической теорией разрушения твердых тел, в которой представление о прочности связано с понятием критического процесса разрушения, наступающего при достижении предельной величины действующего фактора (нагрузки, гидравлического удара, электрического разряда и т.д.) [9–12].

Важным для исследования аспектом является расположение единичного резца PDC резца относительно горной породы, т.е. геометрия расположения резцов в долоте, выражаемая в пространственных углах взаимодействия горной породы с резцом.

В работе [13] отмечается, что силы резания песчаника 0,32 дюймовыми резцами минимальны при значениях главного заднего угла резца $\alpha = 10^\circ \dots 20^\circ$ независимо от скорости при повышении эффективности резания с увеличением глубины резания (при малой глубине резов до 0,02 дюйма).

Дальнейшие исследования [14] продемонстрировали перспективность применения резцов с $\alpha = 20^\circ$ в песчаниках, с $\alpha = 25^\circ$ в твердом граните (объясняется снижением величин скалывания, раскрашивания, и износа).

При комплексных испытаниях [15] (четыре PDC долота с $\alpha_1 = 7^\circ$, $\alpha_2 = 15^\circ$, $\alpha_3 = 20^\circ$, $\alpha_4 = 25^\circ$) в глинистых сланцах максимальная скорость проходки составила при $\alpha = 20^\circ$ при отсутствии влияния глубины резания единичного элемента на поведение PDC долот.

Авторы [16] утверждают об увеличении скорости проходки при уменьшении значения

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ГОРНОЙ ПОРОДЫ ПРИ РЕЗАНИИ-СКАЛЫВАНИИ РЕЗЦАМИ PDC

α и оптимальности его значения при $\alpha = 10^\circ$ для бурения в очень твердых породах (более долговечны, чем при $\alpha = 20^\circ$).

По результатам полевых исследований [17] долото, резцы которого имели $\alpha = 10^\circ$ пробурило Карфагенский мрамор в четыре раза быстрее, чем долото с $\alpha = 40^\circ$. Долото, которое имело комплексное сочетание режущих элементов с α в 7° , 10° и 15° градусов, продемонстрировало лучшие результаты, чем $\alpha = 10^\circ$.

Таким образом, конечной целью работы является разработка новой обоснованной с научной точки зрения методики исследования временной прочностной характеристики горной породы и комплексной оценки эффективности при работе при работе резцами PDC.

УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Авторами предложена установка механического резания (УМР) для реализации разработанной методики определения динамической твердости горной породы (рисунок 1) на базе токарного станка модели 1К62.

Принцип работы заключается в закреплении образца горной породы 1 (керн цилиндрической формы) в патроне 3 шпинделя

и осуществлении по разработанному плану эксперимента токарной обработки сборным инструментом 2 (режущая пластина долота класса PDC, державка, крепеж), установленным в резцедержателе 4.

В процессе резания резцом 2 керн 1 моделируется реальный процесс работы режущих элементов долот класса PDC. При этом схема действия силы резания подобна схеме действия силы при резании-скалывании резцами PDC горной породы, поэтому исследования, проводимые по данному принципу можно считать максимально соответствующими реальным процессам.

Регистрирующее силовое устройство Kistlertm 5 в составе динамометра модели 5233A, блока управления Kistler 5233A с программным обеспечением DynoWare располагается на резцовой каретке.

Данное устройство регистрирует силовые параметры эксперимента – составляющие силы резания P_x , P_y , P_z .

Акселерометры 6–8 при помощи магнитов крепятся в направлении действия составляющих силы резания.

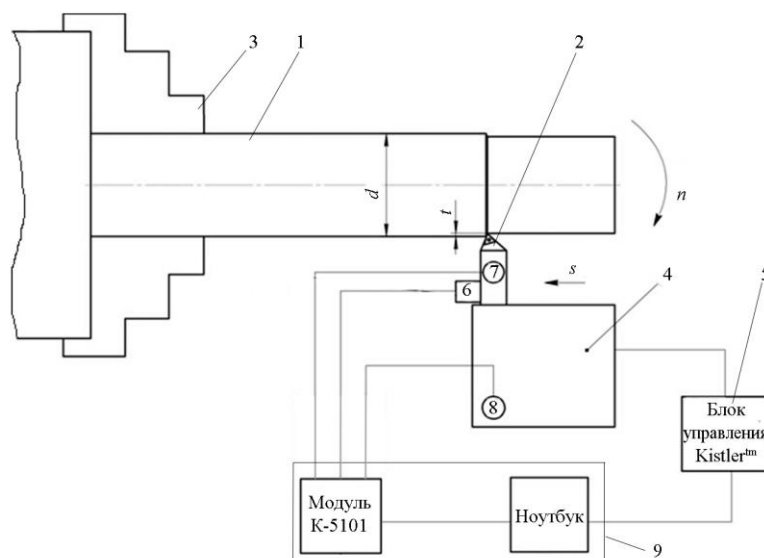


Рисунок 1 – Принципиальная схема УМР для проведения эксперимента: 1 – образец горной породы; 2 – сборный инструмент; 3 – трехлапчатый патрон; 4 – резцедержатель; 5 – регистрирующее силовое устройства марки Kistlertm; 6–8 – акселерометры; 9 – мобильный комплекс для оперативной диагностики элементов технологической системы

Мобильный комплекс для оперативной диагностики [18] состоит из:

- измерительного модуля K-5101 – подключение акселерометров, оцифровка сигналов;
- ноутбука с установленным программным обеспечением «Виброрегистратор-Ф» – обработка информации о вибрации, пред-

ставление результатов в виде временных и частотных диаграмм, запись отчетов.

В качестве исследуемых образцов пород использовались скважинные керны диаметром 80 мм различной жесткости.

При этом в ходе эксперимента можно смоделировать силовую картину динамиче-

ского резания керн в различных режимах разрушения – от истирания до объемного разрушения. Последний факт исключительно важен при получении требуемых силовых характеристик для расчета показателя динамической твердости.

Для упрощения проведения эксперимента и интерпретации данных промысловые агенты не использовались. Также при обработке керн не предусматривалось моделирование термобарических условий, приближенных к забойным.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Цель эксперимента на данном этапе – определение силовых факторов при условии, влияющих на процесс резания, для различных кернов.

Для отладки УМР на данном этапе был проведен двух факторный эксперимент при варьировании:

- глубины резания $t - x_1$;
- подачи – x_2 .

Диапазон варьирования глубины резания и подачи выбран из практических соображений – условий реального процесса и составит в ходе эксперимента 0,5...1,5 мм и 0,07...0,15 мм/мин соответственно при постоянной частоте вращения 160 об/мин (таблица 1).

В ходе эксперимента регистрировались значения следующих параметров процесса:

- составляющих силы резания;
- частоты и амплитуды колебаний.

В таблице приведены результаты эксперимента, анализ которых позволяет сделать вывод о режимах, наиболее оптимальных для обработки [19–24].

Так, например, при подаче $s = 0,15$ мм/об

предпочтительнее работать при глубине резания $t = 1,5$ мм, а не при $t = 1$ мм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В дальнейшем планируется расширить эксперимент дополнительными факторами:

- скоростью резания V (частотой вращения n) – x_3 ;
- главным задним углом резца $\alpha - x_4$.

Пределы заднего угла обратного наклона резца планируется варьировать в диапазоне 10...40°.

Скорость резания (м/мин) единичного резца PDC связана с частотой вращения долота n (об/мин) следующей зависимостью:

$$V = \frac{\pi \cdot d_d \cdot n}{1000}, \quad (2)$$

где d_d – диаметр долота.

При наиболее распространённом значении диаметра в 215,9 мм формула (2) преобразуется:

$$V = 0,678 \cdot n \quad (3)$$

При изменении частоты вращения долота в диапазоне 30...700 об/мин диапазон скоростей резания PDC элементом составит 20...475 м/мин. В эксперименте планируется принять следующие значения частот вращения: 160, 500, 800 об/мин.

В ходе эксперимента на различных режимах резания будет произведен сбор стружки с образцов керн для проведения гранулометрического анализа и дальнейшего сопоставления с результатами.

Работа была поддержана Грантом компании ВР эксплорейшн оперейтинг компании Лимитед.

Таблица 1 – Среднеквадратичные показания датчиков

Подача s , мм/об	Датчик								
	№1 (поз. 7, рис. 1)			№2 (поз. 8, рис. 1)			№3 (поз. 6, рис. 1)		
	Глубина внедрения, мм			Глубина внедрения, мм			Глубина внедрения, мм		
	0,5	1	1,5	0,5	1	1,5	0,5	1	1,5
0,07	3,266	3,973	4,540	6,417	13,709	16,448	6,400	9,760	11,744
0,11	4,2474	4,621	5,668	7,184	17,533	22,209	7,671	10,940	14,557
0,15	4,008	7,037	5,856	7,892	24,130	20,905	7,268	17,703	15,134

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пономарева, Л. Лучшие друзья нефтяников – алмазы. PDC долота все более востребованы на российских месторождениях / Л. Пономарева // Нефть и Газ ЕВРАЗИЯ. – 2012. – № 10. – С. 20–23.
2. Langeveld, C. J. PDC Bit Dynamics / C. J. Langeveld // The IADC/SPE Drilling Conference, New Orleans, Louisiana, USA, February 18-21, 2011. – С. 23867.
3. Brett, J. F. A New Theory of PDC Bit Failure /

- J. F. Brett, T. M. Warren, S. M. Behr, W. Bit // The 64th SPE Annual Technical Conference and Exhibition – San Antonio, Texas, USA. – October 8-11 2012. – С. 19571.

4. Пат. № 2204121 РФ МКП G01N3/40 Способ определения прочности горных пород и устройство для его реализации / А. Г. Архипов, Н. И. Корнилов, Ю. К. Целаки ; опубл. 10.05.2003, Бюл. № 11. – 3 с.

5. Борисов, К. И. Разработка научного метода объективной оценки процессов динамического разрушения горных пород инструментами режущими

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ГОРНОЙ ПОРОДЫ ПРИ РЕЗАНИИ-СКАЛЫВАНИИ РЕЗЦАМИ PDC

скалывающего действия класса PDC (часть II) / К. И. Борисов // Инженер-нефтяник. – 2011. – № 1. – С. 31–35.

6. Борисов, К. И. Влияние скорости резания на коэффициент сопротивления резанию горных пород / К. И. Борисов // Нефтегазовому образованию в Сибири – 50 лет. – Томск : Изд. ТПУ, 2002. – С. 254–255.

7. Борисов, К. И. Научный метод оценки эффективности динамических процессов разрушения горных пород при бурении скважин современными инструментами режуще-скалывающего действия : дис. ... д-ра техн. наук / К.И. Борисов. – Томск, 2012. – 193 с.

8. Нескоромных, В. В. Аналитическое исследование временной прочностной характеристики горной породы при резании-скалывании резцами PDC / В. В. Нескоромных, К. И. Борисов // Известия ТПУ. – 2014. – Т. 235, № 1. – С. 172–178.

9. Шрейнер, Л. А. Физические основы механики горных пород / Л. А. Шрейнер. – М. : Гостехиздат, 1950. – 211 с.

10. Шигин, А. О. Разработка идеализированной модели бурения горных пород с различными физико-механическими свойствами / А. О. Шигин, А. В. Гилёв // Фундаментальные исследования. – 2012. – № 3 (часть 3). – С. 665–667.

11. Горбачев, С. В. Калибровка детектора рентгеновского цифрового микротомографа на основе нечеткой сети кохонена / С. В. Горбачев, А. Ж. Казтаев, В. И. Сырякин, Е. Н. Богомолов, Г. В. Вавилова. // Контроль. Диагностика. – 2012. – № 13. – С. 94–96.

12. Seweryn, A. Verification of brittle fracture criterion for elements with V-shape notches / A. Seweryn, A. Lukaszewicz // Engineering fracture mechanics. – 2002. – Vol. 69, № 13. – P. 1487–1510.

13. Hibbs, Jr. L. E. Diamond compact Cutter Studies for Geothermal Bit Design / Jr. L. E. Hibbs, D. G. Flom // Journal of Pressure Vessel Technology, Transactions of the ASME. – 1978. – Vol. 100, № 4. – P. 406–416.

14. Hoover, E. R. Laboratory Evaluation of PDC Drill Bits Under High-Speed and High-Wear Conditions / E. R. Hoover, J. N. Middleton // Journal of Petroleum Technology. – 1981. – P. 2316–2321.

15. Hough, C. L. Jr. The Effect of Back Rake Angle on the Performance of Small-Diameter Polycrystalline Diamond Rock Bits / C. L. Jr. Hough // ANOVA Tests, Journal of Energy Resources Technology. – 1986. – Vol. 108. – P. 305–309.

16. Karasawa, H. Laboratory Testing to Design PDC Bits for Geothermal Well Drilling / H. Karasawa, S. Misawa // Drilling Technology ASME, PED. – 1992. – Vol. 40. – P. 135–141.

17. Sinor, L. A. The Effect of PDC Cutter Density / L. A. Sinor, J. R. Powers, T. M. Warren // Back Rake, Size and Speed on Performance, IADC/ SPE. – 1998. – P. 39306.

18. Gavrilin, A. Mobile complex for rapid diagnosis of the technological system elements / A. Gavrilin, B. Moyzes, A. Cherkasov, K. Mel'nov, X. Zhang // MATEC Web of Conferences. – 2016. – № 7. – P. 01078. – Режим доступа: <http://dx.doi.org/10.1051/mateconf/20167901078>.

19. Гаврилин, А. Н. Метод снижения уровня виб-

раций при механической обработке / А. Н. Гаврилин // Контроль. Диагностика. – 2013. – № 11. – С. 23–26.

20. Гаврилин, А. Н. Метод оперативной диагностики металлорежущего станка для обработки заготовок типа тел вращения / А. Н. Гаврилин, Б. Б. Мойзес // Контроль. Диагностика. – 2013. – № 9. – С. 81–84.

21. Гаврилин, А. Н. Конструктивные методы повышения виброустойчивости металлорежущего оборудования / А. Н. Гаврилин, Б. Б. Мойзес, А. И. Черкасов // Контроль. Диагностика. – 2013. – № 13. – С. 82–87.

22. Миляев, Д. В. Исследование первичного преобразователя измерителя емкости кабеля / Д. В. Миляев, Г. В. Вавилова, Е. И. Шкляр // Ползуновский вестник. – 2012. – № 2-1. – С. 168–170.

23. Гаврилин, А. Н. Диагностика технологических систем : учебное пособие. Часть 1 / А. Н. Гаврилин, Б. Б. Мойзес. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – 120 с.

24. Гаврилин, А. Н. Диагностика технологических систем : учебное пособие. Часть 2 / А. Н. Гаврилин, Б. Б. Мойзес; Томский политехнический университет. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 128 с.

Гаврилин Алексей Николаевич, к.т.н., доцент кафедры технологии машиностроения и промышленной робототехники Института кибернетики ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», e-mail: tom-gawral@list.ru.

Червач Юрий Борисович, к.т.н., доцент кафедры технологии машиностроения и промышленной робототехники Института кибернетики ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», e-mail: chervach@tpu.ru.

Мойзес Борис Борисович, к.т.н., доцент кафедры физических методов и приборов контроля качества Института неразрушающего контроля ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», e-mail: mhb@tpu.ru.

Рубцов Виталий Леонидович, ведущий инженер ОТПСС, ОАО «ТомскНИПИнефть», г. Томск, e-mail: proektant.burenie@gmail.com.

Борисов Константин Иванович, доцент, д-р техн. наук, советник директора ООО «Комплексные услуги безопасности», г. Томск, e-mail: kibor1956@gmail.ru.

Мельнов Кирилл Вячеславович, магистрант кафедры технологии машиностроения и промышленной робототехники Института кибернетики ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», e-mail: kvm11@tpu.ru.

Хайруллин Александр Римович, магистрант кафедры технологии машиностроения и промышленной робототехники Института кибернетики ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».