

15. Kutuzov B.N. *Metody vedeniya vzryvnykh работ: v 2-ch. Ch. 1. Razrushenie gornykh porod vzryvom* [Methods of blasting operations. In two parts. P. 1. Destruction of blasting operations]. – M.: Publishing house «Mountain Book». 2007. 512 p.
16. Krets V.G., Semenova T.A. *Otsenka nadezhnosti tekhnologicheskikh skhem provedeniya gornykh vyrabotok* [Evaluation of mining technological schemes reliability]. *Problemy nauchno-tekhnicheskogo progressa v burenii geologorazvedochnykh skvazhin. Sbornik dokladov nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Proc. scientific and technical conference. Problems of scientific and technological progress in drilling geological earth bores]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. House, 1991. pp. 172–175.
17. Lukyanov V.G., Komashenko V.N., Shmurygin V.A. *Vzryvnye работы* [Blasting operations]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. House, 2008. 404 p.
18. Rudakov V.M., Shenderov V.I. *Prokhodka gorizontalnykh gorno-razvedochnykh vyrabotok burovzryvnym sposobom* [Horizontal exploration boreholes drilling by drilling-and-blasting method]. Moscow, MGGA Publ., 2001. 57 p.
19. Shchukin A.A., Shmurygin V.A. *Vzryvnye i drugie работы v skvazhinakh* [Blasting and other operations in wells]. Ed. V.G. Lukyanov. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. house, 2006. 224 p.

УДК 622.243.2

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВРЕМЕННОЙ ПРОЧНОСТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГОРНОЙ ПОРОДЫ ПРИ РЕЗАНИИ-СКАЛЫВАНИИ РЕЗЦАМИ PDC

Борисов Константин Иванович,

д-р техн. наук, доцент кафедры бурения скважин Института природных ресурсов ТПУ, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30.

E-mail: kabor@tpu.ru

Рубцов Виталий Леонидович,

ассистент кафедры бурения скважин Института природных ресурсов ТПУ, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: proektant.burenie@gmail.com

Актуальность работы обусловлена отсутствием научно обоснованного физического механизма динамического внедрения в процессе резания-скалывания горных пород резцами при работе породоразрушающего инструмента режуще-скалывающего действия.

Цель работы: Разработка нового научно обоснованного способа комплексной оценки эффективности динамических процессов разрушения при работе современных инструментов режуще-скалывающего действия.

Методы исследования: Анализ современных представлений и теоретическое исследование проблем разрушения горных пород инструментами режуще-скалывающего действия. Для изучения работ, посвященных разрушению горных пород современными инструментами режуще-скалывающего действия, использован системно-целевой подход. Аналитические и экспериментальные исследования переходного и установившегося режимов работы, как единичного резца, так и бурового инструмента в целом, опирающиеся на научную базу математического и физического моделирования процессов и положений теоретической механики, сопротивления материалов, кинетической теории прочности. Сравнительное экспериментальное изучение процессов и механизмов статического и динамического внедрения при резании горной породы единичным разрушающим элементом на базе использования разработанной экспериментальной установки, имеющей оригинальные технико-технологические решения и необходимую поверенную точность результатов измерений цифровой силоизмерительной системы Kistler™.

Результаты: Исследована практическая и научная целесообразность разработки показателя «динамической твердости» горных пород для объективной оценки их поведения при работе инструментов режуще-скалывающего действия. Доказано, что разработка и использование нового показателя «динамической твердости» горных пород и методики его экспериментального определения являются актуальными методологическими шагами в развитии технологии оценки прочностных свойств горных пород при работе инструментов режуще-скалывающего действия для практических потребностей буровой геологоразведочной индустрии.

Ключевые слова:

Разрушение горной породы, бурение скважин, буровые долота PDC, прочностная характеристика, твердость горной породы, осевая нагрузка, моделирование процессов разрушения, частота вращения долота.

Введение

Для промышленного бурения скважин различного назначения практически во всем спектре горных пород в настоящее время применяются долота с композитными PDC (polycrystalline diamond compact) резцами, работающими по принципу резания-скалывания. О перспективности данного вида

вооружения и способа его взаимодействия с разрушаемой горной породой свидетельствуют положительные результаты применения указанных буровых инструментов и их высокая рыночная востребованность [1, 2].

В этой связи детальные исследования как схем установки резцов в долоте, геометрических и раз-

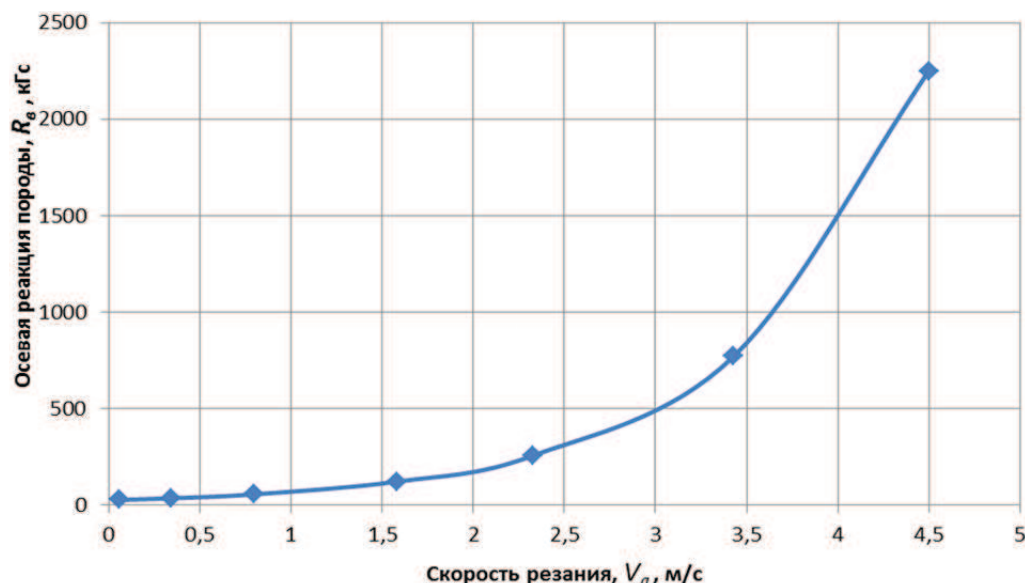


Рис. 1. Зависимость осевой реакции горной породы R_v от скорости резания v_p при постоянной величине срезаемого резцом слоя $h = \text{const}$

мерных характеристик вооружения, так и параметров режима бурения PDC, могут дать реальные результаты для повышения качества их изготовления, и показателей работы [3].

В работе [4, 5] экспериментально установлено, что осевая реакция разрушаемой горной породы при ее строгании-резании R_v при постоянной величине срезаемого слоя h зависит от линейной скорости перемещения реза по забою скважины. Аналитическая аппроксимация полученных экспериментальных данных представлена на рис. 1.

Авторы считают, что такое поведение горных пород при их разрушении наглядно свидетельствует о наличии временной зависимости свойств прочности твердых тел. Теоретический фундамент для объяснения данного явления предложен в 70-е годы научной школой физиков под руководством академика С.Н. Журкова. Выражение долговечности твердого тела под нагрузкой в соответствии с кинетической (термофлуктуационной) теорией имеет следующий вид [6–9]:

$$\tau = \tau_0 \cdot e^{\left[\frac{u(\sigma)}{kT} \right]}, \quad (1)$$

где $\tau_0 = 10^{-13}$ с – период собственных тепловых колебаний (флуктуаций) атомов; $u(\sigma)$ – потенциальный барьер разрушения (энергия активации разрушения), равный $u(\sigma) = u_0 - \gamma\sigma$; u_0 – энергия кристаллической решетки материала; γ – структурно-чувствительный коэффициент с размерностью объема; σ – действующее напряжение; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура.

В практическое развитие термофлуктуационной концепции в работе [10] проведены оригинальные вероятностные расчеты зависимости долговечности кристаллического твердого тела (каменной соли) от уровня снижения его потенциального барьера разрушения за счет действия внешнего ме-

ханического напряжения (нагрузки) σ . Расчеты показали, что она носит экспоненциальный характер (рис. 2), и это соответствует графическому представлению выражения (1).

Проведенные нами исследования и аналитические расчеты (рис. 3) также указывают на то, что фактическое проявление уровня прочности твердого тела существенным образом зависит от времени действия разрушающего усилия (напряжения). На практике это означает, что количественная характеристика свойств прочности любого твердого тела (горной породы) должна представлять собой не определенную предельную величину, а временную функцию прочности $\sigma_t = \sigma(\tau)$.

Это явно противоречит макроскопической теории разрушения твердых тел, где представление о прочности и устойчивости твердых тел связывается с критическим (катастрофическим) понятием процесса разрушения, наступающего при достижении действующего фактора – силовой нагрузки, электрического разряда, гидравлического удара и т. д. – некоторой предельной величины [11–14].

Представления о критическом разрушении твердого тела основываются на простом и понятном наблюдении, что образец, находящийся под действием нагрузки ниже определенного предела, не разрушается, а в случае действия нагрузки критической величины образец немедленно разрушается [15]. Как показывают приведенные здесь экспериментальные данные, такое понимание процессов сопротивления горных пород разрушению не соответствует реальной действительности. Фактически доказано [16], что изменение времени нахождения горной породы под разрушающей нагрузкой приводит к изменению характеристики ее прочности, в частности твердости.

Интересные материалы по скоростному «упрочнению» горной породы при резании-скалы-



Рис. 2. Зависимость времени процесса разрушения твердого тела τ от уровня потенциального барьера $u(\sigma)$, снижаемого действующим напряжением σ



Рис. 3. Зависимость долговечности твердого тела τ от величины механической энергии (напряжения) σ , снижающей потенциальный барьер разрушения

вании инструментами PDC представлены в работе [17]. Предложено объяснять причины роста параметра прочности σ при изменении динамических характеристик процесса резания-скалывания горной породы тем, что при повышении скорости перемещения резца перед ядром сжатия породы, т. е. на передней грани резца, не успевает образоваться («прорасти») синхронно с перемещением резца трещина отрыва АВ (рис. 4, а). В результате резец испытывает увеличивающееся сопротивление породы и стремится снизить глубину резания-скалывания породы до той величины, при которой трещина отрыва породы А1 В1 (рис. 4, б) успеет сформироваться, и происходит синхронное с движением резца отделение породы на его передней грани [17].

Для сохранения прежней глубины резания-скалывания горной породы при повышении частоты вращения инструмента авторы рекомендуют повышать осевую нагрузку на инструмент. Такое

видение реального процесса стружкообразования горной породы при ее резании PDC долотом не противоречит, а соответствует концепции временной зависимости прочности твердых тел.

Методика определения «временной» прочностной характеристики горной породы

В работах [16, 18] предложена методика определения «динамической» твердости горной породы, которая максимально моделирует реальные процессы работы режущих элементов долот класса PDC. Лабораторный комплекс, реализующий разработанную схему и требования к техническим средствам нового метода оценки динамической твердости горных пород при резании, получил название УМР – установка механического резания горных пород.

В установке использовано регистрирующее силовое устройство – 3 с режущим элементом – 1 в держателе – 2, которое размещено неподвижно на

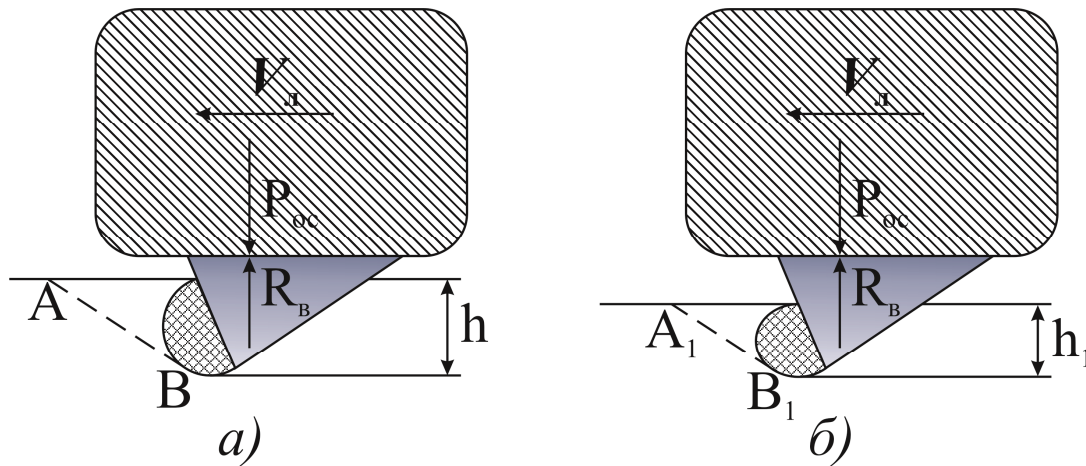


Рис. 4. Схема для анализа процесса резания-скалывания породы резцом PDC: а) при более низкой частоте вращения; б) при более высокой частоте вращения [6]

массивной платформе – 4, а закрепленный в зажимном устройстве – 6 образец горной породы – 5 перемещает специальный механизм – 7 относительно этого режущего элемента (рис. 5).

В качестве исследуемых образцов пород принято решение об использовании скважинного керна различных диаметров (от 40 до 100 мм) и длины не менее 15 см, фиксируемого на подающей раме под определенным углом α к плоскости движения механизма. В качестве подающей рамы – 7 используется плунжер механического строгального станка.

Такое техническое решение позволило после полного прохода керна вдоль закрепленного резца получать в горной породе нарастающий по глубине «след» от срезанной горной породы h_i .

При этом за один эксперимент фактически удается провести моделирование силовой картины динамического резания керна образца во всех известных режимах разрушения горных пород – от истирания до объемного разрушения горной породы. Последнее исключительно важно при получении необходимых силовых характе-

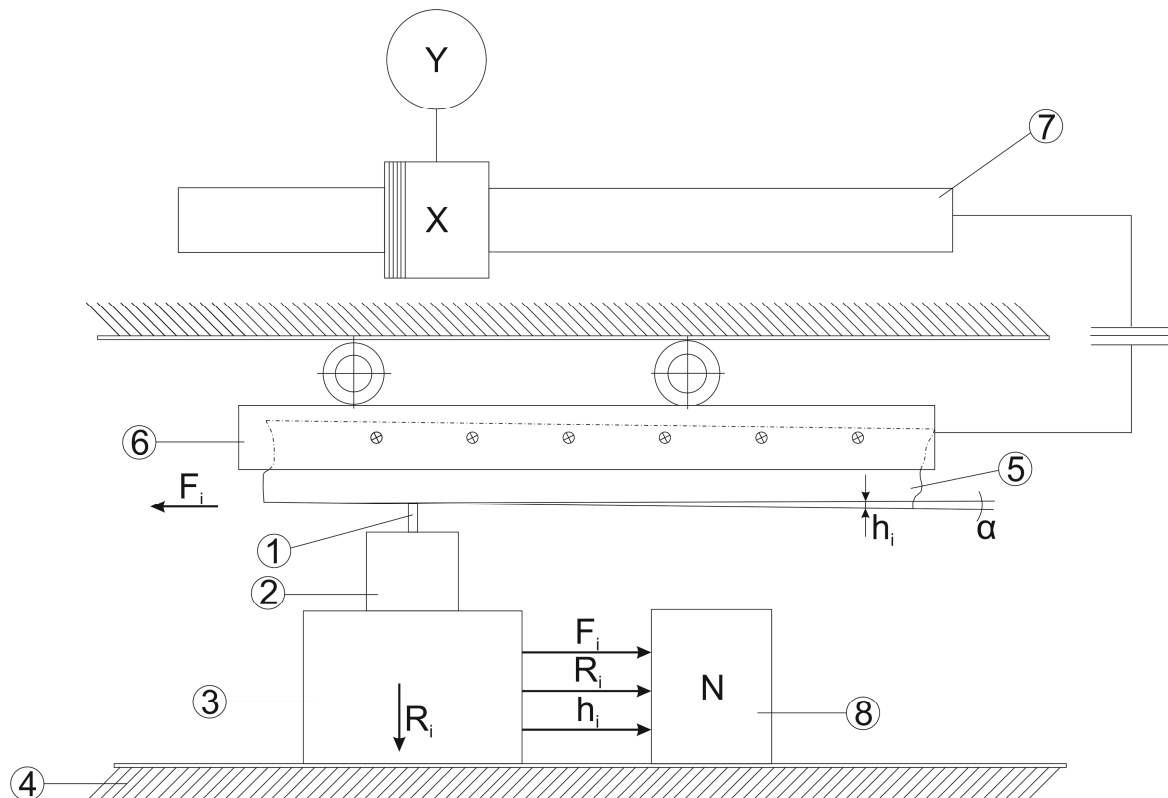


Рис. 5. Комплекс УМР для определения динамической твердости горных пород: 1 – режущий элемент долота класса PDC, 2 – держатель, 3 – регистрирующее силовое устройство Kistler™, 4 – платформа, 5 – образец горной породы, 6 – кернодержатель, 7 – механизм подачи, 8 – преобразователь сигнала

ристик для расчета показателя динамической твердости.

Силовые параметры эксперимента на режущем элементе – выталкивающая (осевая) сила R_i и сила резания F_i – регистрируются цифровым динамометром немецкого производителя KistlerTM, усиливаются и записываются после преобразования на компьютер – 8. Для получения статистических характеристик по указанным исходным данным, т. е. для повторных экспериментов, керновый образец проворачивается в зажимном устройстве на угол 5–8 градусов и закрепляется вновь. При имеющей место вариации исследуемого признака количество экспериментов для получения достоверного искомого показателя R_i обычно не достигает первого десятка.

В качестве образцов для исследований и получения динамического показателя твердости горных пород методикой предусмотрено использование, как правило, обычного специально не подготовленного скважинного керна: песчаники, алевролиты с нефтяных месторождений Томской области. Это значительно упрощает проведение массовых экспериментальных работ по накоплению статистических данных показателей динамической твердости горных пород различных категорий.

Методикой для упрощения проведения лабораторных экспериментов и интерпретации данных не предусматривалось использование промысловых агентов и моделирование термобарических условий, приближенных к забойным. Удаление стружки из резцов происходило за счет сил гравитации.

Методика [16] предполагает определение характеристики твердости путем измерения реакции R_B , возникающей при резании образца (керна) испытуемой горной породы на специальной установке в установившемся режиме, и соотношения этой

силы к площади контакта стандартного режущего элемента с породой S_K , формула (2).

$$H_{\text{ВД}} = \frac{R_B}{S_K}. \quad (2)$$

Схема и методика получения исходных данных для расчета показателя $H_{\text{ВД}}$, не только наглядно воспроизводит работу режцового инструмента PDC во всех режимах разрушения горных при их резании-скалывании, но и учитывает изменение сопротивления горной породы разрушающим усилиям при соответствующем изменении скорости их приложения.

Результаты и их обсуждение

Таким образом, важным научным аспектом предложенного в [18] метода является представление показателя сопротивления горной породы внедрению при ее резании-скалывании (твердости), как функции от скорости процесса разрушения, определяемого скоростью перемещения режущего элемента (рис. 6).

Изучение полученной зависимости показывает реальные масштабы времени, в течение которого разрушаемая порода находится под нагрузкой перемещающегося резца. В частности, для диапазона скоростей, представленных на рис. 6, при размерах контактной площадки в 2 мм этот диапазон находится в пределах от $4 \cdot 10^{-2}$ до $4 \cdot 10^{-4}$ с. Такой диапазон долговечности твердого тела под нагрузкой близок к оценкам автора [4], по данным которого время статического и динамического взаимодействия находится в пределах 10^3 – 10^{-4} с.

Фактически в основу методики [16] положена концепция не предельного критерия твердости горной породы, а предельной прочностной функции, связывающей статическое и динамическое ее разрушение при резании-скалывании в единый процесс на базе фундаментальных закономерностей природных явлений.

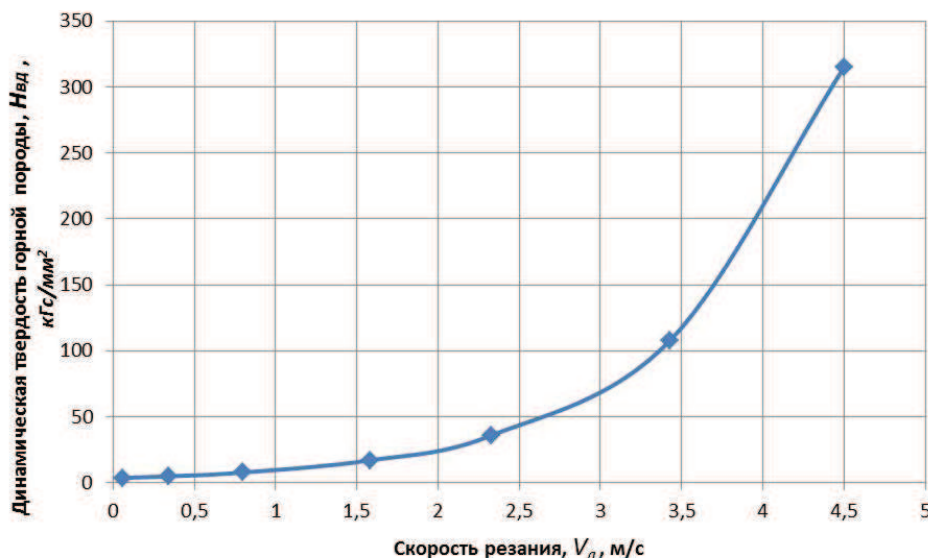


Рис. 6. Зависимость величины динамической твердости горной породы $H_{\text{ВД}}$ от скорости резания V_n при постоянной величине срезаемого резцом слоя $h = \text{const}$; размер площадки контакта резца с горной породой $\delta = 2$ мм.

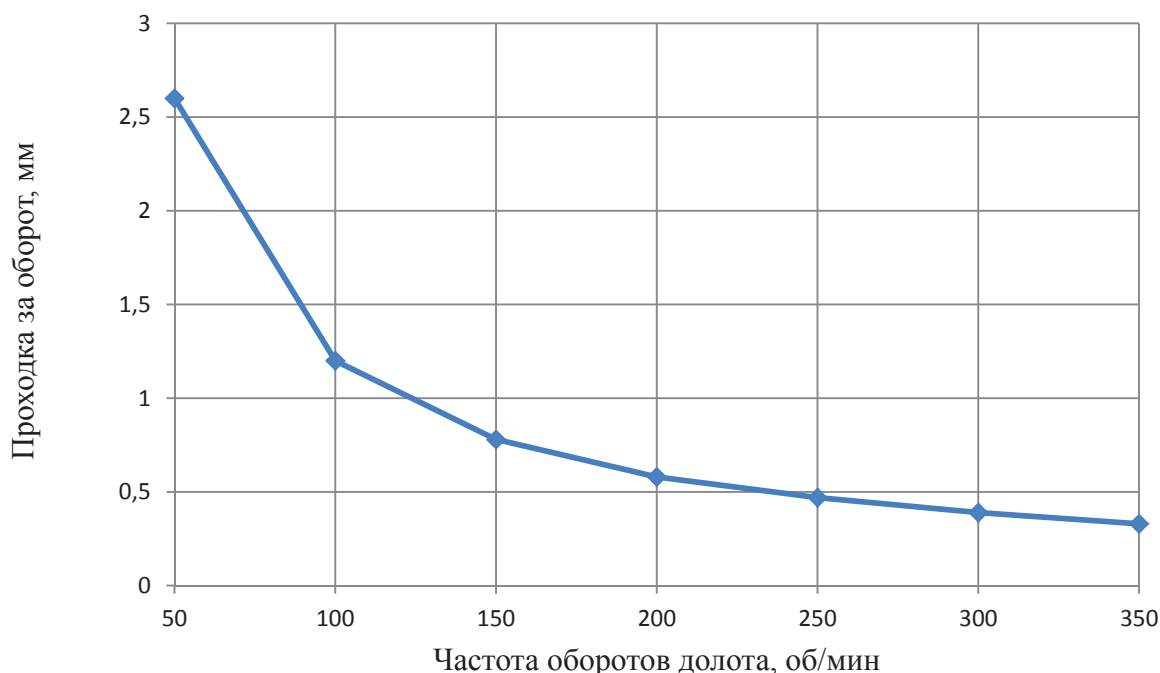


Рис. 7. Характер изменения глубины срезаемого слоя с ростом частоты оборота долота при неизменной нагрузке

Изменение прочностной характеристики разрушаемой горной породы с увеличением скорости процесса резания-скалывания напрямую влияет на результаты работы долота PDC. В частности, исследованиями показано, что с увеличением частоты вращения механическая скорость бурения при неизменной нагрузке G_0 меняется незначительно, либо не меняется совсем [19], вне зависимости от режима разрушения: поверхностного, усталостного или объемного.

Рост объема механической работы разрушения горных пород с повышением интенсивности вращения долота при неизменной осевой нагрузке на него «поглощается» снижением толщины слоя, срезаемого за один оборот. Фактически имеет место процесс «выталкивания долота» за счет эффекта «динамического упрочнения» разрушаемой горной породы [20].

На рис. 7 представлена фактическая экспериментальная картина изменения глубины резания за оборот долотом режуще-скалывающего действия диаметром 215,9 мм при постоянной нагрузке в 3,5 тс с ростом частоты его оборотов.

При таком характере «выталкивания» долота с ростом скорости его вращения механическая скорость бурения практически не меняется.

Объективной физической основой такого поведения горных пород под действием динамических разрушающих сил является зависимость скорости распространения многоэтапного процесса отделения (дизинтеграции) частиц породы от монолита, от уровня внешней разрушающей силы (напряжения) согласно фундаментальной кинетической теории, представленной выражением (1).

В реальном динамическом процессе резания горной породы инструментом режуще-скалываю-

щего действия время на процессы разрушения детерминировано конкретной скоростью перемещения резцов долота по забою или частотой оборотов инструмента. Поэтому увеличение линейных скоростей перемещения резцов по разрушаемой горной породе и, следовательно, уменьшение времени на процессы разрушения для сохранения результата (глубины) разрушения, объективно требует увеличения внешней (осевой) нагрузки на долото.

Однако если процесс бурения скважины идет при запроектированной неизменной осевой нагрузке на долото, то уменьшение времени взаимодействия резцов и породы в каждой конкретной точке разрушаемого забоя приводит к уменьшению глубины (объема) распространения дезинтеграционных процессов в монолите горной породы. Следовательно, глубина динамического резания породы в любом режиме разрушения для конкретной нагрузки снижается (рис. 6), что и проявляется при реальной работе инструментов режуще-скалывающего действия.

И наоборот, если физический эксперимент реализует неизменную глубину динамического резания, то происходит возрастание реакции породы или силы, необходимой для увеличения скорости распространения разрушающих процессов в породе и сохранения объемов разрушения (рис. 2). Данный факт многократно подтвержден экспериментально.

Заключение

Практическое значение и область возможного применения временной прочностной характеристики горных пород для процессов резания-скалывания при бурении скважин инструментами PDC состоит в:

- 1) разработке принципиально новой классификации горных пород на основе временной прочностной характеристики для целей разработки оптимальной технологии промышленного бурения скважин современными долотами PDC;
- 2) внедрении предложенной характеристики в процедуру проектирования параметров режима бурения для конкретных горных пород, условий бурения и конкретного долота режуще-скалывающего действия;
- 3) разработке и внедрении принципиально новых схем размещения на одном радиальном сегменте (лопасти) долота PDC одновременно нескольких режущих элементов (резцов), имеющих пропорционально путям резания различные скорости динамического процесса резания;
- 4) разработке принципиально новых конструкций буровых долот, исключаящих различие в нагруженности режущих элементов, расположенных на периферии и на внутренних радиусах инструмента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пономарева Л. Лучшие друзья нефтяников – алмазы. PDC долота все более востребованы на российских месторождениях // Нефть и Газ ЕВРАЗИЯ. – 2012. – № 10. – С. 20–23.
2. Langeveld C.J. PDC Bit Dynamics // IADC/SPE Drilling Conference. – New Orleans, Louisiana, USA, February 18–21, 2011. – P. 23–28.
3. Brett J.F., Warren T.M., Behr S.M. Bit Whirl: A New Theory of PDC Bit Failure // 64th SPE Annual Technical Conference and Exhibition. – San Antonio, Texas, USA, October 8–11, 2012. – P. 46–62.
4. Борисов К.И. Разработка научного метода объективной оценки процессов динамического разрушения горных пород инструментами режуще-скалывающего действия класса PDC (Ч. II) // Инженер-нефтяник. – 2011. – № 1. – С. 31–35.
5. Борисов К.И. Влияние скорости резания на коэффициент сопротивления резанию горных пород // Нефтегазовому образованию в Сибири – 50 лет. – Томск: Изд-во ТПУ, 2002. – С. 254–255.
6. Петров Ю.В., Груздков А.А., Братов В.А. Структурно-временная теория разрушения как процесса, протекающего на разных масштабных уровнях // Физическая мезомеханика. – 2012. – Т. 15. – № 2. – С. 15–21.
7. Евстифеев А.Д., Груздков А.А., Петров Ю.В. Температурно-скоростная зависимость типа разрушения // Журнал технической физики. – 2013. – Т. 83. – Вып. 7. – С. 59–63.
8. Журков С.Н., Куксенко В.С. О прогнозировании разрушения горных пород // Изв. АН СССР. Сер. Физика земли. – 1977. – № 6. – С. 11–15.
9. Слуцкер А.И. Атомный уровень флуктуационного механизма разрушения твердых тел (модельно-компьютерные эксперименты) // Физика твердого тела. – 2005. – Т. 47. – Вып. 5. – С. 777–787.
10. Нейштетер И.А. Кинетическая природа статического и динамического разрушения горных пород // Межвузовский научный тематический сборник. – Екатеринбург: Уральская государственная горно-геологическая академия, 1998. – Вып. 21. – С. 53–67.
11. Шрейнер Л.А. Физические основы механики горных пород. – М.: Гостоптехиздат, 1950. – 211 с.
12. Шигин А.О., Гилёв А.В. Разработка идеализированной модели бурения горных пород с различными физико-механическими свойствами // Фундаментальные исследования. – 2012. – № 3 (Ч. 3). – С. 665–667.
13. Ewy R.T., Cook N.G.W. Deformation and fracture around cylindrical openings in rock. P. II. Initiation, growth and interaction of fractures // International Journal of Rock Mechanics, Mineral Science, and Geomechanical Abstracts. – 1990. – V. 27 (5). – P. 409–427.
14. Seweryn A., Lukaszewicz A. Verification of brittle fracture criterion for elements with V-shape notches // Engineering fracture mechanics. – 2002. – V. 69. – № 13. – P. 1487–1510.
15. Способ определения прочности горных пород и устройство для его реализации: пат. Рос. Федерация № 2204121; заявл. 21.02.00; опубл. 27.12.01.
16. 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. – Томск, 2012. – 193 с.
17. Нескоромных В.В., Борисов К.И. Аналитическое исследование процесса резания-скалывания горной породы резцами PDC // Инженер-нефтяник. – 2013. – № 3. – С. 1–3.
18. Борисов К.И. Научная база нового метода оценки эффективности процессов разрушения горных пород современными инструментами режуще-скалывающего действия // Вестник ЦКР Роснедра. – 2011. – № 4. – С. 51–58.
19. Третьяк А.Я., Литкевич Ю.Ф., Асеева А.Е. Научные основы создания многоярусных буровых долот режущего типа для бурения нефтяных и газовых скважин // Проблемы геологии и освоения недр юга России: Труды Междунар. конф. – Азов, Ростов н/д., 2006. – С. 176–178.
20. Adams M., Amadei B., Argon A.S. Drilling and Excavation Technologies for the Future. – Washington, D.C.: The National Academies, 2014. – P. 176–188.

Поступила 13.01.2014 г.

UDC 622.243.2

ANALYTICAL INVESTIGATION OF ROCK TEMPORAL STRENGTH PROPERTY AT PDC CUTTING

Konstantin I. Borisov,

Dr. Sc., Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue,
Tomsk, 634050, Russia. E-mail: kibor@tpu.ru

Vitaliy L. Rubtsov,

Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue,
Tomsk, 634050, Russia. E-mail: proektant.burenie@gmail.com

Relevance of the work is caused by the lack of science-based physical mechanism of dynamic introduction at rock cutting with chipping rocks cutters at operation of rock cutting action tool.

Objectives: to develop a new method of complex science-based evaluation of dynamic fracture process effectiveness at operation of new cutting action tools; to analyze new concepts and theoretical study of the problems of rock destruction with cutting action tools.

Methods: To study the works devoted to rock destruction with new cutting action tools the authors have used the system oriented approach. Analytical and experimental studies of transient and steady modes both of a single tool, and drilling tools in general, based on scientific and mathematical modeling of physical processes and the provisions of theoretical mechanics, strength of materials, the kinetic theory of strength. Comparative experimental study of the processes and mechanisms of static and dynamic implementation when cutting rock with a single destructive element based on application of the developed experimental station having original technical and technological solutions and necessary evaluate accuracy of measurement results of digital force measuring system Kistler™.

Results: The authors studied practical and scientific feasibility of developing the indicator of rock «dynamic hardness» for objective evaluation of their behavior at operation of cutting tools. It is proved that the development and use of a new indicator rock «dynamic hardness» and methods of its experimental determination are the relevant methodological steps in development of assessment technology for rock strength properties at operation of cutting action tools for practical needs of the exploration drilling industry.

Key words:

Rock destruction, well drilling, PDC drill bits, strength feature, rock hardness, axial load, fracture process simulation, speed bit.

REFERENCES

1. Ponomareva L. Luchshiye druzya neftyanikov – almazy. PDC dolota vse bolee vostrebovany na rossiyskikh mestorozhdeniyakh [A Best Friends of oil industry workers are diamonds. PDC bits are more in demand in Russian fields]. *Neft i Gaz YEVRASIYA*, 2012, no. 10, pp. 20–23.
2. Langeveld C.J. PDC Bit Dynamics. *IADC/SPE Drilling Conference*. New Orleans, Louisiana, USA, February 18–21 2011. pp. 23–28.
3. Brett J.F., Warren T.M., Behr S.M. Bit Whirl: A New Theory of PDC Bit Failure. *64th SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. San Antonio, Texas, USA, October 8–11 2012. pp. 46–62.
4. Borisov K.I. Razrabotka nauchnogo metoda obektivnoy otsenki protsessov dinamicheskogo razrusheniya gornykh porod instrumentami rezhushche-skalyvayushchego deystviya klassa PDC [Development of a scientific method of an objective assessment of processes of dynamic cutting of rocks by instruments of cutting action of the class PDC]. *Inzhener-neftyanik*, 2011, P. I, no. 1, pp. 31–35.
5. Borisov K. Vliyaniye skorosti rezaniya na koeffitsient soprotivleniya rezaniyu gornykh porod [Cutting speed effect on rock cutting resistance factor]. *Neftgazovomu obrazovaniyu v Sibiri – 50 let* [The 50th anniversary of oil-and-gas industry in Siberia]. Tomsk, TPU Publ. House, 2002. pp. 254–255.
6. Petrov Yu.V., Gruzdkov A.A., Bratov V.A. Strukturno-vremennaya teoriya razrusheniya kak protsessa, protekayushchego na raznykh masshtabnykh urovnyakh [The structural and time theory of destruction as a process proceeding at different large-scale levels]. *Fizicheskaya mezhmekhanika*, 2012, vol. 15, no. 2, pp. 15–21.
7. Evstifeev A.D., Gruzdkov A.A., Petrov Yu.V. Temperaturno-skorostnaya zavisimost tipa razrusheniya [Temperature and high-speed dependence of destruction type]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*, 2013, vol. 83, no. 7, pp. 59–63.
8. Zhurkov S. Kuksenko V. O prognozirovanii razrusheniya gornykh porod [Predicting rock destruction]. *Izvestiya Akademii Nauk SSSR. Seriya Fizika zemli*, 1977, no. 6, pp. 11–15.
9. Slutsker A.I. Atomny uroven fluktuatsionnogo mekhanizma razrusheniya tverdykh tel (modelno-kompyuternye eksperimenty) [Nuclear level of the fluctuation mechanism of solid body destruction (model and computer experiments)]. *Fizika tverdogo tela*, 2005, vol. 47, no. 5, pp. 777–787.
10. Neyshteter I.A. Kineticheskaya priroda staticheskogo i dinamicheskogo razrusheniya gornykh porod [Kinetic nature of static and dynamic formation failure]. *Mezhvuzovskiy nauchnyy tematicheskiy sbornik* [International scientific subject collection]. Yekaterinburg, Ural State Academy of Mining and Geology, 1998, no. 21, pp. 53–67.
11. Schreiner L.A. *Fizicheskiye osnovy mekhaniki gornykh porod* [Physical fundamentals of rock mechanics]. Moscow, Gostoptekhizdat Publ., 1950. 211 p.
12. Shigin A.O. Gilev A.V. Razrabotka idealizirovannoy modeli bureniya gornykh porod s razlichnymi fiziko-mekhanicheskimi svoystvami [Development of idealized model for drilling rocks with different physicommechanical properties]. *Fundamentalnye issledovaniya – Fundamental researches*, 2012, no. 3 (P. 3), pp. 665–667.
13. Ewy R.T., Cook N.G.W. Deformation and fracture around cylindrical openings in rock – part II. Initiation, growth and interaction of fractures. *International Journal of Rock Mechanics, Mineral Science, and Geomechanical Abstracts*, 1990, vol. 27 (5), pp. 409–427.
14. Seweryn A., Lukaszewicz A. Verification of brittle fracture criterion for elements with V-shape notches. *Engineering fracture mechanics*, 2002, vol. 69, no. 13, pp. 1487–1510.
15. Arkhipov A.G., Kornilov N.I., Tselaki Yu.K. *Sposob opredeleniya prochnosti gornykh porod i ustroystvo dlya ego realizatsii* [Method for rock durability determination and the device for its implementation]. Patent RF, no. 2204121, 2001.

16. Borisov K.I. *Nauchny metod otsenki effektivnosti dinamicheskikh protsessov razrusheniya gornykh porod pri burenii skvazhin sovremennymi instrumentami rezhushche-skalyvayushchego deystviya. Dokt. Diss.* [The scientific method of assessing the performance of dynamic processes of rock cutting when drilling by new tools of cutting action. Dr. Diss.]. Tomsk, 2012. 193 p.
17. Neskromnykh V.V., Borisov K.I. Analiticheskoe issledovanie protsessov rezaniya-skalyvaniya gornoj porody reztami PDC [Analytical study of rock cutting-shearing by PDC cutters]. *Inzhener-neftyanik*, 2013, no. 3, pp. 1–3.
18. Borisov K.I. Nauchnaya baza novogo metoda otsenki effektivnosti protsessov razrusheniya gornykh porod sovremennymi instrumentami rezhushche-skalyvayushchego deystviya [Scientific basis of a new method for assessing the effectiveness of rock destruction by modern cutting-shearing tools]. *Vestnik Tsentralnoy komissii po razrabotke mestorozhdeniy poleznykh iskopayemykh Rosnedra*, 2011, no. 4, pp. 51–58.
19. Tretiak A.Y., Litkevich Yu.F., Aseeva A.E. Nauchnye osnovy sozdaniya mnogoyarusnykh burovnykh dolot rezhushchego tipa dlya burenii neftnykh i gazovykh skvazhin [Scientific foundations for developing multilevel drill bits of cutting type for drilling oil and gas wells]. *Problemy geologii i osvoyeniya nedr yuga Rossii: Trudy Mezhdunarodnoy konferentsii* [Proc. International Conference. Problems of geology and exploration of interior of the south of Russia]. Azov, Rostov on Don, 2006, pp. 176–178.
20. Adams M., Amadei B., Argon A.S. Drilling and Excavation Technologies for the Future. Washington, D.C., *The National Academies*, 2014. pp.176–188.

УДК 622.277

СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ ПРИ ОТРАБОТКЕ ПРОДУКТИВНЫХ ПЛАСТОВ МЕТОДОМ СКВАЖИННОЙ ГИДРОДОБЫЧИ

Бондарчук Игорь Борисович,

ассистент кафедры бурения скважин Института природных ресурсов ТПУ,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: bond_ib@mail.ru

Рябчиков Сергей Яковлевич,

д-р техн. наук, профессор кафедры бурения скважин Института природных
ресурсов ТПУ, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30.
E-mail: kafedrabs@mail.ru

Актуальность работы обусловлена необходимостью отработки продуктивных пластов твердых полезных ископаемых методом скважинной гидродобычи. Основное достоинство метода заключается в том, что добычу полезных ископаемых можно проводить в сложных горно-геологических условиях, исключая проходку горных выработок и сооружение карьеров.

Цель работы: выявление и анализ основных способов, технических и технологических решений для реализации разрушения горных пород, всасывания и подъема гидросмеси на поверхность в процессе скважинной гидродобычи.

Методы исследования: анализ и обобщение литературных источников, а также производственных материалов по скважинной гидродобыче, бурению и эксплуатации скважин различного назначения.

Результаты: Выявлены основные способы разрушения горных пород, всасывания и подъема гидросмеси на поверхность в процессе скважинной гидродобычи. Приведено углубленное представление об основных технологических процессах скважинной гидродобычи, связанных с отработкой продуктивных пластов. Разработаны классификации, которые систематизируют и обобщают информацию о способах, технических и технологических решениях для реализации разрушения горных пород, всасывания и подъема гидросмеси на поверхность в процессе скважинной гидродобычи. Данные классификации позволяют значительно упростить методику выбора и усовершенствования рассмотренных технологических процессов для повышения производительности скважинной гидродобычи полезных ископаемых.

Ключевые слова:

Скважинная гидродобыча, технологические процессы, разрушение горных пород, отделение горных пород от массива, всасывание и подъем гидросмеси на поверхность.

К настоящему времени накоплен значительный опыт работ по скважинной гидродобыче (СГД) полезных ископаемых. СГД является одной из физико-химических технологий, основанной на приведении горных пород на месте залегания в подвижное состояние и выдаче их в виде гидросмеси (пульпы) на поверхность через скважины [1]. Технология и оборудование для СГД применяются в различных направлениях, основными из которых являются разведка и добыча твердых полезных ископаемых, сооружение фундаментов и противофильтрационных завес, интенсифика-

ция работы водозаборных скважин, газо- и нефтедобычи, создание подземных резервуаров различного назначения. Несмотря на значительный опыт работы в этих направлениях, широкого промышленного внедрения способ СГД до сих пор не получил. Одной из причин при этом является низкая производительность добычных работ. Поэтому исследование данной проблемы путем углубленных теоретических и лабораторных исследований, промышленных испытаний, а также проектно-конструкторских разработок является актуальной задачей.