



УДК 622.24.051.64

ОСОБЕННОСТИ СИЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ АЛМАЗНОГО РЕЗЦА НА ПОРОДУ В ПРОЦЕССЕ БУРЕНИЯ СКВАЖИН

FEATURES OF THE POWER IMPACT OF THE DIAMOND CUTTER ON THE ROCK IN THE PROCESS OF DRILLING WELLS

Нескоромных Вячеслав Васильевич

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой технологии и техники разведки,
института горного дела, геологии и геотехнологий,
Сибирский федеральный университет
sovair@bk.ru

Попова Марина Сергеевна

кандидат технических наук,
старший преподаватель
кафедры технологии и техники разведки
института горного дела, геологии и геотехнологий,
Сибирский федеральный университет
alleniram83@mail.ru

Харитонов Антон Юрьевич

кандидат технических наук,
сертифицированный LabVIEW-разработчик, инженер,
ООО «Витэк-Автоматика»
ant.kharitonov@gmail.com

Аннотация. Изучение механизма разрушения горной породы рабочей частью бурового инструмента позволяет обосновать и вовремя предпринять меры по улучшению производственного процесса бурения скважин. Несмотря на мелкие габариты системы взаимодействия алмазного резца с забоем, необходимо учитывать все факторы, влияющие на процесс разрушения им горной породы. Наиболее весомыми из них, влияющими на эффективность разрушения горной породы, являются силы способствующие внедрению резца в породу и оказывающие ему сопротивление. Внедрению резца в породу способствуют осевое и тангенциальное усилия, величины которых оказывают влияние на характер воздействия на породу. В процессе бурения сопротивление забоя может меняться в разной степени. Определение причин и степени изменения величины силы сопротивления является достаточно актуальной темой для научного исследования. Объектом исследований является механизм разрушения горной породы единичным алмазным резцом. В качестве методов приняты аналитический анализ и метод компьютерного моделирования, основанные на результатах экспериментальных данных. В результате исследования выявлен характер взаимного влияния осевого усилия, глубины внедрения резца в породу, коэффициента сопротивления внедрению резца в забой и тангенциального усилия.

Ключевые слова: буровой инструмент, алмазный резец, тангенциальное усилие, механизм разрушения, горная порода, сила сопротивления, имитационное моделирование.

Neskosromnykh Vyacheslav Vasilievich

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Head of the Department of Technology
and Technology of Prospecting,
Institute of Mining, Geology
and Geotechnologies,
Siberian Federal University
sovair@bk.ru

Popova Marina Sergeevna

Candidate of Technical Sciences,
Senior Lecturer,
Department of Technology and Exploration
Techniques Institute of Mining,
Geology and Geotechnology
Siberian Federal University
+7-950-995-40-03
alleniram83@mail.ru

Kharitonov Anton Yuryevich

Candidate of Technical Sciences,
Certified LabVIEW-Developer, Engineer,
ООО Vitek-Avtomatika
ant.kharitonov@gmail.com

Annotation. The study of the mechanism of rock destruction by the working part of the drilling tool allows you to justify and take timely measures to improve the production process of drilling wells. Despite the small dimensions of the system of interaction of the diamond cutter with the bottom, it is necessary to take into account all the factors influencing the process of destruction of the rock by it. The most significant of them, affecting the efficiency of destruction of the rock, are the forces promoting the introduction of the cutter into the rock and resisting it. The penetration of the cutter into the rock is facilitated by axial and tangential forces, the values of which affect the nature of the impact on the rock. During drilling, the bottomhole resistance can vary to a different extent. Determination of the causes and degree of change in the magnitude of the resistance force is a fairly relevant topic for scientific research. The object of research is the mechanism of rock destruction by a single diamond cutter. Analytical analysis and computer modeling method based on the results of experimental data are accepted as methods. As a result of the study, the nature of the mutual influence of the axial force, the depth of penetration of the cutter into the rock, the coefficient of resistance to the penetration of the cutter into the face, and the tangential force were revealed.

Keywords: drilling tool, diamond cutter, tangential force, fracture mechanism, rock, resistance force, simulation.

Результаты научных работ, посвященные исследованию работы алмазного породоразрушающего инструмента в процессе бурения скважины [1–12], указывают на необходимость тщательного изучения взаимодействия режущей его поверхности с горной породой.



При проведении производственного и экспериментального бурения алмазным породоразрушающим инструментом неоднократно наблюдался факт снижения углубления за оборот при повышении режимов бурения [6; 9; 10].

Согласно работе [9, 12], результаты которой основаны на экспериментальных данных, с ростом осевой нагрузки на инструмент растет коэффициент сопротивления внедрению резца в породу (μ_k), а с повышением частоты вращения (ω) показатель сопротивления снижается (рис. 1).

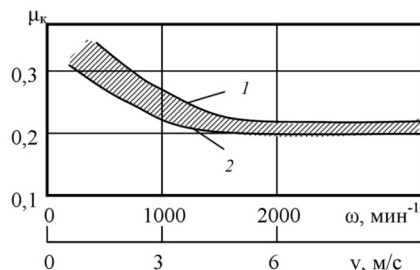


Рисунок 1 – Зависимость коэффициента сопротивления μ_k от линейной скорости перемещения резца (v) и частоты вращения (ω) при: 1 – осевой нагрузке 12 кН; 2 – осевой нагрузке 6 кН [9]

Данное явление можно объяснить путем аналитического анализа механизма разрушения горной породы алмазным резцом. Согласно схеме механизма разрушения породы (рис. 2) и ранее проведенным исследованиям [5], в процессе бурения на резец действует осевая нагрузка (P) и тангенциальное усилие (F).

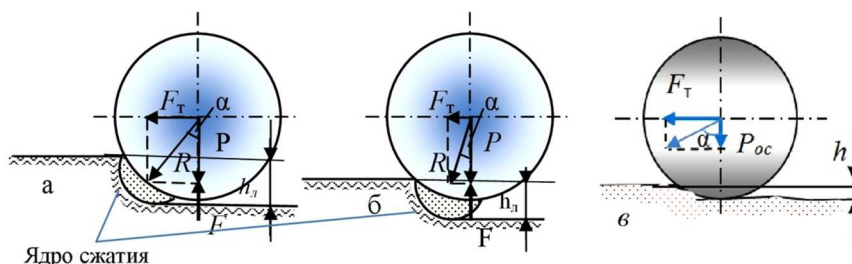


Рисунок 2 – Схемы взаимодействия с породой: а – тангенциальное и осевое усилия равны; б – тангенциальное усилие меньше осевого; в – тангенциальное усилие больше осевого

Результаты научного исследования механизма разрушения породы алмазом [11] показали, что глубина внедрения алмазного резца в породу зависит от множества факторов и определяется как:

$$h = \left(\frac{-0,25\sqrt{d} + \sqrt{(0,25\sqrt{d})^2 + 4 \frac{2\text{tg}\gamma_{\text{СК}}(P(1-\text{tg}\gamma_{\text{П}}f) - (0,25\pi^3 \cdot \omega^2 \cdot r^2 \cdot C_c \cdot \rho_c \cdot d \cdot H) \sin\gamma_{\text{П}}(\cos\gamma_{\text{П}} - f\sin\gamma_{\text{П}} + 1))}{\pi\sigma_{\text{СК}}\text{tg}\gamma_{\text{П}}(1+\text{tg}\varphi_{\text{П}})}}}{2} \right)^2 \quad (1)$$

где d – диаметр алмазного резца; $\sigma_{\text{СК}}$ – предел прочности породы на скалывание; H – выпуск алмаза; ω – частота вращения; ρ_c – весовая плотность среды с учетом плотности бурового раствора, насыщенного шламом из зоны разрушения и разрушаемой горной породы; $\varphi_{\text{П}}$ – угол внутреннего трения породы; $\gamma_{\text{СК}}$ – угол скола; C_c – коэффициент сопротивления со стороны резца, определяемый формой плоскости резца; f – коэффициент внешнего трения на контакте поверхность резца горная порода; $\gamma_{\text{П}}$ – передний угол алмаза.

Безусловно, рост осевой нагрузки на резец ведет к увеличению глубины его внедрения в породу, однако, при этом, согласно исследованиям [5], по мере роста глубины внедрения резца, повышается и сопротивление его внедрению. Коэффициент сопротивления находится по формуле:

$$\mu_k = \frac{N_c h \left(\sqrt{\frac{h}{d}} - \frac{0,25\pi^3 \cdot \omega^2 \cdot r^2 \cdot C_c \cdot \rho_c \cdot d \cdot H}{P} \right)}{h_{\text{Л}}} + f, \quad (2)$$

где N_c – число алмазных резцов, армирующих торец породоразрушающего инструмента; $h_{\text{Л}}$ – величина глубины лунки разрушения породы, которая определяется как $h_{\text{Л}} = 0,25\cos\alpha(2h + \sqrt{dh})$, где α – угол между осевым и результирующим усилием R [5] (рис. 2).



Выражение (2) указывает на то, что с ростом глубины внедрения резца в породу растёт и сопротивление, а также, что на ее величину оказывает влияние значение и частоты вращения.

В то же время, значение тангенциального усилия определяется зависимостью:

$$F_T = \frac{\mu_k P h_d}{N_c h} + 0,25 \pi^3 \omega^2 r^2 C_c \rho_c d H, \tag{3}$$

и, согласно данной зависимости, растёт по мере роста коэффициента сопротивления и осевого усилия.

Взаимное влияние на резец осевого и тангенциального усилий приводит к формированию результирующего усилия (R), направление действия которого оказывает существенное влияние на показатели разрушения горной породы и как следствие углубления за оборот инструмента в целом (см. рис. 2). В случае, когда осевое усилие равно тангенциальному, результирующее усилие своим действием направлена на переднюю грань резца, осуществляется резание породы, глубина разрушения породы равна глубине внедрения резца ($h = h_n$) (рис. 2, а). Если осевое усилие превышает тангенциальное, действие результирующего направлено под резец, образуется лунка разрушения, т.е. глубина разрушения превышает глубину внедрения резца ($h < h_n$) (рис. 2, а). Если тангенциальное усилие превышает осевое, резец скользит по поверхности забоя, практически не внедряясь в породу. Таким образом соотношение величин осевого и тангенциального усилий играет определенную роль в изменении углубления породоразрушающего инструмента. При этом, если осевое усилие регулируется прямым способом, то тангенциальное зависит от многих факторов и является побочным явлением. Анализ формул (1)–(3) показывает, что рост осевого усилия способствует увеличению глубины внедрения резца в породу, чем выше глубина внедрения резца в породу, тем выше сопротивление его внедрению, в тоже время одновременный рост осевого усилия и коэффициента сопротивления ведет к увеличению тангенциального усилия. А выражение (3) показывает четкую связь всех перечисленных показателей. Причем наглядна роль частоты вращения в формировании значений перечисленных показателей.

Итак, согласно аналитическим исследованиям, наблюдается тесная взаимосвязь и взаимное влияние следующих показателей: осевой нагрузки, глубины внедрения резца в породу, коэффициента сопротивления внедрению резца и тангенциального усилия. Чтобы подробно изучить и дать пояснения описанной взаимосвязи экспериментального метода недостаточно в виду слабой визуализации взаимодействия алмазного резца с породой. Эксперимент позволяет оценить лишь результаты бурения, косвенно указывая на промежуточные процессы и явления. В качестве научного метода изучения данного объекта применим метод компьютерного моделирования в системе LabVIEW. Среда графического программирования LabVIEW давно зарекомендовала себя как удобный и точный инструмент исследования в различных областях науки. Программа, написанная в LabVIEW, позволяет обработать сложный алгоритм взаимодействия параметров механизма разрушения, получить достоверные визуальные и расчетные результаты, описывающие картину распределения сил при внедрении алмазного резца в породу [11] (рис. 3). А анимация имитации работы резца точно демонстрирует изменение всех параметров механизма разрушения породы на любом этапе бурения.

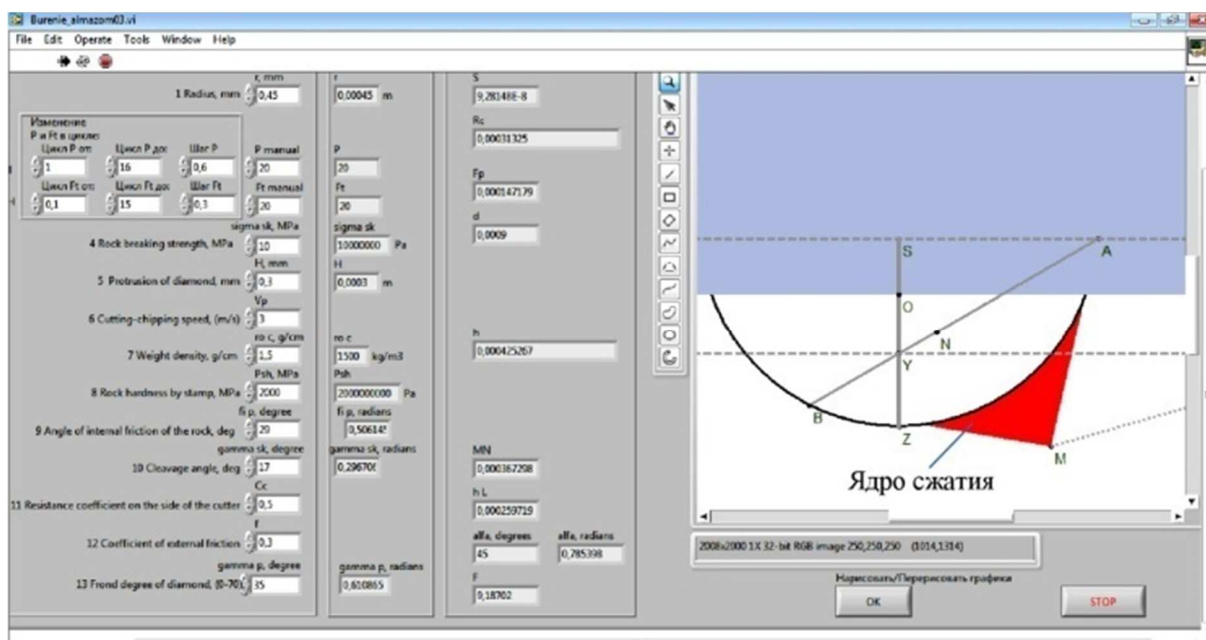


Рисунок 3 – Имитационное моделирование в системе LabVIEW



Используя программное обеспечение, рассмотрен случай, когда частота вращения постоянна, а осевое усилие непрерывно растет. Согласно результатам имитационного моделирования, представленных в виде графика на рисунке 4, на начальном этапе повышения осевой нагрузки коэффициент сопротивления падает. Это связано с тем, что при внедрении под действием осевой нагрузки резца в породу, под резцом образуется зона предразрушения породы. В таком состоянии породы сопротивление забоя падает и разрушенная порода под резцом легко поддается дальнейшему активному его внедрению. При этом рост величины лунки разрушения h_n незначительный, реализуется объемное разрушение породы. По мере роста осевого усилия постепенно отношение h / h_n падает, порода под резцом уплотняется так, что коэффициент сопротивления μ_k начинает расти и растет до тех пор пока не начинает оказывать выталкивающее воздействие на резец. Создается условие, когда часть растущего осевого усилия уже не реализуется на углубление резца в породу, а расходуется на увеличение тангенциального усилия, что отражено в выражении (3).

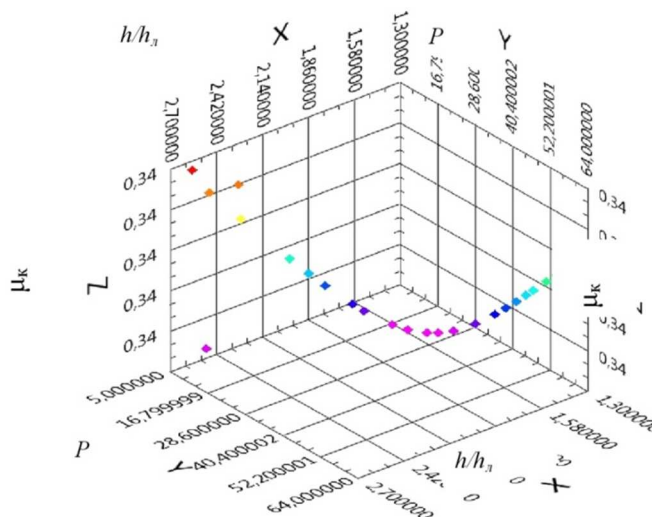


Рисунок 4 – Графическая интерпретация результатов компьютерного моделирования разрушения горной породы алмазным резцом

Согласно схеме механизма разрушения (рис. 2), рост тангенциального усилия F_T меняет направление действия вектора результирующего усилия R в сторону поверхности забоя, при этом величина глубины внедрения уменьшается. Таким образом, повышение осевой нагрузки приводит к падению углубления бурового инструмента.

для эффективного разрушения различных по свойствам пород должно быть реализовано соответствующее значение отношение h / h_n . Для пластичных и менее твердых горных пород – $h / h_n = 1$, что будет способствовать реализации резания породы, для более твердых и упругих горных пород – $h / h_n < 1$, что способствует раздавливанию. Учитывая результаты представленной работы, регулирование данного показателя возможно путем изменения режимов бурения, что особенно полезно в случае встрече в геологическом разрезе интервала часто перемежающихся пород.

Выводы:

1. Метод компьютерного моделирования является надежным инструментом научного исследования особенностей силового воздействия алмазного резца на породу в процессе бурения скважины.
2. Чрезмерное увеличение осевой нагрузки при неизменной частоте вращения может привести к снижению углубления бурового инструмента.
3. На степень изменения коэффициента сопротивления внедрению алмазного резца в породу влияет отношение величины глубины внедрения резца к величине глубины лунки разрушения (h / h_n).
4. Отношение h / h_n зависит от свойств горной породы и усилий, с которыми резец воздействует на породу.
5. Своевременное регулирование режимов бурения способствует стабилизации углубления за оборот.

Литература:

1. Принципы конструирования и эксплуатации алмазного породоразрушающего инструмента / А.А. Буканов [и др.] // Разведка и охрана недр. – 2013. – № 7. – С. 44–49.



2. Горшков Л.К., Осецкий А.И. Развитие принципов конструирования и эксплуатации нового алмазного породоразрушающего инструмента // Записки Горного института. – 2012. – Т. 197. – С. 40–45.
3. Brook B. Principles of diamond tool technology for sawing rock // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2002. – Vol. 39 (1). – P. 41–58.
4. Tonon F., Amadei B. Effect of elastic anisotropy on tunnel wall displacements behind a tunnel face // Rock Mechanics and Rock Engineering. – 2002. – № 35 (3). – P. 141–160.
5. Нескоромных В.В. Разрушение горных пород при бурении скважин. – М. : ИНФРА-М; Красноярск : Сибирский федеральный университет. – 2015. – 336 с.
6. Киселев А.Т., Крусир И.Н. Вращательно-ударное бурение геологоразведочных скважин. – М. : Недра, 1984. – 102 с.
7. Detournay E., Richard T., Shepherd M. Drilling response of drag bits: theory and experiment // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2008. – Vol. 45 (8). – P. 1347–1360.
8. Basarir H., Karpuz C. Preliminary estimation of rock mass strength using diamond bit drilling operational parameters // International Journal of Mining, Reclamation and Environment. – 2016. – Vol. 30 (2). – P. 145–164.
9. Борисов К.И. Современные методы оценки сопротивления горных пород резанию-скалыванию при бурении долотами PDC: монография. – ТПУ. – 2013. – 166 с.
10. Кардыш В.Г., Мурзаков Б.В., Окмянский А.С. Энергоёмкость бурения геологоразведочных скважин. – М. : Недра, 1984. – 201 с.
11. Нескоромных В.В., Попова М.С., Харитонов А.Ю. Влияние сил сопротивления на глубину резания-скалывания горной породы алмазным резцом // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 10. – С. 40–48.

References:

1. Principles of design and operation of diamond rock-cutting tools / A.A. Bukanov [et al.] // Exploration and protection of mineral resources. – 2013. – № 7. – P. 44–49.
2. Gorshkov L.K., Ossetsky A.I. Development of principles of design and operation of new diamond rock-destroying tools // Notes of the Mining Institute. – 2012. – Vol. 197. – P. 40–45.
3. Brook B. Principles of diamond tool technology for sawing rock // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2002. – Vol. 39 (1). – P. 41–58.
4. Tonon F., Amadei B. Effect of elastic anisotropy on tunnel wall displacements behind a tunnel face // Rock Mechanics and Rock Engineering. – 2002. – № 35 (3). – P. 141–160.
5. Neskromnykh V.V. Destruction of rocks when drilling wells. – М. : INFRA-M; Krasnoyarsk : Siberian Federal University. – 2015. – 336 p.
6. Kiselev A.T., Krusir I.N. Rotary-impact drilling of exploration wells. – М. : Nedra, 1984. – 102 p.
7. Detournay E., Richard T., Shepherd M. Drilling response of drag bits: theory and experiment // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2008. – Vol. 45 (8). – P. 1347–1360.
8. Basarir H., Karpuz C. Preliminary estimation of rock mass strength using diamond bit drilling operational parameters // International Journal of Mining, Reclamation and Environment. – 2016. – Vol. 30 (2). – P. 145–164.
9. Borisov K.I. Modern methods of estimating resistance of rocks to shear cutting while drilling with PDC bits: monograph. – TPU. – 2013. – 166 p.
10. Kardysh V.G., Murzakov B.V., Okmyansky A.S. Energy intensity of drilling exploration wells. – М. : Nedra, 1984. – 201 p.
11. Neskromnykh V.V., Popova M.S., Kharitonov A.Yu. Resistance forces influence on rock cutting-cutting depth by diamond cutter // Izvestia of Tomsk Polytechnic University. Georesource Engineering. – 2020. – Vol. 331. – № 10. – P. 40–48.