

Научная статья

УДК 622.24.051.55

DOI: 10.26730/1816-4528-2024-5-78-85

Буялич Геннадий Даниилович^{1*}, Хуснутдинов Михаил Константинович¹,
Хорешок Алексей Алексеевич¹, Лагунова Юлия Андреевна^{2,3},
Буялич Константин Геннадьевич¹

¹ Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева² Уральский государственный горный университет³ Уральский Федеральный университет им. Первого Президента России Б. Н. Ельцина

*E-mail: gdb@kuzstu.ru

ФОРМИРОВАНИЕ КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА НА ШАРОШЕЧНОМ ИНСТРУМЕНТЕ ПРИ ОБРАЗОВАНИИ СКВАЖИН С УГЛОВЫМИ КОНЦЕНТРАТОРАМИ НАПРЯЖЕНИЙ



Информация о статье

Поступила:

31 октября 2024 г.

Одобрена после
рецензирования:

15 ноября 2024 г.

Принята к печати:

22 ноября 2024 г.

Опубликована:

11 декабря 2024 г.

Ключевые слова:

бурение, буровой инструмент,
форма буровой скважины,
скважина, взрывная скважи-
на, шарошка

Аннотация.

Одной из основных проблем на разрезах при проведении вскрышных работ с помощью взрывания крепких вышележащих пород над пластом полезного ископаемого является снижение затрат на эти работы, заключающиеся в уменьшении объема буровых работ и уменьшении количества взрывчатых веществ, которые прямо влияют на себестоимость вскрышных работ.

В этом направлении на кафедре горных машин и комплексов Кузбасского государственного технического университета имени Т. Ф. Горбачева на протяжении нескольких лет ведутся работы по совершенствованию бурового инструмента для формирования буровых скважин под взрывчатые вещества некруглого сечения с угловыми концентраторами напряжений (например, квадратного сечения).

Отличительной особенностью такого бурения заключается в том, что для достижения такого эффекта используются серийные буровые станки вращательного бурения со специально разработанным шарошечным инструментом со своей геометрией и кинематическими связями.

В статье дана сравнительная оценка влияния формы скважины на изменение крутящего момента за один оборот бурового инструмента с различным количеством шарошек. Определено, что при равной площади поперечного сечения скважины на изменение крутящего момента оказывает влияние соотношение углов сопряжения стенок скважины и количества шарошек, а также степень скругления углов сопряжения стенок и их выпуклости. Установлено, что для уменьшения возмущения колебаний крутящего момента, среди рассмотренных сочетаний количества углов сопряжения стенок скважин и количества шарошек, следует использовать трёхшарошечное долото для образования четырёхугольной формы поперечного сечения.

Для цитирования: Буялич Г.Д., Хуснутдинов М.К., Хорешок А.А., Лагунова Ю.А., Буялич К.Г. Формирование крутящего момента на шарошечном инструменте при образовании скважин с угловыми концентраторами напряжений // Горное оборудование и электромеханика. 2024. № 5 (175). С. 78-85. DOI: 10.26730/1816-4528-2024-5-78-85, EDN: SILSPF

Образование некруглой формы поперечного сечения скважины при вращении бурового инструмента может происходить за счет его несбалансированной работы, либо за счет заданной конструкции бурового инструмента. В первом случае некруглая форма поперечного сечения является след-

ствием процессов, ухудшающих технико-экономические показатели процесса бурения скважины [1]. Во втором случае некруглая форма поперечного сечения обеспечивает наличие угловых концентраторов напряжений в горном массиве для управления энергией взрыва заряда, помещенного в

скважину [2–5], и работа бурового инструмента, напротив, должна обеспечивать заданную некруглую форму поперечного сечения скважины. Однако формирование некруглого поперечного сечения скважины и в этом случае привносит в процесс вращательного бурения особенности, которые могут носить отрицательное на него влияние.

Крутящий момент, возникающий при вращении шарошечного бурового инструмента, возникает из-за сопротивления качения шарошек по забой скважины, вызванного неровностями поверхности забоя скважины, характером изменения осевого усилия и наличием вооружения шарошек, трением вооружения шарошек по горной породе и сопротивлением её скалыванию при несовпадении мгновен-

ной оси вращения с вершинами вооружения шарошек, а также наличием смещения в плане осей шарошек. Исследованиям влияния различных факторов на формирование крутящего момента на буровом стае посвящены работы многих исследователей [6–21]. Кроме этого, известна зависимость крутящего момента на буровом инструменте от частоты его вращения [22]. Таким образом, определение крутящего момента на буровом инструменте является достаточно сложной задачей.

Образование шарошечным инструментом некруглой формы поперечного сечения происходит в результате переменного по углу поворота радиуса воздействия на забой скважины при перекачивании по нему шарошек, имеющих разную длину образу-

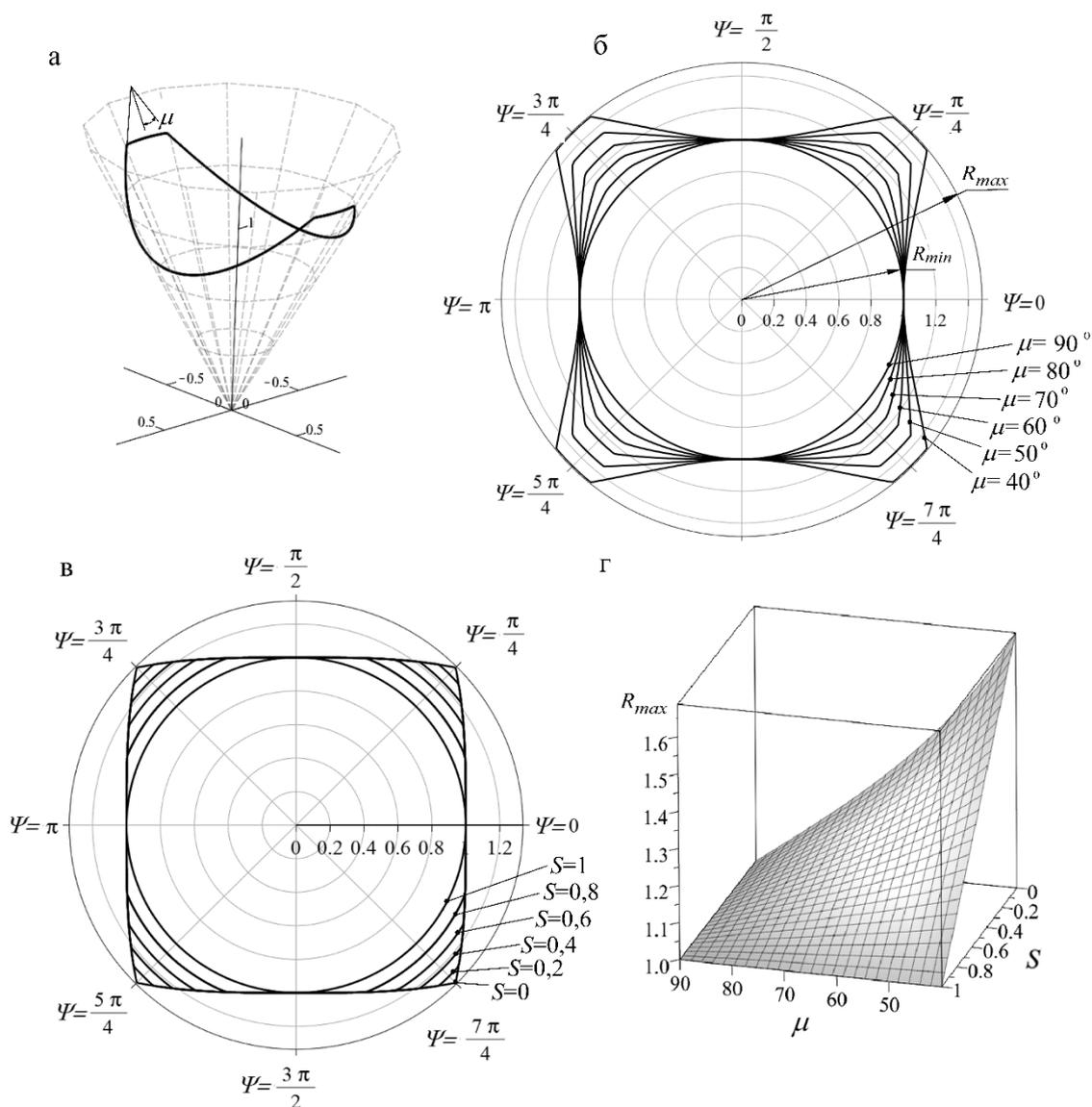


Рис. 1. Влияние формы калибрующей кромки шарошки (а), угла наклона секущей плоскости (б, при $S=0,3$) и степени скругления углов S поперечного сечения (в, при $\mu=60^\circ$) на максимальный радиус R_{max} некруглого поперечного сечения (г) при единичном радиусе вписанной него окружной $R_{min}=1$ и четырехугольной скважине

Fig. 1. The influence of the shape of the calibrating edge of the ball (a), the angle μ of inclination of the secant plane (b, at $S = 0.3$) and the degree of rounding of the corners S of the cross section (c, at $\mu = 60^\circ$) on the maximum radius R_{max} of the non-circular cross section (d) with a single radius of the circumferential $R_{min} = 1$ and a quadrangular borehole

ющих их конуса (рис. 1) [23–28]. В первом приближении для анализа влияния только формы поперечного сечения скважины на формирование крутящего момента можно пренебречь влиянием поперечных, продольных колебаний бурового инструмента, а также его крутильными колебаниями.

Таким образом, применительно к конструкции шарошечного бурового инструмента, изначально

предназначенного для формирования некруглого поперечного сечения, параметры некруглой формы скважины можно рассматривать как возмущающий фактор, влияющий на динамические процессы бурения скважины. Поэтому оценка этого фактора является этапом исследований, результаты которого необходимы для изучения процессов бурения в динамической постановке задачи [23].

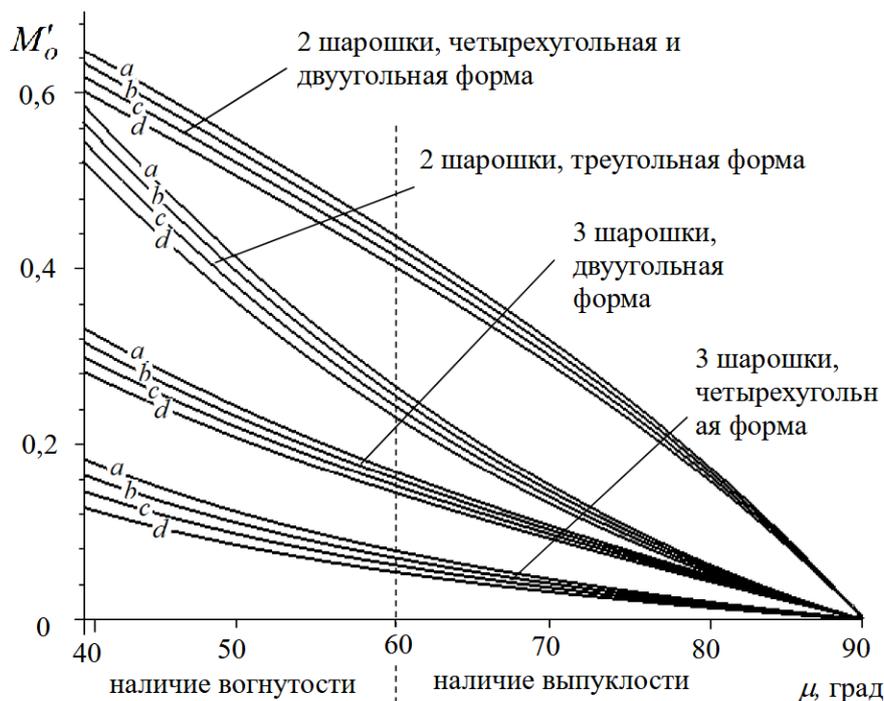


Рис. 2. Зависимость относительного размаха нормированных значений крутящего момента M'_o от формы поперечного сечения скважины, угла μ и количества шарошек при: а) $S=0$; б) $S=0,05$; в) $S=0,1$; д) $S=0,15$

Fig. 2. The dependence of the relative span of the normalized torque values M'_o on the shape of the cross-section of the well, the angle μ and the quantitative indicator at: а) $S=0$; б) $S=0.05$; в) $S=0.1$; д) $S=0.15$

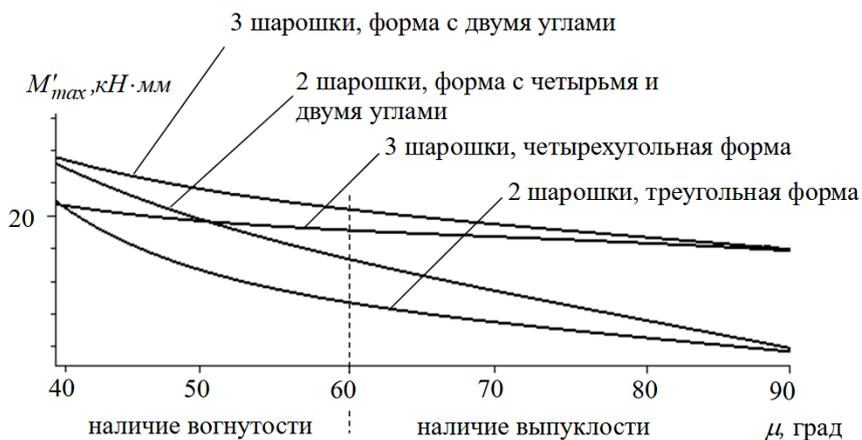


Рис. 3. Максимальные значения крутящего момента M'_{max} в зависимости от формы поперечного сечения скважины, угла μ и количества шарошек при $S=0$, $\gamma=15^\circ$ и площади поперечного сечения скважины, соответствующей площади круглого поперечного сечения скважины диаметром 216 мм (значения при пропорциональности силы сопротивления перекачиванию шарошек длине линии их контакта с забоем $1H=1\text{мм}$)

Fig. 3. The maximum values of the torque M'_{max} depending on the shape of the cross-section of the well, the angle μ and the number of balls at $S=0$, $\gamma=15^\circ$ and the cross-sectional area of the well corresponding to the area of the circular cross-section of the well diameter 216 mm (values for the proportionality of the resistance force to rolling of the balls to the length of their line of contact with the face $1H = 1\text{mm}$)

Учитывая выше названные допущения, шарошки представлены как гладкий недеформируемый конус, который обкатывается по гладкому недеформируемому забою скважины.

Крутящий момент описывается следующей зависимостью:

$$M' = \sum_{i=1}^m \frac{L_i}{2} P_i \approx \sum_{i=1}^m \frac{L_i^2}{2} = \sum_{i=1}^m \frac{1}{2} \left(\frac{R_i(\Psi, \mu, S)}{\cos(\gamma)} \right)^2,$$

где Ψ – угол поворота долота или угол поворота линии контакта кругового конуса шарошки с круговым конусом забоя скважины;

γ – угол наклона образующей конуса забоя скважины к плоскости, перпендикулярной её поперечному сечению;

R_i – радиус некруглого поперечного сечения, образуемый i -ой шарошкой;

μ – угол наклона секущей плоскости к оси вращения шарошки, образующей её калибрующую кромку;

S – степень скругления углов сопряжения стенок некруглого поперечного сечения, которая для скважин с 2-мя и 4-мя углами определяется, как

$$S_{2,4} = \frac{\sqrt{2} - \left(\frac{1}{\sin\left(\beta + \left(\frac{\pi}{4}\right)\right)} \right)}{\sqrt{2} - 1},$$

а для скважин с 3-мя углами, как

$$S_3 = 2 - \frac{1}{\sin\left(\beta + \left(\frac{\pi}{6}\right)\right)},$$

где β – половина полярного угла дуги скругляющей окружности.

Выше приведенная формула крутящего момента получена, исходя из условий пропорциональности реакции забоя P длине линии контакта шарошек с горной породой L , а также пропорциональности реакции забоя P сопротивлению перекачиванию шарошек.

Размах нормированных значений крутящего момента определяется по формуле

$$M'_o = \frac{M'_{\max} - M'_{\min}}{M'_{\max}},$$

где M'_{\max} и M'_{\min} – максимальное и минимальное значения нормированного крутящего момента бурового инструмента.

Величина этого параметра определяется конструктивными особенностями долота, параметрами поперечного сечения скважины, количеством шарошек и их передаточным отношением.

Установлено, что для скважин с равной площадью поперечного сечения параметр M'_o зависит от количества углов поперечного сечения скважины, параметров выпуклости (вогнутости) стенок, параметров скругления углов, а также от количества шарошек и их передаточного отношения (рис. 1 и рис. 2). Уменьшение величины M'_o уменьшает изменения крутящего момента при работе бурового инструмента. При этом наименее нагруженным является трёхшарошечное долото для четырёхугольного поперечного сечения скважины.

Максимальный нормированный крутящий момент M'_{\max} (рис. 3) отрицательно сказывается на проявлении динамических процессов в буровом инструменте, буровом ставе и вращательно-подающем механизме бурового станка. Наимень-

шие значения величины M'_{\max} наблюдаются при бурении треугольного поперечного сечения двумя шарошками, а наибольшие – при бурении двухугольного поперечного сечения тремя шарошками (рис. 2) [23].

Кроме того, для наиболее распространённой четырёхугольной формы поперечного сечения скважины наибольшее влияние угла наклона секущей плоскости μ (например, на рис. 2 при $\mu=50,4^\circ$ и $\gamma=15^\circ$) происходит при уменьшении количества шарошек. Это объясняется менее равномерным расположением шарошек в сечении скважины [23].

Таким образом, для уменьшения возмущения колебаний крутящего момента за один оборот бурового инструмента, среди рассмотренных сочетаний количества углов сопряжения стенок скважин и количества шарошек, следует использовать трёхшарошечное долото для образования четырёхугольной формы поперечного сечения. При этом максимальное значение крутящего момента в этом случае в меньшей степени зависит от степени выпуклости стенок скважины и имеет не самые высокие значения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трушкин О. Б. Несбалансированность конструкции вооружения долот как причина самопроизвольного искривления скважины и формирования некруглого сечения ее ствола // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2012. – № 11. – С. 4–9.
2. Буялич Г. Д., Хуснутдинов М. К., Баканов А. А. Оценка форм поперечного сечения взрывной полости для разрушения горной породы // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2017. – № 1. – С. 53–58.
3. Буялич Г. Д., Хуснутдинов М. К. Критерии формы поперечного сечения взрывной скважины // Инновационные технологии в машиностроении : сб. тр. VIII Междунар. науч.-практ. конф., Юрга, 18–20 мая 2017 г. – Томск : Изд-во Том. политехн. ун-та, 2017. – С. 280–283.
4. Экспериментально-аналитические исследования геомеханических процессов в массиве крепких сложноструктурных горных пород при взрыве зарядов ВВ различной формы / К. С. Ищенко, С. В. Коновал, И. Л. Кратковский [и др.] // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2014. – Т. 1, № 1. – С. 12–127.
5. Numerical study of fracture plane control in laboratory-scale blasting / S. H. Cho, Y. Nakamura, B. Mohanty, H. S. Yang, K. Kaneko // Engineering Fracture Mechanics. – 2008. – V. 75. – P. 3966–3984. – DOI10.1016/J.ENGFRACMECH.2008.02.007.
6. Performability of electro-hydro-mechanical rotary head of drill rig in open pit mining : case-study./ D. A. Kuziev, V. V. Zotov, E. S. Sazankova, R. O. Muminov // Eurasian Mining, 2022, 37(1), pp. 76–80. – DOI 10.17580/em.2022.01.16.
7. Алгоритм определения максимальной мощности привода подачи карьерного бурового станка / Д. А. Кузиев, И. Ю. Пятава, И. Н. Клементьева, Д. Пихторинский // Горный информационно-

аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2019. – № 1. – С. 128–133. – DOI 10.25018/0236-1493-2019-01-0-128-133.

8. Разработка мероприятий по совершенствованию вращательно-падающего механизма бурового станка / Р. О. Муминов, А. Н. Рузубаев, Н. Н. Жураев и др. // Уголь. – 2024. – № 1. – С. 94–99. – DOI 10.18796/0041-5790-2024-1-94-99.

9. Rahimdel M. J., Ataei M., Ghodrati B. Modeling and Simulation Approaches for Reliability Analysis of Drilling Machines // Journal of The Institution of Engineers (India): Series C 2020 101(1), pp. 125–133.

10. Юнгмейстер Д. А., Крупенский И., Лавренко С. А. Анализ вариантов модернизации станков шарошечного бурения с погружным пневмоударником // Записки Горного Института. – Т. 231. – С. 321. – DOI 10.25515/pmi.2018.3.321.

11. Малиновский Ю. А., Учитель А. Д., Лялюк В. П. Причины возникновения вибрации става при работе станков шарошечного бурения // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2020. – Т. 76. – № 9. – С. 897–904.

12. Кантович Л. И., Подэрни Р. Ю., Муминов Р. О. Влияние параметров вращательно-подающего механизма бурового станка на его производительность // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – М.: Изд-во «Горная книга», – 2010. – № 11. – С. 396–399.

13. Шигин А. О. Адаптивный вращательно-подающий механизм бурового станка для снижения непрогнозируемых нагрузок при бурении сложноструктурных пород // Горный журнал. – 2013. – № 7. – С. 79–83.

14. Разработка мероприятий по совершенствованию вращательно-подающего механизма бурового станка / Р. О. Муминов, А. Н. Рузубаев, Н. Н. Жураев и др. // Уголь. – 2024. – № 1. – С. 94–99. – DOI 10.18796/0041-5790-2024-1-94-99.

15. Муминов Р. О., Райханова Г. Е., Кузиев Д. А. Повышение надежности и долговечности буровых станков за счет понижения динамических нагрузок // Уголь. – 2021. – № 5. – С. 32–36. DOI 10.18796/0041-5790-2021- 5-32-36.

16. Анистратов К. Ю., Донченко Т. В., Опанасенко П. И., Строгий И. Б. Анализ рынка буровых станков для открытых горных работ горнодобывающих предприятий России // Горная промышленность. – 2018. – № 2 (138). – С. 84–89.

17. S. Kahraman. Performance analysis of drilling machines using rock modulus ratio // J S Afr I Min Metall, 103 (2003), pp. 515–522.

18. S. Kahraman, C. Balci, S. Yazici, N. Bilgin. Prediction of the penetration rate of rotary blast hole drills using a new drillability index // Int J Rock Mech Min 37 (2000), pp. 729–743.

19. Герике П. Б. Некоторые результаты диагностирования оборудования буровых станков // Вестник научного центра по безопасности работ в

угольной промышленности. – 2018. – № 4. – С. 74–79.

20. M. J. Rahimdel, M. Ataei, B. Ghodrati. Modeling and Simulation Approaches for Reliability Analysis of Drilling Machines // Journal of The Institution of Engineers (India): Series C. – 2020. – 101(1), pp. 125–133.

21. Кузиев Д. А., Муминов Р. О. Анализ и выбор рациональных параметров вращательно-подающего механизма карьерного бурового станка // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности : сб. тр. XIX междунар. науч.-технич. конф., проведенной в рамках Уральской горнопромышленной декады. – Екатеринбург, 2021. – С. 209–212.

22. Симонов В. В., Юнин Е. К. Влияние колебательных процессов на работу бурильного инструмента. – Москва : Недра, 1977. – 217 с.

23. Хуснутдинов М. К. Обоснование параметров шарошечного инструмента для бурения некруглых скважин с угловыми концентраторами напряжений : специальность 05.05.06 «Горные машины» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук; Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева. – Кемерово, 2021. – 20 с.

24. Development of a drilling tool for making non-circular cross-sections of blastholes at open-cast operations / G. Buyalich, V. Tatsienko, M. Khusnutdinov, P. Podkur // The 9th China-Russia Symposium Coal in the 21st Century : Mining, Intelligent Equipment and Environmental Protection, China, Qingdao, 18–21 October 2018. – Paris : Atlantis Press, 2018. – P. 209–212. – (Advances in Engineering Research, ISSN 2352- 5401). – ISBN 978-94-62520-569-6. – DOI 2991/coal-18.2018.38

25. Буялич Г. Д., Шмат В. Н., Хуснутдинов М. К. Особенности шарошечного бурового инструмента для получения некруглого поперечного сечения скважины // Горное оборудование и электромеханика. – 2017. – № 5. – С. 10–14.

26. Буялич Г. Д., Хуснутдинов М. К. Разработка бурового инструмента для создания некруглых поперечных сечений взрывных скважин на открытых горных работах // Экологические проблемы промышленно развитых и ресурсодобывающих регионов: пути решения : сб. тр. II Всерос. молодеж. науч.-практ. конф., 21–22 дек. 2017 г. – Кемерово : КузГТУ, 2017. – # 135. – 4 с.

27. Буялич Г. Д., Тацienко В. П., Хуснутдинов М. К. Испытания шарошечного инструмента для бурения взрывных скважин некруглого поперечного сечения // Уголь. – 2019. – № 7 (1120). – С. 15–18. – DOI <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2019-7-15-18>.

28. Буялич Г. Д., Хуснутдинов М. К. Горные машины и оборудование как продукт изобретательской деятельности в КузГТУ // Горное оборудование и электромеханика. – 2021. – № 4 (156). – С. 45–51. – DOI 10.26730/1816-4528-2021-4-45-51.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Буялич Геннадий Данилович – проф., доктор техн. наук, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева (650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28)

Хуснутдинов Михаил Константинович – кандидат техн. наук, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева (650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28)

Хорешок Алексей Алексеевич – проф., доктор техн. наук, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева (650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28)

Лагунова Юлия Андреевна – проф., доктор техн. наук, ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», (620144, Россия, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30), ФГАОУ ВО «Уральский Федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» (620002, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19).
yu.lagunova@mail.ru

Буялич Константин Геннадьевич – кандидат техн. наук, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева (650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28)

Заявленный вклад авторов:

Буялич Геннадий Данилович – постановка исследовательской задачи, построение модели, написание текста

Хуснутдинов Михаил Константинович – построение и решение модели, анализ результатов, написание текста

Хорешок Алексей Алексеевич – концептуальный менеджмент

Лагунова Юлия Андреевна – менеджмент при построении моделей

Буялич Константин Геннадьевич – обработка полученных данных, обзор соответствующей литературы

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

DOI: 10.26730/1816-4528-2024-5-78-85

Gennady D. Buyalich^{1*}, Mihail K. Husnutdinov¹, Aleksey A. Khoreshok¹, Yuliya A. Lagunova^{2,3}, Konstantin G. Buialich¹

¹ T. F. Gorbachev State Technical University

² Ural State Mining University

³ Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin

*E-mail: gdb@kuzstu.ru

THE FORMATION OF TORQUE ON A ROLLING TOOL DURING THE FORMATION OF WELLS WITH ANGULAR STRESS CONCENTRATORS



Article info

Received:

31 October 2024

Accepted for publication:

15 November 2024

Accepted:

22 November 2024

Published:

11 December 2024

Keywords: : Drilling, drilling tool, bore-hole shape, well, blast hole, cone bit cutter.

Abstract.

One of the main problems in the sections during overburden operations by blasting strong underlying rocks above the mineral formation is to reduce the cost of these operations, which consists in reducing the volume of drilling operations and reducing the amount of explosives, which directly affect the cost of overburden operations. In this direction, the Department of Mining Machines and Complexes of the T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University has been working for several years to improve drilling tools for forming drilling wells for explosives of non-circular cross-section with angular stress concentrators (for example, square section). A distinctive feature of such drilling is that in order to achieve this effect, serial rotary drilling rigs with a specially designed spherical tool with its own geometry and kinematic connections are used.

The article gives a comparative assessment of the influence of the shape of the well on the change in torque per revolution of a drilling tool with a different number of cutters. It is determined that with an equal cross-sectional area of the well, the change in torque is influenced by the ratio of the angles of conjugation of the walls of the well and the number of cutters, as well as the degree of rounding of the angles of conjugation of the walls and their convexity. It has been established that in order to reduce the perturbation of torque fluctuations, among the considered combinations of the

number of angles of conjugation of the walls of the wells and the number of cutters, a three-cone bit should be used to form a quadrangular cross-sectional shape.

For citation: Buyalich G.D., Husnutdinov M.K., Khoreshok A.A., Lagunova Yu.A., Buialich K.G. The formation of torque on a rolling tool during the formation of wells with angular stress concentrators. *Mining Equipment and Electromechanics*, 2024; 5(175):78-85 (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1816-4528-2024-5-78-85, EDN: SILSPF

REFERENCES

1. Trushkin O. B. Nesbalansirovannost' konstrukcii vooruzheniya dolot kak prichina samoproizvol'no-go iskrivleniya skvazhiny i formirovaniya nekругlogo secheniya ee stvola // *Stroitel'stvo neftyanyh i gazovyh skvazhin na sushe i na more.* – 2012. – № 11. – S. 4–9.
2. Buyalich G. D., Husnutdinov M. K., Bakanov A. A. Ocenka form poperechnogo secheniya vzryvnoj polosti dlya razrusheniya gornoj porodyy // *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta.* – 2017. – № 1. – S. 53–58.
3. Buyalich G. D., Husnutdinov M. K. Kriterii formy poperechnogo secheniya vzryvnoj skvazhiny // *Inno-vacionnye tekhnologii v mashinostroenii* : sb. tr. VIII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., YUrga, 18–20 maya 2017 g. – Tomsk : Izd-vo Tom. politekhn. un-ta, 2017. – S. 280–283.
4. Eksperimental'no-analiticheskie issledovaniya geomekhanicheskikh processov v massive krepkih slozhnostrukturnykh gornykh porod pri vzryve zaryadov VV razlichnoj formy / K. S. Ishchenko, S. V. Konoval, I. L. Kratkovskij [i dr.] // *Fundamental'nye i prikladnye voprosy gornykh nauk.* – 2014. – T. 1, № 1. – S. 12–127.
5. Numerical study of fracture plane control in laboratory-scale blasting / S. H. Cho, Y. Nakamura, B. Mohanty, H. S. Yang, K. Kaneko // *Engineering Fracture Mechanics.* – 2008. – V. 75. – P. 3966–3984. – DOI 10.1016/J.ENGFRACMECH. 2008.02.007.
6. Performability of electro-hydro-mechanical rotary head of drill rig in open pit mining : case-study./ D. A. Kuziev, V. V. Zotov, E. S. Sazankova, R. O. Muminov // *Eurasian Mining*, 2022, 37(1), pp. 76–80. – DOI 10.17580/em.2022.01.16.
7. Algoritm opredeleniya maksimal'noj moshchnosti privoda podachi kar'ernogo burovogo stanka / D. A. Kuziev, I. YU. Pyatova, I. N. Klement'eva, D. Pihtorinskij // *Gornyy informacionno-analiticheskij byulleten'* (nauchno-tekhnicheskij zhurnal). – 2019. – № 1. – S. 128–133. – DOI 10.25018/0236-1493-2019-01-0-128-133.
8. Razrabotka meropriyatij po sovershenstvovaniyu vrashchatel'no-padayushchego mekhanizma burovogo stanka / R. O. Muminov, A. N. Ruzibaev, N. N. Zhuraev i dr. // *Ugol'*. – 2024. – № 1. – S. 94–99. – DOI 10.18796/0041-5790-2024-1-94-99.
9. Rahimdel M. J., Ataei M., Ghodrati B. Modeling and Simulation Approaches for Reliability Analysis of Drilling Machines // *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C* 2020 101(1), pp. 125–133.
10. YUngmejster D. A., Krupenskij I., Lavrenko S. A. Analiz variantov modernizacii stankov sharoshechnogo bureniya s pogruzhnym pnevmoudarnikom // *Zapiski Gornogo Instituta.* – T. 231. – S. 321. – DOI 10.25515/pmi.2018.3.321.
11. Malinovskij YU. A., Uchitel' A. D., Lyalyuk V. P. Prichiny vozniknoveniya vibracii stava pri rabote stankov sharoshechnogo bureniya // *CHernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoy i ekonomicheskoy in-formacii.* – 2020. – T. 76. – № 9. – S. 897–904.
12. Kantovich L. I., Poderni R. YU., Muminov R. O. Vliyanie parametrov vrashchatel'no-podayushchego mekha-nizma burovogo stanka na ego proizvoditel'nost' // *Gornyy informacionno-analiticheskij byulleten'* (nauchno-tekhnicheskij zhurnal). – M.: Izd-vo «Gornaya kniga», – 2010. – № 11. – S. 396–399.
13. SHigin A. O. Adaptivnyj vrashchatel'no-podayushchij mekhanizm burovogo stanka dlya snizheniya nepro-gnoziruemykh nagruzok pri burenii slozhnostrukturnykh porod // *Gornyy zhurnal.* – 2013. – № 7. – S. 79–83.
14. Razrabotka meropriyatij po sovershenstvovaniyu vrashchatel'no-podayushchego mekhanizma burovogo stan-ka / R. O. Muminov, A. N. Ruzibaev, N. N. Zhuraev i dr. // *Ugol'*. – 2024. – № 1. – S. 94–99. – DOI 10.18796/0041-5790-2024-1-94-99.
15. Muminov R. O., Rajhanova G. E., Kuziev D. A. Povyshenie nadezhnosti i dolgovechnosti burovyyh stankov za schet ponizheniya dinamicheskikh nagruzok // *Ugol'*. – 2021. – № 5. – S. 32–36. DOI 10.18796/0041-5790-2021- 5-32-36.
16. Anistratov K. YU., Donchenko T. V., Opanasenko P. I., Strogij I. B. Analiz rynka burovyyh stankov dlya otkrytyh gornykh rabot gornodobyvayushchih predpriyatij Rossii // *Gornaya promyshlennost'*. – 2018. – № 2 (138). – S. 84–89.
17. S. Kahraman. Performance analysis of drilling machines using rock modulus ratio // *J S Afr I Min Metall*, 103 (2003), pp. 515–522.
18. S. Kahraman, C. Balci, S. Yazici, N. Bilgin. Prediction of the penetration rate of rotary blast hole drills using a new drillability index // *Int J Rock Mech Min* 37 (2000), pp. 729–743.
19. Gerike P. B. Nekotorye rezul'taty diagnostirovaniya oborudovaniya burovyyh stankov // *Vestnik nauchnogo centra po bezopasnosti rabot v ugol'noj promyshlennosti.* – 2018. – № 4. – S. 74–79.
20. M. J. Rahimdel, M. Ataei, B. Ghodrati. Modeling and Simulation Approaches for Reliability Analysis of Drilling Machines // *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C.* – 2020. – 101(1), pp. 125–133.
21. Kuziev D. A., Muminov R. O Analiz i vybor racional'nykh parametrov vrashchatel'no-podayushchego me-hanizma kar'ernogo burovogo stanka // *Tekhnolog-*

icheskoe oborudovanie dlya gornoj i neftegazovoj promyshlennosti : sb. tr. XIX mezhdunar. nauch.-tekhnich. konf., provedennoj v ramkah Ural'skoj gornopromyshlennoj de-kady. – Ekaterinburg, 2021. – S. 209–212.

22. Simonov V. V., YUnin E. K. Vliyanie kolebatel'nyh processov na rabotu buril'nogo instrumenta. – Moskva : Nedra, 1977. – 217 s.

23. Husnutdinov M. K. Obosnovanie parametrov sharoshechnogo instrumenta dlya bureniya nekruglyh skvazhin s uglovymi koncentratorami napryazhenij : special'nost' 05.05.06 «Gornye mashiny» : avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk / Husnutdinov Mihail Konstantinovich ; Kuzbasskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet imeni T.F. Gorbacheva. – Kemerovo, 2021. – 20 s.

24. Development of a drilling tool for making non-circular cross-sections of blastholes at open-cast operations / G. Buyalich, V. Tatsienko, M. Khusnutdinov, P. Podkur // The 9th China-Russia Symposium Coal in the 21st Century : Mining, Intelligent Equipment and Environmental Protection, China, Qingdao, 18–21 October 2018. – Paris : Atlantis Press, 2018. – P. 209–212. – (Advances in Engineering Research, ISSN 2352- 5401). – ISBN 978-94-62520-569-6. – DOI 2991/coal-18.2018.38

25. Buyalich G. D., SHmat V. N., Husnutdinov M. K. Osobennosti sharoshechnogo burovogo instrumenta dlya polucheniya nekruglogo poperechnogo secheniya skvazhiny // Gornoe oborudovanie i elektromekhanika. – 2017. – № 5. – S. 10–14.

26. Buyalich G. D., Husnutdinov M. K. Razrabotka burovogo instrumenta dlya sozdaniya nekruglyh poperechnykh sechenij vzryvnykh skvazhin na otkrytykh gornyx rabotah // Ekologicheskie problemy promyshlennogo razvitya i resursodobyvayushchih regionov: puti resheniya : sb. tr. II Vseros. molodezh. nauch.-prakt. konf., 21–22 dek. 2017 g. – Kemerovo : KuzGTU, 2017. – # 135. – 4 c.

27. Buyalich G. D., Tacienko V. P., Husnutdinov M. K. Ispytaniya sharoshechnogo instrumenta dlya bureniya vzryvnykh skvazhin nekruglogo poperechnogo secheniya // Ugol'. – 2019. – № 7 (1120). – S. 15–18. – DOI <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2019-7-15-18>.

28. Buyalich G. D., Husnutdinov M. K. Gornye mashiny i oborudovanie kak produkt izobretatel'skoj de-yatel'nosti v KuzGTU // Gornoe oborudovanie i elektromekhanika. – 2021. – № 4 (156). – S. 45–51. – DOI 10.26730/1816-4528-2021-4-45-51.

© 2024 The Author. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The authors declare no conflict of interest.

About the author:

Gennady D. Buyalich – Professor, Dr. Sc. in Engineering, T. F. Gorbachev State Technical University (650000, Russia, Kemerovo, Vesennaya str., 28).

Mihail K. Husnutdinov – C. Sc. in Engineering, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, (650000, Russia, Kemerovo, Vesennaya str., 28).

Aleksey A. Khoreshok – Professor, Dr. Sc. in Engineering, T. F. Gorbachev State Technical University (650000, Russia, Kemerovo, Vesennaya str., 28).

Yuliya A. Lagunova – Professor, Dr. Sc. in Engineering, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ural State Mining University», (620144, Russia, Yekaterinburg, Kuibysheva St., 30); Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin» (620002, Russia, Yekaterinburg, Mira St., 19).

Konstantin G. Buialich – C. Sc. in Engineering, Associate Professor, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, (650000, Russia, Kemerovo, Vesennaya str., 28).

Contribution of the authors:

Gennady D. Buyalich – setting a research task, building a model, writing a text

Mihail K. Husnutdinov – building and solving a model, analyzing the results, writing a text

Aleksey A. Khoreshok – conceptual management

Yliya A. Lagunova – management in building models

Konstantin G. Buialich – processing of the received data, review of the relevant literature

Authors have read and approved the final manuscript.

