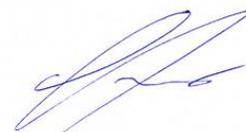


На правах рукописи



Хуснутдинов Михаил Константинович

**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

Кемерово – 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева».

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор
Богомолов Игорь Дмитриевич

доктор технических наук, доцент
Буялич Геннадий Даниилович

Официальные оппоненты:

Шигин Андрей Олегович

доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет», кафедра «Горные машины и комплексы», профессор

Карпов Владимир Николаевич

кандидат технических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н. А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук», старший научный сотрудник

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный горный университет» (г. Екатеринбург)

Защита состоится «14» января 2021 г. в 13.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.102.01 на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева» по адресу: 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28. Факс (3842) 58-33-80, e-mail: siyu.eav@kuzstu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева» и на сайте <http://science.kuzstu.ru/wp-content/docs/OAD/Soresearchers/2020/hus/Dissertation.pdf>

Автореферат разослан «___» _____ 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Семькина Ирина Юрьевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Доля открытых горных работ в общей добыче угля в 2019 г. составила 75,7% – 334,1 млн т при сохранении ее роста. Объемы добычи сырой железной руды в 2016 г. составили 298 млн т и имеется тенденция их сохранения, при этом открытым способом добывается около 93 % железной руды. Основные объемы открытых горных работ связаны с применением взрывного дробления для подготовки горных пород к выемке – проведением буровзрывных работ. В связи с увеличением объемов добычи полезных ископаемых растут количество используемых взрывчатых веществ и, соответственно, объемы бурения взрывных скважин, например, на угольных разрезах Кузбасса в 2019 г. использовано 809,6 млн т взрывчатых веществ.

На крупных предприятиях, ведущих открытый способ добычи полезного ископаемого, затраты на буровзрывные работы достигают 30 % от общих затрат на добычу и ожидается их увеличение по мере углубления горных работ, при этом требования к буровзрывным работам в этой связи неуклонно растут в части сокращения затрат. В ближайшие годы доля крепких и крепчайших пород на крупных карьерах в вынимаемой горной массе превысит 75 %. Поэтому подготовка горных пород к выемке буровзрывным способом, особенно в условиях углубления открытых горных работ и повышения прочности горных пород, требует дальнейшего развития. При этом обеспечение рационального использования взрывчатых веществ для уменьшения затрат, а также достижения высокой производительности бурового станка по обуренной горной массе и качества взрывного дробления горной породы достигается повышением эффективности действия взрыва.

Одним из перспективных способов повышения эффективности действия взрыва является использование угловых концентраторов напряжений на стенке взрывной полости путем изменения формы ее поперечного сечения. Отсутствие научно-обоснованных решений в этой области является сдерживающим фактором развития буровзрывных работ на открытых разработках. Поэтому обоснование параметров шарошечного инструмента, использование которого имеет наибольшее распространение на открытых разработках, для бурения скважин с угловыми концентраторами напряжений является актуальной задачей.

Степень разработанности.

Исследованию процесса шарошечного бурения посвящены работы Буткина В. Д., Гилева А. В., Шигина А. О., Эйгелеса Р. М., Симонова В. В., Балицкого П. В., Юнина Е. К. и др., в которых определены эксплуатационно-технические показатели процесса шарошечного бурения, конструктивные, кинематические и силовые параметры шарошечного инструмента для бурения скважин круглого поперечного сечения. В настоящее время недостаточно полно исследованы параметры шарошечного инструмента для бурения некруглых скважин на открытых горных работах.

Цель работы – обоснование конструктивных, кинематических и силовых параметров шарошечного инструмента для бурения некруглых скважин с угловыми концентраторами напряжений.

Идея работы заключается в использовании оригинального инструмента для образования взрывных скважин с угловыми концентраторами напряжений при вращательном бурении.

Задачи работы:

- разработать модели взаимосвязей конструктивных, кинематических параметров шарошечного инструмента и формы и параметров забоя некруглой скважины с концентраторами напряжений;

- разработать модели влияния формы и параметров забоя некруглой скважины с концентраторами напряжений на формирование силовых параметров шарошечного инструмента;

- обосновать параметры шарошечного инструмента, путем разработки критериев функции полезности и комплексной сравнительной оценки эффективности шарошечного инструмента для бурения взрывных скважин с различными формой и параметрами некруглого поперечного сечения станками вращательного бурения для открытых горных работ;

- разработать схемные и конструктивные решения шарошечного инструмента для бурения некруглых скважин с угловыми концентраторами напряжений и провести в производственных условиях испытания его экспериментального пилотного образца.

Научная новизна заключается в том, что:

- установлено, что изменение угла наклона секущих плоскостей, образующих калибрующие кромки шарошек, по линии диаметра которых они пересекаются, приводит к изменению выпуклости или вогнутости стенок скважины некруглого поперечного сечения с угловыми концентраторами напряжений;

- определено, что для поперечного сечения скважины с двумя и четырьмя углами, при вогнутой или плоской форме забоя максимально возможное количество шарошек – 3, а для треугольного поперечного сечения – 2;

- впервые установлен характер изменения за один оборот момента, отклоняющего буровой инструмент от оси его вращения, осевого усилия и крутящего момента, при этом эти силовые параметры уменьшаются при увеличении выпуклости и притупления углов сопряжения стенок скважины, а момент, отклоняющий инструмент от оси его вращения, возникает при дробной кратности отношения количества углов поперечного сечения скважины к количеству шарошек;

- доказано, что при формировании угловых концентраторов напряжений на стенках скважины с плоской или вогнутой формой поверхности забоя наиболее эффективным по интегральному критерию функции полезности ($U=0,910$) является вариант, при котором происходит образование четырех-угольного поперечного сечения скважины без притупления углов сопряжения ее стенок ($b=0$) трехшарошечным буровым инструментом, шарошки которого имеют наибольшее для такого поперечного сечения значение угла конусности ($\alpha=60^0$), при котором реализуется плоская или вогнутая форма поверхности забоя скважины, а относительный размах нормированных значений крутящего момента ($M'_o=0,0202$) получен при максимальном из рассмотренных значениях угла наклона секущих плоскостей к оси вращения шарошек, образующих калибрующие кромки шарошек ($\mu=80^0$).

Теоретическая и практическая значимость работы. Разработанные математические модели и схемные решения шарошечного инструмента для бурения некруглых скважин с угловыми концентраторами напряжений могут быть использованы в организациях, занимающихся исследованием и совершенствованием буровой техники, проектированием и разработкой бурового инструмента, образовательной деятельностью по направлению подготовки «Горное дело».

Методология и методы исследования. Для решения поставленных задач в работе произведен комплекс исследований, заключающийся в теоретическом обосновании параметров шарошечного бурового инструмента и апробации его экспериментального образца в промышленных условиях, при этом использованы следующие методы исследований:

- анализ литературных источников по теме исследования;
- методы математического моделирования при обосновании параметров шарошечного бурового инструмента;
- методы корреляционного анализа и выбора конкурирующих технических решений по интегральному критерию с использованием аддитивной функции полезности;
- пассивные методы экспериментальных исследований при определении работоспособности предложенного шарошечного бурового инструмента.

Научные положения, выносимые на защиту:

- основными конструктивными и кинематическими параметрами шарошечного бурового инструмента, которые определяют форму и параметры некруглого поперечного сечения скважины с угловыми концентраторами напряжений, являются количество одноконусных шарошек, углы их конусности, параметры расположения на них калибрующих кромок и передаточное отношение;
- силовые параметры шарошечного бурового инструмента определяются параметрами формы некруглого поперечного сечения скважины с угловыми концентраторами напряжений и отношением количества ее углов к количеству шарошек;
- обоснование конструктивных, кинематических и силовых параметров шарошечного инструмента для бурения некруглых скважин с угловыми концентраторами напряжений определяется с помощью функции полезности, частными критериями которой являются количество углов сопряжения стенок скважины, величина их притупления, угол конусности шарошек и относительный размах нормированных значений крутящего момента.

Личный вклад автора заключается:

- в получении зависимостей конструктивных и силовых параметров шарошечного бурового инструмента от формы и параметров некруглого поперечного сечения скважины с угловыми концентраторами напряжений;
- в обосновании параметров шарошечного инструмента, путем разработки критериев функции полезности и комплексной сравнительной оценки его эффективности для бурения некруглых скважин с угловыми концентраторами напряжений;

- в разработке схемных и конструктивных решений шарошечного инструмента для бурения некруглых скважин с угловыми концентраторами напряжений, создании экспериментального образца шарошечного инструмента и проведении его испытаний;

- в написании научных публикаций.

Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертационной работе, обеспечиваются использованием хорошо проверенных в различных областях знаний методов корреляционного анализа и теории принятия решений с использованием аддитивной функции полезности, корректностью допущений при определении параметров шарошечного бурового инструмента и результатами его промышленной апробации.

Реализация выводов и рекомендаций работы. Результаты работы были использованы при выполнении НИиОКР «Буровой инструмент нового поколения для получения скважин с некруглым поперечным сечением при ведении буровзрывных работ на горных предприятиях России» в рамках государственного контракта №054 от 01 июня 2012 года Федерального фонда содействия малых форм предпринимательства в научно-технической сфере по программе УМНИК, а также при выполнении хозяйственной научно-исследовательской работы с АО «СУЭК-Кузбасс».

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на всероссийских и международных научно-практических конференциях: «Безопасность жизнедеятельности предприятий в угольных регионах» (Кемерово, 2000), «Динамика и прочность горных машин» (Новосибирск, 2003), «Влияние научно-технического прогресса на экономическое развитие Кузбасса» (Прокопьевск, 2007), «Энергетическая безопасность России. Новые подходы к развитию угольной промышленности» (Кемерово, 2012), «Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов» (Новокузнецк, 2012), «Неделя горняка-2017» (Москва, 2017), «Безопасность жизнедеятельности предприятий в промышленно развитых регионах» (Кемерово, 2017), «Четвертый международный горный симпозиум» (Кемерово, 2019), «Машиностроение и техносфера XXI века (Севастополь, 2020).

Публикации. По теме диссертации всего опубликовано 19 научных работ, в том числе 7 статей в изданиях, рекомендованных ВАК России, 4 патента РФ на изобретения и 1 патент РФ на полезную модель.

Структура и объем работы. Диссертация изложена на 177 страницах текста. Она состоит из введения, 4 разделов, заключения, списка литературы из 163 наименований, и содержит 63 рисунка, 25 таблиц и 1 приложение.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первом разделе проведен анализ влияния горно-геологических и горнотехнических условий на эффективность ведения буровзрывных работ, дана характеристика известных решений по управлению энергией взрыва при дроблении горных пород на открытых горных работах. Установлено, что в условиях увеличения глубины ведения горных работ и прочности горных пород одним из перспективных

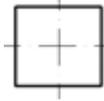
направлений по увеличению эффективности управления энергией взрыва является управление процессом трещинообразования путем создания направленного действия взрыва с применением взрывной полости некруглого поперечного сечения, использование которого способно приводить к уменьшению удельного расхода взрывчатых веществ до 20 %, а наличие угловых концентраторов напряжений, образованных сопряжением стенок скважины некруглого поперечного сечения, их геометрические параметры и расположение являются факторами, влияющими на эффективность действия взрыва.

С помощью кинематического способа задания поверхностей проведен анализ конструкций бурового инструмента с точки зрения их эффективности для получения некруглого поперечного сечения скважины. Определено, что разрушение забоя скважины с некруглой формой поперечного сечения и образованием угловых концентраторов напряжений с помощью шарошек позволяет производить бурение без увеличения числа кинематических ветвей конструкции инструмента, наиболее распространенным вращательным способом бурения в условиях открытых горных работ.

Исследованию процесса шарошечного бурения посвящены работы Буткина В. Д., Гилева А. В., Шигина А. О., Эйгелеса Р. М., Симонова В. В., Балицкого П. В., Юнина Е. К. и др., в которых определены эксплуатационно-технические показатели процесса шарошечного бурения, конструктивные, кинематические и силовые параметры шарошечного инструмента для бурения скважин круглого поперечного сечения. Для создания шарошечного инструмента для бурения некруглых скважин требуется обоснование его конструктивных и силовых параметров с учетом формы и параметров получаемой скважины некруглого поперечного сечения.

Во втором разделе разработаны модели взаимосвязи конструктивных и кинематических параметров шарошечного бурового инструмента и формы и параметров забоя некруглой скважины с угловыми концентраторами напряжений. При этом в качестве основных допущений принято, что шарошки представляют собой круговой конус, который перекачивается по конусной недеформируемой поверхности забоя скважины. Установлено, что форма и параметры некруглого поперечного сечения скважины с угловыми концентраторами напряжений определяются количеством одноконусных шарошек (m), углами их конусности (α), передаточным отношением (i) (таблица 1) и параметрами расположения на них калибрующих кромок (рисунок 1).

Таблица 1 – Взаимосвязь конструктивных параметров бурового инструмента и формы поперечного сечения скважины

Пример формы поперечного сечения								
	Значение							
i	3	1,5	4	1,33	2			
α_{max} , град	39,0	83,6	29,0	97,2	60			
m	2	3	2	2	3	–	2	3
α_{min} , град	0	0	82,8	0	0	0	0	40,6

Некруглая форма поперечного сечения скважины с угловыми концентраторами напряжений образуется одноконусными шарошками, калибрующие кромки которых получены при сечении их конуса плоскостями, пересекающимися по линии их диаметра и проходящими под острым углом к оси их вращения. Перекатывание шарошки по забою воспроизводит стороны стенок скважины разной кривизны: при угле (μ) наклона секущей плоскости к оси конуса шарошки больше или равным 60 градусам – выпуклые, а при величине этого угла менее 60 градусов – вогнутые (рисунок 1 и 2).

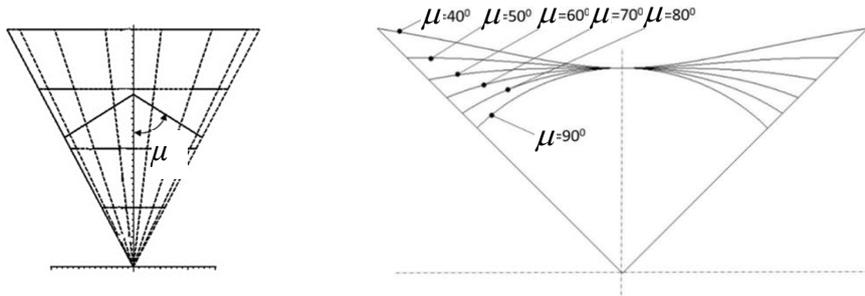


Рисунок 1 – Формирование вогнутых и выпуклых участков стенки скважины в зависимости от угла наклона секущей плоскости к оси вращения шарошки (μ): а – конус шарошки с плоскостями среза под углом μ ; б – элемент стенки скважины

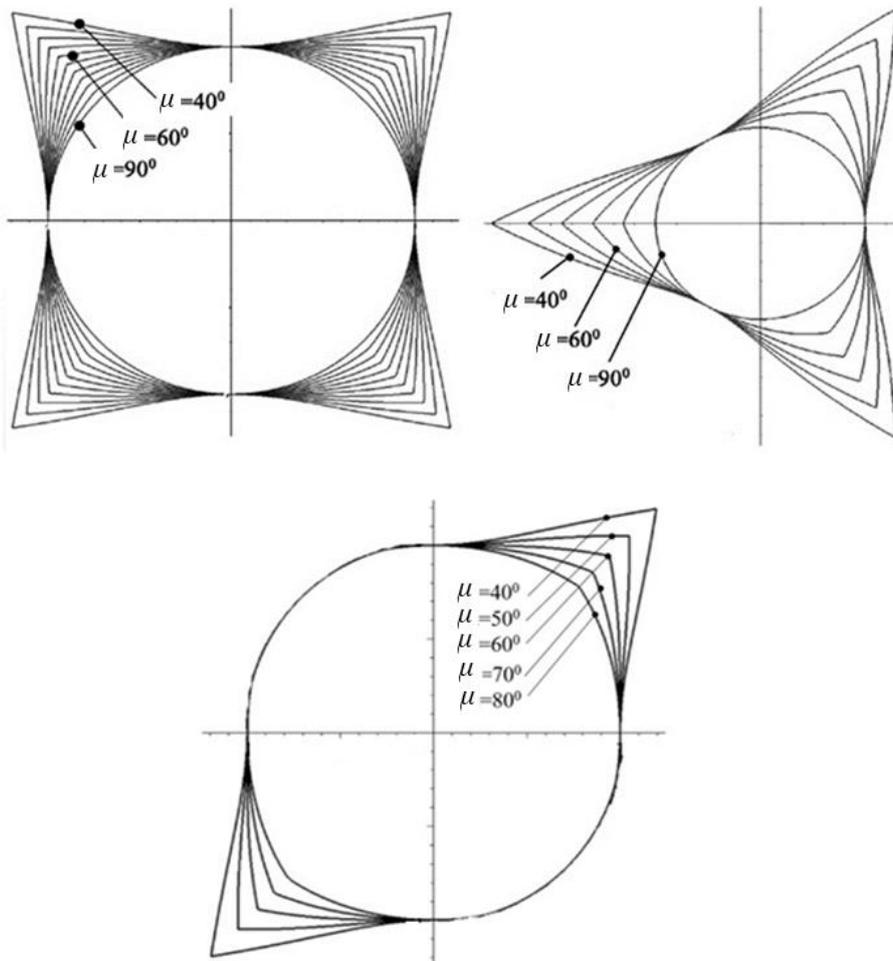


Рисунок 2 – Влияние угла наклона секущей плоскости (μ) на формирование различных поперечных сечений скважины

Радиус некруглого поперечного сечения R в полярных координатах с угловой координатой Ψ , представляющей собой угол поворота бурового инструмента или линии контакта кругового конуса шарошки с круговым конусом забоя скважины, может быть представлен непрерывной кусочно-заданной функцией. Например, для поперечного сечения с четырьмя углами радиус R некруглого поперечного сечения, которое имеет притупления сопряжения стенок и образуется перекачиванием шарошки, калибрующая кромка которой получена при сечении их конуса плоскостями под углом μ , описывается выражением:

$$R^{n=4} = \begin{cases} R_{\min} \frac{\sqrt{3}\sin(\mu)+\cos(\mu)}{\sqrt{3}\sin(\mu)+\cos(2\Psi)\cos(\mu)}, & \text{при } 0 \leq \Psi \leq \frac{\pi}{4} - \beta \\ R_{\min} \frac{\sqrt{3}\sin(\mu)+\cos(\mu)}{\sqrt{3}\sin(\mu)+\cos(2\beta)\cos(\mu)}, & \text{при } \frac{\pi}{4} - \beta \leq \Psi \leq \frac{\pi}{4} + \beta \\ R_{\min} \frac{\sqrt{3}\sin(\mu)+\cos(\mu)}{\sqrt{3}\sin(\mu)-\cos(2\Psi)\cos(\mu)}, & \text{при } \frac{\pi}{4} + \beta \leq \Psi \leq \frac{3\pi}{4} - \beta \\ R_{\min} \frac{\sqrt{3}\sin(\mu)+\cos(\mu)}{\sqrt{3}\sin(\mu)+\cos(2\beta)\cos(\mu)}, & \text{при } \frac{3\pi}{4} - \beta \leq \Psi \leq \frac{3\pi}{4} + \beta \\ R_{\min} \frac{\sqrt{3}\sin(\mu)+\cos(\mu)}{\sqrt{3}\sin(\mu)+\cos(2\Psi)\cos(\mu)}, & \text{при } \frac{3\pi}{4} + \beta \leq \Psi \leq \frac{5\pi}{4} - \beta \\ R_{\min} \frac{\sqrt{3}\sin(\mu)+\cos(\mu)}{\sqrt{3}\sin(\mu)+\cos(2\beta)\cos(\mu)}, & \text{при } \frac{5\pi}{4} - \beta \leq \Psi \leq \frac{5\pi}{4} + \beta \\ R_{\min} \frac{\sqrt{3}\sin(\mu)+\cos(\mu)}{\sqrt{3}\sin(\mu)-\cos(2\Psi)\cos(\mu)}, & \text{при } \frac{5\pi}{4} + \beta \leq \Psi \leq \frac{7\pi}{4} - \beta \\ R_{\min} \frac{\sqrt{3}\sin(\mu)+\cos(\mu)}{\sqrt{3}\sin(\mu)+\cos(2\beta)\cos(\mu)}, & \text{при } \frac{7\pi}{4} - \beta \leq \Psi \leq \frac{7\pi}{4} + \beta \\ R_{\min} \frac{\sqrt{3}\sin(\mu)+\cos(\mu)}{\sqrt{3}\sin(\mu)+\cos(2\Psi)\cos(\mu)}, & \text{при } \frac{7\pi}{4} + \beta \leq \Psi \leq 2\pi \end{cases} \quad (1)$$

где R_{\min} – минимальный радиус скважины (радиус вписанной в поперечное сечение скважины окружности), мм;

β – половина полярного угла дуги, скругляющей сопряжение стенок скважины окружности, град.

Отрезок ρ , соединяющий центр вращения шарошки (вершину ее конуса) и точку на калибрующей кромке шарошки, имеет длину:

$$\rho = R / \cos(\gamma), \quad (2)$$

где γ – угол наклона образующей конуса забоя скважины к плоскости, перпендикулярной ее поперечному сечению скважины, град.

Параметрические уравнения координат точки на калибрующей кромке конуса шарошки, при начальном положении которой ось ее вращения в плоскости $хоу$ направлена по оси x , с учетом $\varphi = i\Psi$, имеют вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} x=\rho \\ y=\rho \\ z=\rho \end{array} \right\} \left(\begin{array}{l} \left(\sin(i\Psi)\sin\Psi + \cos(i\Psi)\cos\Psi\cos\Theta \right) \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cos\delta + \left(\cos(i\Psi)\sin\Psi - \right. \\ \left. \sin(i\Psi)\cos\Psi\cos\Theta \right) \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \sin\delta + \cos\Psi\sin\Theta\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \\ \left(-\sin(i\Psi)\cos\Psi + \cos(i\Psi)\sin\Psi\cos\Theta \right) \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cos\delta - \\ \left(\cos(i\Psi)\cos\Psi - \sin(i\Psi)\sin\Psi\cos\Theta \right) \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \sin\delta + \sin\Psi\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \\ \left(-\cos(i\Psi)\sin\Theta\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cos\delta + \sin(i\Psi)\sin\Theta\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \sin\delta + \right. \\ \left. \cos\Theta\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \right) \end{array} \right), \quad (3)$$

где δ – координата точки на калибрующей кромке конуса шарошки в виде полярного угла в системе координат, связанной с телом шарошки, град;

θ – угол между осью вращения шарошки и осью скважины, град.

Уравнения (3) позволили определить, что, когда калибрующая кромка шарошки образована секущими ее конус плоскостями, условие свободного вращения шарошек в границах некруглого поперечного сечения соблюдается.

На основании корреляционного анализа определены критерии, позволяющие проводить сравнительную оценку форм поперечного сечения скважин с точки зрения эффективности действия взрыва с помощью функции полезности и установлено, что наиболее эффективная форма поперечного сечения (интегральный критерий $U=0,888$) образована четырьмя углами сопряжения ее стенок ($n=4$) без притупления углов ($b=0$), с вогнутой формой сторон, полученной при минимальном из рассмотренных значений угла наклона секущей плоскости ($\mu=40^0$).

На основании корреляционного анализа определены критерии, позволяющими проводить сравнительную оценку шарошечного бурового инструмента по конструктивным параметрам с помощью функции полезности и установлено, что наиболее эффективной является конструкция (интегральный критерий $U=1,000$) при максимальном угле конусности шарошки ($\alpha=83,6^0$), который достигается при треугольном поперечном сечении, максимальном из рассмотренных значений притупления углов сопряжения стенок скважины ($b=30$ мм) и максимальной выпуклости их сторон, полученной при максимальном из рассмотренных значений угла наклона секущей плоскости ($\mu=80^0$).

В третьем разделе разработаны модели влияния формы и параметров забоя некруглой скважины с концентраторами напряжений на формирование силовых параметров шарошечного инструмента. Принято, что шарошки представляют собой гладкий недеформируемый конус, который перекачивается по гладкому недеформируемому забою скважины, а реакции забоя скважины пропорциональны длине линии контакта одноконусных шарошек (L_i), изменяющейся по углу поворота (ψ) инструмента. На основании этого определен характер изменения осевого

усилия и крутящего момента по углу поворота инструмента, а также относительных размахов их нормированных значений.

Осевое усилие на шарошечном инструменте:

$$P_{oc} \propto \frac{L_{\Sigma}}{\cos(\gamma)} = \sum_{i=1}^m R_i(\Psi, \mu, S), \quad (4)$$

где R_i – текущий радиус некруглого поперечного сечения (лежит в одной плоскости с осью вращения шарошки), мм;

S – степень скругления углов сопряжения стенок некруглого поперечного сечения.

Крутящий момент на шарошечном инструменте:

$$M' = \sum_{i=1}^m \frac{L_i}{2} P_i \approx \sum_{i=1}^m \frac{L_i^2}{2} = \sum_{i=1}^m \frac{1}{2} \left(\frac{R_i(\Psi, \mu, S)}{\cos(\gamma)} \right)^2, \quad (5)$$

где P_i – реакция забоя скважины, пропорциональная силе сопротивления перекачиванию шарошек и длине L_i линии контакта конуса шарошек с горной породой.

Установлено, что максимальные значения и относительные размахи нормированных значений силовых параметров уменьшаются при увеличении выпуклости и притупления углов сопряжения стенок скважины. При образовании четырехугольного поперечного сечения тремя шарошками размахи нормированных значений осевого усилия и крутящего момента являются наименьшими (рисунок 3).

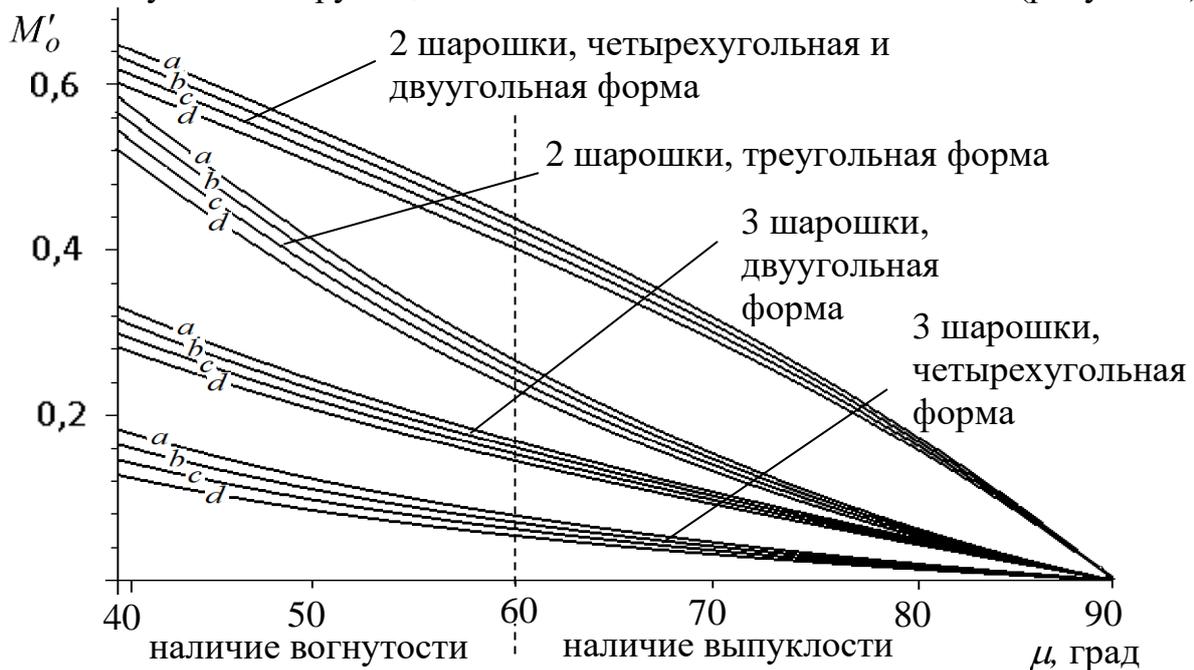


Рисунок 3 – Зависимость относительного размаха нормированных значений крутящего момента M'_0 от формы поперечного сечения скважины, угла μ и количества шарошек при: а) $S=0$; б) $S=0,05$; в) $S=0,1$; д) $S=0,15$

Максимальные значения осевого усилия и крутящего момента являются наименьшими при образовании треугольного поперечного сечения двумя шарошками.

Определено, что при дробной кратности отношения количества углов поперечного сечения скважины к количеству шарошек: при образовании поперечного сечения с двумя и четырьмя углами тремя шарошками, а также при образовании поперечного сечения с тремя углами двумя шарошками возникает момент, отклоняющий буровой инструмент от оси его вращения (рисунки 4–6).

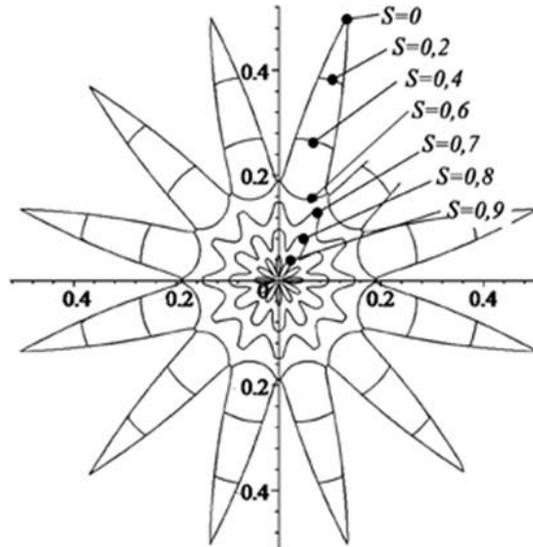


Рисунок 4 – Изменение модуля главного момента M_0 (Н·мм), отклоняющего буровой инструмент от оси его вращения в полярной системе координат в зависимости от угла Ψ поворота бурового инструмента при различных значениях степени скругления S ($n=4$, $t=3$, $R_{min}=1$ мм, $\mu=60^\circ$)

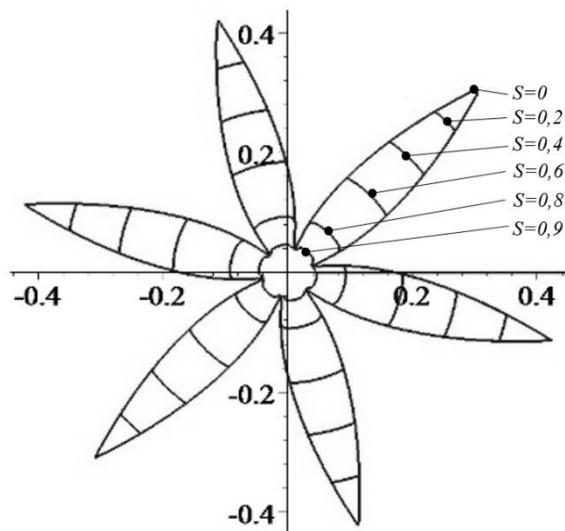


Рисунок 5 – Изменение модуля главного момента M_0 (Н·мм), отклоняющего буровой инструмент от оси его вращения в полярной системе координат в зависимости от угла Ψ поворота бурового инструмента при различных значениях степени скругления S ($n=2$, $t=3$, $R_{min}=1$ мм, $\mu=60^\circ$)

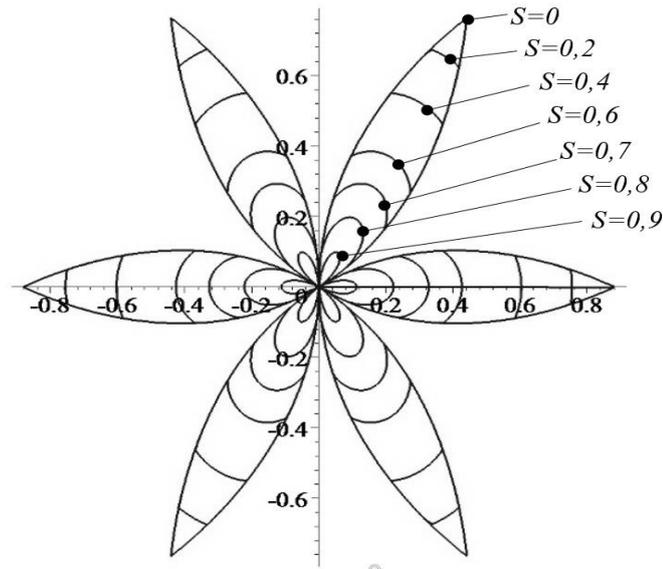


Рисунок 6 – Изменение модуля главного момента M_0 (Н·мм), отклоняющего буровой инструмент от оси его вращения в полярной системе координат в зависимости от угла Ψ поворота бурового инструмента при различных значениях степени скругления S ($n=3$, $m=2$, $R_{min}=1$ мм, $\mu=60^\circ$)

Установлено, что при образовании четырехугольного поперечного сечения тремя шарошками возникающие максимальные значения момента, отклоняющего буровой инструмент от оси его вращения (рисунок 7), являются наименьшими.

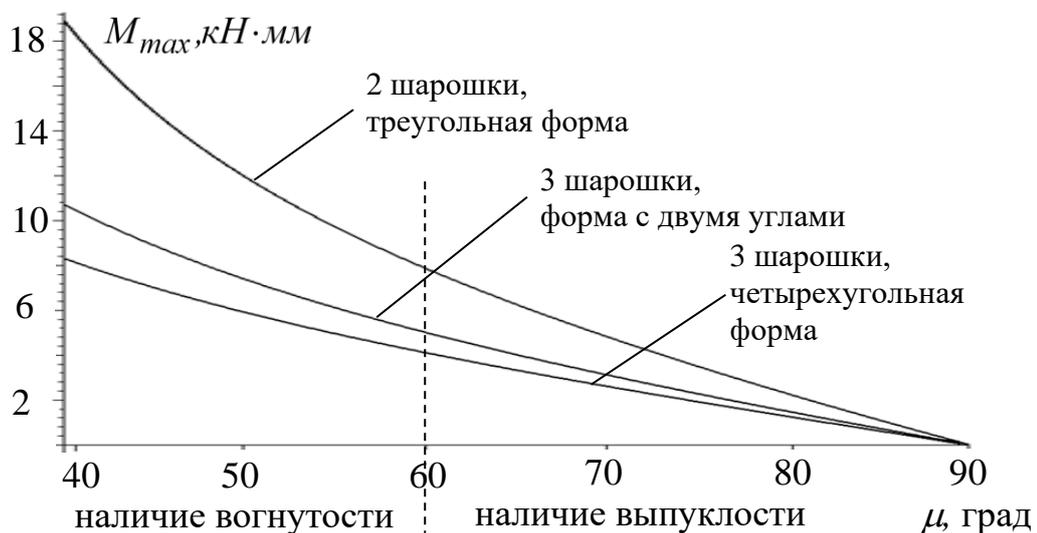


Рисунок 7 – Максимальные значения отклоняющего момента M_{max} в зависимости от формы поперечного сечения скважины, угла μ и количества шарошек при $S=0$, $\gamma=15^\circ$ и площади поперечного сечения скважины, соответствующей площади круглого поперечного сечения скважины диаметром 216 мм (значения при пропорциональности реакция забоя скважины длине линии контакта шарошек с забоем $1Н=1$ мм)

На основании корреляционного анализа определено, что сравнительная оценка силового взаимодействия конструкций шарошечного бурового инструмента с забоем скважин, имеющих различное поперечное сечение с помощью функции полезности производится с использованием одного критерия – относительного размаха нормированных значений крутящего момента на буровом инструменте (M'_o). Установлено, что наиболее эффективной по силовым параметрам является конструкция (интегральный критерий $U=1,000$) при которой обеспечивается минимальное значение относительного размаха нормированных значений крутящего момента на буровом инструменте ($M'_o=0,00553$), когда происходит получение четырехугольного поперечного сечения скважины трехшарошечным буровым инструментом с шарошками, имеющими максимальный угол конусности ($\alpha=60^0$), который достигается при четырехугольном поперечном сечении, максимальном из рассмотренных значениях притупления углов сопряжения стенок скважины ($b=30$ мм) и максимальной выпуклости их сторон, полученной при максимальном из рассмотренных значениях угла наклона секущей плоскости ($\mu=80^0$).

В четвертом разделе проведены обоснование рациональных параметров и разработка схемных решений шарошечного инструмента.

На основании корреляционного анализа определено, что значимыми критериями для обоснования параметров шарошечного инструмента для бурения некруглых скважин с угловыми концентраторами напряжений с точки зрения эффективности действия взрыва, по конструктивным и силовым параметрам являются: количество углов n сопряжения стенок скважины и их притупление b , угол конусности шарошки α и относительный размах нормированных значений крутящего момента M'_o . С помощью комплексной сравнительной оценки доказано, при формировании угловых концентраторов напряжений на стенках некруглой скважины наиболее эффективным по интегральному критерию функции полезности ($U=0,910$) является вариант, при котором происходит образование четырехугольного поперечного сечения скважины без притупления углов сопряжения ее стенок ($b=0$) трехшарошечным буровым инструментом, шарошки которого имеют наибольшее для такого поперечного сечения значение угла конусности ($\alpha=60^0$), при котором реализуется плоская или вогнутая форма поверхности забоя скважины, а относительный размах нормированных значений крутящего момента ($M'_o=0,0202$) получен при максимальном из рассмотренных значениях угла наклона секущих плоскостей к оси вращения шарошек, образующих калибрующие кромки шарошек ($\mu=80^0$).

Определено, что схемные решения шарошечного инструмента должны удовлетворять следующим требованиям:

1. Необходимость обеспечения передаточного отношения долота (i), равным 1,5 и 2 для возможности получения двугугольного, треугольного и четырехугольного поперечных сечений, при которых углы конусности (α) шарошек должны иметь значения, не более 83,6 (для треугольного сечения) и 60 (для двугугольного и четырехугольного сечения) градусов для получения вогнутой или плоской формы забоя скважины (таблица 1). Выполнение шарошек одноконусными с такими

углами конусности в условиях уменьшенных размеров подшипниковых опор шарошек обуславливает необходимость разработки схемных решений, направленных на обеспечение ремонтпригодности шарошечного бурового инструмента и снижение нагрузок на шарошки, которые формируют некруглое поперечное сечение скважины.

2. С точки зрения повышения эффективности действия взрыва требуется обеспечение форм поперечного сечения скважин с большим относительным размахом радиусов, получаемых при меньшем притуплении углов сопряжения стенок скважины и большем угле наклона секущей конус шарошки плоскости, что предъявляет особые требования к прочности тела шарошки, так как в этом случае конструктивные параметры бурового инструмента ухудшаются. При этом для обеспечения более надежной кинематической связи требуется выполнение вооружения шарошек зубчатым, по крайней мере, в периферийной их части. В этом случае зубья шарошек в периферийной их части должны являться ребрами жесткости участков тела шарошек, формирующих углы сопряжения стенок скважины с некруглым поперечным сечением.

3. С точки зрения уменьшения отрицательного влияния некруглой формы поперечного сечения скважины на силовое взаимодействие бурового инструмента с забоем скважины, в части возникновения изменений нагрузок за один оборот инструмента, а также с точки зрения эффективности по комплексу показателей, требуется разработка схемных решений, которые предусматривают использование как двух, так и трех шарошек.

На основании указанных выше требований разработаны схемные решения шарошечного инструмента и рекомендованы конструкции разборных шарошечных расширителей со сниженными нагрузками на шарошки, формирующие некруглое поперечное сечение скважины. Также разработана конструкция экспериментального образца шарошечного расширителя (рисунок 8, а).

Проведена промышленная апробация экспериментального образца шарошечного расширителя, которая показала его работоспособность при бурении некруглой скважины с угловыми концентраторами напряжений на базе серийного шарошечного бурового станка DML1200 (рисунок 8, б).

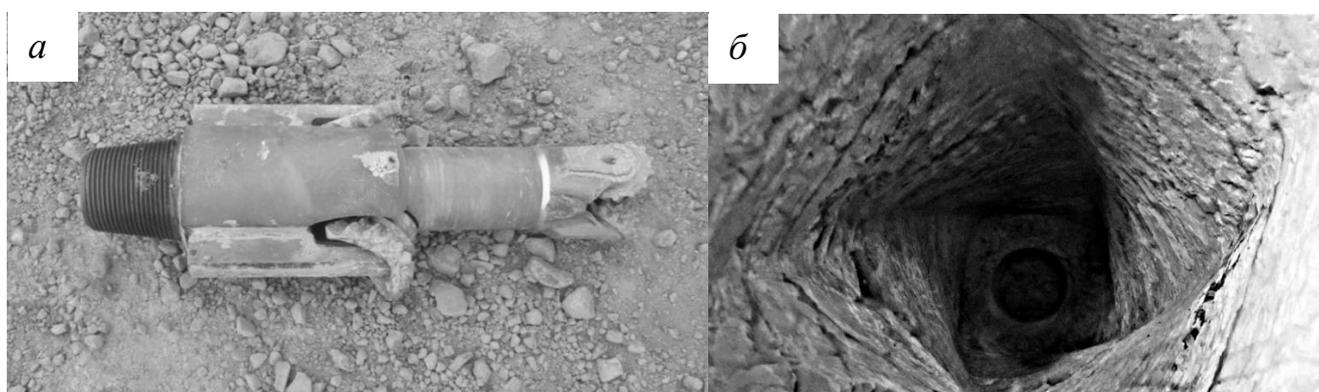


Рисунок 8 – Экспериментальный образец шарошечного расширителя (а) и вид на забуренную им скважину (б)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена актуальная научно-техническая задача обоснования параметров шарошечного инструмента для бурения скважин с некруглым поперечным сечением с угловыми концентраторами напряжений, что имеет существенное значение для развития буровзрывных работ в области горного дела.

Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. Разработаны модели зависимости кинематических и конструктивных параметров шарошечного бурового инструмента от формы и параметров не-круглого поперечного сечения скважины с угловыми концентраторами напряжений, которые определяются передаточным отношением, количеством одноконусных шарошек, углами конусности и наклона оси их вращения к оси скважины, расположением на них секущих плоскостей для образования калибрующих кромок.

2. Выявлено, что максимальное число одноконусных шарошек, способных образовывать вогнутую или плоскую поверхность забоя некруглой скважины, для поперечного сечения с двумя и четырьмя угловыми концентраторами напряжений равно трем, а для треугольного поперечного сечения – двум. Перекатывание шарошки по забою воспроизводит стороны стенок скважины разной кривизны: при угле (μ) наклона секущей плоскости к оси конуса шарошки большем или равным 60° градусов – выпуклые, а при величине этого угла менее 60° градусов – вогнутые.

3. Разработаны модели влияния формы и параметров забоя некруглой скважины с концентраторами напряжений на силовые параметры шарошечного инструмента и определен характер изменения за один оборот инструмента осевого усилия, крутящего момента и момента, отклоняющего буровой инструмент от оси его вращения. Установлено, что максимальные значения момента, отклоняющего буровой инструмент от оси его вращения, размахи нормированных значений осевого усилия и крутящего момента являются наименьшими при образовании четырехугольного поперечного сечения тремя шарошками. Максимальные значения осевого усилия и крутящего момента являются наименьшими при образовании треугольного поперечного сечения двумя шарошками. Максимальные значения и относительные размахи нормированных значений силовых параметров уменьшаются при увеличении выпуклости и притупления углов сопряжения стенок скважины.

4. Обоснованы параметры шарошечного инструмента и доказано, при формировании угловых концентраторов напряжений на стенках некруглой скважины наиболее эффективным по интегральному критерию функции полезности ($U=0,910$) является вариант, при котором происходит образование четырехугольного поперечного сечения скважины без притупления углов сопряжения ее стенок ($b=0$) трехшарошечным буровым инструментом, шарошки которого имеют наибольшее для такого поперечного сечения значение угла конусности ($\alpha=60^\circ$), при котором реализуется плоская или вогнутая форма поверхности забоя скважины, а относительный размах нормированных значений крутящего момента ($M'_o = 0,0202$) получен при максимальном из рассмотренных значениях угла наклона секущих плоскостей к оси вращения шарошек, образующих калибрующие кромки шарошек ($\mu=80^\circ$).

5. Разработаны схемные решения шарошечного инструмента и рекомендованы конструкции разборных шарошечных расширителей со сниженными нагрузками на шарошки, формирующие некруглое поперечное сечение скважины. Промышленная апробация экспериментального образца шарошечного расширителя в условиях разреза «Заречный» ОА «СУЭК-Кузбасс» показала его работоспособность при бурении некруглой скважины с угловыми концентраторами напряжений на базе серийного бурового станка.

Направления дальнейших исследований:

- исследование влияния геометрии различного вооружения одноконусных шарошек на передаточное отношение инструмента и силовые параметры процесса бурения, разработка рекомендации по выбору параметров вооружения шарошек;
- обоснование рекомендации по выбору режимных параметров процесса бурения некруглых скважин шарошечным инструментом;
- исследование процессов транспортирования буровой мелочи сжатым воздухом при бурении некруглых скважин шарошечным инструментом.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

Статьи в изданиях рекомендованных ВАК

1. Богомолов, И. Д. Забуривание квадратной скважины шарошечным долотом / И. Д. Богомолов, М. К. Хуснутдинов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2004. – № 6.1. – С. 39-41.
2. Богомолов, И. Д. О применении шарошечного типа исполнительного органа для бурения скважин некруглой формы / И. Д. Богомолов, М. К. Хуснутдинов // Горный информационно-аналитический бюллетень – 2003. – № 2. – С. 215-216
3. Богомолов, И. Д. Оборудование для бурения шпуров некруглого сечения / И. Д. Богомолов, М. К. Хуснутдинов // Горное оборудование и электромеханика. – 2006. – № 3. – С. 12-14.
4. Богомолов, И. Д. Кинематические и геометрические аспекты бурения скважин некруглой формы шарошечным долотом / И. Д. Богомолов, М. К. Хуснутдинов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2004. – № 6.1. – С. 15-18.
5. Буялич, Г. Д. Оценка форм поперечного сечения взрывной полости для разрушения горной породы / Г. Д. Буялич, М. К. Хуснутдинов, А. А. Баканов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2017. – № 1. – С. 53–58.
6. Буялич, Г. Д. Особенности шарошечного бурового инструмента для получения некруглого поперечного сечения скважины / Г. Д. Буялич, В. Н. Шмат, М. К. Хуснутдинов // Горное оборудование и электромеханика. – 2017. – № 5. – С. 10-14.
7. Буялич, Г. Д. Испытания шарошечного инструмента для бурения взрывных скважин некруглого поперечного сечения / Г. Д. Буялич, В. П. Тащиенко, М. К. Хуснутдинов // Уголь. – 2019. – № 7. – С. 15-18. – DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2019-7-15-18>.

Статьи в прочих изданиях

8. Богомолов, И. Д. Анализ направлений по созданию исполнительного органа для бурения скважин с концентраторами напряжений / И. Д. Богомолов, М. К. Хуснутдинов // Совершенствование технологических процессов при разработке месторождений полезных ископаемых. – Кемерово, 2002. – С. 120-127. – (Сборник научных трудов / Научно-техн. центр «Кузбассуглетехнология» ; № 19).

9. Хуснутдинов, М. К. О возможности создания инструмента для бурения взрывных скважин с некруглым поперечным сечением / М. К. Хуснутдинов, Д. А. Малышкин, К. В. Начев // Энергетическая безопасность России. Новые подходы к развитию угольной промышленности : сборник трудов XIV Международной научно-практической конференции, 18-21 сентября 2012 года, г. Кемерово. – Кемерово : СО РАН, КемНЦ СО РАН, ИУ СО РАН, ИУХМ СО РАН, КузГТУ, ООО КВК «Экспо-Сибирь», 2012 – С. 136–138.

10. Богомолов, И. Д. Предпосылки по созданию и использованию инструмента для получения взрывных скважин на открытых горных работах / И. Д. Богомолов, М. К. Хуснутдинов, Д. А. Малышкин, И. П. Головин, А. Н. Тимшин // Научно-технологические разработки и использования минеральных ресурсов : сборник научных статей Международной научно-практической конференции в рамках XIX международной специализированной выставки «Уголь России и Майнинг», 5-8 июня 2012 года, г. Новокузнецк. – Новокузнецк : СибГИУ, 2012. – С. 66–69.

11. Богомолов, И. Д. Вопросы создания исполнительного органа для механического бурения скважин с некруглым поперечным сечением в крепких породах / И. Д. Богомолов, А. М. Цехин, М. К. Хуснутдинов // Динамика и прочность горных машин: Сборник трудов II Международной конференции, 28-29 мая 2003 года, Том I, г. Новосибирск. – Новосибирск, 2003. – С. 74-79.

12. Buyalich, G. Justification of the Shape of a Non-Circular Cross-Section for Drilling With a Roller Cutter / G. Buyalich, M. Khusnutdinov // E3S Web of Conferences. – EDP Sci-ences, 2017. – Vol. 21 : The second international innovative mining symposium. – P. 03010 – DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20172103010>.

13. 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.

14. Богомолов, И. Д. Об использовании нетрадиционных форм заряда для взрывного дробления и буровом инструменте для его осуществления / И. Д. Богомолов, М. К. Хуснутдинов // Влияние научно-технического прогресса на экономическое развитие Кузбасса : материалы I региональной научно-практической конференции, 15 марта 2007 года, г. Прокопьевск. – Прокопьевск : КузГТУ, 2007. – С. 151-153.

Патенты

15. Патент № 141747 Российская Федерация, МПК E 21 B 10/28 (2006.01). Разборный шарошечный буровой инструмент : № 2014103421/03 : заявлено 31.01.2014 : опубликовано 10.06.2014 / Богомоллов И. Д., Любимов О. В., Хуснутдинов М. К., Малышкин Д. А. ; Патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Кузбасский государственный технический университет» (КузГТУ). – Бюл. № 16. – 2 с.

16. Патент № 2548274 Российская Федерация, МПК E 21 B 10/28 (2006.01). Разборный буровой инструмент : № 2014103415/03 : заявлено 31.01.2014 : опубликовано 20.04.2015 / Богомоллов И. Д., Любимов О. В., Хуснутдинов М. К., Малышкин Д. А. ; Патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Кузбасский государственный технический университет» (КузГТУ). – Бюл. № 11. – 5 с.

17. Патент № 2549336 Российская Федерация, МПК E 21 B 10/28 (2006.01). Разборное буровое долото : № 2014113586/03 : заявлено 07.04.2014 : опубликовано 27.04.2015 / Богомоллов И. Д., Любимов О. В., Хуснутдинов М. К., Малышкин Д. А. ; Патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Кузбасский государственный технический университет» (КузГТУ). – Бюл. № 12. – 10 с.

18. Патент № 2592911 Российская Федерация, МПК E21B 10/28 (2006.01). Шарошечный буровой инструмент : № 2015120830/03 : заявлено 01.06.2015 : опубликовано 21.07.2016 / Богомоллов И. Д., Тациенко В. П., Хуснутдинов М. К., Любимов О. В. ; Патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Кузбасский государственный технический университет» (КузГТУ). – Бюл. № 21. – 8 с.

19. Патент № 2655505 Российская Федерация, МПК E21B10/22 (2006.01), E21B10/28 (2006.01). Буровой инструмент : № 2017131006 : заявлено 01.09.2017 : опубликовано 28.05.2018/ Хуснутдинов М. К., Любимов О. В., Головин И. П., Малышкин Д. А. ; Патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Кузбасский государственный технический университет» (КузГТУ). – Бюл. № 16. – 8с.

Личный вклад автора в работах, выполненных в соавторстве, заключается в следующем:

[1], [7] – выполнение основного объема экспериментальных исследований, обработка полученных результатов, формулировка выводов;

[2-6], [8-14] – проведение аналитического обзора и анализа литературных источников информации, выполнение основного объема теоретических исследований, обработка полученных результатов, формулировка выводов;

[15-19] – разработка идеи технического решения и формулировка его сущности.

Подписано к печати 10.11.2020г. Формат 60x84/16
Уч.-изд. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ 326

Отпечатано в издательском центре УИП КузГТУ.
650000, Кемерово, ул. Д. Бедного, 4а.