

АННОТАЦИЯ

диссертации на соискание степени доктора философии (PhD)
по образовательной программе 8D07208 – Геология и разведка месторождений полезных
ископаемых

УТЕПОВА ЗАМАНБЕК ГАБИТОВИЧА

РАЗРАБОТКА ЭФФЕКТИВНЫХ ТЕХНИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ДЛЯ БУРЕНИЯ И ОСВОЕНИЯ ГЕОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СКВАЖИН С ВЫСОКИМИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Актуальность темы. Потребность в буровых алмазных инструментах с улучшенными механическими и эксплуатационными характеристиками для добычи полезных ископаемых в республике Казахстан и в мире с каждым годом быстро растет. Бурение технологических и инженерно-геологических скважин в условиях сложных и переменных геолого-технических разрезов требует постоянного совершенствования породоразрушающего инструмента. Особенности таких разрезов – чередование мягких и плотных пород, наличие пластичных глин, а также развитая трещиноватость нижних интервалов – предъявляют к долотам повышенные требования по устойчивости, износостойкости и стабильности работы. Наиболее острой становится задача обеспечения равномерной работы режущих элементов и исключения так называемого эффекта «зависания» инструмента, который приводит к снижению механической скорости бурения и неравномерному износу вооружения.

Долгое время основным типом бурового инструмента для таких условий оставались твердосплавные лопастные долота и пикобуры. Они демонстрируют удовлетворительную эффективность при бурении легкоразрушаемых пород верхнего интервала разреза, однако теряют производительность при переходе к более плотным слоям. Существующие конструкции таких долот допускают локальный износ вблизи оси, что вызывает нестабильную работу инструмента и прерывистую углубку забоя. При этом износ в центральной зоне нарушает равновесие нагрузок, увеличивает осевую вибрацию и приводит к «зависанию» – временному прекращению бурения без выхода инструмента из скважины. Это явление особенно часто наблюдается при бурении пластичных, вязких глин и чередующихся пород с плотными включениями, где сопротивление породы резко возрастает по мере продвижения долота.

Появление и активное внедрение в практику долот с поликристаллическими алмазными резцами (PDC) стало важным этапом повышения эффективности бурения. PDC резцы обладают высокой износостойкостью, сохраняют режущую способность на больших интервалах и обеспечивают значительное повышение механической скорости проходки. Однако стандартные конструкции PDC долот были ориентированы в первую очередь на однородные, малотрещиноватые породы и непрерывный процесс разрушения. В условиях переменной литологии и высокой трещиноватости эффективность таких долот существенно снижается. В трещиноватых породах, где наблюдаются значительные потери промывочной жидкости, ухудшаются условия очистки забоя и отвода тепла от режущих элементов. В результате PDC резцы подвергаются локальному перегреву, термическому старению и ускоренному абразивному износу. Дополнительно, резкое изменение сопротивления породы при переходе из связных участков в трещиноватые приводит к неравномерному нагружению резцов и возникновению вибраций, снижающих срок их службы.

Еще одной проблемой при бурении трещиноватых пород является нерегулярное разрушение забоя: резец может неожиданно провалиться в пустоту (трещину) или резко натолкнуться на выступ породы, что вызывает значительные ударные и крутильные нагрузки. Традиционные PDC резцы, особенно без дополнительных модификаций, плохо переносят такие режимы, поскольку изначально проектировались для стабильных условий резания.

В этих условиях логичным развитием конструктивных решений становится переход к комбинированному вооружению бурового долота, сочетающему твердосплавные и PDC резцы.

Такая комбинация позволяет распределить функциональные задачи между различными типами резцов: твердосплавные зубья воспринимают ударные и абразивные нагрузки на периферии, где чаще всего происходит контакт с неоднородностями породы, а PDC резцы обеспечивают эффективное резание в центральной и промежуточной зонах. Однако простое объединение резцов разного типа не гарантирует желаемого результата. Необходима рациональная расстановка резцов по радиусу, а также согласование глубины врезания, формы посадочных гнезд, гидродинамических каналов и профиля лопастей. Только при комплексном подходе комбинированное вооружение способно повысить устойчивость долота, предотвратить «зависание» и повысить проходку на одно долото.

При этом отдельного внимания требует совершенствование самих PDC резцов. Для оснащения инструментов для бурения горных пород используются композиционные алмазосодержащие материалы (КАМ) на основе WC-Co-сплавов (композиты системы $S_{\text{алмаз}}-(WC-Co)$), поскольку они обладают хорошим сочетанием твердости, износостойкости, прочности и трещиностойкости, а также рядом других полезных свойств. От качества этих инструментов зависит скорость бурения и объем добычи полезных ископаемых. Современные буровые инструменты должны не только обеспечивать высокую эффективность работы, но и соответствовать экологическим стандартам, минимизируя отрицательное воздействие на окружающую среду. Механические и эксплуатационные свойства буровых инструментов зависят от физико-механических и режущих свойств композитов $S_{\text{алмаз}}-(WC-Co)$. Спеченные КАМ обладают свойствами, существенно отличными от свойств каждого отдельно взятого компонента, входящего в их состав, и, в то же время, частично обладая свойствами металла (например, пластичностью, теплопроводностью) и керамики (например, высокими твердостью, упругостью и термостойкостью). Эти свойства зависят от фазового состава, микроструктуры и морфологии, которые, в свою очередь, зависят от физико-механических свойств их составляющих, способов и технологических режимов спекания. Некоторые композиты системы $S_{\text{алмаз}}-(WC-Co)$ обладают такими механическими и эксплуатационными свойствами, которые недостижимы в традиционных материалах.

Однако в процессе бурения прочных и абразивных горных пород твердосплавная матрица подвергается сильному абразивному, усталостному и адгезионному изнашиванию, что ограничивает практическое применение КАМ и снижает ресурс их эксплуатации. При этом на рабочей поверхности КАМ в процессе бурения скважин в прочных и абразивных горных породах протекают физико-химические процессы, которые могут привести к необратимым изменениям в микроструктуре твердосплавной матрицы. Кроме того, из-за слабой адгезии между алмазными зёрнами и матрицей они целиком могут выпадать из твердосплавной матрицы во время работы КАМ, что существенно снижает износостойкость породоразрушающего инструмента.

К недостаткам рассматриваемых КАМ следует отнести графитизацию алмазных зёрен и интенсивный рост карбидных зёрен, происходящие при их спекании, а также хрупкость твердосплавной матрицы.

Поэтому улучшение алмазоудержания, повышение прочности, надежности и износостойкости композитов $S_{\text{алмаз}}-(WC-Co)$, а также разработка эффективных инструментов на их основе является важной задачей науки и техники, поскольку это значительно расширяет область их применения и влияет на добычу полезных ископаемых.

В теорию и развитие технологии получения композиционных материалов весомый вклад внесли известные учёные Скороход В.В., Кислый П.С., Новиков Н.В., Туркевич В.З., Александров В.А., Шило А.Ю., Лисовский А.Ф., Мечник В.А., Barrer R.M., Clark P.W., Coble R.L., Kingery W.D., Nabarro F.R.N., Nicholas M., Scott P.

В развитии техники и технологии бурения скважин различного назначения большой вклад внесли зарубежные и отечественные ученые и производственники: Воздвиженский Б.И., Куличихин Н.И., Шамшев Ф.А., Башкатов Д.Н., Козловский Е.А., Панков А.В., Квашнин Г.П., Башкатов А.Д., Олоновский Ю.А., Дрягалин Е.Н., Тесля В.Г., Беляков В.М., Третьяк А.Я., Дубровский В.В., Белицкий А.С., Бессонов Н.Д., Новиков Г.П., Шищенко Р.И., Романенко В.А., Драхлис С.Л., Федоров В.С., Эпштейн Е.Ф., Оницин В.П., Кожевников А.А., Давиденко А.Н.,

Хоменко В.Л., Мусанов А.М., Танатаров Т.Т., Федоров Б.В., Билецкий М.Т., Ратов Б.Т., Кудайкулова Г.А. и многие другие.

Существует несколько подходов для улучшения свойств и снижения стоимости композиционных материалов. Один из них - применение плазменно-искрового спекания (ПИС), позволяющего быстро получать материалы с мелкозернистой структурой и повышенными механическими характеристиками за счёт высокоскоростного нагрева порошковой смеси в вакууме под давлением. Также эффективным является введение в состав карбидов, боридов, нитридов и оксидов переходных металлов, которые препятствуют росту зерна WC и повышают прочность и износостойкость.

Особое значение имеет размер зерна WC, напрямую влияющий на твердость и вязкость разрушения. Добавки ультрадисперсных и нанопорошков (например, Cr₃C₂, VC, Al₂O₃) способствуют его измельчению и улучшению свойств, однако повышают стоимость материалов.

Для систем С_{алмаз}-(WC-Co) при использовании в буровом инструменте важно изучение структуры и трибологических свойств, особенно при работе в абразивных породах. Добавки CrB₂ и другие многокомпонентные модификаторы могут снижать коэффициент трения и износ, однако данные по их влиянию ограничены и требуют дальнейшего уточнения.

Таким образом, повышение износостойкости композиционных алмазосодержащих материалов остаётся **актуальной задачей**, связанной с разработкой эффективных породоразрушающих инструментов. Перспективным направлением является создание композитов системы С_{алмаз}-(WC-6%Co)-CrB₂ для бурения прочных и абразивных горных пород.

Цель и задачи исследования. Целью настоящей работы является обоснование конструктивных параметров бурового долота с комбинированным вооружением с высокими эксплуатационными характеристиками в условиях литологически неоднородного и трещиноватого разреза при бурении геотехнологических скважин.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**: Проанализировать геолого-технические условия бурения геотехнологических скважин, на примере месторождения Буденовское, как одного из крупнейших объектов для разработки уранового сырья.

Исследовать причины неравномерного износа режущих элементов и возникновения явления «зависания» при использовании традиционных твердосплавных и PDC долот.

Обосновать принципы формирования комбинированного вооружения долота, сочетающего твердосплавные и PDC резцы, с учетом распределения нагрузок и условий разрушения породы.

Усовершенствовать состав и структуру PDC резцов путем модификации матричного материала и геометрических параметров режущей части для повышения термостойкости, износостойкости и стойкости к динамическим нагрузкам.

Провести анализ износостойкости КАМ и породоразрушающих инструментов, изготовленных на их основе.

Исследовать влияние добавки CrB₂ в интервале от 0 до 10% на изменение нанотвердости H, модуля упругости E в различных фазах спеченных образцов твердосплавных матриц.

Провести стендовые испытания разработанных инструментов при бурении гранита и подготовить методические материалы для применения новых инструментов в промышленной практике.

Изготовить опытные образцы комбинированного долота, оснащенного вставками из сформированных КАМ и провести производственные испытания разработанных инструментов в условиях Буденовского месторождения.

Идея работы заключается в том, что повышение эффективности бурения технологических скважин в условиях литологически неоднородного и трещиноватого разреза может быть достигнуто за счет разработки бурового долота с комбинированным вооружением, в котором твердосплавные и усовершенствованные PDC резцы работают согласованно, компенсируя слабые стороны друг друга. Устойчивость долота к динамическим нагрузкам, перегреву и неравномерному износу достигается не только за счет рациональной расстановки

режущих элементов, но и благодаря направленному улучшению состава и конструкции PDC резцов, изготовленных на основе сформированных методом плазменно-искрового спекания композиционных алмазосодержащих материалов $C_{\text{алмаз}}-(WC-Co)$ с добавками CrB_2 , что позволяет адаптировать их к сложным геолого-техническим условиям и существенно увеличить ресурс работы инструмента.

Объект исследования – процессы разрушения горных пород и износа режущих элементов бурового инструмента при бурении технологических скважин в литологически неоднородных и трещиноватых разрезах, конструктивные параметры буровых долот с комбинированным вооружением, влияющие на эффективность и устойчивость их работы в указанных условиях, а также композиционные алмазосодержащие материалы системы $C_{\text{алмаз}}-(WC-Co)-CrB_2$.

Предмет исследования – принципы формирования и оптимизации комбинированного вооружения бурового долота, включая взаимное расположение и функциональное взаимодействие твердосплавных и усовершенствованных PDC резцов, а также влияние состава, структуры, алмазоудержания и износостойкости композиционных алмазосодержащих материалов на повышение стойкости и эффективности инструмента в сложных геолого-технических условиях.

Методика работы. Диссертационная работа основана на комплексном подходе, включающем теоретические, лабораторные, конструкторские и экспериментальные исследования, направленные на создание бурового долота для сложных литологических условий. Основные задачи включали устранение «зависания», разработку комбинированного вооружения и модификацию PDC-резцов.

На первом этапе проведён анализ геолого-технических условий бурения и причин «зависания» долота, выявлены конструктивные и технологические факторы, влияющие на неравномерное разрушение пород. На основе полученных данных сформулированы требования к новой конструкции инструмента.

На втором этапе разработано долото с комбинированным размещением твердосплавных и PDC-резцов и оптимизированной геометрией, исключая «зависание» за счёт рационального распределения вооружения.

Параллельно выполнены исследования по улучшению PDC-резцов. Методом плазменно-искрового спекания получены композиты WC-Co с добавкой CrB_2 в различных концентрациях. Изучались их структура, механические и трибологические свойства.

Применялись современные методы анализа: СЭМ и EDS для исследования микроструктуры, оптическая профилометрия для оценки шероховатости, микротвердость и нанотвердость по методу Виккерса и Оливера–Фара, а также испытания износостойкости по схеме «цилиндр–вал» при обработке гранита. Поверхности износа исследовались с помощью оптической микроскопии.

Разработанное долото реализовано в виде опытного образца и испытано в промышленных условиях на скважине месторождения «Буденовское», где оценивались его производительность, виброустойчивость и износостойкость.

Практическая значимость работы заключается в разработке и экспериментальной проверке конструкции бурового долота для бурения технологических скважин в сложных литологических условиях. Предложенные решения - комбинированное вооружение (твердосплавные и усовершенствованные PDC-резцы) и оптимизированная геометрия, исключая «зависание», - позволяют повысить механическую скорость бурения и износостойкость инструмента.

Научные результаты способствуют развитию технологий получения композиционных алмазосодержащих материалов на основе WC-Co матриц методом плазменно-искрового спекания. Установлены составы шихты и закономерности формирования структуры и износа КАМ системы $C_{\text{алмаз}}-(WC-Co)-CrB_2$, обеспечивающие повышение их износостойкости.

Разработаны композиционные материалы: $C_{\text{алмаз}}-(66,74WC-4,26Co)-4CrB_2$, обеспечивающий снижение показателей износа WR, WV и WS до 2 раз по сравнению с базовым

составом; $C_{\text{алмаз}}-(61,1\text{WC}-3,9\text{Co})-10\text{CrB}_2$, также демонстрирующий снижение износа по всем основным параметрам.

На основе разработанного КАМ изготовлены экспериментальные алмазные импрегнированные коронки, которые при бурении гранита показали износостойкость примерно в 2 раза выше по сравнению с базовым материалом.

Установлено, что максимальная износостойкость коронок достигается при частоте вращения 250 об/мин и нагрузке 900 кг, а минимальная - при 750 об/мин и 1250 кг.

Реализация результатов исследований. Разработанные в ходе исследований долота типа пикобур, прошли сравнительные испытания и показали производительность на 15-20% выше, ранее применяемых пикобуров.

Разработанные PDC резцы на основе новых КАМ при бурении гранита в два раза превышают износостойкость резцов, изготовленных из КАМ на основе WC-6 Co-матриц.

Научные положения, выносимые на защиту.

1. Оптимизация геометрии осевой части бурового долота и перераспределение резцов по радиусу устраняют неравномерность углубки забоя и предотвращают возникновение «зависания», тем самым обеспечивая эффективность разрушения породы и снижение износа породоразрушающих инструментов.

2. Комбинированное вооружение из твердосплавных и PDC резцов обеспечивает равномерное распределение нагрузки на режущие элементы при бурении неоднородных и трещиноватых пород, что способствует снижению вибрационной неустойчивости и увеличению стойкости долота за счет полной отработки вооружения.

3. Введение микропорошка CrB_2 в количестве 4% (по массе) в состав связующей фазы при изготовлении PDC резцов сформированных методом плазменно-искрового спекания повышает их термостойкость и износостойкость за счет формирования термически стабильной структуры, что особенно актуально при бурении в зонах с потерями промывочной жидкости и затрудненным охлаждением.

Научная новизна работы:

Все результаты, представленные в диссертационной работе, сформулированы и получены впервые, имеют научное и практическое значение и способствуют дальнейшему развитию научных основ разработки композиционных алмазосодержащих материалов на основе твердосплавных матриц и инструментов, изготавливаемых на их основе с повышенной износостойкостью.

Впервые установлено, что причиной возникновения явления «зависания» бурового долота при проходке пластичных и плотных пород является не только физико-механическое сопротивление породы, но и нерациональная геометрия осевой части долота, вызывающая концентрацию нагрузки и локальный износ в центральной зоне, что нарушает равномерность углубки забоя. Это позволило обосновать необходимость целенаправленного изменения формы профиля лопастей и перераспределения режущих элементов вблизи оси вращения долота.

Впервые обоснована эффективность комбинированного размещения твердосплавных и PDC резцов в буровом долоте, основанная на различной чувствительности этих элементов к типу нагрузки и характеру породы. Показано, что твердосплавные резцы эффективно воспринимают ударные нагрузки в трещиноватых зонах, в то время как PDC резцы обеспечивают высокую производительность в более однородных участках.

Впервые установлено, что введение в состав КАМ добавки микропорошка диборида хрома CrB_2 в количестве 4 % обеспечивает снижение скорости износа, что обусловлено формированием мелкозернистой структуры твердосплавной матрицы, более равномерным распределением твердости и модуля упругости увеличением относительной плотности и улучшением прочности сцепления алмазных зерен с твердосплавной матрицей. Дальнейшее увеличение содержания диборида хрома CrB_2 приводит к повышению скорости износа, что обусловлено повышенной хрупкостью твердосплавной матрицы.

Соответствие направлениям развития науки или государственным программам: Диссертация соответствует ключевым направлениям государственной научно-технической

политики и программам, направленным на улучшение промышленности, повышение энергоэффективности и обеспечение экологической безопасности. Ее содержание соответствует целям Государственной программы «Цифровизация экономики Республики Казахстан», Государственной программе «Развитие науки и технологий в Республике Казахстан», а также Государственной программе «Новой промышленной политики Республики Казахстан на 2020–2025 годы»

Личный вклад автора. В работе приведены результаты исследований при непосредственном участии автора в 2023-2026 гг. Основные результаты работы получены диссертантом самостоятельно. Постановка задач, обсуждение результатов и формирование основных выводов проведено совместно с научными консультантами. Лично автором разработаны научные положения, выбор исходных материалов и приготовление смесей для формирования методом плазменно-искрового спекания образцов твердосплавных матриц и композиционных алмазосодержащих материалов, принципы и методики теоретических и экспериментальных исследований. Установление закономерностей изнашивания разработанных образцов композиционных алмазосодержащих материалов и импрегнированных алмазных коронок, изготовленных на их основе, при бурении прочных и абразивных горных пород.

Из работ с соавторами в диссертацию включены только те результаты, которые получены автором лично. В диссертации не содержатся идеи и разработки, принадлежащие соавторам.

Достоверность результатов: Достоверность полученных результатов диссертационной работы подтверждается использованием современного оборудования и аттестованных методик исследований, значительным количеством экспериментальных данных и применением статических методов обработки результатов, сопоставлением полученных результатов с результатами других авторов.

Апробация результатов работ и публикации.

Основные положения диссертационной работы отражены в монографии и 6 научных статьях, в том числе в 1 издании, рекомендованном Комитетом по обеспечению качества в сфере науки и высшего образования (КОКНВО), в 2 журналах, входящих в базу данных Scopus Analytics, а также в сборниках международных научных конференций и международном журнале.

В период с 15 декабря 2024 года по 15 января 2025 года пройдена научная стажировка в Северо-Восточном нефтяном университете Китая (NEPU, Дацин, КНР) под руководством PhD Xiaofeng Zhou.

В рамках работы разработаны композиционные алмазосодержащие материалы и буровое лопастное долото, на которые подана заявка на полезную модель в Национальный институт интеллектуальной собственности Республики Казахстан. Основные результаты диссертации отражены в опубликованных трудах.

Объем и структура работы.

Диссертация состоит из введения, 5 разделов, общих выводов и рекомендаций, содержит 50 рисунков, 6 таблиц, 17 формул, список литературы из источников.

Диссертационная работа выполнена на кафедре «Геология и нефтехимический инжиниринг» НАО "Каспийский университет технологий и инжиниринга им. Ш. Есенова"

Благодарности.

В заключение считаю своим долгом выразить благодарность научным консультантам за конструктивные, ценные профессиональные советы и рекомендации: доктору технических наук, профессору Ратову Б.Т., а также кандидату технических наук, доценту Хоменко В.Л. На протяжении всего периода работы автор ощущал постоянное внимание и поддержку со стороны профессора Қожахмет Қ.Ә.

Отдельную благодарность за ценные консультации и рекомендации по совершенствованию структуры и содержания диссертации автор выражает профессорско-преподавательскому составу кафедры «Геология и нефтехимический инжиниринг», а также коллегам.