

ОБЗОР СОВРЕМЕННОГО ПРИМЕНЕНИЯ ГИДРОТЕХНОЛОГИИ ПРИ ДОБЫЧЕ УГЛЯ

А. А. Кравцов, В. А. Атрушкевич

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова Российской академии наук, г. Москва, Россия

Аннотация: В статье выполнен обзор современных исследований, рассматривающих применение гидротехнологии для дегазации угольных пластов, бурении разгрузочных скважин, оборке и других вспомогательных операциях. При дегазации и работах по управлению горным давлением большую роль играют радиальные щели в скважинах, нарезание которых становится возможным при применении специальных насадок, формирующих струи высокого давления. Эксперименты по оборке кровли с использованием гидромониторного исполнительного органа также показали хорошие результаты, и по производительности не уступают традиционным механическим оборочным машинам. Авторы рассмотренных исследований отмечают перспективность гидротехнологии для указанных процессов, а также выделяют ее преимущества, среди которых безопасность, простота и высокая производительность. За счет современных средств автоматизации и роботизации становится возможным создание новых машин и технологий не только для вспомогательных операций, но и для проходки и выемки угля.

Ключевые слова: гидравлическая добыча, гидротехнология, подземная разработка угля, компьютерное моделирование, автоматизация

Благодарность: Авторы выражают благодарность сотрудникам отдела «Моделирования и управления горнотехническими системами» Института проблем комплексного освоения недр им. Академика Н.В. Мельникова Российской академии наук за консультации и помощь в проведении исследований.

Для цитирования: Кравцов А. А., Атрушкевич В. А. Обзор современного применения гидротехнологии при добыче угля. *Маркшейдерия и недропользование*. 2024. №5. С. 26-33. https://doi.org/10.56195/20793332_2024_5_26_33.

REVIEW OF MODERN APPLICATION OF HYDRAULIC TECHNOLOGY IN COAL MINING

A. A. Kravtsov, V. A. Atrushkevich

Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences. Moscow, Russian Federation

Abstract: Article provides review of modern research on hydraulic technology application for coal seam gas drainage, rock stress relief, rock scaling and other supplementary operations. Radial slots in drilled wells play significant role on gas drainage and stress relief process. Cutting such slots is achievable with high-pressure waterjets bits. Experiments on rock scaling shows good results as well, hydraulic machines achieve same level of productivity as mechanical ones. Author of reviewed researches claims perspectives of this technology due to its safety, simplicity and high productivity. Using modern robotic and automation technology it is possible to use hydraulic technology not only for supplementary operations, but for roadheading and coal extraction as well.

Keywords: hydraulic mining, hydraulic technology, underground coal mining, computer simulation, automation

Acknowledgment: The authors express gratitude to the staff of the Department of “Modeling and Control of Mining Technical Systems” of the Institute for Problems of Integrated Development of Subsoil named after Academician N.V. Melnikov of the Russian Academy of Sciences for consultations and assistance in conducting research.

For citation: Kravtsov A. A., Atrushkevich V. A. Review of modern application of hydraulic technology in coal mining. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2024;(5):26-33. (In Russ.). https://doi.org/10.56195/20793332_2024_5_26_33.

Введение

Гидравлическая добыча подразумевает использование воды для осуществления одной или нескольких технологических операций очистного цикла, таких как отбойка, транспортировка, промывка и сортировка полезных ископа-

емых. В процессе гидравлической добычи вода под высоким давлением направляется на горную породу, размывая и разрушая её. Образовавшаяся пульпа, состоящая из воды и мелких частиц породы, затем транспортируется по специальным каналам или трубопроводам к месту дальнейшей обработки.

Этот метод широко применяется в горнодобывающей промышленности для добычи золота, олова, алмазов и других полезных ископаемых, особенно в тех случаях, когда традиционные методы добычи оказываются неэффективными или экономически нецелесообразными. Гидравлическая добыча позволяет эффективно извлекать полезные ископаемые из рыхлых и слабо сцепленных пород, а также из россыпных месторождений.

Одним из ключевых преимуществ гидравлической добычи является её способность обрабатывать большие объемы материала за относительно короткое время. Эксперименты по использованию высоконапорных струй для добычи угля активно проводились в прошлом веке как в СССР, так и за рубежом. В СССР такие эксперименты начались в 1930-х годах и продолжались вплоть до 1980-х [1,2]. Советские инженеры и ученые активно исследовали возможности применения гидравлической отбойки в различных угольных бассейнах страны, таких как Кузнецкий, Донецкий и Печорский. В ходе этих исследований были разработаны и испытаны различные конструкции гидромониторов и насосных станций, а также методы управления процессом добычи. В некоторых случаях гидравлическая отбойка показала высокую эффективность, особенно в условиях сложных геологических структур и при добыче угля из тонких пластов.

За рубежом, в частности в США, Канаде и Китае, также проводились активные исследования и эксперименты по использованию высоконапорных струй для добычи угля. В этих странах были разработаны свои уникальные технологии и оборудование для гидравлической отбойки. Например, в 60-х годах США был реализован проект механогидравлического комбайна Hydrominer, осуществляющего подрезку угля высоконапорными струями и скалывание угля механическими клиньями. Помимо этого, были проведены эксперименты по добыче с использованием струй различного давления — от 70 до 450 МПа, причем струи более низкого давления показали лучшую энергоэффективность добычи [3].

Несмотря на значительные успехи и перспективы, гидравлическая отбойка угля не получила широкого распространения в промышленном масштабе — комбайны типа longwall для добычи сплошным забоем опередили механогидравлические очистные машины в плане стоимости и скорости добычи. Тем не менее, накопленный опыт и результаты исследований в области гидравлической отбойки угля внесли значительный вклад в развитие горнодобывающей техники и технологий, а также в понимание процессов разрушения и транспортировки горных пород с помощью высоконапорных струй. К тому же струи высокого давления продолжают использоваться для вспомогательных целей при разработке угольных пластов, а новые разработки в области автоматизации и роботизации добычи открывают новые перспективы для гидродобычи.

Цель исследований: анализ современного применения высоконапорных струй в добыче угля, разработка предложений по применению гидродобычи в автоматизированном очистном цикле.

Объект исследования: технология гидравлической добычи, а также современное применение высоконапорных струй в горном деле.

Методы и материалы исследования

Методами исследований выступают поиск и синтез данных из научных статей, отчетов и литературы, отражающих

современное состояние применения гидротехнологии при добыче угля, сравнительный анализ полученных результатов с традиционной технологией добычи.

Результаты исследования и их обсуждение

На сегодняшний день проводятся эксперименты по использованию высоконапорных струй для широкого круга задач проходческого и очистного цикла. Некоторые технологии успешно внедрены, другие находятся на стадии исследований. Особенную важность представляет собой дегазация пластов — в ходе разработки угольных месторождений серьезную опасность представляет метан, заключенный в пластах. Этот газ является чрезвычайно взрывоопасным и может привести к катастрофическим последствиям, таким как взрывы и пожары, что ставит под угрозу жизнь шахтеров и целостность оборудования. Метан образуется в процессе разложения органических веществ и накапливается в угольных пластах на протяжении миллионов лет. При нарушении целостности пласта, например, в процессе бурения или выемки угля, метан может внезапно высвободиться в больших объемах.

Для предотвращения таких опасных ситуаций перед началом выемки угля необходимо провести дегазацию пласта. Дегазация представляет собой процесс удаления метана из угольного пласта и прилегающих пород. Это достигается путем бурения специальных дегазационных скважин, через которые метан выводится на поверхность и утилизируется или используется в качестве топлива. Эффективная дегазация не только снижает риск взрывов и пожаров, но и улучшает условия труда в шахте, уменьшая концентрацию вредных газов в воздухе. Кроме того, удаление метана способствует повышению безопасности и эффективности добычи угля, а также снижает негативное воздействие на окружающую среду, так как метан является мощным парниковым газом.

Для увеличения эффективности процесса Ш. Чуминг, Л. Байкан, С. Чен и др. [4] предлагают увеличить площадь поверхности скважины путем нарезания в ней радиальных щелей высоконапорными струями.

На рис. 1 представлена принципиальная схема устройства для одновременного бурения и нарезания радиальных щелей [5].

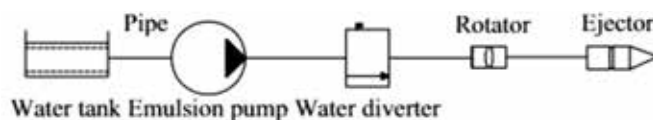


Рис. 1. Принципиальная схема устройства для бурения и нарезания радиальных щелей

Fig. 1. Scheme of device for drilling and radial slotting

Для оценки эффективности применения радиальных скважин исследователи провели компьютерное моделирование процесса дегазации. Проницаемость породы в разработанной модели описывается формулой (1)

$$k(\sigma, p) = \varepsilon k_0 e^{-\beta(\sigma/3 - \alpha p)} \quad (1)$$

где σ — напряжение, Н/м²;

k_0 — начальная проницаемость, Д;

p — давление газа, Н/м²;

$\alpha, \beta, \varepsilon$ — эмпирически определяемые коэффициенты.

На рис. 2 представлено распределение давления газа вокруг скважины.

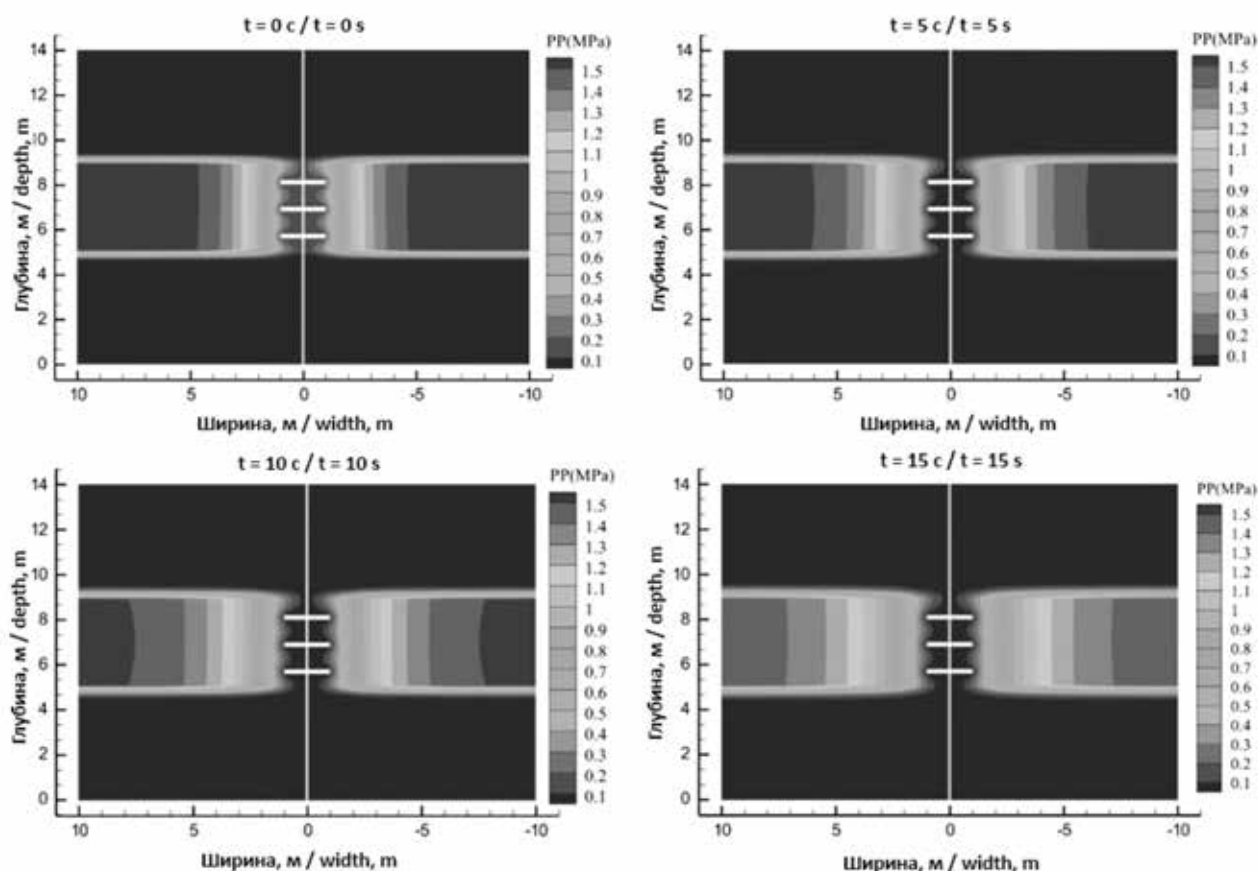


Рис. 2. Распределение давления газа в процессе дегазации в различные моменты времени t
 Fig. 2. Spatial distribution of gas pressure during gas drainage at different timestamps t

Также авторы отметили безопасность гидрорезания при дегазации. Во-первых, влажность в области резания сильно повышается, что существенно снижает риск возгорания метана. Во-вторых, повышенная влажность способствует осаждению угольной пыли, являющейся одним из основных факторов риска в угольных шахтах. Так, угольная пыль не только представляет собой взрывоопасный материал, но и негативно влияет на здоровье шахтеров, вызывая заболевания дыхательных путей [6-8].

Другая группа исследователей, включающая Я. Кселин, Х. Липенг, Л. Тинган и др., создала насадку для нарезания радиальных щелей и провела ее полевые испытания. Затем была разработана ее математическая модель (рис. 3).

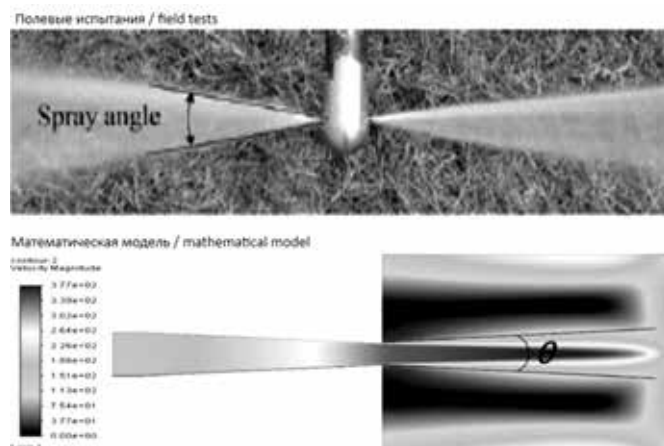


Рис. 3. Полевые испытания и математическая модель насадки для нарезания радиальных щелей в скважине
 Fig. 3. Field tests and mathematical model of waterjet radial slotting nozzle

По результатам испытаний были определены оптимальные параметры сопла насадки: диаметр 3 мм, угол распыления 7° и длина 9 мм. Максимальная глубина эффективного резания составила 18 мм, а при попытках резания на глубину более 21 мм эффективность резки снижалась.

Полевые испытания проходили на угольной шахте Руджигу. Давление воды составило 45 МПа. После нарезания щелей при указанных параметрах насадки и давления скорость извлечения метана увеличилась с $0,126 - 1,476 \text{ м}^3/\text{ч}$ до $0,138 - 9,198 \text{ м}^3/\text{ч}$. Исследователи пришли к выводу, что нарезание радиальных щелей высоконапорными струями улучшает проницаемость угля и повышает эффективность его дегазации [9].

Группой ученых в составе Л. Ченгвей, К. Бинвейи и Л. Юи была предложена конструкция сопла, генерирующего пульсирующую струю.

Конструкция представлена на рис. 4.

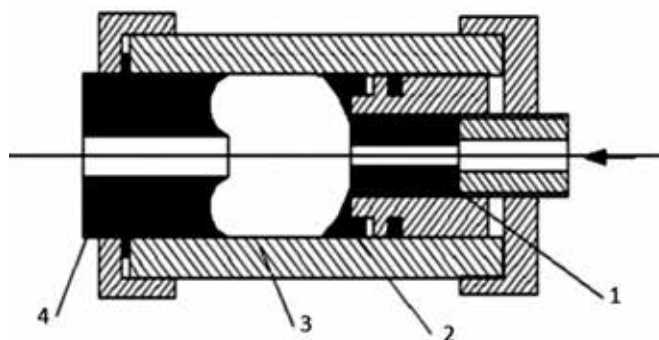


Рис. 4. Конструкция сопла с пульсирующей струей: 1 – входное сопло, 2 – стенка, 3 – кавитационная камера, 4 – выходное сопло /
 Fig. 4. Oscillating waterjet nozzle: 1 – inbound nozzle, 2 – wall, 3 – cavitation chamber, 4 – outbound nozzle

Принцип работы сопла заключается в следующем. Струя из входного сопла 1 проходит через кавитационную камеру 3, где часть струи распыляется, и распыленная часть ударяется в стенки 2 камеры. Далее отклоненная таким образом жидкость поступает обратно к входному соплу 1, где разгоняется входящей струей в направлении выходного сопла 4 – таким образом создается пульсирующая струя [10].

График давления постоянной и пульсирующей струи представлен на рис. 5.

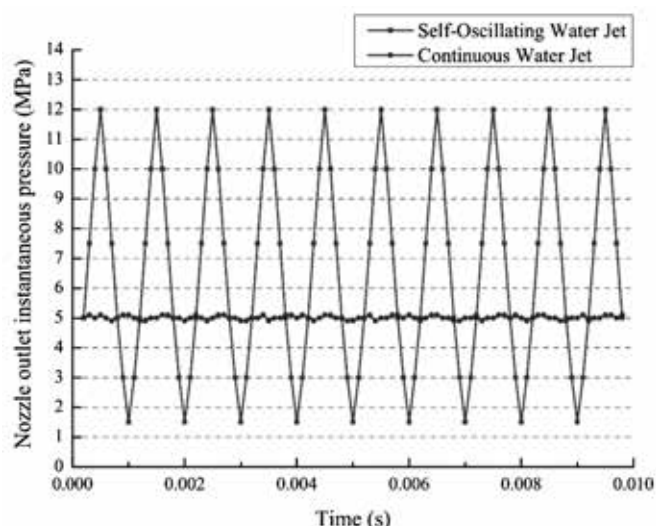


Рис. 5. График давления постоянной и пульсирующей струи от времени
Fig. 5. Pressure-time chart of constant and oscillating water jet

Согласно полевым испытаниям, проведенным на Жонглиангшан Саус Майн, нарезание щелей в скважине пульсирующими струями значительно повысили эффективность дегазации. Графики общего объема извлеченного газа и минутного дебита представлены на рис. 6 и 7 соответственно.

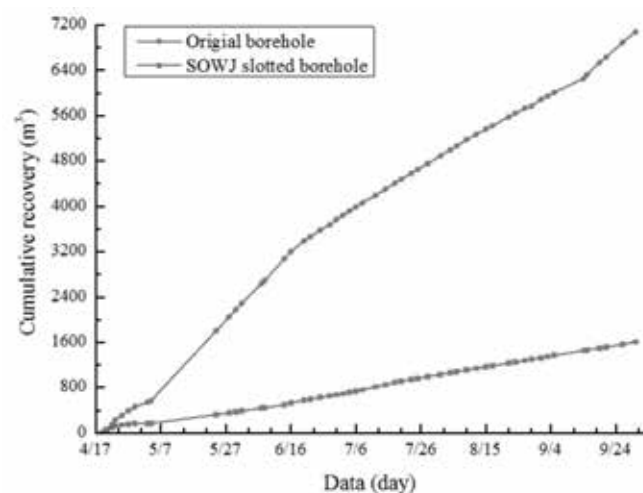


Рис. 6. Общий объем извлеченного газа из обычной скважины и скважины с щелями
Fig. 6. Total volume of extracted gas from conventional and slotted well

Как было показано в данном и в предыдущих исследованиях, нарезание щелей в скважинах значительно увеличивает производительность дегазации. К тому же увеличивается радиус дегазации, что позволяет бурить меньшее количество скважин.

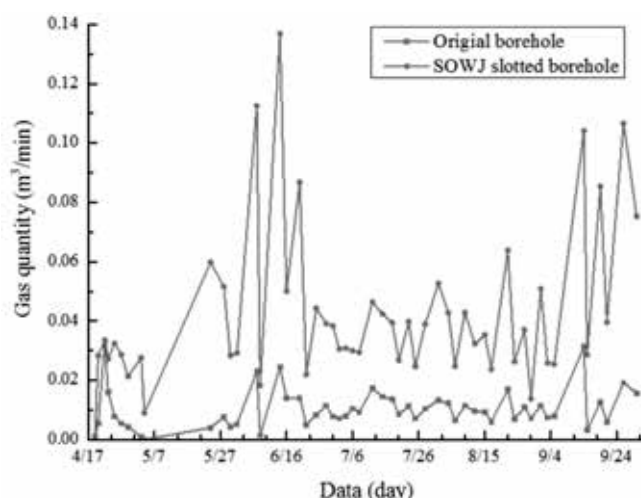


Рис. 7. Минутный дебит обычной скважины и скважины с щелями
Fig. 7. Flow rate per minute of conventional and slotted well

Впрочем, нарезание щелей в выработках может использоваться не только для удаления газа – разгрузочные щели также применяются для управления горным давлением. Эти щели, создаваемые в горных породах, играют важную роль в обеспечении безопасности и стабильности горных выработок. Когда горные породы подвергаются значительным нагрузкам, возникающим из-за горного давления, существует риск обрушения или деформации выработок. Разгрузочные щели помогают перераспределить напряжения в породах, снижая концентрацию напряжений в критических зонах. Это достигается за счет создания контролируемых зон слабости, которые позволяют породам деформироваться более равномерно и предсказуемо.

Л. Тингкан, Я. Зайфенг, Ч. Фантао и Ж. Жичан провели численное моделирование и построили графики распределения горного давления вблизи разгрузочных скважин с радиальными щелями.

На рис. 8 изображено распределение давления при толщине радиальной щели в 10 и 60 мм.

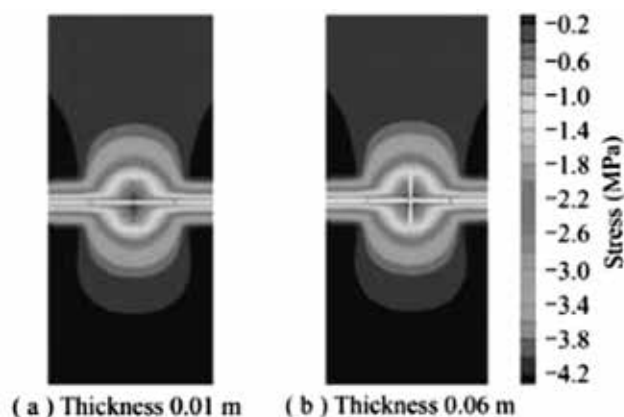


Рис. 8. Распределение горного давления вокруг разгрузочной скважины при толщине радиальной щели в 10 и 60 мм
Fig. 8. Spatial distribution of rock pressure around relief well having radial slot width of 10 and 60 mm

Как видно из графика, наличие щели значительно расширяет зону влияния скважины на горное давление, в то время как толщина щели практически не влияет на распределение давления. Соответственно, тонких высоконапорных струй достаточно для значительного повышения эффектив-

ности разгрузочной скважины [11-13]. Далее исследователи смоделировали влияние нескольких щелей и скважин на горное давление.

На рис. 9 представлено влияние расстояния радиальных щелей на распределение давления, на рис. 10 — влияние взаимного расположения скважин.

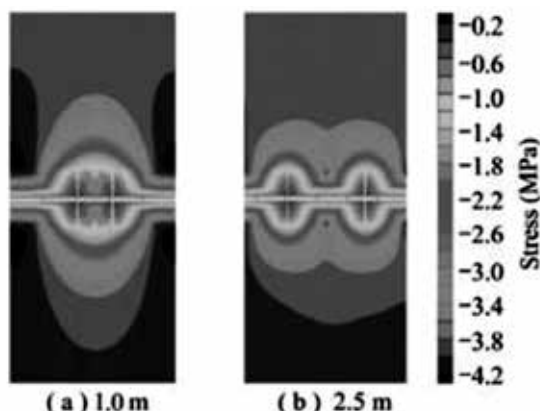


Рис. 9. Распределение горного давления вокруг разгрузочной скважины при расстоянии радиальных щелей в 1 м и 2,5 м

Fig. 9. Spatial distribution of rock pressure around relief well having radial slots spacing of 1 and 2.5 m

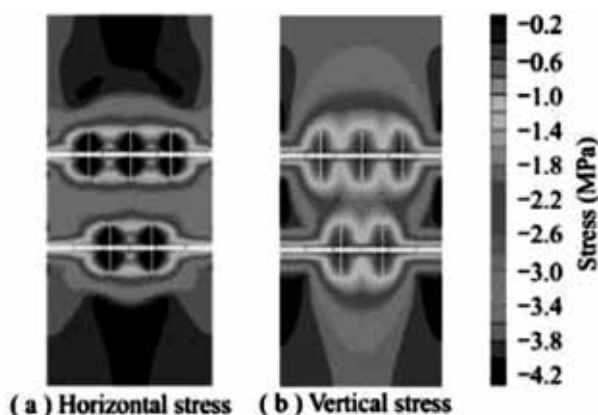


Рис. 10. Распределение горного давления вокруг двух разгрузочных скважин

Fig. 10. Spatial distribution of rock pressure around two relief wells

Авторы исследования делают вывод, что высоконапорные струи могут значительно повысить зону влияния разгруз-

очной скважины, к тому же такие скважины могут служить и для более эффективной дегазации пласта. Нарезание щелей струями не требует сложного оборудования, а необходимые насадки с соплами обладают небольшим размером и легко поместятся в скважину.

Впрочем, не только нарезание щелей, но и сам процесс бурения возможно вести высоконапорными струями. Например, самодвижущиеся гидромониторные буры широко применяются в нефтедобыче для повышения дебита существующих нефтяных скважин путем бурения радиальных скважин от основной. Этот метод позволяет значительно увеличить площадь дренажа и улучшить доступ к нефтеносным пластам, что способствует более эффективному извлечению углеводородов. Радиальные скважины, отходящие от основной, создают дополнительные пути для нефти и газа, что снижает сопротивление потоку и увеличивает скорость добычи [14-16].

Процесс радиального бурения включает использование специализированного оборудования, такого как гибкие буровые трубы и высокоточные навигационные системы, которые позволяют точно направлять буровой инструмент в нужное место. Но в случае бурения дегазационных и разгрузочных скважин процесс значительно упрощается, так как глубина скважины обычно не превышает нескольких десятков метров.

В работе Л. Юи, К. Сонгкианг, Ж. Жаолонг и др. рассмотрены возможности применения самодвижущихся гидромониторных буров в угольных шахтах [17].

На рис. 11 представлено строение гидромониторного бура, на рис. 12 — различные использованные в исследовании буры.

В ходе исследования были определены оптимальные параметры гидравлического бура для угля: угол наклона сопла в продольном направлении 15° , угол наклона сопла в поперечном направлении 90° , расстояние между соплами 2,1 мм. Авторы делают вывод о перспективности применения гидравлических буров для более безопасной и эффективной дегазации угольных пластов [18].

Впрочем, опыты по применению высоконапорных струй не ограничены лишь бурением и дегазацией — также проводились эксперименты по оборке кровли и стен выработок [19,20]. Х. Миллер и М. Кучта описывают испытания оборочных машин, применяющих гидромониторные насадки.

На рис. 13 представлена машина, участвовавшая в эксперименте.

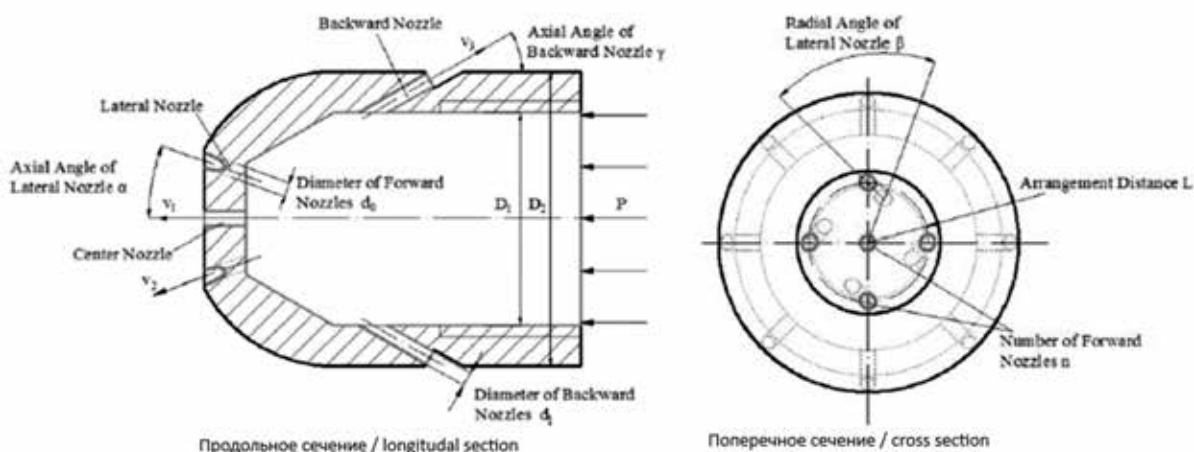


Рис. 11. Строение гидромониторного бура в продольном и поперечном сечении

Fig. 11. Scheme of hydraulic drilling bit in longitudinal and cross section

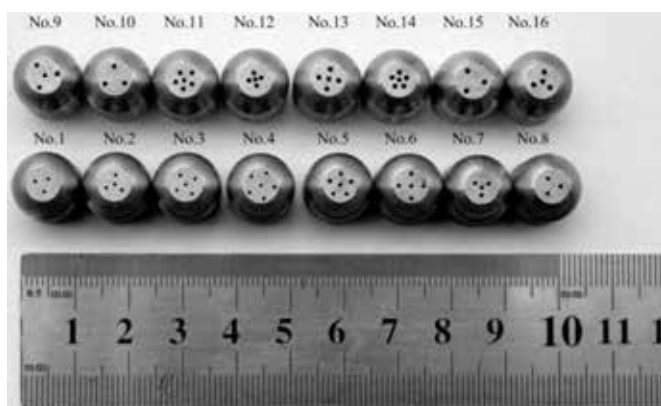


Рис. 12. Использовавшиеся в исследовании гидромониторные буры
Fig. 12. Tested waterjet drilling bits



Рис. 13. Оборочная машина с гидромониторным рабочим органом
Fig. 13. Waterjet rock scaling machine

Несмотря на то, что было испытано небольшое количество различных насадок для формирования струй, эксперимент по гидравлической оборке был признан успешным, производительность работ не уступала механической оборке. Авторы отмечают следующие преимущества гидравлической оборки:

- отсутствие прямого контакта между исполнительным органом и породой;
- возможность направлять струи в разные направления одновременно;
- возможность выборочной отбойки — тонкая струя позволяет точно обрабатывать определенную поверхность, не затрагивая соседние с ней поверхности;
- естественное пылеподавление;
- возможность регулировать давление, расход воды и другие параметры в зависимости от крепости пород;
- простота автоматизации и применения на дистанционно-управляемых машинах.

Авторы отмечают сложности по удалению воды из выработки, с которыми они столкнулись в процессе эксперимента, поэтому необходимо найти баланс между давлением струи и расходом воды. Повышение давления снизит расход воды, но увеличит удельную энергоёмкость процесса, что с определенного момента сделает его неэффективным. С другой стороны, большой расход создаст проблемы по удалению и очищению отработанной воды. Тем не менее, для разрушения некрепких пород не требуется большое давление, поэтому задача по поиску наиболее эффективного баланса давление-расход легко выполнима в условиях угольных шахт.

Также следует упомянуть о роботе для испытаний гидро-резания компании HydroCoal Plus (рис. 14).



Рис. 14. Робот для испытаний гидрорезания компании HydroCoal Plus
Fig. 14. HydroCoal Plus robot for waterjet cutting tests

Проект был запущен в 2018 году с целью разработки и внедрения методик, повышающих эффективность и безопасность процессов гидрорезания в горной промышленности. К концу 2019 года были проведены первые полевые испытания в экспериментальной выработке «Барбара». Робот управляется дистанционно с пульта управления. Исследователи установили, что использование струи большего диаметра при сниженном давлении оказывается более эффективным по сравнению с применением тонкой струи с повышенным давлением. В ходе экспериментов учёные определили, что оптимальными параметрами являются давление до 30 МПа и расход воды до 500 л/мин [21].

Заключение

В статье были рассмотрены современные исследования в области применения гидротехнологии при добыче угля, в том числе бурение скважин и шпуров, дегазация, нарезание разгрузочных щелей, оборка. За счет малого размера насадок для гидрорезания становится возможным нарезать радиальные щели в скважинах, что значительно увеличивает скорость дегазации и расширяет площадь влияния разгрузочных скважин на напряжение в горном массиве. Также само бурение скважин возможно реализовать с помощью самодвижущихся гидромониторных насадок — соответственно, бурение и нарезание щелей можно проводить, используя исключительно энергию воды. Также был рассмотрен опыт по оборке кровли выработки машиной с гидромониторным рабочим органом.

Несмотря на активные разработки и внедрение гидродобычи в первой половине прошлого века, сегодня в угольных выработках гидротехнология применяется только для вспомогательных операций. Впрочем, как было указано в рассмотренных статьях, гидротехнология перспективна ввиду малооперационности и легкости автоматизации. Поэтому возрождение исследований применения гидротехнологии совместно с современными средствами роботизации и автоматизации может дать в результате совершенно новые машины и технологии проходки и добычи, аналогов которым не было ранее [22].

Выводы

В статье выполнен анализ современных исследований применения гидротехнологии при добыче угля.

Определены технологические процессы и направления, в которых применение гидротехнологии наиболее целесообразно.

Показано, что проходческие и очистные работы с применением роботизированной или автоматизированной гидро-технологии являются перспективной областью исследований.

Результаты исследований могут быть полезны широкому ряду научных работников и специалистов, исследующих новые способы проходки и выемки угля и других полезных ископаемых.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Грачев Н.П. Состояние и перспективы научных исследований гидромеханизации горных работ. *Записки Горного института*. 1959;41(1):135-139. [Grachev NP. State and perspectives of hydrojet mining scientific research. *Notes of Mining Institute*. 1959;41(1):135-39 (in Russ.)].
2. Кравцов АА, Дмитрак ЮВ, Атрушкевич ВА. Опыт применения подземной гидравлической добычи угля в СССР и России. *Маркшейдерия и недропользование*. 2023;3(125):18-23. [Kravtsov AA, Dmitrak UV, Atrushkevich VA. Experience of underground hydraulic mining in USSR and Russia. *Mine surveying and subsurface use*. 2023;3(125):18-23 (in Russ.)]. DOI: 10.56195/20793332_2023_3_18_23.
3. Summers DA. *Waterjetting Technology*. Taylor & Francis, 1995.
4. Shen C, Lin B, Sun C, Zhang Q. Analysis of the stress-permeability coupling property in water jet slotting coal and its impact on methane drainage. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2015;126:231-41. DOI: 10.1016/j.petrol.2014.11.035.
5. Lin B, Shen C. Coal permeability-improving mechanism of multilevel slotting by water jet and application in coal mine gas extraction. *Environmental Earth Sciences*. 2015;73:5975-86. DOI: 10.1007/s12665-015-4154-8.
6. Lu T, Zhao Z, Hu H. Improving the gate road development rate and reducing outburst occurrences using the waterjet technique in high gas content outburst-prone soft coal seam. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2011;48(8):1271-82. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2011.09.003.
7. Lu Y, Zhang Y, Tang J, Yao Q. Switching mechanism and optimisation research on a pressure-attitude adaptive adjusting coal seam water jet slotter. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2022;32(6):1167-79. DOI: 10.1016/j.ijmst.2022.09.005.
8. Jun X, Yunpei L, Quanle Z, et al. Elimination of coal and gas outburst risk of low-permeability coal seam using high-pressure water jet slotting technology: A case study in Shihuatian Coal Mine in Guizhou Province, China. *Energy Sci Eng*. 2019;7(7):1394-404. DOI: 10.1002/ese3.359.
9. Yang X, He L, Lu T. Optimization and field application of water jet for coal bed methane stimulation. *Energy Science & Engineering*. 2019;7(6):3186-203. DOI: 10.1002/ese3.490.
10. Liu C, Xia B, Lu Y. Coalbed methane extraction using the self-oscillating water jet slotting method. *Energies*. 2018;11(4):897. DOI: 10.3390/en11040897.
11. Lu T, Yao Z, Chang F. Outburst control in soft and outburst prone coal seam using the waterjet slotting technique from modeling to field work. *Journal of Coal Science and Engineering (China)*. 2012;18:39-48. <https://doi.org/10.1007/s12404-012-0108-x>.
12. Lin B, Yan F, Zhu C. Cross-borehole hydraulic slotting technique for preventing and controlling coal and gas outbursts during coal roadway excavation. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2015;26:518-25. DOI: 10.1016/j.jngse.2015.06.035.
13. Sang S, Xu H, Fang L. Stress relief coalbed methane drainage by surface vertical wells in China. *International Journal of Coal Geology*. 2010;82(3-4):196-203. DOI: 10.1016/j.coal.2009.10.016.
14. Buset P, Riiber M, Eek A. Jet drilling tool: cost-effective lateral drilling technology for enhanced oil recovery. *SPE/ICoTA Well Intervention Conference and Exhibition*. SPE, 2001:SPE-68504-MS. DOI: 10.2118/68504-MS.
15. Ma DJ, Li GS, Huang ZW, Li J. Mechanism of a self-propelled multi-hole jet bit and influencing rules on its self-propelled force. *Natural Gas Industry*. 2014;34(4):99-104. DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2014.04.016.
16. Di F, Li GS, Huang ZW. Capability analysis of self-feeding multi-nozzle jet bit in radial horizontal drilling. *China Petroleum Machinery*. 2014;42(6):7-11.
17. Lu Y, Xiao S, Ge Z, Zhou Z. Rock-breaking properties of multi-nozzle bits for tree-type drilling in underground coal mines. *Energies*. 2016;9(4):249. DOI: 10.3390/en9040249.
18. Lu Y, Liu Y, Li X, Kang Y. A new method of drilling long boreholes in low permeability coal by improving its permeability. *International Journal of Coal Geology*. 2010;84(2):94-102. DOI: 10.1016/j.coal.2010.08.009.
19. Miller H, Kuchta M. Waterjet Rock Scaling In Underground Mining And Construction Applications. *Jet News*. 2008:4-15.
20. Wang A, Sun P, Zhang Z, et al. Numerical Simulation and Experimental Study on High-Pressure Water Jet Descaling in Coal Mine Drainage Pipeline. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering*. 2022;46:113-30. <https://doi.org/10.1007/s40997-020-00408-y>.
21. Dubiński J, Jura B, Makówka J, et al. In-situ experimental study on hydro-borehole technology application to improve the hard coal excavating techniques in coal mine. *Scientific Reports*. 2023;13(1):1190. DOI: 10.1038/s41598-023-28501-7.

22. Кравцов АА, Анищенко ВИ, Атрушкевич ВА, Пыталев ИА. Перспективы применения технологии WEBRTC для дистанционного управления горным оборудованием. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2020;12(4):592-99. [Kravtsov AA, Anischenko VI, Atrushkevich VA, Pytalev IA. Perspectives of applying WEBRTC for remote-controlled mining equipment. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2020;4(46):592-99. (In Russ.)]. DOI: 10.21177/1998-4502-2020-12-4-592-599.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ABOUT THE AUTHORS



Кравцов Алексей Александрович – аспирант, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова Российской академии наук, г. Москва, Россия, e-mail: alexey.kravtsov08@gmail.com

Alexey A. Kravtsov – Postgraduate Student, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation, e-mail: alexey.kravtsov08@gmail.com



Атрушкевич Виктор Аркадьевич – доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник отдела Моделирования геотехнических систем, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова Российской академии наук, г. Москва, Россия, e-mail: iugi@mail.ru

Victor A. Atrushkevich – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Leading Research Scientist of the Department of Design Theory of Subsoil Development. Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation, e-mail: iugi@mail.ru

Критерии авторства / Contribution:

Авторы заявляют о равном вкладе каждого в работу над статьей / The authors participated equally in the writing and collection of the material, as well as its processing.

Конфликт интересов / Conflict of interest:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.