

УДК 622.234.57:622.831.3

**Поляков Ю.Е.**, магистр,  
**Усов О.А.**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.  
(ИГТМ НАН Украины)

**ФАКТОРЫ ВЛИЯНИЯ ГИДРООБРАБОТКИ УГЛЯ НА РАЗГРУЗКУ  
ПРИЗАБОЙНОЙ ЧАСТИ МАССИВА**

**Поляков Ю.Є.**, магистр,  
**Усов О.О.**, канд. техн. наук, ст. наук. співр.  
(ІГТМ НАН України)

**ФАКТОРИ ВПЛИВУ ГІДРООБРОБКИ ВУГІЛЛЯ НА РОЗВАНТАЖЕННЯ  
ПРИВИБІЙНОЇ ЧАСТИНИ МАСИВУ**

**Polyakov Yu.E.**, M.S. (Tech.),  
**Usov O.A.**, Ph.D. (Tech.), Senior Researcher  
(IGTM NAS of Ukraine)

**FACTORS OF INFLUENCE OF COAL HYDRAULIC TREATMENT ON  
UNLOADING OF THE FACE AREA IN THE ROCKS**

**Аннотация.** В данной статье рассматривается соответствие практическим наблюдениям общепринятых представлений о разгрузке пласта при его гидрорыхлении за счет развития трещин от давления воды (гидросиловая разгрузка). Рассматривая существующие материалы с этой точки зрения, сталкиваемся с проблемой образования трещин с большим необратимым раскрытием при давлениях нагнетания, меньших минимальной компоненты горного давления, что не может быть объяснено существующими представлениями о развитии трещин. Обоснованно предполагаем, что причиной разгрузки массива от давления вмещающих пород при гидрорыхлении является не развитие трещин под давлением нагнетания, а другие эффекты, связанные с проникновением жидкости в массив.

Выдвигается модель разгрузки предельно напряженного пласта, при которой трещинообразование зависит не от давления воды, а от горного давления, превышающего предел прочности увлажненного угля. Рассмотрено влияние глубины герметизации, и длины фильтрующей части скважины, которые радикально меняют результат гидрообработки. Исходя из практических наблюдений утверждается, что глубина герметизации сильнее влияет на процесс, чем длина фильтрующей части скважины.

**Ключевые слова:** гидросиловой, контактнот трения, гидрообработка, предел прочности, гидрорыхление.

**Актуальность задачи.** Одним из нормативных способов борьбы с внезапными выбросами угля и газа, является гидрообработка угольного массива - гидрорыхление. Этот способ заключается в нагнетании жидкости в призабойную часть массива пласта под давлением. Его эффективность определяется равномерностью увлажнения угля и его разупрочнением (трещинообразованием), а также по сигналам акустической эмиссии. Это приводит к увеличению фильтрации метана через породу угля и его выделению в лицевую часть забоя, отодвиганию опорного давления в глубь пласта и как следствие разгрузке

призабойной части массива, что в свою очередь увеличивает безопасность проведения выемочных работ. Однако возникло предположение, что трещинообразование происходит не от давления воды, а от горного давления, которое становится больше предела прочности

пласта, подвергаемого гидрообработке, и сподвигает к дальнейшему исследованию в данном направлении. Так же заставляет задуматься о доработках ранее принятых моделей разгрузки краевой части массива от опорного давления и факторов влияющих на неё.

**Основное содержание работы.** Основной эффект при гидрообработке выбросоопасного угольного пласта заключается в разгрузке его призабойной части от сил горного давления. Он обнаруживается сейсмоакустическими измерениями, измерениями смещения кровли, а также сравнением поинтервальных замеров газовыделения в контрольные шпурь до и после гидрообработки.

Известно два режима гидрообработки выбросоопасных пластов – гидроотжим и гидрорыхление.

Оба эти режима по гидравлическим параметрам – давлению и темпу нагнетания аналогичны [1]. Разница заключается в длине фильтрующей части шпура и глубине его герметизации. При гидроотжиме шпур герметизируют не глубоко (~ 2 м) и оставляют короткую (~ 0,2 м) фильтрующую часть. А при гидрорыхлении шпур герметизируют глубже (~ 5 м), а его фильтрующую часть делают гораздо длиннее (~ 2 м).

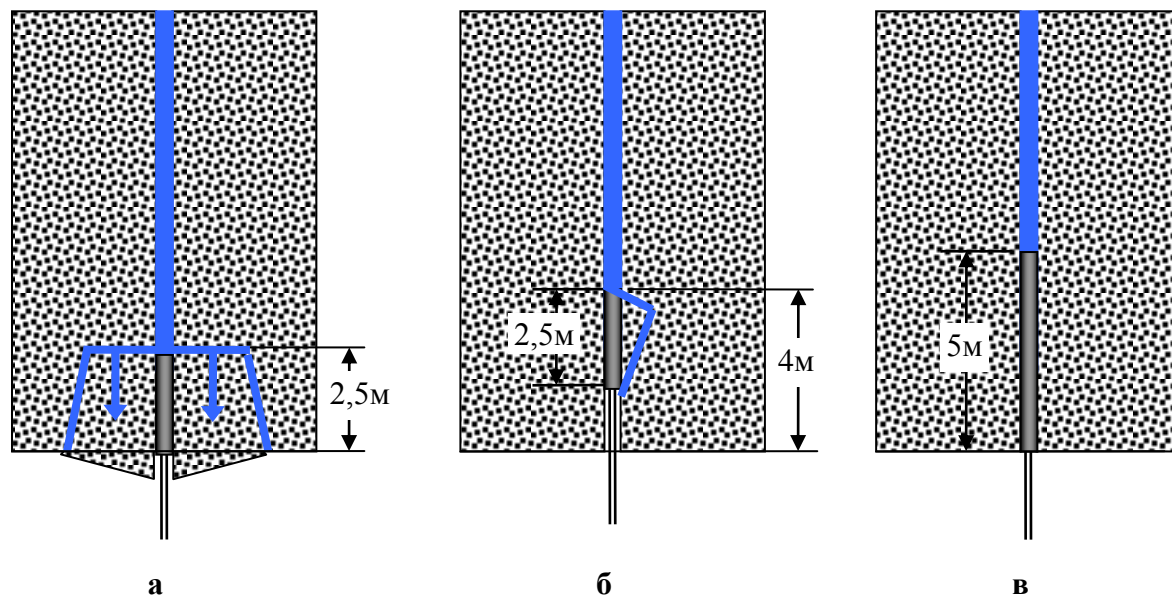
Изменение глубины герметизации и длины фильтрующей части скважины радикально меняют результат гидрообработки. При гидрорыхлении визуальные признаки разрушения призабойной части пласта отсутствуют, ее разгрузка от горного давления определяется путем анализа сейсмоакустики и поинтервальных замеров газовыделения в контрольные шпурь. А при гидроотжиме визуально наблюдается выдвигание части пласта, сопровождаемое почти полным разрушением угля на глубину 0,5-1,0 м.

По нашему мнению, глубина герметизации сильнее влияет на процесс, чем длина фильтрующей части скважины. Об этом свидетельствовали наблюдения за процессом нагнетания воды в пласт из вентиляционного штрека ш. «Восточная» п/о «Ростовуголь». Скважина длиной 40 м была загерметизирована на глубину 2,5 м шланговым затвором длиной 2,5 м. После включения насоса произошло выдвигание пачки угля толщиной ~ 0,2 м, как показано на рисунке 1-а.

В 20 м от старой была пробурена новая скважина той же длины 40 м. Она была загерметизирована тем же затвором длиной 2,5 м на глубину 4 м. После включения насоса произошел гидроразрыв пласта. Причем трещина гидроразрыва вышла не на обнаженную поверхность выработки, а на свободную поверхность скважины за затвором, как показано на рисунке 1-б. И только после того, как эту скважину загерметизировали пятиметровым затвором, удалось провести ее полноценную гидрообработку, которая протекала в режиме гидрорыхления (рис.1-в).

Поскольку длина фильтрующей части скважины практически не изменялась

– 37,5 в первом опыте и 35 м во втором и третьем опытах, и темп нагнетания насосной установкой был одинаковым – 35 л/мин, характер процесса определялся только глубиной герметизации.



а) гидроотжим; б) гидроразрыв; в) гидрорыхление

Рисунок 1 – Режимы гидрообработки пласта при разной глубине герметизации скважины

При неглубокой герметизации (рис.1-а) на стенке скважины возникают и развиваются крупные гидропроводные трещины, заполненные водой под давлением. Усилий, действующих со стороны стенок трещин на призабойную часть пласта достаточно, чтобы оторвать ее от остального массива и сместить в выработку. Процесс выдвигания краевой части пласта при гидроотжиме сопровождается ее частичной локальной дезинтеграцией и приводит к разгрузке вмещающих пород от горного давления.

В связи с тем, что гидроотжим пласта бесспорно вызван силовым воздействием нагнетаемой жидкости на пласт, назовем разгрузку вмещающих пород от горного давления при гидроотжиме **гидросиловой**.

Среди исследователей процесса гидрообработки пласта укоренилось мнение, что и при гидрорыхлении происходит силовая разгрузка пласта – за счет раскрытия в нем существующих и развития новых трещин от давления нагнетаемой воды.

Однако, анализируя материал с этой точки зрения, мы сталкиваемся с проблемой образования трещин с большим необратимым раскрытием при давлениях нагнетания, меньших минимальной компоненты горного давления, что не может быть объяснено существующими представлениями о развитии трещин.

Несомненно, на последней стадии гидрорыхления образуется устойчивая гидравлическая связь нагнетательной камеры шпура с обнаженной поверхностью – при прекращении подачи воды в скважину прекращается ее вытекание из пласта, при последующем возобновлении нагнетания возобновляется утечка

(при этом давление в скважине практически не растет).

Очевидно, возникновение этой гидравлической связи объясняется образованием трещины (трещин), раскрытие которой достаточно велико – практически вся жидкость, подаваемая насосом, проходит через нее почти без потерь давления. Раскрытие этой трещины необратимо – оно сохраняется после прекращения нагнетания и исчезновения внутреннего давления жидкости – налицо явные признаки образования трещины гидроразрыва ( см. рис. 1-б).

Но, обязательным условием образования крупной гидропроводящей трещины с необратимым раскрытием является повышение давления нагнетания до уровня минимальной компоненты горного давления, а при гидрорыхлении этого не происходит.

О том, что первые стадии процесса гидрорыхления протекают при давлении воды, меньшем минимальной компоненты горного давления свидетельствуют бародинамические кривые, которые идентичны при разных давлениях нагнетания. Понятно, что если трещины развиваются при давлении  $P_2$ , то они не могут развиваться при меньшем давлении  $P_3$  и вызывать разгрузку пласта. Но поскольку разгрузка пласта наблюдается и при более высоком  $P_2$  и при более низком давлении  $P_3$  нужно признать, что ее причина – не в развитии трещин.

Эксперимент (рис.1-в) тоже указывает на отсутствие условий для развития трещин при глубокой сплошной герметизации потому, что горное давление на глубине 5 м от края пласта выше, чем на глубине 4 м, при котором наблюдалась трещина гидроразрыва, показанная на рис. 1-б.

Резюмируя изложенное, можно обоснованно предположить, что причиной разгрузки массива от давления вмещающих пород при гидрорыхлении является не развитие трещин под давлением нагнетания, а другие эффекты, связанные с проникновением жидкости в массив.

Известно, что повышение влажности угля приводит к определенному изменению его механических свойств и состояния пласта. По данным работы [2] насыщение водой снижает на 20 – 30 % прочность угольных образцов. Модуль упругости угля тоже снижается. Эти зависимости представлены на рисунке 2, где  $E_{отн}$ ,  $\sigma_{отн}$  – отношения модуля упругости и прочности на сжатие влажного угля к таким же величинам для сухого угля.

Кроме того, вода под давлением уменьшает силы трения на контактах между пластом и вмещающими породами, а также между берегами практически ортогональных эндогенных и экзогенных естественных трещин (кливажа), разбивающими пласт на совокупность полусвязных отдельностей.

Каждая грань отдельности взаимодействует с остальным массивом частично через цельный материал, а частично – через кливаж, воспринимающий нормальную нагрузку полностью, а касательную – пропорционально коэффициенту трения. Экспериментально наблюдаемое сохранение какой-то проницаемости для жидкости (газа) даже сжатых горным давлением естественных трещин показывает, что их берега контактируют между собой не по всей площади  $S$ , а по некоторой ее части  $S_c(\sigma, p)$ , причем с ростом внутреннего давления газа или жидкости относительная площадь контакта уменьшается, о чем свидетельству-

ет рост проницаемости трещины. В пределе, когда давление жидкости сравняется с горным, контакт между берегами кливажных трещин, а значит и касательная нагрузка исчезнет. Важно, что существенное уменьшение сил контактного трения начинается задолго до того, как давление нагнетания сравняется с горным давлением – за счет уменьшения нормальной нагрузки, передаваемой твердым скелетом.

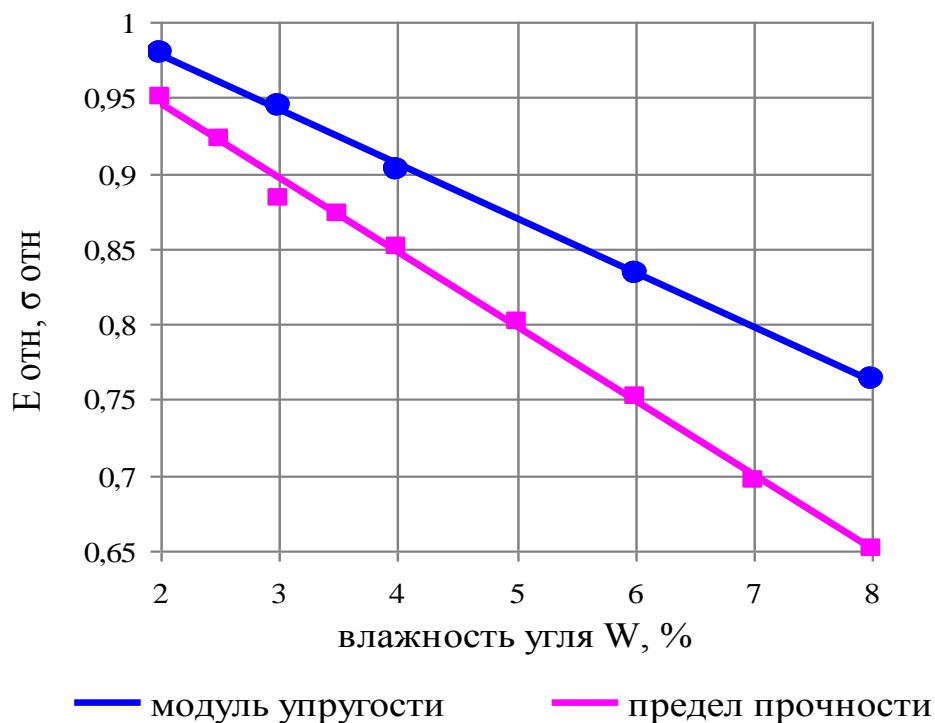


Рисунок 2 – Зависимость относительных величин модуля упругости и предела прочности от влажности угля W по данным [2]

Контактное трение – фактор, существенно влияющий на параметры разрушения сжатого материала – предельную нагрузку и ориентацию плоскостей разрушения. Многочисленными экспериментами по одноосному сжатию образцов горных пород установлено, что снижение контактного трения между образцом и плитами пресса уменьшает значение напряжения разрушения.

**Выводы.** Таким образом, снижение предела прочности угля, как за счет повышения влажности, так и за счет снижения контактного трения уменьшают несущую способность пласта при его напорной гидрообработке.

Если пласт находится в предельном напряженном состоянии, то снижение предела прочности из-за водонасыщения переводит его в запредельное состояние, сопровождающееся трещинообразованием и разгрузкой. Но трещинообразование происходит не от давления воды, а от горного давления, которое становится больше предела прочности влажного пласта. Такую модель разгрузки предельно напряженного пласта, при которой трещинообразование зависит не от давления воды, а от горного давления, превышающего предел прочности увлажненного угля можно назвать **горно-силовой**.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРЫ

1. Айруни, А.Т. Оценка экспериментальных данных по равновесной сорбции  $\text{CH}_4$  и  $\text{CO}_2$  на ископаемых углях / А.Т. Айруни, В.А. Бобин, А.А. Галманов // ФТПРПИ. – 1985. – №3. – С. 45-53.
2. Повышение эффективности гидрорыхления выбросоопасных угольных пластов / С.П. Минеев, А.А. Потапенко, Т.Я. Мхватури [и др.]. – Донецк: Східний видавничий дім, 2013. – 216 с.
3. Модель предельного состояния угольного пласта при нагнетании жидкости / В.В. Зберовский, Ю.Е. Поляков, А.В. Пазынич [и др.] // Збірник наукових праць НГУ. – Днепропетровск: НГУ, 2011 - № 36, Том № 1. – С. 194-199.
4. Методика моделирования процесса импульсного нагнетания жидкости / Л.М. Васильев, В.В. Зберовський, Ю.Е. Поляков [и др.]. – Днепропетровск: ИГТМ НАН Украины, 2014. – 13 с.
5. Зорин, А. Н. Управление динамическими проявлениями горного давления / А.Н. Зорин.- М.: Недра, 1978. – 216 с.
6. Виноградов, В.В. Геомеханика управления состоянием массива вблизи горных выработок / В.В. Виноградов. – Киев: Наукова думка, 1989 – 192 с.
7. Кияшко, Ю.И. Закономерности разрушения угольного вещества за традиционно определяемыми пределами прочности / Ю.И. Кияшко, Р.А. Дякун / Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках: XVII Межд. Науч. Школы / ТНУ. – Симферополь, 2007. – С. 134-136.
8. Система уголь-газ в углеводородах угольного генезиса: Монография / В.В. Соболев, А.С. Поляшов, В.В. Зберовский [и др.]. – Днепропетровск: АРТ-ПРЕСС, 2013. - 246 с.

## REERENCES

- 1 Ayruni, A.T., Bobin, V.A. and Galmanov, A.A. (1985), "Evaluation of experimental data on the equilibrium sorption  $\text{CH}_4$  and  $\text{CO}_2$  in fossil coals", *Fiziko-technicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*, no.3 pp.45-53.
2. Mineev, S.P., Potapenko, A.A., Mhvatvari, T.Ya., et al. (2013), *Povyshenie effektivnosti gidrorykhlenniya vybrosoopasnykh ugolnykh plastov* [Improving the efficiency of hydro breaking on outburst coal seams], *Shidnyi vydavnychiy dim, Donetsk, Ukraine*.
- 3 Zberovskiy, V.V., Pazynich, A.V., Polyakov, Yu.E., Potapenko, A.A. and Angelovskiy, A.A.(2011), "The model of a limiting condition of the coal seam at the liquid injection", *Scientific Collected Works of NMU*, no. 36, vol. № 1., pp. 194-199.
4. Vasilyev, L.M., Zberovskiy, V.V., Polyakov, Yu.E., et al. (2014), *Metodika modelirovaniya protsessu impulsnogo nagnetaniya zhydkosti* [The methodology of modeling process of impulsive fluid injection], M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under NAS of Ukraine, Dnepropetrovsk, Ukraine.
5. Zorin, A.N. (1978), *Upravlenie dinamicheskimi proyavleniyami gornogo davleniya* [Control of dynamic manifestations of rock pressure], Nedra, Moscow, Russia.
6. Vinogradov, V.V. (1989), *Geomekhanika upravleniya sostoyaniem massiva vblizi gornyx vyrabotok* [Geomechanics control of the array state near mine workings], Naukova Dumka, Kiev, Ukraine.
7. Kiyashko, Yu. I., Dyakun, R. A. (2007), "Legitimacies the destruction of the coal matter by the traditional definition of strength", *Deformirovaniye i razrusheniye materialov s defektami i dinamicheskije yavleniya v gornyx porodakh i vyrabotkakh* [Deformation and destruction of materials with defects and dynamic phenomena in rocks and workings], *XVII Mezhdunarodnaya Nauchnaya Shkola* [XVII International Scientific School], TNU, Simferopol, pp. 134-136.
8. Sobolev, V.V., Polyashov, A.S., Zberovskiy, V.V., Angelovskiy, A.A., Chugunkov, I.F. (2013), *Sistema ugol-gaz v uglevodorodakh ugolnogo genezisa: Monografiya* [System coal-gas hydrocarbon genesis of coal: monograph], ART-PRESS, Dnepropetrovsk, Ukraine.

## Об авторах

**Поляков Юрий Евгеньевич**, магистр, младший научный сотрудник в отделе Проблем разрушения горных пород, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАНУ), Днепр, Украина, [ZoRTFA@mail.ru](mailto:ZoRTFA@mail.ru).

**Усов Олег Александрович**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник в отделе Проблем разрушения горных пород, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАНУ), Днепр, Украина, [usov\\_o\\_a@mail.ru](mailto:usov_o_a@mail.ru).

### About the authors

**Polyakov Yuriy Evgenevich**, Master of Sciences, Junior Researcher in Department of Rock Breaking Problems, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepr, Ukraine, [ZoRTFA@mail.ru](mailto:ZoRTFA@mail.ru).

**Usov Oleg Aleksandrovich**, Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Senior Researcher in Department of Rock Breaking Problems, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepr, Ukraine, [usov\\_o\\_a@mail.ru](mailto:usov_o_a@mail.ru).

**Анотація.** У наведеній статті розглядається відповідність практичним спостереженням загальноприйнятих уявлень про розвантаження пласта при його гідророзпушуванні за рахунок розвитку тріщин від тиску води (гідросилового розвантаження). Розглядаючи існуючі матеріали з цієї точки зору, ми стикаємось з проблемою утворення тріщин з великим незворотним розкриттям при тисках нагнітання, менших мінімальної компоненти гірського тиску, що не може пояснюватися існуючими уявленнями про розвиток тріщин. Обґрунтовано передбачається, що причиною розвантаження масиву від тиску вмішуючих порід, при гідророзпушуванні є не розвиток тріщин під тиском нагнітання, а інші ефекти, пов'язані з проникненням рідини в масив.

Висувається модель розвантаження гранично напруженого пласта, при якій утворення тріщин залежить не від тиску води, а від гірського тиску, що перевищує межу міцності зволоженого вугілля. Розглянуто вплив глибини герметизації, та довжини фільтруючої частини свердловини, які радикально змінюють результат гідрообробки. Виходячи з практичних спостережень стверджується, що глибина герметизації сильніше впливає на процес, ніж довжина фільтруючої частини свердловини.

**Ключові слова:** гідро-силова, контактне тертя, гідрообробка, межа міцності, гідро розпушування.

**Abstract.** This article analyzes correspondence between practical observations and generally accepted conception on the seam unloading during the hydraulic breaking through the crack propagation caused by the water pressure (water-power unloading). By considering the existing materials from this point of view, we face a problem of crack formation with a large irreversible opening under discharge pressures, which are less than minimum component of the rock pressure. This fact cannot be explained by existing conception on crack propagation. So, we can reasonably assume that reason of the rock unloading due to the surrounding rock pressure during the hydraulic breaking is not the crack propagation under discharge pressure, and that other effects may exist which could be associated with liquid penetration into the rocks. The article presents a model of unloading of ultimately stressed coal seam at which crack formation does not depend on water pressure and depends on rock pressure which exceeds ultimate strength of the wetted coal. The effect of the sealing depth and length of the filter portion of borehole are considered, which radically change result of the hydraulic treatment. On the basis of practical observations, it is stated that sealing depth has greater influence on the process than length of filter portion of the borehole.

**Keywords:** hydraulic power, contact friction, hydraulic treatment, ultimate strength, hydraulic breaking.

*Статья поступила в редакцию 13.09.2016*

*Рекомендовано к публикации д-ром технических наук Минеевым С.П.*