

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОПУСТИМОГО ДАВЛЕНИЯ ГИДРОРЫХЛЕНИЯ УГОЛЬНОГО ПЛАСТА ПО ИМПУЛЬСНОЙ ИНДИКАТОРНОЙ ДИАГРАММЕ

*С.П. Минеев, О.А. Усов, Ю.Е. Поляков*

*Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины, Украина*

Предложен метод получения импульсной индикаторной диаграммы опытного нагнетания воды в угольный пласт путем кратковременного повышения давления нагнетания с последующим возвратом к исходному значению

**Актуальность.** Одним из основных мероприятий по борьбе с выбросами является гидрорыхление угольного пласта – нагнетание воды под высоким давлением определенной величины через шпур, пробуренные из забоев горных в угольный пласт.

Несмотря на полувековую историю его широкого применения, сопровождающуюся интенсивными экспериментальными, в первую очередь, а также теоретическими исследованиями, до сих пор не выстроена адекватная модель, которая не противоречила бы наблюдаемым особенностям процесса.

Например, во всех известных авторам исследованиях фильтрации воды в угольном пласте используется линейный закон фильтрации Дарси в классической модели трещиновато-пористой среды [1]. Однако в работе [2] показано, что теоретическая форма бародинамической кривой, выражающей изменение давления с течением времени нагнетания (при постоянном расходе воды), построенной по модели Дарси-Дюпюи, не соответствует бародинамике реального процесса гидрообработки пласта в шахтных условиях. Теоретическая бародинамическая кривая монотонно возрастает, а реальная стабилизируется после кратковременного интервала интенсивного набора давления.

Причинами этого несоответствия могут быть и нелинейный закон фильтрации, и существенное изменение проницаемости угля с расстоянием от скважины, и консервация метана в локальных областях фильтрационного потока, которые совершенно не учитываются используемой моделью Дарси-Дюпюи. Может быть, фильтрационный поток определяется не гидродинамическими, а суффозионно-кольматационными эффектами, наличие которых установлено при лабораторных исследованиях двумерной фильтрации воды через угольные образцы [3].

Еще одним не до конца проработанным вопросом является механизм разгрузки пласта в процессе его гидрорыхления. Среди исследователей укоренилось мнение, что при гидрорыхлении происходит гидросиловая разгрузка пласта – за счет раскрытия в нем существующих и развития новых трещин от давления нагнетаемой воды. Однако анализ шахтных наблюдений привел авторов работы к выводу о том, что причиной разгрузки пласта при гидрорыхлении является не развитие трещин под давлением нагнетания, а другие эффекты, связанные с проникновением жидкости в массив. В работах [4, 5] предложена горно-силовая модель, по которой трещинообразование происходит не от давления воды, а от естественного горного давления из-за понижения предела прочности увлажненного пласта. В работе [6] проанализирована горно-деформационная модель разгрузки увлажненного пласта в результате увеличения его податливости.

Приведенные примеры показывают актуальность дальнейших исследований процесса гидрорыхления для повышения эффективности этого противовыбросного мероприятия.

**Целью работы** является анализ влияния горно-геологических и горнотехнических факторов на величину максимального давления гидрорыхления.

Известны два режима гидрообработки выбросоопасных пластов – гидрорыхление и гидроотжим.

При гидрорыхлении визуальные признаки разрушения призабойной части пласта отсутствуют, ее разгрузка от горного давления определяется путем анализа сейсмоакустики и поинтервальных замеров газовыделения в контрольные шпур. А при гидроотжиме визуально

наблюдается выдвигание призабойной части пласта, иногда сопровождаемое почти полным разрушением угля на глубину 0,5-1,0 м. Известен ряд случаев провоцирования внезапных выбросов при проведении гидроотжима. Поэтому, в настоящее время гидроотжим на шахтах Украины не применяется.

По существующим представлениям, отраженным в Правилах ведения горных работ на пластах, склонных к газодинамическим явлениям [6], оба эти режима по гидравлическим параметрам – давлению и темпу нагнетания аналогичны. А радикальная разница в результатах гидрообработки обусловлена длиной фильтрующей части шпура. При гидроотжиме шпур герметизируют на чуть меньшую глубину (2 – 5,5м), чем при гидрорыхлении (3 – 6м), но оставляют короткую (0,3м) фильтрующую часть шпура. А при гидрорыхлении фильтрующую часть шпура делают гораздо длиннее (1 – 2м).

По теоретическим представлениям при постоянном темпе нагнетания в один и тот же пласт одной и той же насосной установкой давление нагнетания обратно пропорционально длине фильтрующей части шпура. Поэтому следует ожидать, что с увеличением длины фильтрующей части шпура трещинообразование с достаточной для гидроотжима интенсивностью не происходит. Эти представления отражены в нормативных документах [5, 7].

Но в работе [4] приводятся пример гидроотжима при обработке 40- метровой скважины – после включения насоса произошло выдвигание пачки угля толщиной ~ 0,2м. В то же время шпуры глубиной 1,7м, загерметизированные на 1,5м обрабатывались в режиме гидрорыхления, а не гидроотжима. Кроме приведенных примеров авторам известны случаи гидроотжима в шпурах пробуренных и загерметизированных в соответствии с требованиями по гидрорыхлению. Таким образом, режимы гидрорыхления и гидроотжима определяются не только геометрическими параметрами скважины, но и гидравлическими характеристиками процесса – темпом и давлением нагнетания.

С учетом этого крайне важно вести гидрорыхление при таком давлении, которое надежно исключало бы переход процесса гидрорыхления в гидроотжим. В нормативных документах максимальное давление гидрорыхления  $P_{\max}$  увязывается только с весом лежащей выше пласта толщи горных пород –  $\gamma H$ :

$$P_{\max} = k\gamma H \quad (1)$$

Безразмерный коэффициент  $k$  принимает значения от 0,75 до 2 в зависимости от режимов обработки пласта. Однако верхнее значение коэффициента  $k$  зависит от названия страны – разработчика нормативного документа и от даты его утверждения. В нормативных документах Советского Союза, единых для угольных шахт России, Украины и Казахстана  $0,75 \leq k \leq 2$ . В сегодняшних нормативных документах России и Казахстана это значение  $k$  сохранилось, а на Украине резко уменьшилось до значений  $0,75 \leq k \leq 1$ , свидетельствуя об отсутствии полной ясности в этом вопросе [8- 10].

С одной стороны, понятно, что если по всей достаточно обширной области фильтрации в пласте давление воды превысит горное давление, то эта область подвергнется гидравлическому расчленению и разрушению [10].

С другой стороны, по общепринятым моделям движения жидкости в пористых средах давление воды в пласте снижается по мере удаления от источника нагнетания. В области фильтрации давление воды максимально на контуре скважины, а по мере удаления от скважины оно снижается либо по логарифмическому, либо по степенному закону [2]. Тогда получается, что при давлении в скважине, превышающем величину горного давления разрушения всей области фильтрации в пласте не произойдет – в ней давление воды существенно ниже горного давления. А на контуре скважины могут образоваться гидропроводные трещины, развитие которых прекращается на определенном удалении от него. Значит, при определенных условиях давление в скважине может превышать горное давление без негативных последствий.

С методологической точки зрения давление вышележащей толщи горных пород на угольный пласт не является исчерпывающей характеристикой его напряженного состояния.

Важны еще боковые компоненты горного давления – по падению и по простиранию пласта.

Существует распространенное мнение о гидростатическом характере компонент горного давления на больших глубинах в нетронутых горными работами массиве. И если компоненту горного давления, направленную параллельно плоскости проходческого забоя или линии добычной лавы еще можно с определенной натяжкой принимать равной вертикальной компоненте, то в направлении от забоя в глубину массива – нельзя. Многочисленными теоретическими и горно-экспериментальными исследованиями установлен возрастающий характер горного давления по мере увеличения расстояния от забоя выработки в глубину массива [10]. Первая зона максимума горного давления, как правило, регистрируется на глубине 7-11 м от забоя. А гидрорыхление пласта производится как раз между забоем и этой зоной опорного давления. Т.е. каждый метр изменения глубины фильтрующей части скважины сопровождается существенным изменением напряженного состояния вокруг нее. Поэтому понятно, что ориентация на усредненную величину горного давления по формуле (1) имеет смысл только как ориентировочное первое приближение.

Так же, как известно, что увеличение глубины разработки угольных пластов и проведение горных работ в зонах геологических нарушений приводит к изменению соотношения вертикальных и горизонтальных компонент горного давления. Однако, влияние фактора изменения соотношения компонент горного давления на величину давления гидрорыхления в нормативных документах совершенно не учитывается, а теоретические исследования этого вопроса носят фрагментарный характер. Поэтому, использование формулы (1) для определения давления гидрорыхления может носить сугубо предварительный оценочный характер. А сама величина максимального давления гидрорыхления должна определяться для конкретной горной выработки по результатам ее экспериментальной гидрообработки.

На первый взгляд классическая индикаторная диаграмма, полученная в процессе опытного нагнетания в конкретный пласт, решает нашу задачу. При плавном повышении расхода воды в пласт давление вначале повышается при мерно пропорционально расходу. Затем интенсивность повышения давления при повышении расхода уменьшается. На последней стадии процесса давление перестает реагировать на повышение расхода воды из-за развития трещин в пласте, оставаясь постоянной величиной – предельным давлением нагнетания. Однако таким методом можно пользоваться только на безопасных по выбросам пластах.

Если же пласт выбросоопасный, то повышение давления до предельного значения  $P_{пр}$  с высокой вероятностью приведет к гидроотжиму пласта. А гидроотжим пласта, в свою очередь, может спровоцировать выброс. Т.е, несмотря на простоту экспериментального измерения и отсутствие дополнительной расчетной обработки их результатов, метод количественной оценки горного давления по величине предельного давления нагнетания  $P_{пр}$  не гарантирует безопасного применения на выбросоопасных пластах. Выход из этой тупиковой ситуации видится в изменении параметров опытной скважины и, главное, в изменении алгоритма управления расходом воды при получении индикаторной диаграммы. Технологическая суть этого метода показана на рисунке 1.

Бурение скважины производится последовательно на глубину одного интервала гидрообработки. Герметизация пробуренного интервала может производиться укороченным стандартным шланговым гидрозатвором, или специальным распорным механическим герметизатором. Длина нагнетательной камеры превышать 0,3 м и соответствовать условиям гидроотжима согласно требованиям [7].

После бурения и герметизации очередного интервала включается насосная установка. Расход воды в скважину регулируется путем ее перепуска из нагнетательной во всасывающую магистраль. Расход измеряется ротаметром, расположенным как показано на рисунке 2.

Перед включением насосной установки перепускной кран полностью открывается и весь поток воды из насоса возвращается в его всасывающую магистраль.

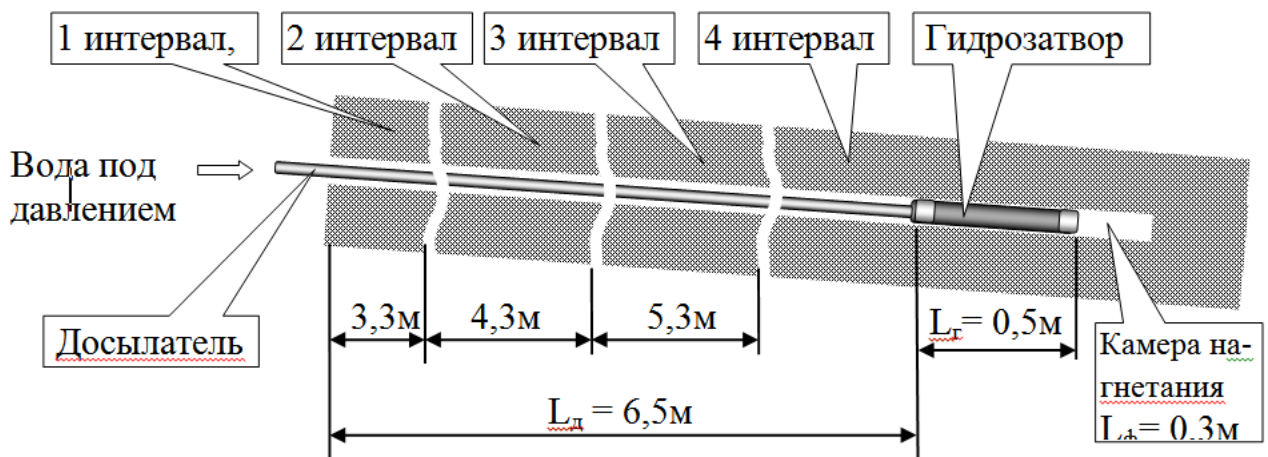


Рисунок 1 – Технологическая схема определения давления

При этом давление в скважине равно давлению на всасе насоса. Затем перепускной кран постепенно прикрывается, во всасывающую магистраль возвращается уже не весь поток воды из насоса – часть его поступает в пласт, а давление в скважине повышается. Для определенных значений давления в скважине  $P_1, P_2, P_3, \dots$ , измеряются значения расхода воды  $Q_1, Q_2, Q_3, \dots$ . В этой части горно-экспериментальные работы полностью совпадают с построением стандартной индикаторной диаграммы. Существенное отличие заключается в алгоритме повышения давления. Рассмотрим это.

Если в стандартной индикаторной диаграмме давление повышается монотонно от значения  $P_i$  до значения  $P_{i+1}$ , то в циклической – коротким импульсом с возвратом к исходному значению:  $P_i \rightarrow P_{i+1} \rightarrow P_i$ .

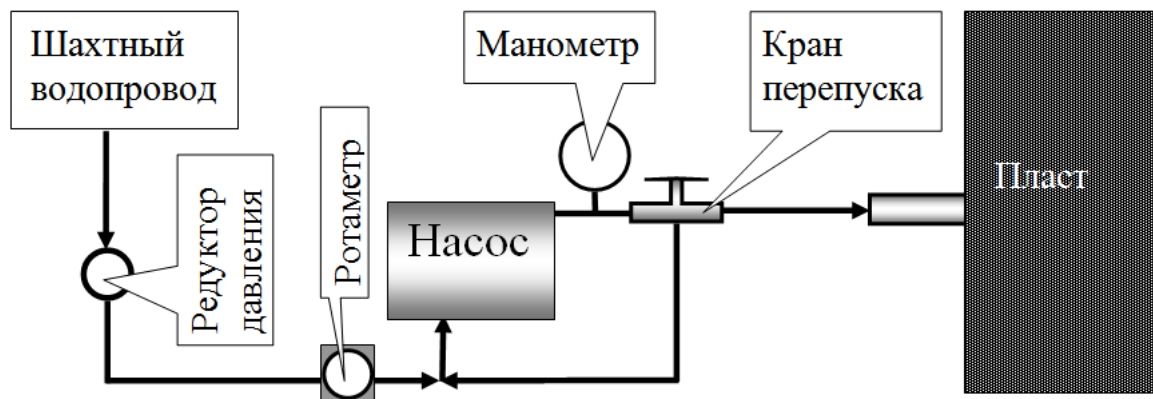


Рисунок 2 – Гидравлическая схема определения давления

После возврата к исходному значению давления сравниваются показания расхода (по ротаметру) до  $Q_1(P_i)$  и после  $Q_2(P_i)$  импульса. Если показания расхода примерно одинаковы  $Q_1(P_i) \approx Q_2(P_i)$ , то давление снова повышается до значения  $P_{i+1}$ . После измерения расхода  $Q_1(P_{i+1})$  при давлении  $P_{i+1}$  следует новый импульс  $P_{i+1} \rightarrow P_{i+2} \rightarrow P_{i+1}$ . Процесс повторяется до тех пор, пока расход после очередного импульса  $Q_2(P_6)$  заметно не изменится по сравнению с расходом до импульса  $Q_1(P_6)$ . В этот момент нагнетание прекращается, допустимое давление для опробованного интервала принимается равным  $P_6$ , а расход воды при допустимом давлении – принимается равным  $Q_1(P_6)$ .

На рисунке 3 показана бародинамическая кривая – зависимость давления от времени нагнетания – при снятии импульсной индикаторной диаграммы. Подачу импульсов давления рекомендуется начинать после прохождения минимального нормативного расчетного значения давления гидрорыхления, равного  $0,75\gamma H$ . Отрезки бародинамической кривой на которых производится измерение расходов  $Q_2$ ,  $Q_3$ ,  $Q_6$  соответствуют точкам  $Q_2$ ,  $Q_3$ ,  $Q_6$  на горизонтальной оси импульсной индикаторной диаграммы.

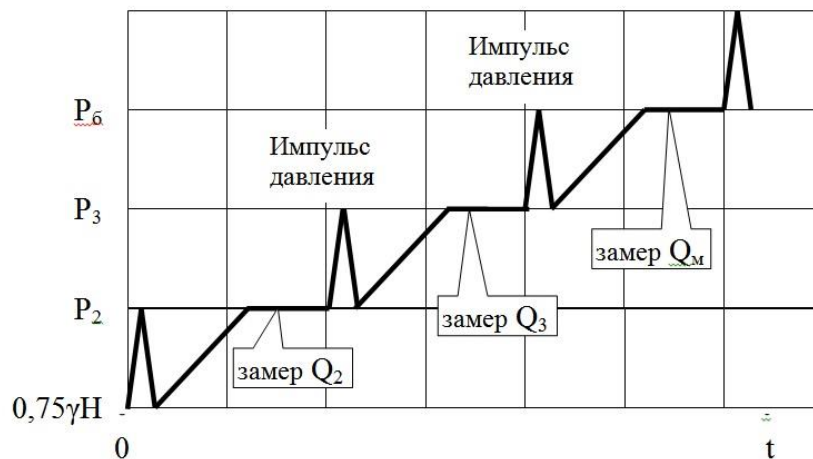


Рисунок 3 – Бародинамическая кривая при снятии импульсной индикаторной диаграммы

На рисунке 4 представлено схематическое изображение импульсной индикаторной диаграммы.

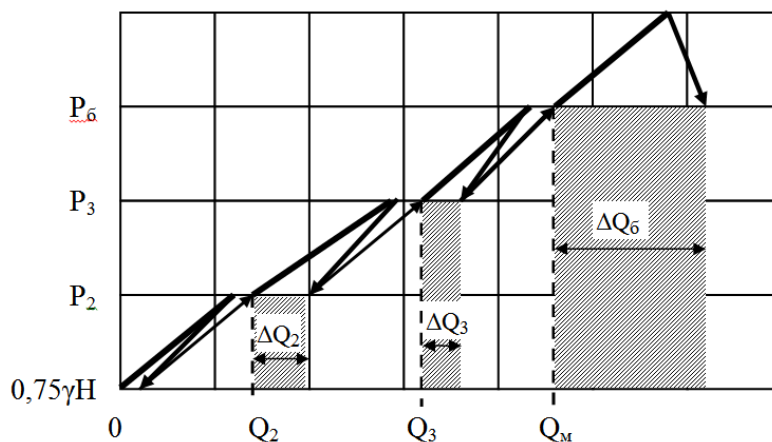


Рисунок 4 – Импульсная индикаторная диаграмма

По вертикальной оси расположены значения давления нагнетания по горизонтальной оси – расхода воды (темпа нагнетания). Линиями со стрелками обозначены стадии сброса давления. Пунктирными линиями – значения расхода до импульсного подъема давления ( $Q_2$ ,  $Q_3$ ,  $Q_м$ ) и после его сброса.

При реальном нагнетании между двумя значениями расхода воды, измеренными при одном и том же давлении всегда будет наблюдаться разница -  $\Delta Q_2$ ,  $\Delta Q_3$ ,  $\Delta Q_м$ . Пока эта разница не велика и примерно одинакова для разных значений расхода ( $\Delta Q_2$ ,  $\Delta Q_3$  на рис.3) ею пренебрегают и продолжают импульсное повышение давления. Но существенное возрастание этой разницы ( $\Delta Q_м$  на рис.4) свидетельствует об интенсивном трещинообразовании и является основанием для прекращения нагнетания.

Найденное по импульсной индикаторной диаграмме опытного нагнетания воды через короткую фильтрующую часть шнура значение безопасного давления гидрорыхления  $P_6$

может оказаться в некоторых случаях меньше максимально давления гидрорыхления при длинной фильтрующей части шпура. Однако в большинстве случаев безопасное давление гидрорыхления  $P_6$  будет точно выше максимального нормативного значения давления гидрорыхления, равного  $\gamma H$ .

Это позволяет повысить темп нагнетания, а значит и производительность гидрорыхления. Можно, наоборот, сохраняя темп нагнетания сократить длину фильтрующей части шпура за счет его более глубокой герметизации. Повышение глубины герметизации, согласно нормативным документам, увеличивает глубину зоны разгрузки гидрорыхлением и позволяет, например, повысить скорость проходки подготовительных выработок.

### **Выводы**

1. Существующие в настоящее время теоретические представления и требования нормативных документов Украины не позволяют определить оптимальные параметры гидрорыхления выбросоопасных пластов из-за ненадежности теоретических рекомендаций по выбору максимальной, но безопасной величины давления нагнетания.

2. Предлагаемая импульсная индикаторная диаграмма, получаемая в процессе нагнетания воды в выбросоопасный угольный пласт через скважину с короткой фильтрующей частью, позволяет установить близкое к максимальному но безопасное значение давления и на этой основе рассчитать оптимальные параметры гидрорыхления.

### **Список литературы**

1. Анпилогов Ю.Г. Оперативная оценка эффективности гидродинамического воздействия на угольный пласт по изменению его проницаемости. Горный информационно-аналитический бюллетень. Отдельный выпуск №8 «Экология, безопасность». — М.: МГУ, 2011. — с.137-145.

2. Усов, О.А. Оценка соответствия линейного закона фильтрации воды реальной динамике изменения ее давления при нагнетании в угольные пласты / О.А. Усов // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр./ ИГТМ НАН Украины. - Днепрпетровск, 2015. - Вып. 120. - С. 93-101.

3. Лабораторные исследования двумерной фильтрации воды через угольные образцы// Форум гірників - 2017: матеріали між нар. конф., 4-7 жовтня 2017р., м. Дніпро. – Д.: Національний гірничий університет, 2017. С. 298-307 О.А. Усов, С.П. Минеев, Р.А. Дякун, Ю.Е. Поляков, Н.Я. Трохимец, А.С. Янжула, В.П. Рудь

4. Усов О.А., Поляков Ю.Е. //Факторы влияния гидрообработки угля на разгрузку призабойной части массива Геотехническая механика. Межвед. сб. науч. Трудов. – Дн-вск: - 2016. - №129. – С. 166-172.

5. Минеев С.П. Прогноз и предотвращение выбросов угля и газа на шахтах Украины / С.П. Минеев. - Мариуполь: Східний видавничий дім, 2016.- 254 с.

6. Поляков, Ю.Е. Деформационная модель разгрузки увлажненного угольного массива// Геотехническая механика. Межвед. сб. науч. Трудов. – Дн-вск: - 2016. - №130. – С. 125-136.

7. Правила ведення гірничих робіт на пластах, схильних до газодинамічних явищ. Стандарт Мінвуглепрому України СОУ 10.1.00174088011-2005. Київ: Мінвуглепром України: 2005. – 221 с.

8. [https://studopedia.su/1\\_5281\\_gidrootzhim-ugolnogo-plasta.html](https://studopedia.su/1_5281_gidrootzhim-ugolnogo-plasta.html)

9. <http://lib.kstu.kz:8300/tb/books/2015/RMPI/Romanov/Теория/7.htm>

10. Минеев С.П. Повышение эффективности гидравлического рыхления выбросоопасных угольных пластов: монография / С.П.Минеев, А.А.Потапенко, Т.Я.Мхатавари, А.В.Никифоров, С.В.Кузюра, Э.И.Тимофеев – Донецк: ТОВ «Східний видавничий дім», 2013,– 216 с.