

Основатели конференции выражают искреннюю благодарность Президиуму НАН Украины за поддержку в ее организации и проведении.

Следующие заседания научного форума планируется провести, как всегда, через два года. Более детальная информация будет размещена на Web-сайте: <http://iipt.com.ua>.

УДК 622.831

Д-р техн. наук В.А. Канин
(УкрНИМИ НАН Украины)

НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПОРОД ВОКРУГ ВЫЕМОЧНОЙ ВЫРАБОТКИ, ОХРАНЯЕМОЙ ИСКУССТВЕННЫМИ ОПОРАМИ

Виконано математичне моделювання напруженого стану гірського масиву навколо пластової виймальної виробки після проходження лави за допомогою методу скінченних елементів при різних співвідношеннях міцності оточуючих порід і матеріалу штучної опори.

STRESS STATE OF ROCKS AROUND MINE WORKING PROTECTED BY ARTIFICIAL SUPPORTS

Mathematical simulation of rock mass stress state around in-seam extraction working after longwall driving is carried out with the help of finite-element method with different correlations of surrounding rock strength and artificial support material.

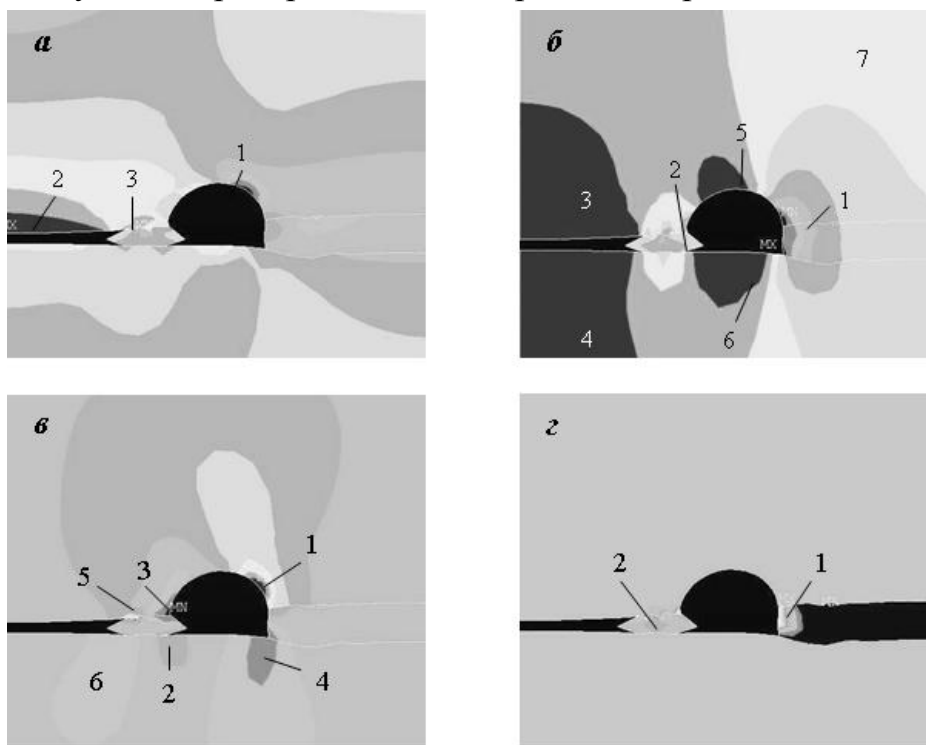
При охране выемочных выработок искусственными опорами силовое взаимодействие опор с расслоившимися породами кровли определяется как свойствами пород, так и деформационными характеристиками самих опор. Как показали исследования [1], при использовании опор постоянного сопротивления зона расслоения пород при тонкослоистой структуре кровли меньше, чем в случае использования опор нарастающего сопротивления. Уменьшая опускание породной консоли, опоры постоянного сопротивления способствуют также сохранению связей в слоях, и в случае их нарушения могут быстро развить сопротивление до рабочего и тем самым предотвратить развитие заколов или обрушений пород кровли.

Для уточнения деталей силового взаимодействия поддерживающих опор различной прочности с окружающими породами было выполнено математическое моделирование методом конечных элементов. Моделируемая область включала участок массива, примыкающий к сопряжению выемочной выработки с лавой. Вертикальное сечение было разбито на 1050 конечных прямоугольных элементов. Вблизи выработки и поддерживающей опоры сетка разбиения сгущалась, что позволило получить решение о перераспределении напряжений с достаточной точностью. Моделирование выполнялось для условий охраны выработки арочной формы сечением $13,8 \text{ м}^2$, высотой 3,6 м и шириной 4,2 м, пройденной по пласту мощностью 1,5 м на глубине 800 м. Ширина опоры – 1,5 м. Прочность угольного пласта – 15 МПа. Значения этих параметров на всех этапах моделирования оставались постоянными, а значения прочностных характеристик породного массива и материала поддерживающей опоры варьировались.

Имитация запредельного состояния пород и материала опоры проводилась путем итерационного повторения следующей процедуры. На каждой ступени

приложения нагрузки к верхней части модели проверялось условие прочности по теории Кулона-Мора с учетом сцепления, угла внутреннего трения и коэффициента разуплотнения материала после перехода его в запредельное состояние. Моделирование необратимых деформаций разрушения выполнялось с использованием процедуры начальных напряжений [2]. Нагрузка в узлах, примыкающих к элементу, перешедшему в запредельное состояние, корректировалась с таким расчетом, чтобы соотношение полученных напряжений и деформаций соответствовало реальному поведению породы при испытаниях на жестких прессах. Такой пересчет на каждом шаге нагружения повторялся многократно. В целом же задача решалась за сотни итераций, в процессе выполнения которых прослеживалась сходимость решения.

На первом этапе исследований моделировался устойчивый массив. Прочность пород на сжатие ($\sigma_{п}$) – 60 МПа, сцепление – 0,5 МПа, модуль упругости – 2 МПа, угол внутреннего трения – 30° , прочность опоры (σ_0) – 5,0 МПа. Полученные для этих условий распределения напряжений представлены на рис. 1.



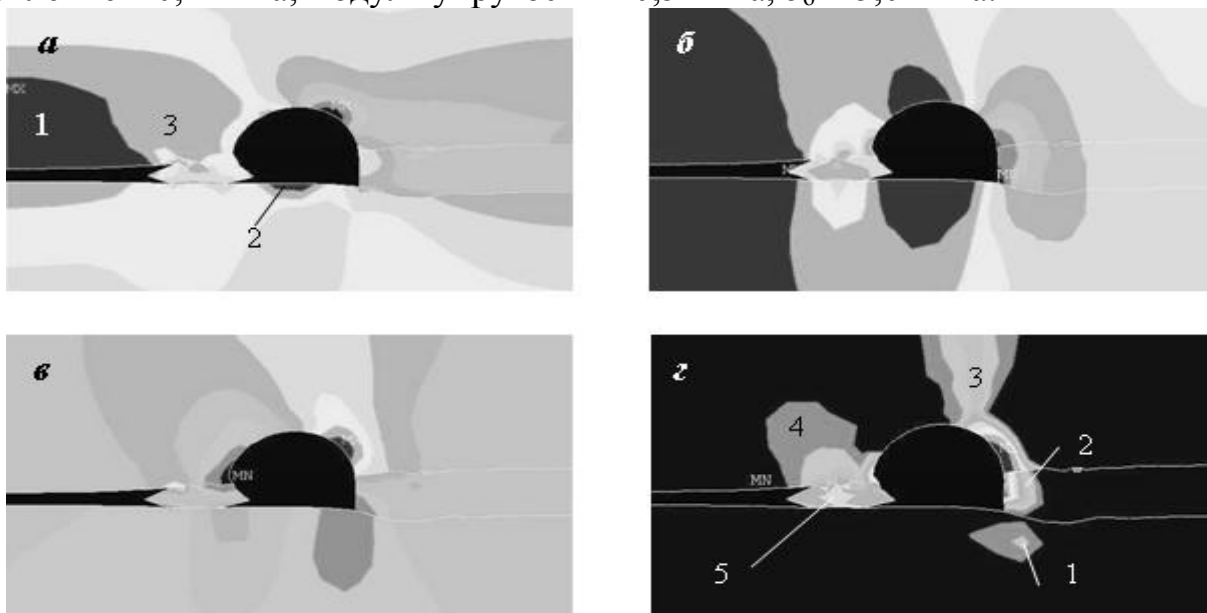
a – горизонтальные напряжения; *б* – вертикальные напряжения; *в* – касательные напряжения; *г* – пластические (запредельные) зоны напряжений

Рис. 1 – Распределение напряжений вокруг выработки при $\sigma_0 = 5$ МПа и $\sigma_{п} = 60$ МПа

На рис. 1, *a* повышенное горизонтальное сжатие наблюдается со стороны нетронутого массива (1), над краевой частью выработанного пространства – область растяжения (2). Состояние, близкое к растяжению (3) отмечается и над опорой. Непосредственная почва выработки находится в состоянии сжатия в направлении слоистости. Вертикальные напряжения (рис. 1, *б*) распределены следующим образом. В боку выработки со стороны нетронутого массива наблюдается область (1) повышенного давления, концентрация которого (k) над краевой частью пласта достигает трех. Область повышенных напряжений с $k = 1,5-1,8$ наблюдается и в средней части опоры. Над и под выработанным пространством

лавы образовались зоны растяжения (3 и 4). Зоны растяжения (5 и 6) сформировались также над и под выработкой. Переходной участок между зонами разгрузки и повышенных напряжений наблюдается со стороны нетронутого массива (7). Максимальные касательные напряжения (рис. 1,в) наблюдаются в кровле выработки со стороны нетронутого массива (1). Парная ей область (2) образуется в почве со стороны сопряжения с лавой. Напряжения в этих областях выворачивают блоки породы в полость выработки против часовой стрелки. Аналогичная пара областей в левом верхнем (3) и в правом нижнем (4) боку выработки поворачивает породные блоки по часовой стрелке. Кроме того, область 3 имеет парную область 6, в которой напряжения концентрируются в левой части опоры, а область 2 взаимодействует с областью 5 над правой частью опоры. Напряжения в областях 5 и 6 выворачивают породы в полость выработанного пространства. Области запредельного состояния показаны на рис. 1,г. В запредельное состояние перешла краевая часть пласта (1) с коэффициентом разрыхления 1,3 и опора (2) с коэффициентом разрыхления 1,15-1,2.

На следующем этапе исследований (рис. 2) были приняты: $\sigma_{II} = 30-40$ МПа, сцепление – 0,1 МПа; модуль упругости – 0,5 МПа, $\sigma_0 = 5,0$ МПа.



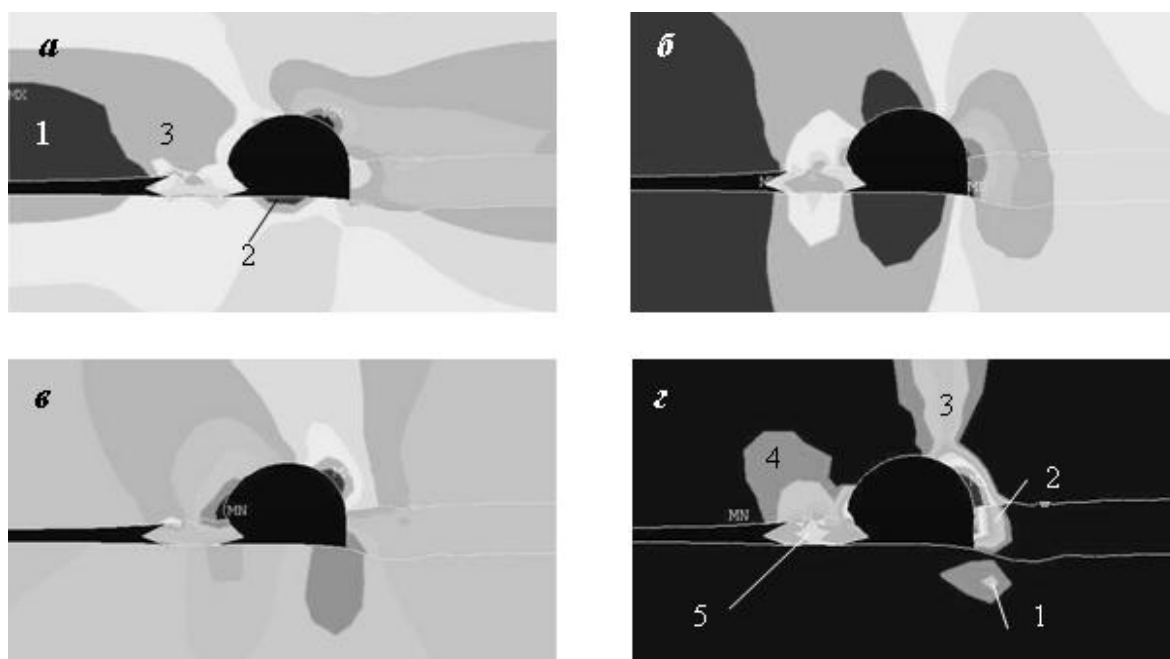
a – горизонтальные напряжения; *б* – вертикальные напряжения; *в* – касательные напряжения; *г* – пластические (запредельные) зоны напряжений

Рис. 2 – Распределение напряжений вокруг выработки при $\sigma_0 = 5$ МПа и $\sigma_{II} = 30-40$ МПа

На рис. 2,а показано распределение горизонтальных напряжений, которое при уменьшении прочности пород претерпело изменения: в кровле над выработанным пространством увеличивалась область растяжения (1); в почве появилась область растягивающих напряжений (2); над опорой (3) и в опоре напряжения сжатия снизились. Распределение вертикальной компоненты напряжений изменилось несущественно. Распределения касательных напряжений на рис. 2,в и 1,в также схожи. Таким образом, эффект уменьшения прочности пород связан с изменением распределения горизонтальной компоненты напряжений, в результате чего увеличились зоны растягивающих нагрузок и уменьши-

лись зоны сжатия. Это послужило причиной развития нескольких областей за-
 предельного состояния (рис. 2,з), которые заняли большую площадь на верти-
 кальном разрезе массива, примыкающего к выработке. Со стороны нетронутого
 массива в запредельное состояние перешла вся часть массива, примыкающая к
 правому борту выработки (2), а центр зоны максимального разуплотнения у по-
 лости выработки переместился в породы кровли. В кровле развилась обширная
 область запредельного состояния (3), представляющая опасность по обрушению
 породы. В связи с этим, при залегании в кровле неустойчивых пород необходи-
 мо предусматривать мероприятия по их закреплению в области 3 для снижения
 опасности завала выработки. Область запредельного состояния в породах кровли
 развилась также и над опорой (4), но в данном случае это является положитель-
 ным моментом, подтверждающим возможность использования опор прочно-
 стью 5 МПа в качестве обрезной крепи. В запредельное состояние перешла и
 сама опора (5), в ядре которой произошло снижение уровня сжатия.

На следующем этапе исследований моделирование проводилось в тех же
 условиях, но при прочности материала опоры 12 МПа (рис.3).



а – горизонтальные напряжения; *б* – вертикальные напряжения;
в – касательные напряжения; *г* – пластические (запредельные) зоны напряжений

Рис. 3 – Распределение напряжений вокруг выработки при $\sigma_0 = 12$ МПа и $\sigma_n = 30-40$ МПа

Распределение горизонтальной компоненты напряжений (рис. 3,а) измени-
 лось таким образом, что область горизонтального сжатия внутри опоры соеди-
 нилась с областью сжатия под выработкой. Одновременно с этим возникла об-
 ласть пониженного сжатия под основанием опоры. Повышение прочности опо-
 ры перераспределило и вертикальную компоненту напряжений (рис. 3,б). Из-
 менялось и распределение касательных напряжений (рис. 3,в). В результате от-
 меченных метаморфоз существенные изменения произошли и в характере фор-
 мирования областей запредельного состояния (рис. 4,з). С увеличением проч-
 ности опоры более обширной стала зона разрушений (5) над опорой. Появилась

новая зона разрушений (6) под основанием опоры. Зона разрушений (4) в кровле над правой частью выработки существенно сократилась. Сократилась также и зона разрушений (3) в почве выработки под краевой частью пласта. А зона разрушений 1 и по форме и по размерам осталась такой же. Суммарная протяженность участков периметра выработки, соприкасающихся с зонами разрушений, увеличилась и увеличилась площадь участков кровли и почвы, для обеспечения устойчивости которых необходимо производить закрепление пород. В целом, анализируя особенности формирования зон разрушений вокруг выработки, охраняемой опорами при различной прочности пород, можно сделать выводы:

1. Опоры с $\sigma_0 = 5$ МПа в условиях пород с $\sigma_{сж} \geq 60$ МПа функции обрезной крепи не выполняют, о чем свидетельствует отсутствие зон разрушений на контакте опоры с кровлей пласта (рис. 1,2).

2. В условиях, где были использованы опоры с $\sigma_0 = 5$ МПа, зоны разрушений в породах почвы отсутствуют. Следовательно, такие опоры оказывают щадящее действие на породы почвы, и не способствуют их выдавливанию в выработку.

3. В неустойчивых породах ($\sigma_{сж} \leq 30-40$ МПа) опоры с $\sigma_0 = 5$ МПа способны выполнять функцию обрезной крепи. В процессе деформирования опоры (ε), зона разрушений пород начинает проявляться при $\varepsilon = 12$ %. Применительно к газобетонным опорам [3] это значение характеризует работу опоры в области постоянного сопротивления.

4. Повышение прочности опор в неустойчивых породах не решает проблему безаварийного поддержания выработок. С точки зрения безопасности работ это связано с увеличением протяженности зон разрушений по контуру выработки, которые повышают опасность обрушений пород кровли, а с точки зрения эффективности охраны выработки – ситуация ухудшается вследствие повышения вероятности выдавливания пород почвы. Как видно на рис. 4, формирование зоны разрушений пород под основанием опоры начинается при $\varepsilon = 8$ %, а при $\varepsilon = 27$ % зона разрушений становится обширной. Зона разрушений пород над опорой с $\sigma_0 = 12$ МПа начинает формироваться при $\varepsilon = 2$ %, что является положительным качеством. Но в отличие от характера формирования зоны разрушений над опорой с $\sigma_0 = 5$ МПа зона разрушений уже на первых стадиях деформирования опоры захватывает и породы на контуре выработки. Эти данные согласуются с опытом охраны выработок различными видами крепежных конструкций [3], где было показано, что эффективное применение железобетонных опор было достигнуто только на пластах с устойчивыми породами.

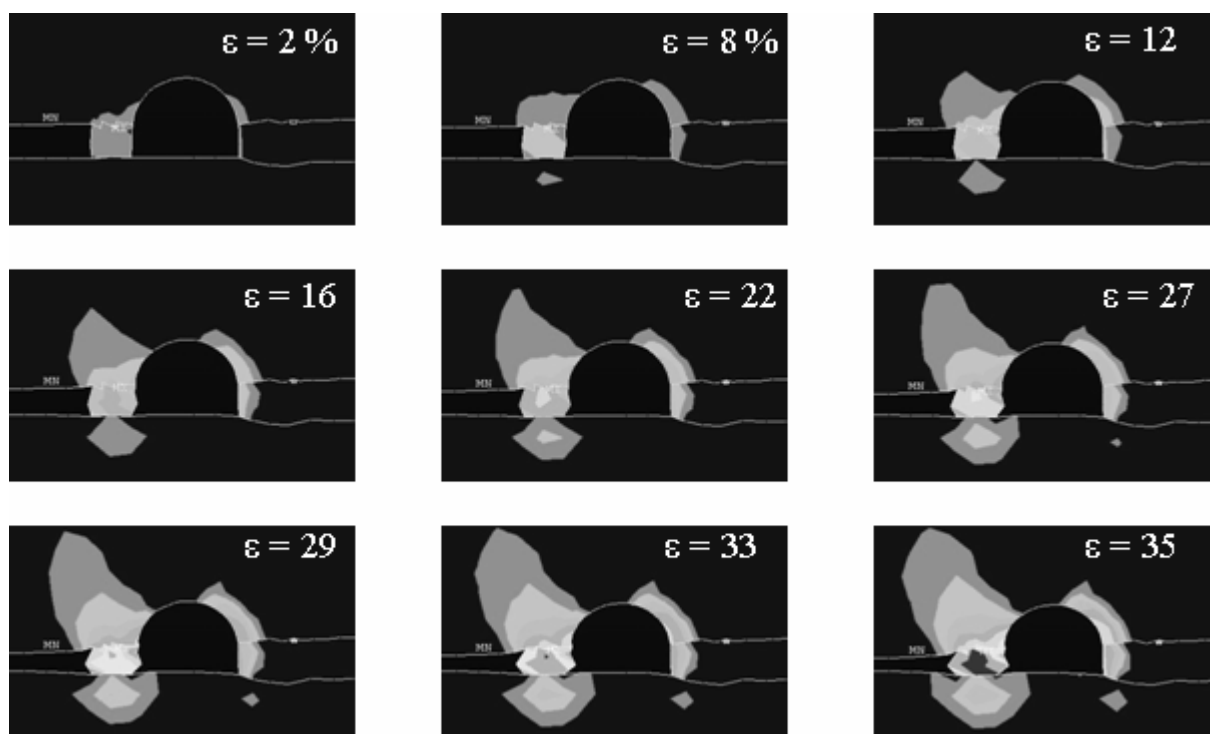


Рис. 4 - Динамика формирования зон разрушений вокруг выемочной выработки в процессе деформирования поддерживающей опоры прочностью 12 МПа.

5. При охране выемочных выработок в условиях неустойчивых пород после деформирования опор (независимо от их прочности) на 8-12 % практически по всему борту выработки, противоположному выработанному пространству, образуется область запредельного состояния, которая к заключительной стадии процесса увеличивается по площади примерно в два раза. В этой области возможны разрушения породы с последующими вывалами в полость выработки.

Таким образом, при выборе материала и конструкции опор для эффективной охраны выемочных выработок несущую способность опор и их податливость необходимо соотносить с прочностными характеристиками вмещающих пород. Если же материал опор уже задан, но в процессе их эксплуатации изменяются прочностные характеристики пород, то на формирование зон разрушений вокруг выработки можно влиять, регулируя податливость и несущую способность опор за счет ввода в их конструкцию прокладок различной жесткости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Орлов А.А. Исследование поведения пород кровли при применении стоек постоянного и нарастающего сопротивления // Сборник статей по вопросам исследования горного давления и сдвижения горных пород. Сб. XXXVI. – Л.: ВНИМИ, 1959. – С. 145–159.
2. Решение проблемы провалов земной поверхности при закрытии угольных шахт / Е.Л. Звягильский, С.С. Пенг, Н.Ф. Шевченко, В.В. Назимко // Стратегия управления социально-экономическим развитием региона на период до 2010 года. – Донецк: ИЭПИ. – Т. 1. – С. 42-46.
3. Канин В.А., Анциферов А.В. Охрана горных выработок газобетонной крепью. – Донецк: ООО «АЛЛАН», 2004. – 396 с.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИМПУЛЬСНОГО РЫХЛЕНИЯ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ

В роботі дано зіставлення теоретичного розрахунку з експериментальними даними частоти і розмаху автоколивань тиску кавітаційного пристрою. Рекомендовані коригування робочого граничного відношення тиску до напірного тиску, з урахуванням яких істотно підвищується достовірність теоретичного розрахунку.

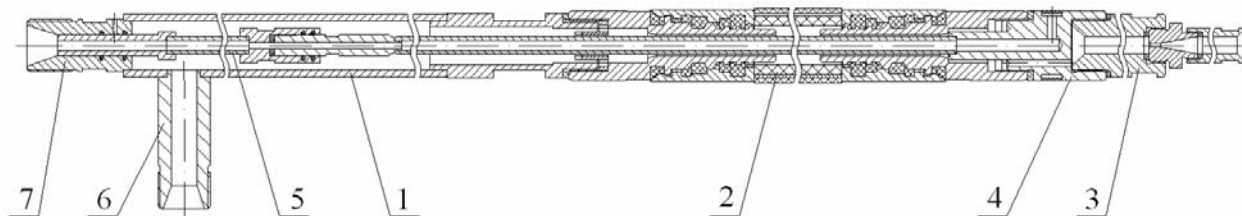
THE DETERMINATION OF HYDRODYNAMIC PARAMETERS OF THE PULSE DEVICE FOR LOOSENING COAL SEAMS.

This paper gives a comparison of theoretical calculations with experimental data of frequency and amplitude of oscillation of the cavitation pressure device. Recommended adjusting the boundary of the working relationship of pressure to the discharge pressure, under which substantially increases the reliability of theoretical calculations.

Одним из эффективных способов предотвращения внезапных выбросов угля и газа является гидрорыхление угольного массива путём статического нагнетания воды или водных химреактивов (ПАВ или ХАВ) в угольные пласты, обеспечивающее разгрузку последних от горного давления и дегазацию призабойного пространства через систему вновь образованных трещин.

Однако практикой ведения горных работ выявлен ряд существенных недостатков статического нагнетания. При сложном строении угольного пласта из-за наличия слоёв и пропластков с низкими фильтрационными свойствами непрерывное нагнетание воды сопровождается её прорывом в свободное пространство с падением гидростатического давления. В результате в угольном пласте формируются локальные зоны пригрузки, которые при проведении работ по выемке угля являются инициаторами газодинамических явлений.

Одним из перспективных направлений, позволяющих исключить эти недостатки, является создание высокоамплитудных гидродинамических волн в скважине устройством (рис. 1), основанным на явлении периодически-срывной кавитации, реализующейся путём подачи жидкости через трубку Вентури с углом раскрытия диффузора 18-22°.



1 – корпус, 2 – герметизатор, 3 – генератор упругих колебаний, 4 – переходник с каналами для отвода жидкости, 5 – трубка для отвода жидкости, 6 – патрубок под высоконапорный рукав, 7 – запорная втулка с переходником под манометр

Рис. 1 – Устройство гидроимпульсного воздействия на угольный пласт