

ратуры на 2-3 К. Для длинных маршрутов, протяженностью более 2000м, охлаждающее влияние расхода воздуха не сказывалось, так как продолжительность контакта воздуха с горными породами была достаточной.

Процесс разогревания воздуха происходил за счет геотермальной энергии недр. Ориентировочные расчеты показали, что мощность получаемой геотермальной энергии на выемочном участке может достигать в данных условиях 170-600 кВт и более.

Такой энергетический потенциал можно утилизировать различными способами. Наиболее простым представляется использование геотермального тепла для проветривания шахт - так называемая тепловая депрессия. Можно применить нагретый воздух для подпитки тепловых насосов. Возможны другие варианты использования геотермальной энергии для нужд предприятий или внешних потребителей.

#### Список литературы

1. Патент на корисну модель №17751 Україна, МПК F24J 3/08. "Спосіб одержання геотермальної енергії" / В.К.Костенко, О.В.Костенко, Т.В.Костенко; заявник і власник ДонНТУ. – №200603621; заявл. 03.04.2006; опубл. 16.10. 2006, Бюл. №10.
2. Костенко В.К. Математическая модель эксплуатационного режима шахтного геотермического теплообменника/ В.К.Костенко, И.Р.Венгеров // Вісті Донецького гірничого інституту. – 2007. - № 2. - С. 86-89.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Бойком В.О.  
Надійшла до редакції 24.06.11*

УДК 622.224:532.528

© В.А. Дзензерский, Ю.А. Жулай, А.А.Потапенко

## **ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ КАВИТАЦИЯ В РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЯХ**

Выполнена оценка эффективности технических средств гидроимпульсного воздействия с использованием режимов высокочастотных кавитационных автоколебаний для интенсификации технологических процессов в горнодобывающей отрасли.

Виконано оцінку ефективності технічних засобів гідроімпульсного впливу з використанням режимів високочастотних кавітаційних автоколиваний для інтенсифікації технологічних процесів у гірничодобувній галузі.

The estimation of efficiency of hydro impulsive technique using the high-frequency self-excited cavity oscillations modes for intensification of process technologies in mining industry is carried out.

Реализация ресурсосберегающих технологий предприятием, в том числе и в горнодобывающей отрасли, является одной из важных задач его хозяйственной деятельности. Особенно остро эта проблема встала перед руководителями хозяйствующего субъекта в условиях роста цен на энергоносители. В последнее время в мире и в Украине наблюдается устойчивая тенденция в разра-

ботке технологий, использующих гидродинамическую кавитацию, способствующей их интенсификации и повышению энергоэффективности.

В работах [1, 2] описаны примеры практического применения дискретно-импульсных струй, полученных посредством гидродинамической кавитации, для достижения позитивных результатов по интенсификации и ресурсосбережению различных технологических процессов:

- в металлургии – для удаления вторичной окалины пульсирующими струями при горячей прокатке металла;

- в машиностроении – для удаления заусениц и очистки различных поверхностей от ржавчины, загрязнений, старой краски;

- в химической промышленности – для эмульгирования жидкостей и диспергирования с использованием режимов периодически-срывной кавитации в потоке суспензии.

Практическое использование гидродинамической кавитации в этих отраслях позволяет снизить удельное энергопотребление до 50%.

**Целью** данной работы является оценка эффективности технических средств гидроимпульсного воздействия в режиме периодически-срывной кавитации и формирование приоритетных направлений их развития в горнодобывающей отрасли.

Решение этих задач связано с получением дискретно-импульсной энергии большой мощности в потоке жидкости при помощи кавитационного генератора (КГ), создающего высокоамплитудные колебания в диапазоне звуковых частот. Это достигается только за счет соответствующей геометрии специального гидравлического канала [3], без использования каких-либо движущихся частей и дополнительных источников энергии.

При экспериментальном исследовании кавитационных автоколебаний в гидравлической системе с трубкой Вентури с углом раскрытия диффузора  $\beta > 15^\circ$  и более, которые проводилось в Институте технической механики НАН Украины [4], на всех режимах работы трубки Вентури в широком диапазоне изменения числа кавитации  $K$  (критерий динамического подобия кавитационного течения жидкости) – наблюдались высокочастотные кавитационные автоколебания. Трубка Вентури со специальными геометрическими параметрами была названа кавитационным генератором (КГ), схема которого представлена на рисунке 1.

Снижение давления ниже некоторого критического значения давления  $P_{кр}$ , вследствие больших местных скоростей в потоке движущейся капельной жидкости в узком сечении КГ, приводит к разрыву сплошности. Такую кавитацию называют гидродинамической.

В качестве примера, на рис.2 (справа) приведена копия участка осциллограммы с записью параметров кавитационных автоколебаний, реализовавшихся в гидравлической системе, включающей КГ. Здесь же (слева), представлена копия участка кинограммы с кавитационным течением в генераторе и трубопроводе за ним. Экспериментально были установлены характерные особенности этого вида колебаний. К ним относится, прежде всего, отсутствие зависимости частоты колебаний от длины выходного трубопровода, которое указывает на не

акустическую природу высокочастотных кавитационных колебаний. Частота и «двойная амплитуда» этих колебаний определяются формой, геометрическими и режимными параметрами КГ.

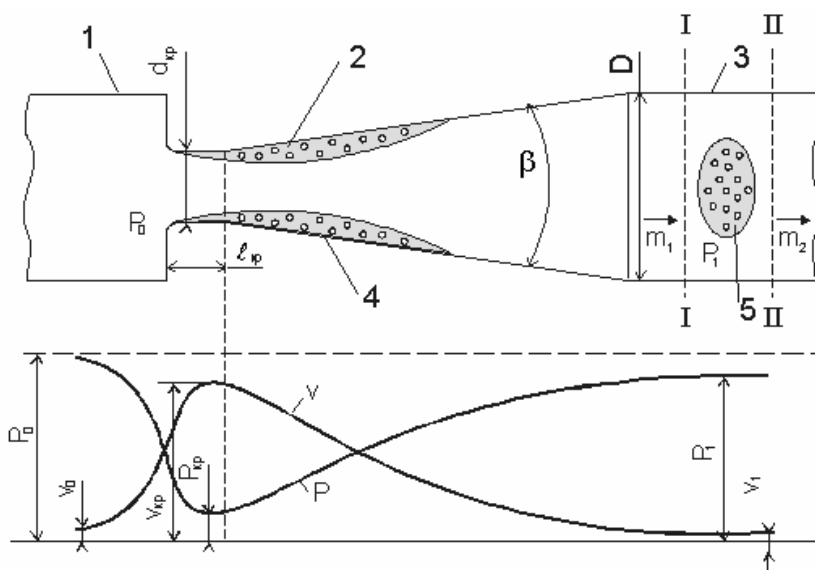


Рис.1. Схема кавитационного генератора с распределением давления и скорости потока вдоль него: 1 – входной трубопровод; 2 – трубка Вентури; 3 – выходной трубопровод; 4 – кавитационная зона; 5 – оторвавшаяся часть каверны.

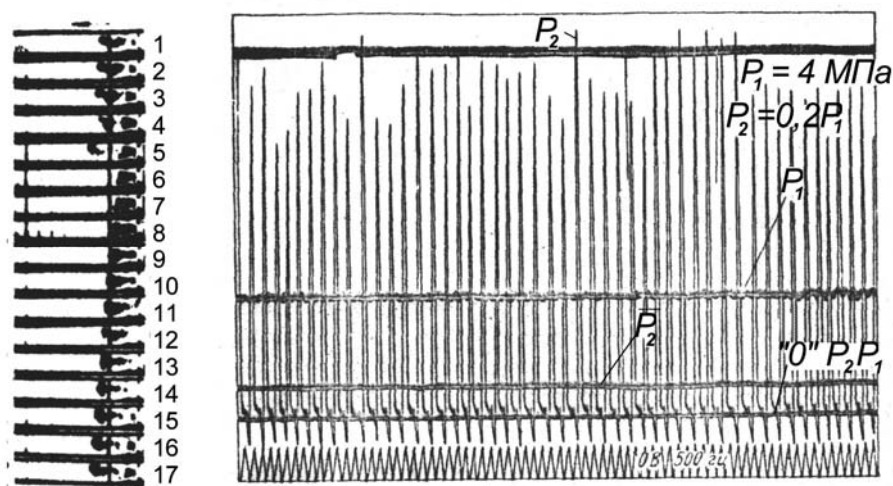


Рис.2. Копии участков осциллограммы и кинограммы кавитационных автоколебаний

Под «двойной амплитудой», вследствие негармонической формы колебаний, понимается величина размаха  $\Delta P_2 = P_{2\max} - P_{2\min}$ , где  $P_{2\max}$  и  $P_{2\min}$  – максимальное и минимальное значения давления в импульсе. При этом установлено, что наиболее развитые кавитационные колебания, частотой и амплитудой которых в широком диапазоне значений легко управлять геометрическими и режимными параметрами, наблюдаются в гидравлической системе при значениях угла раскрытия диффузора  $\beta > 15^\circ$ .

Визуальные исследования физической картины течения с применением скоростной киносъемки [5] показали, что в зависимости от геометрических параметров КГ для данного режима ( $P_1$  и  $P_2 = \text{const}$ ) в нем может реализоваться

режим периодически срывного кавитационного течения. При этом осевшая каверна растет до максимальных размеров, а потом происходит отрыв всей её диффузорной части и захлопывание со стабильной частотой.

Использование такого типа устройства в качестве источника гидродинамических волн позволяет реализовать способ создания импульсов давления жидкости, в несколько раз превышающие по величине давление, получаемое на выходе насосной установки.

Примером успешного использования гидродинамической кавитации может служить **иницирование водяных скважин**.

Для увеличения дебита скважин, т.е. повышения их фильтрационных свойств, необходимо проведение комплекса технических мероприятий, связанных с процессами расколматаций продуктивных зон фильтров различными методами, характеризующихся различной степенью эффективности. Это – чистка стенок скважин шарошечными долотами, откачки эрлифтом, механическое воздействие вибраторами на колонну с фильтром, создание гидравлических ударов при использовании в качестве генератора пневматических (низкочастотных) устройств, кислотное воздействие на фильтр, взрыв в районе фильтра или (без фильтра) в зоне водоносного горизонта. В последние годы начали применяться гидравлические свистки и магнестрикционные генераторы ультразвуковых колебаний. Не вдаваясь в глубокий анализ названных методов и средств, их недостатки определяют преимущества генератора колебаний давления жидкости, который имеет длительный ресурс работы (т.к. не содержит быстроизнашиваемых элементов и подвижных частей) и не требует дополнительных источников энергии.

При его использовании эффективность увеличения фильтрационных свойств продуктивных пластов значительно возрастает. В результате гидродинамического воздействия на горную породу в пласте формируются продольные и поперечные волны, возбуждающие упругие (собственные) колебания пористой среды, которые, в свою очередь, приводят к нарушению сплошности, идущей с образованием сети микротрещин.

Для оценки роста параметров проницаемости пластов использовался технический параметр – дебит скважины, по величине которого производилось определение фильтрационных свойств скважины.

На рис. 3 и 4 показаны схемы размещения наземного оборудования, обвязки и установки КГ в скважине с запиткой от погружного или автономного насоса.

По технологической схеме с запиткой от погружного насоса произведено восстановление двух скважин. В процессе работы проводилось сравнение эффективности расколматации скважин до, и после обработки. Изменение дебита фиксировалось при каждом замере. Вначале скважины были обработаны в режиме поступления всей воды на генератор. Дебит был повышен на 40%. Затем откачкой погружным насосом воды на слив обеспечивалась очистка скважины от частиц шлама. На втором режиме погружной насос одновременно работал на генератор и производился отбор воды в течение 68 часов. Общее повышение дебита составило 200%.

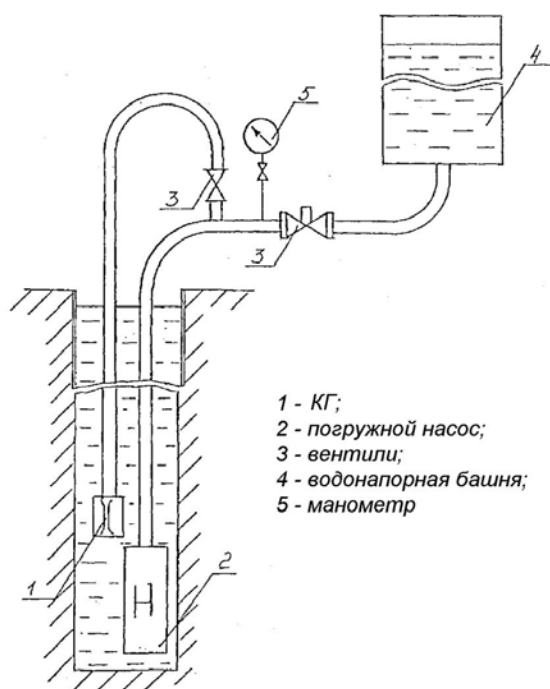


Рис. 3. Схема раскольматации скважин с приводом КГ от погружного насоса.

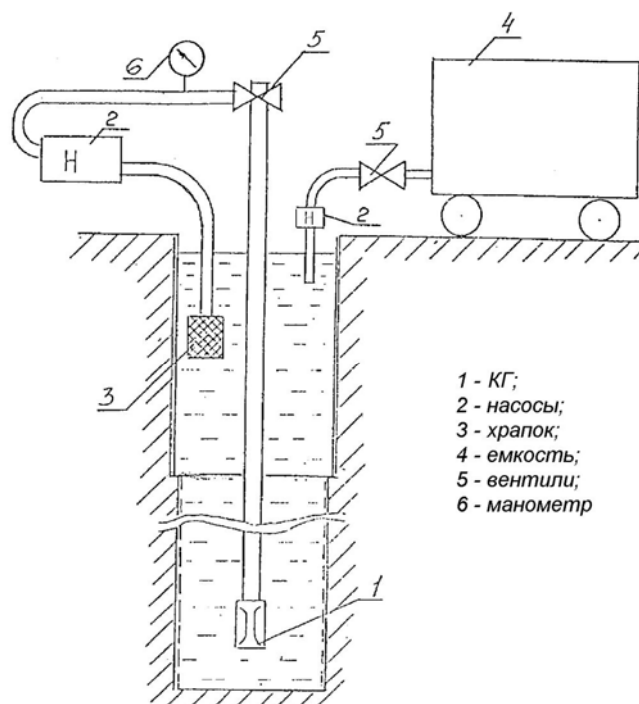


Рис. 4. Схема раскольматации скважин с приводом КГ от автономного насоса.

В скважинах, в которых водоносный горизонт перекрыт фильтром была проведена их обработка по схеме, представленной на рис. 7. Обеспечивалось поинтервальное перемещением КГ на любую высоту и обработка поверхности стенок скважин или фильтра. Это является важным фактором, поскольку стендовые исследования по определению параметров импульсного воздействия потока жидкости на фильтрующий элемент показали, что амплитуда колебаний давления по мере удаления его от выхода КГ падает.

Испытание схемы раскольматации скважин с приводом от погружного насоса проводились в скважинах глубиной 100 м. Скважины были снабжены фильтровыми колоннами, выполненными в виде перфорированной трубы.

После обработки скважин гидродинамическим способом в течение 4 часов их дебит увеличился на 25% – 110% по отношению к замеренному до обработки.

На основании изложенного были сделаны следующие выводы:

1. Увеличение дебита скважин на 25-200% (путем импульсной гидрообработки скважин с величинами пиковых давлений, лежащих в диапазоне 4-12 МПа) обуславливается нелинейным увеличением параметров проницаемости, благодаря формированию разветвленной сети трещин и пор за счет высокочастотного знакопеременного воздействия жидкости на капилляры породы, твердую фазу и фильтрат и эффективным выносом последних из продуктивной зоны.

2. Эффективность работ по раскольматации скважин и очистки фильтров зависит от схемы воздействия на пласт или фильтр.

Известно, что при **бурении скважин** в твердых горных породах наложенные вибронагрузки на породоразрушающий инструмент приводит к повышению технико-экономических показателей бурения.

Одним из эффективных способов бурения скважин является использование гидроударных машин. Однако технические средства для его осуществления обладают рядом недостатков, главным из которых является сложность эксплуатации машин, связанная с наличием движущихся деталей и пружин, резиновых манжет, изнашивающихся в процессе эксплуатации, в связи, с чем межсмотровой период не превышает 25 часов. Негативным моментом в этом случае является не только трудоемкость работ, но и большая зависимость эффективности бурения от точности регулировки движущихся деталей.

Одним из перспективных направлений, позволяющих исключить эти недостатки, является создание высокоамплитудных гидродинамических волн в трубопроводе за КГ и преобразование их в механическое вибронагружение породоразрушающего инструмента.

На рис.5 приведены схемы гидродинамических буровых снарядов (БС) для кернового а) и безкернового б) бурения. Генератор 2, используя энергию промывочной жидкости, преобразует стационарный поток в дискретно-импульсный и создает высокочастотные продольные виброускорения на породоразрушающем инструменте 3. Указанные БС прошли полный комплекс экспериментальных исследований на гидравлических и буровых стендах, а также в условиях сооружения гидрогеологических и геологоразведочных скважин.

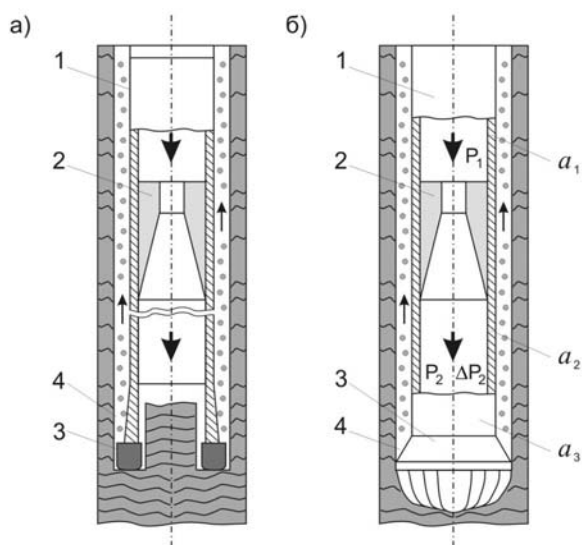


Рис.5. Принципиальная схема гидродинамического бурового снаряда (а – бурение с отбором керна; б – бескерновое бурение): 1 – буровая колонна; 2 – КГ; 3 – породоразрушающий инструмент; 4 – скважина.

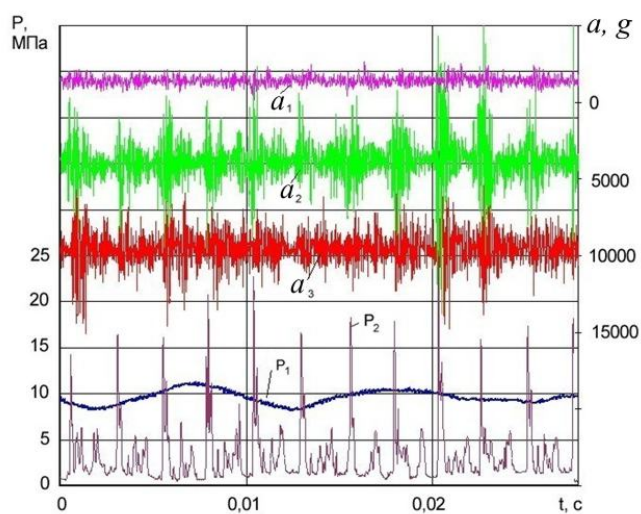


Рис.6. Копия оциллограммы записи параметров при испытаниях экспериментального образца гидравлического бурового снаряда на гидравлическом стенде:  $P_1 \approx 10$  МПа,  $P_2/P_1 \approx 0,123$ .

На рис.6 приведена копия участка оциллограммы с записью в реальном режиме времени параметров экспериментального образца БС при его испытаниях на гидравлическом стенде. К этим параметрам (см. рис.2) относятся  $P_1$  и  $P_2$  – давления на входе в кавитационный генератор и в трубопроводе за ним,  $a_1$ ,

$a_2$  и  $a_3$  – виброускорения в сечениях до и после кавитационного генератора и на корпусе имитатора породоразрушающего инструмента.

Анализ результатов этих испытаний не оставляет сомнений в том, что в трубопроводе БС (за сечением выхода из генератора) реализуется режим периодически срывной кавитации с частотами в диапазоне 70 – 3000 Гц с максимальным размахом колебаний давления жидкости  $\Delta P_2$  до  $2,7 P_1$ . Максимальные значения виброускорений на корпусе имитатора породоразрушающего инструмента составили 1600 g (при  $P_1 \approx 5$  МПа) и 2700 g (при  $P_1 \approx 10$  МПа). То есть, повышение давления подачи промывочной жидкости приводит к росту значений виброускорений на породоразрушающем инструменте и их частоты.

Следует отметить удовлетворительное согласование виброускорений БС, полученных при испытаниях на гидравлическом и буровом стенде. Так максимальные значения виброускорений в обоих случаях, полученные при давлениях питания  $P_1 = 5,1$  МПа, достигают величин  $\approx 1600$  g.

Эффективность бурения с наложением вибронагрузки на породоразрушающий инструмент была подтверждена при сооружении гидрогеологических скважин большого диаметра.

Результаты сравнительного анализа бурения гидрогеологической скважины диаметром 190 мм показали, что при работе БС средний рост механической скорости бурения достигает 71,5% по сравнению со скоростью бурения роторным способом. При этом произошло снижение износа породоразрушающего инструмента и энергозатрат до 30%.

На основе проведенных исследований были созданы гидродинамические БС снаряды для бурения геологоразведочных скважин 76мм, испытания которых выполнялись в условиях ПГО "Степьгеология" (Кокчетавская область и район Астаны). Данные испытаний в идентичных условиях показали, что по сравнению с гидроударником Г76ВО, гидродинамический БС, оснащенный коронкой 02ИЗ, обеспечил рост механической скорости бурения на 15,8% и ресурса работы коронки на 13,2%. При использовании алмазных коронок типа А4ДП, рост механической скорости в среднем составил 26,7%, а ресурс коронки по средним значениям 11,8%.

Анализ затрат мощности на вращение бурового инструмента на всех режимах бурения показал, что при работе гидродинамического БС происходит их снижение до 20% (по сравнению с затратами мощности при работе гидроударника Г76ВО). БС обеспечивает улучшение стабилизации и устойчивости функционирования буровой колонны и породоразрушающего инструмента.

Сравнительный анализ надежности работы гидродинамического БС и гидроударника Г76ВО показал следующее: за период испытаний было отмечено 4 отказа гидроударника и произведено 10 его сборок-разборок для регулировки и замены деталей. В то же время, за весь период испытаний не произошло ни одного отказа в работе гидродинамического БС. Осмотром и замером основных размеров деталей БС установлено отсутствие их износа. Это свидетельствует о том, что ресурс работы гидродинамического БС значительно превышает ресурс гидроударника.

С применением БС пробурена скважина глубиной 522,5 м и до этой глубины подтверждена его работоспособность.

Анализ способов и средств **борьбы с газовым и пылевым факторами** в странах с наиболее развитой угольной отраслью показывает, что до настоящего времени статическое нагнетание жидкости в угольные пласты является основополагающим мероприятием.

В мировой практике ведения горных работ по данным направлениям проведен большой объем научно-технических исследований, на основании которых разработаны нормативные документы, регламентирующие проведение работ, их контроль и оценку эффективности. Вместе с тем увеличение глубины разработки месторождений, изменение горно-геологических условий и свойств углепородного массива при одновременном увеличении нагрузки на очистные и подготовительные забои привели к значительному снижению эффективности профилактических мероприятий. Анализ исследований показывает, что в условиях больших глубин возможности нагнетания жидкости в статическом режиме исчерпаны. При таком нагнетании жидкости имеют место случаи спонтанного прорыва воды в выработанное пространство и преждевременного гидроотжима краевой части пласта с угрозой провоцирования газодинамического явления. Эффективное решение данной проблемы стало возможным после ряда экспериментальных исследований импульсного нагнетания жидкости.

В последние годы значимые результаты в этом направлении получены Институтом геотехнической механики (ИГТМ) НАН Украины совместно с ПАО «Краснодонуголь». Лабораторные исследования погружного устройства гидроимпульсного воздействия (УГИВ) на модели скважины показали, что при давлении нагнетания от 5,0 до 30,0 МПа с расходом жидкости 30-70 л/мин рабочий диапазон частоты автоколебаний составляет от 1 до 7 кГц. Максимальный размах автоколебаний давления жидкости, наложенный на величину подпора, соизмерим с давлением нагнетания. Что подтвердило возможность эффективного использования разработанного устройства для импульсного нагнетания жидкости в комплексе горного оборудования при гидрорыхлении угольных пластов.

В результате горно-экспериментальных работ и оценки эффективности применения УГИВ, расположенного в скважине (рис. 7), при гидрорыхлении выбросоопасных угольных пластов в забое подготовительной выработки установлено:

- разработанная конструкция УГИВ при нагнетании жидкости в диапазоне давления от 10,0 до 20,0 МПа со скоростью нагнетания от 40 до 60 л/мин обеспечивает эффективное рыхление и дегазацию выбросоопасных угольных пластов в зонах с низкой гидравлической проницаемостью;



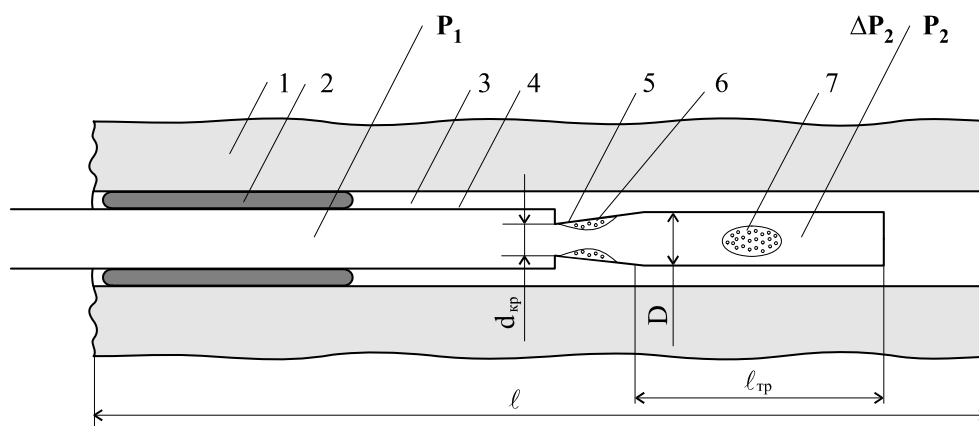


Рис. 7. Схема гидрорыхления угольного массива

1 – угольный пласт; 2 – герметизатор скважины; 3; 4 – напорный трубопровод; 5 – КГ; 6 – оседлая каверна; 7 – оторвавшаяся и снесенная по потоку каверна

- рыхление массива нагнетанием жидкости через скважины диаметром 43 мм и длиной от 6,0 до 7,0 м с глубиной герметизации от 4,0 до 5,0 м за зоной максимального опорного горного давления осуществляется без проявления гидроразрыва и протекания воды по сечению пласта в забое выработки.

- сравнение эффективности применения статического и импульсного нагнетания жидкости по длительности воздействия на массив показало, что при гидроимпульсном воздействии длительность нагнетания жидкости до завершения активного процесса гидрообработки пласта снижается до 50 %, а расход жидкости до 60%. В процессе ведения работ признаки ГДЯ не наблюдались.

- из условия безопасного ведения горных работ величина давления в фильтрационной камере скважины не должна превышать давление гидроразрыва пласта, т.е.  $0,75\gamma H$ . Применение импульсного режима нагнетания с кавитационным течением жидкости обеспечивает соблюдение этого критерия, при этом позволяет управлять процессом трещинообразования в угольном пласте.

### Выводы

Эффективность использования гидродинамической кавитации подтверждена разработками способов и устройств по интенсификации технологических процессов в горнодобывающей отрасли: при бурении и раскольматации скважин, гидроимпульсного рыхления выбросоопасных угольных пластов.

Кавитационный генератор, преобразующий стационарный поток жидкости в дискретно-импульсный, за счет высокочастотного знакопеременного воздействия, интенсифицирует различные технологические процессы. Он обладает рядом преимуществ перед другими техническими средствами волнового воздействия:

– простота изготовления, отсутствие подвижных частей, дополнительных источников энергии, длительность ресурса, исключение передачи колебаний жидкости на насос;

– конструкция кавитационного генератора органично вписывается в различные технологии и позволяет интенсифицировать их при более низких удельных энергозатратах, не требует трудоемкой доработки оборудования.

Перспективним в даному напрямку дослідження є використання отриманих результатів для аналізу впливу динамічних характеристик УГІВ на процес гидрорухлення удароопасних углей і визначення раціональних величин імпульсів тиску і частоти їх повторення.

#### Список літератури

1. V.V.Pilipenko. Cavitation self-oscillations intensify technological processes / V.V.Pilipenko, I.K.Man'ko, V.A.Zadontsev // Proceedings of a Fluid Dynamics Panel Workshop. – Kiev, Ukraine. Report 827, 1998, – P.32-1-4.
2. Жулай Ю.А. Гидродинамическая кавитация в энергосберегающих технологиях/ Ю.А. Жулай, Ворошилов А.С. //«Вестник»: сб. науч. трудов/ ДНУЖТ им. академика Лазаряна. – Днепропетровск, 2007. – Вып. № 14. – С.46–51.
3. А.с. 1232296 СССР, МКИ В 06 В 1/18. Генератор колебаний давления жидкости / В.В.Пилипенко, В.А.Задонцев, И.К.Манько, Ю.А.Жулай, Н.А.Дзоз (СССР). –№ 3772504/24-28; заявл. 19.07.84; опубл. 23.05.86, Бюл. № 12.
4. Пилипенко В.В. Кавитационные автоколебания: монография / В.В. Пилипенко. – К: Наук. думка, 1989. - 316 с.
5. Манько И.К. Визуальные исследования кавитационных автоколебаний в гидравлической системе с прозрачной трубкой Вентури / И.К. Манько // Кавитационные автоколебания в насосных системах. – К.: Наук. думка, 1976. – Ч. 2. – С.113-118.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Бойком В.О.  
Надійшла до редакції 21.06.11*

UDC 550.83

© G. Gruhler, S. Dashevsky, J. Kranz, T. Zawischka

## **ELECTRIC ROAD VEHICLES – OVERVIEW, CONCEPTS AND RESEARCH AT REUTLINGEN UNIVERSITY**

The paper details the architecture of fully electrified vehicles as well as their new electronic systems. Examples of up-to-date electrical passenger cars are given. A very important question, that is the environmental foot-print of electrical vehicles compared to conventional ones, is examined. A research project is introduced where a fleet of two-wheeled vehicles is available for day-to-day use. Research on vehicles, software for fleet management and battery range prediction is described.

В даній статті наведено докладні відомості щодо принципів роботи електрифікованих транспортних засобів, а також описано їх нові електричні системи. Показано приклади вже існуючих електричних пасажирських транспортних засобів. Розглянуто вплив електрифікованого транспорту на навколишнє середовище у порівнянні із звичайними видами транспорту. Наведено проект досліджень, у рамках якого існує парк двоколісних електрифікованих транспортних засобів для щоденного використання. Описано дослідження, безпосередньо пов'язані із електрифікованим транспортом, визначенням точного часу розряду батареї, а також програмним забезпеченням, що дозволяє керувати парком таких транспортних засобів.

У статті наведено докладні відомості щодо принципів роботи електрифікованих транспортних засобів, а також описано їх нові електричні системи. Показано приклади вже існуючих електричних пасажирських транспортних засобів. Розглянуто вплив електрифікованого транспорту на навколишнє середовище у порівнянні із звичайними видами транспорту. Наведено проект досліджень, у рамках якого існує парк двоколісних електрифікованих транспортних засобів для щоденного використання. Описано дослідження, безпосередньо пов'язані із електрифікованим транспортом, визначенням точного часу розряду батареї, а також програмним забезпеченням, що дозволяє керувати парком таких транспортних засобів.