



**РАЗРАБОТКА ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ГЕО-
И ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ГИДРОРАЗРЫВЕ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ**

А. Н. Дробчик

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: a.n.drobchik@gmail.com,
Красный проспект 54, г. Новосибирск 630091, Россия*

Разработана измерительная система для стенда, позволяющего проводить исследования газодинамических процессов на крупногабаритных образцах горной породы при выполнении гидравлического разрыва пласта в модели скважины. Система обеспечивает сбор данных о давлении в устройстве гидроразрыва и нагружении пневмомонократов, которые создают сжимающие напряжения в прискважинной зоне, а также регистрацию акустической эмиссии при образовании трещины. Дополнительно реализована возможность измерения расхода газа, подаваемого в образец через шпур на его боковой стенке и откачиваемого из скважины.

Угольный пласт, дегазация, газодинамический картаж, гидроразрыв, лабораторный стенд

**MEASURING SYSTEM TO INVESTIGATE GEO- AND GAS-DYNAMIC PROCESSES
IN HYDRAULIC FRACTURING OF COAL SEAMS**

A. N. Drobchik

*Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
E-mail: a.n.drobchik@gmail.com, Krasny pr. 54, Novosibirsk 630091, Russia*

A measuring system has been developed for a test bench allowing the study of gas-dynamic processes in large-sized rock samples when performing hydraulic fracturing of a coal seam in a borehole model. This system provides collection of the data on pressure in a hydraulic fracturing device and loading of pneumatic jacks which create compressive stresses in the borehole zone, it also records acoustic emission during crack formation. An additional capability is implemented to measure the flow rate of gas supplied to sample through the holes on its side wall and pumped from the borehole.

Coal seam, degassing, gas-dynamic logging, hydraulic fracturing, laboratory test bench

Метан, содержащийся в угольных пластах, является, с одной стороны, фактором, осложняющим добычу угля, а с другой — ценным углеводородным сырьем, объемы которого растут с увеличением разработки угольных пластов. Безопасность и эффективность разработки газоносных угольных пластов зависит от качества дегазации выработок и пластов, в которых планируется или была проведена выработка. Использование протяженных скважин направленного бурения при продолжительности предварительной дегазации выемочного участка около одного года обеспечивает степень дегазации до 70% метана угольных пластов и обеспечивает безопасную выемку угля современным высокопроизводительным очистным оборудованием [1]. Эффективность дегазации зависит от проницаемости угольного массива и плотности покрытия дегазационными скважинами. В большинстве случаев рабочая зона одной скважины ограничена несколькими метрами, что приводит к большому объему буровых работ и высокой стоимости процедуры дегазации. Главным и наиболее эффективным способом повышения произво-

длительности дегазационных скважин (и снижения плотности их сетки) является множественный (интервальный) гидроразрыв с заполнением создаваемых трещин раскрепляющим агентом (проппантом). Предварительная дегазация неразгруженных угольных пластов в шахтных условиях с применением гидроразрыва показала увеличение извлечения метана в 5 раз в пластах проницаемостью 0.02 – 0.03 мД и до 180 раз в пластах более низкой проницаемости [2]. Широкому внедрению метода препятствует отсутствие эффективных и экономически рентабельных технических и методических решений, а также приборов газодинамического каротажа дегазационных скважин с возможностью получения данных по газопритоку для определения мест, требующих уплотнения / разрежения сетки дегазационных скважин.

В рамках научных исследований по теме “Разработка технологии шахтного гидроразрыва на основе проппантов низкой плотности и роботизированного скважинного оборудования для повышения эффективности освоения газоносных угольных пластов и извлечения из них метана” создана лабораторная установка (стенд) для исследования гео- и газодинамических процессов при интенсивной обработке угольных пластов с использованием шахтного гидроразрыва. Стенд представляет собой металлическую раму (рис. 1, II), внутри которой располагается физическая модель углепородного массива с устройством создания пластовых напряжений, и систему подвода газа с комплексом управления стендом (рис. 1, I).

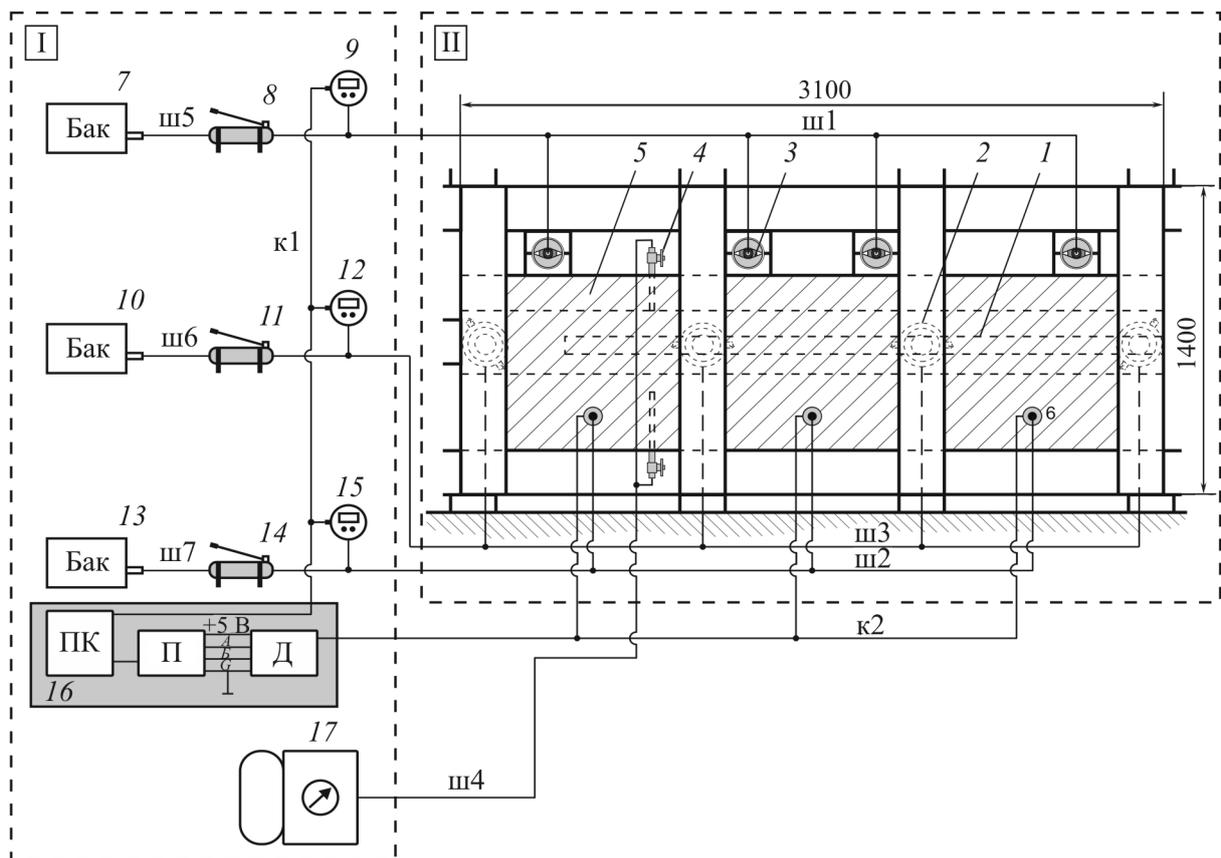


Рис. 1. Принципиальная схема установки для исследования гео- и газодинамических процессов при интенсивной обработке угольных пластов с использованием шахтного гидроразрыва

Рассмотрим схему установки более подробно. Вдоль оси физической модели углепородного массива 5 пробурена дегазационная скважина 1. Моделирование напряженного состояния пласта осуществляется с помощью пневмодомкратов горизонтального 2 и вертикального 3 действия, подключенных к гидравлическим насосам высокого давления 8, 11, 14 с баками 7, 10, 13. Измерение давлений нагружения модели проводится с помощью датчиков 9, 12, 15. Дополнительно

установлены датчики измерения деформаций *б*. Стенд оборудован комплексом информационно-измерительной и регистрирующей аппаратуры *16* и газовой станцией для исследования газодинамических процессов *17* с подачей/отводом газа через гермовводы *4*.

Физическая модель углепородного массива изготовлена из измельченного угля с добавлением цементно-песчаного состава и установлена внутри металлической рамы стенда. Форма модели — параллелепипед размером 270×85×75 см. Цемент, песок и плотный уголь марки “Д” смешаны в пропорции 1 : 1 : 4. На рис. 2 приведены фотографии стенда и физической модели углепородного массива. Скважины выбуриваются в модели после ее отвердевания буровым инструментом с алмазной коронкой.



Рис. 2. Стенд для исследования гео- и газодинамических процессов при гидроразрыве угольных пластов (*а*) и модель углепородного массива (*б*)

В процессе формирования трещин гидроразрыва и заполнения их проппантом в физической модели происходит изменение напряженного-деформированного состояния и емкостно-фильтрационных свойств. Разработанный экспериментальный образец оборудования газодинамического каротажа обеспечивает проведение интервальных измерений газопроницаемости углепородного массива [3].

Измерительная система собрана на базе автономных регистраторов SCOUT (СКБ СТ, Самара), синхронизируемых между собой по сигналам GPS. Данные регистраторы позволяют оцифровывать входные сигналы с минимальным интервалом квантования 0.25 мс и точностью синхронизации по времени 1 мкс. Применение регистраторов полевого исполнения в дальнейшем позволят перейти к натурному эксперименту без каких-либо доработок.

Для контроля за состоянием физической модели массива проводится запись сейсмической эмиссии. Для этого используются однокомпонентные сейсмоприемники (вертикальные и горизонтальные) марок GS-20DX, GS-ONE. Регистраторы SCOUT были доработаны для записи выходных сигналов мостовых тензометрических датчиков давления ЛХ-412-250 в диапазоне частот 0–1500 Гц. Для подключения тензодатчика к регистратору разработан преобразователь (рис. 3). Регулирование динамического диапазона выходного сигнала преобразователя осуществляется через коэффициент усиления, задаваемый резистором R1(Rg), таким образом, чтобы при максимальном давлении уровень на выходе преобразователя не превышал 5В (линейный участок работы усилителя при напряжении электрического питания ± 7.2 В).

На рис. 4*а* показана осциллограмма изменения давления в гидравлической системе с ростом до 20 МПа и последующим быстрым сбросом, имитирующим гидроразрыв. Пересчет выходного сигнала датчика в давление осуществляется через линейные коэффициенты *A* и *B* преобразователя, определяемые в ходе калибровки по образцовому манометру. Фотография трехканального преобразователя давления и регистратора данных SCOUT приведена на рис. 4*б*.

Схема согласования ЛХ-42 и БАР SCOUT

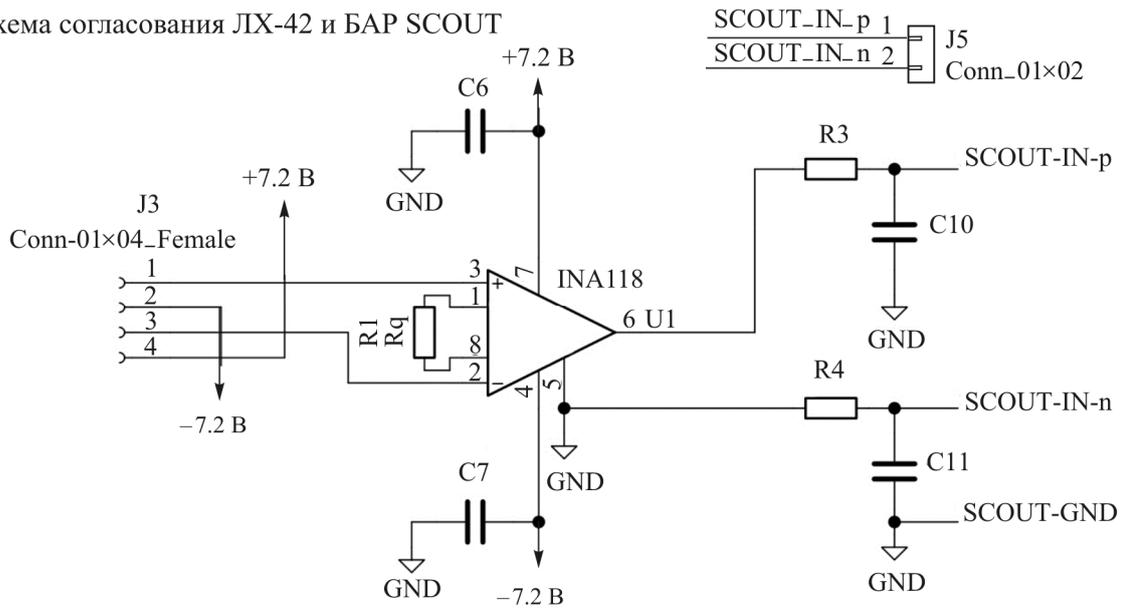


Рис. 3. Схема преобразователя ЛХ412- БАР SCOUT

Стенд оснащен системой неразрушающего контроля модели акустическим просвечиванием. В источнике колебаний применяется обратный пьезоэлектрический эффект. Активный пьезоэлемент установлен на конце анкера, обеспечивающего передачу генерируемого сигнала в модель. Анкер содержит встроенный винт для регулирования усилия прижима пьезокерамического излучателя к среде. Указанная система может быть использована и для излучения, и для приема упругих колебаний. Группа излучателей и приемников, размещенных в различных точках модели, образуют систему наблюдений, которая позволяет отслеживать процесс образования конечной формы трещины гидроразрыва. Оценим разрешающую способность системы акустического контроля стенда. Скорость распространения акустических волн в углебетоне колеблется от 2500 до 5250 м/с. Время пробега продольной волны по бетону вдоль максимальной длины модели и обратно составляет не более 1.5–2.0 мс. Физический предел разрешающей способности акустического мониторинга близок к $\frac{1}{4}\lambda$, где λ — длина волны упругих колебаний. Для обеспечения разрешающей способности на уровне 0.01 м необходимо, чтобы частота акустического сигнала была не ниже 100 кГц. Для достоверной оцифровки гармонического сигнала по теореме Котельникова период дискретизации должен быть не меньше половины периода сигнала, оптимально — не меньше 1/10, т. е. для получения разрешающей способности в 1 см необходимо организовать запись данных с частотой дискретизации 1 МГц при объеме памяти не менее 1500 точек, что обеспечивает большинство современных цифровых осциллографов.

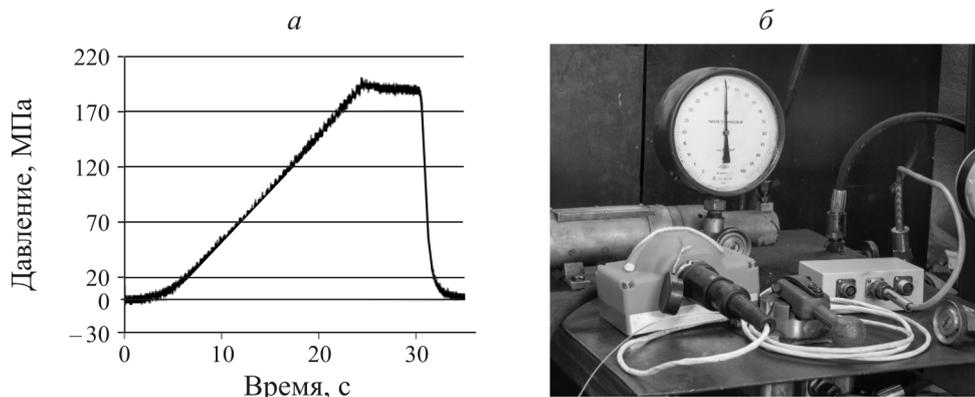


Рис. 4. Результаты проверки и пересчета преобразователя давления и фотография оборудования

Помимо акустического просвечивания для контроля процессов разрушения модели планируется использовать также метод выделения стоячих волн из шумового поля. Реализация этого метода не потребует дополнительных изменений в аппаратной части стенда.

ВЫВОДЫ

Разработана измерительная система для стенда по исследованию гео- и газодинамических процессов при гидроразрыве угольных пластов. Система обеспечивает регистрацию давлений в системе создания напряжений в прискважной зоне, а также акустическую эмиссию при образовании трещины. Дополнительно разработана система неразрушающего акустического контроля с частотой зондирующих сигналов не менее 100 кГц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- 1. Shouqing Lu., Yuanping Cheng, Jinmin Ma, Yuebing Zhang.** Application of in-seam directional drilling technology for gas drainage with benefits to gas outburst control and greenhouse gas reductions in Daning coal mine, China, *Nat Hazards*, 2014.
- 2. Jeffrey R. G., Boucher C.** Sand Propped Hydraulic Fracture Stimulation of Horizontal In-seam Gas Drainage Holes at Dartbrook Coal Mine, In: *Coal Operators' Conference, University of Wollongong & the Australasian Institute of Mining and Metallurgy (Wollongong, February 4–6, 2004)*, Wollongong: University of Wollongong, 2004, pp. 169–179.
- 3. Serdyukov S. V., Shilova T. V., Rybalkin L. A.** Down-the-hole device for measuring recovery and coal permeability, *Journal of Mining Science*, 2016, vol. 52, no. 3, pp. 608. [**Сердюков С. В., Шилова Т. В., Рыбалкин Л. А.** Скважинный прибор для измерения газоотдачи и фильтрационных свойств угольного пласта // *ФТПРПИ*. — 2016. — № 3. — С. 192–199.]