

УДК 622.831:537.86

**ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА УГОЛЬНЫЙ
ПЛАСТ ДЛЯ АКТИВАЦИИ ПРОЦЕССА ДЕГАЗАЦИИ**

д.т.н. Алексеев А.Д., к.ф.н. Кириллов А.К. (ИФГП НАН Украины)
д.т.н. Мнухин А.Г., к.т.н. Брюханов А.М. (МакНИИ)

Дано теоретичне обґрунтування та методику експериментів з впливу високочастотного електромагнітного поля на вугільну речовину для прискорення десорбції метану.

**ELECTROMAGNETIC EFFECT ON THE COAL – SEAM FOR
ACTIVATION OF DEGASIFICATION**

Alekseev A.D., Kirillov A.K., Mnukhin A.G., Brukhanov A.M.

The theoretical substantiation and technique of experiments on effect by the high-frequency electromagnetic field with the purpose to speed up methane desorption from coal substance is given.

Настоящее исследование посвящено обоснованию эффективности применения высокочастотного электромагнитного излучения для ускорения процесса дегазации угля, что дает возможность воздействовать непосредственно на метан, сорбированный в структуру угольного вещества.

Лабораторные эксперименты по воздействию электромагнитного излучения на уголь проводились ранее [1], однако рассматривались достаточно сильные поля с амплитудой электрической составляющей $E > 10^4$ V/m в интервале частот 1–7 МГц. В этом случае происходит усиленное образование трещин, облегчающее фильтрацию газа из образцов угля. Ниже представлены результаты экспериментов, при которых воздействие высокочастотных электромагнитных колебаний приводит к ускорению процесса десорбции метана без изменения структуры угольной среды.

Однако при этом возникает вопрос о механизме и необходимых энергетических затратах для обеспечения эффективности рассматриваемого метода дегазации пористой угольной среды непосредст-

венно в условиях производства. Фактически необходимо активировать выход метана, сорбированного в межслоевых промежутках и в твердом растворе без разрушения угля и дополнительного трещинообразования.

С этой целью можно создавать низкочастотные вибрации или генерировать импульсы ЭМП высокой частоты. Генерация импульсов должна приводить к пульсациям давления в среде (обратный сейсмо-электромагнитный эффект). Поэтому необходимо связать амплитуду электромагнитного импульса с импульсом давления. Оценка параметров такого волнового воздействия на газонасыщенное угольное вещество проводилось в работах [2, 3].

Одним из способов инициирования выхода метана из газонасыщенного образца может быть резонансное воздействие на молекулы, внедренные в структуру угольного вещества. Примем для резонансной частоты $\Omega_0 \approx 70$ МГц. Фактически необходимо генерировать ударные волны (или слабые разрывы) с такой же частотой. Как показано в экспериментах на проводящих средах [4], наиболее эффективным оказался вариант, когда отношение интервала между последовательными импульсами, T , к продолжительности импульса, τ : $q = T/\tau = 5$ или 10 . В качестве примера рассмотрим вариант, когда $\tau = 10^{-7}$ с, и $T = 10^{-6}$ с. За отрезок времени 10^{-6} с сейсмический импульс пройдет путь $R = T \cdot v_p = 2 \cdot 10^{-3}$ м, где $v_p = 2 \cdot 10^3$ м/с – скорость продольной сейсмической волны.

Так, если расположить генератор в 10 м от забоя, то мы должны обеспечить достаточную мощность, а разрешение по времени должно быть достаточно высоким, чтобы следующий импульс не интерферировал с предыдущим. При $R = 10$ м этот интервал Δt должен быть больше, чем $R/v_p = 10/2 \cdot 10^3 = 5 \cdot 10^{-3}$ сек. Это означает, что в режиме сейсмического воздействия невозможно обеспечить частоту f больше, чем $1/\Delta t = 200$ Гц. Поэтому единственная возможность обеспечить дополнительное активирование выхода метана из угольного пласта с частотой $\Omega_0 \approx 70$ МГц – это электромагнитное воздействие. Длина волны при этом $\lambda = c \cdot T = c/f = 3 \cdot 10^8 / 10^7 \approx 30$ м в воздухе. Для угля, где фазовая скорость $v_\phi = c/\sqrt{\epsilon\mu}$ и $\epsilon = 3 \div 5$, получаем значение длины волны $\lambda = 15$ м. То есть, при таком частотном интервале мы работаем в ближней зоне, где электромагнитные колебания в первую очередь определяются электрической компонентой \vec{E} .

Поскольку расстояния малы, то нет проблемы с затуханием, поскольку характерное расстояние затухания волны гораздо больше, чем $R = 10$ м.

Согласно работе [5], наблюдаемое во время землетрясений импульсное электромагнитное излучение имеет предельную частоту $\sim 10^7$ Гц, причем эта частота определяется временем релаксации зарядов, $\tau = 1/\omega_{\text{макс}}$, и соответствует длине волны $\lambda \approx 30$ м. Поэтому не имеет смысла использовать частоты выше указанной величины, если основываться на сейсмо-электромагнитном механизме [6] активации выхода метана.

Одним из вариантов генерации электромагнитного излучения (ЭМИ) является излучение элементарного излучателя – диполя Герца. В ближней зоне $r \ll \lambda$ имеется решение в сферической системе координат для азимутальной компоненты магнитного поля $\dot{H}_{m\alpha} = \dot{H}_m$ и двух компонент напряженности электрического поля $\dot{E}_{m\theta}$, \dot{E}_{mR} в комплексном виде [7]:

$$\dot{E}_{mR} = \frac{\dot{I}_m l e^{-j\frac{\omega R}{c}} e^{-j\frac{\pi}{2}}}{2\pi\epsilon\omega R^3} \cos\theta, \quad (1)$$

$$\dot{E}_{m\theta} = \frac{\dot{I}_m l e^{-j\frac{\omega R}{c}} e^{-j\frac{\pi}{2}}}{4\pi\epsilon\omega R^3} \sin\theta, \quad (2)$$

$$\dot{H}_m = \frac{\dot{I}_m l e^{-j\frac{\omega R}{c}}}{4\pi R^2} \sin\theta, \quad (3)$$

где $i = \dot{I}_m \sin \omega t$ – ток в проводнике, имеющего длину l . Величина $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$ – абсолютное значение диэлектрической проницаемости.

Определим значение импеданса $Z = E/H$ для эффективных значений компонент электромагнитного поля $E = E_m / \sqrt{2}$ и $H = H_m / \sqrt{2}$. Рассмотрим случай для точки, расположенной в плоскости (х,у), т.е. $\theta = 90^\circ$. Для реальных компонент напряженностей электромагнитного поля имеем

$$H_{eff} \equiv H = \frac{I_A \cdot l}{4\sqrt{2}\pi R^2}, \quad (4)$$

$$E_{eff} \equiv E = \frac{I_A \cdot l}{4\sqrt{2}\pi \varepsilon \omega R^3}. \quad (5)$$

Тогда

$$Z = \frac{1}{\varepsilon \omega R}. \quad (6)$$

Для $\varepsilon_r = 4$ и $R = 1\text{ м}$ $Z = 404\text{ Ом}$, а для $R = 10\text{ м}$ – $Z = 40,4\text{ Ом}$, в то время как в плоской электромагнитной волне импеданс $Z = 377\text{ Ом}$.

Оценим энергию, которую необходимо внести в угольный пласт для возбуждения молекулы метана. При сложной внутренней структуре угольного вещества реально имеется распределение молекул по энергии связи в зависимости от их расположения в поровой системе угольного вещества.

Напомним, что метан в ископаемом угле находится в трех состояниях:

- газ в транспортных каналах и порах;
- адсорбированный метан на их поверхности и поверхности закрытых пор, из которых он выходит путем твердотельной диффузии;
- метан, растворенный в органическом веществе угля [8]. Наибольшей энергии активации процесса выхода газа из угля требует метан, растворенный в угле.

Для того, чтобы инициировать выход метана из «твердого раствора», необходима энергия на уровне 45 КДж/моль или $u_0 = 0,5\text{ эв}$ на каждую молекулу. При плотности угля $\rho = 1,5 \cdot 10^3\text{ кг/м}^3$ 1 м^3 содержит атомов углерода $N_c = \rho/m_c = 0,75 \cdot 10^{29}$. Поскольку в межплоскостном пространстве угольной структуры может располагаться $0,01 \div 0,1$ доля молекул метана, то для оценки наибольшей энергии, необходимой для активации выхода метана примем количество таких молекул $N \approx 0,1 \cdot N_c = 0,75 \cdot 10^{28}$. Полная энергия, необходимая для активации молекул метана получится из равенства $W = 0,75 \cdot 10^{28} u_0 = 0,6 \cdot 10^9\text{ Дж/м}^3$. Оценим необходимую для этого величину напряженности электрического поля. Будем исходить из того, что все джоулевые потери в диэлектрической среде определяются выражением

$$W_{II} = \varepsilon_0 \varepsilon_r E^2 \omega \cdot \text{tg} \delta, \text{ Вт/м}^3 \quad (7)$$

В широком интервале в ряду метаморфизма угли имеют электропроводность $\gamma \approx 10^{-7}(\text{Ом}\cdot\text{м})^{-1}$. Поэтому для диэлектрических потерь справедливо

$$\text{tg } \delta = \frac{\gamma}{\omega \varepsilon_r \varepsilon_0}, \quad (8)$$

$$W_{\text{П}} \approx \gamma E^2. \quad (9)$$

Тогда из равенства:

$$W = W_{\text{П}} \cdot t, \quad (10)$$

где t – время воздействия на пласт, следует, что для напряженности $E = 100 \text{ В/м}$ потребуется время $t = 6 \cdot 10^4 \text{ с} = 16,7 \text{ часа}$.

Оценим возможности резонансного метода воздействия, позволяющего раскачать молекулу метана, внедренную в структуру угля.. В присутствии электрического поля происходит поляризация молекулы метана, т. е. возникает дипольный электрический момент $p = \alpha E$, где поляризуемость $\alpha = 2,6 \cdot 10^{-30} \text{ м}^3$. Относительная диэлектрическая проницаемость метана при нормальных условиях равна $\varepsilon = 1,00804$. Связь между α , ε и дипольным моментом молекулы в общем виде определяется уравнением Клаузиуса-Мосотти, которая для неполярной молекулы принимает вид:

$$\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} = \frac{4}{3} \pi n \alpha_{\text{Э}}, \quad (11)$$

где n – число молекул в единице объема, ε - диэлектрическая проницаемость, $\alpha_{\text{Э}}$ – электронная поляризуемость.

Метан, внедренный в угольную структуру в результате абсорбции поляризуются эффективным электрическим полем с напряженностью E_0 , которое можно определить из выражения для энергии взаимодействия молекулы, имеющей поляризуемость α :

$$\vec{W}_p = -\vec{p}\vec{E}_0, \quad (12)$$

где $p = \alpha \varepsilon_0 E_0$ - дипольный момент, ε_0 – диэлектрическая постоянная. Полагая $W_p = 0,5 \text{ эв} = 0,8 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$, получаем $E_0 = 5,9 \cdot 10^{10} \text{ В/м}$. При этом дипольный момент молекулы $p = 1,36 \cdot 10^{-32}$. При рассмотрении работы A , совершаемой при переносе электрона между ламелями в

Физика угля и горных пород

угольном веществе, средняя напряженность электрического поля между слоями определится из равенства

$$E = -\frac{\Delta U}{\Delta L} = 2,06 \cdot 10^8, \quad (13)$$

где для расстояния между ламелями принято $\Delta L = 4 \cdot 10^{-10}$ м, и $\Delta U = -A$. В этом случае дипольный момент молекулы метана составит $p = 4,74 \cdot 10^{-33}$ (СИ). Как это видно, что на основе энергетического подхода необходимо создание высоких напряженностей электромагнитного поля в среде, чтобы обеспечить раскачку молекул метан в сорбированном состоянии.

При вычислении необходимых параметров генератора ЭМИ будем исходить из того, что для создания деформаций угольного пласта, приводящих к активации выхода метана, необходима величина импульса давления 0,01 МПа. В классическом рассмотрении [7] излучение диполя создает в диэлектрике механические колебания с силой (в единице объема):

$$f = \frac{\epsilon_0 (\epsilon_r - 1)}{2} \text{grad} E^2. \quad (14)$$

Тогда для эффективной напряженности электрического поля E_{eff} (4), учитывая, что давление определяется из выражения:

$$p = \frac{\partial f}{\partial R} = \frac{21(I_A l)^2}{64\pi^2} \cdot \frac{(\epsilon_r - 1)}{\epsilon_0 \epsilon_r^2 \omega^2} R^{-8}, \quad (15)$$

получим, что произведение $I_A l$, являющееся характеристикой мощности генератора излучения, выразится через изменение давления в точке в следующем виде:

$$(I_A l)^2 = 64\pi^2 \cdot \epsilon_0 \epsilon_r^2 \omega^2 \cdot p R^8 / 21 \cdot (\epsilon_r - 1). \quad (16)$$

Вычисления для $\epsilon_r = 5$, $R = 10$ м и $\omega = 7 \cdot 10^7$ Гц дают величину $I_A l = 2,8 \cdot 10^9$. Для обеспечения того же напряжения на расстоянии $R = 1$ м достаточно, чтобы $I_A l = 2,8 \cdot 10^5$. Это означает, что при токе $I_A = 100$ А величина $l = 2,8$ км, что совершенно невозможно обеспечить конструкцией источника излучения. Полученное при этом значение $E_{\text{eff}} = 7,3 \cdot 10^6$ В/м совершенно недостижимо технически.

Определим необходимые величины деформации и, тем самым, напряжения, необходимые для активации выхода метана из межслоевых промежутков при электрострикционном эффекте. В этом случае для однородной и изотропной среды относительное изменение объема определяется выражением

$$\frac{\Delta V}{V} = A \cdot E^2, \quad (17)$$

где $A = (\beta/2\pi)\rho\left(\frac{\partial\varepsilon}{\partial\rho}\right)$, β – сжимаемость, ρ – плотность, ε – диэлектрическая проницаемость. Для органических жидкостей коэффициент $A = 10^{-12}$ в системе CGSE. Чтобы вычислить коэффициент A для углей, воспользуемся формулой (11), которая для углей различной степени метаморфизма может быть записана как:

$$\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} \cdot \frac{1}{d} = 0,3, \quad (18)$$

где d – удельный вес. Для производной по плотности получаем

$$\frac{\partial\varepsilon}{\partial\rho} = \frac{0,3(\varepsilon + 2)}{1 - 0,3 \cdot d} \cdot g. \quad (19)$$

Принимая $d = 1,4$ г/см³, $\varepsilon = 4$, $g = 981$ см/с², получим для $\partial\varepsilon/\partial\rho = 3 \cdot 10^3$.

Сжимаемость β вычислим согласно определению

$$\beta = \frac{1}{\rho} \frac{\partial\rho}{\partial p} = \frac{1}{\rho \cdot c_p},$$

где в знаменателе стоит скорость упругих продольных волн, c_p . Для угля скорость звука выражается через модуль упругости:

$$c_p = \sqrt{\frac{E}{\rho}}. \quad (20)$$

Принимая значения для $E = 5 \cdot 10^8$ Па и $\rho = 1,373 \cdot 10^3$ кг/м³, получим для $c_p = 603,5$ м/с. Тогда сжимаемость $\beta = 2 \cdot 10^{-10}$ (CGS), а коэффициент A в равенстве (6) будет равен $1,3 \cdot 10^{-7}$ (CGSE). Если взять

Физика угля и горных пород

для относительного изменения объема значение $\Delta V/V = 10^{-6}$, то получаем напряженность электрического поля $E = 2,76 \text{ В/см} \approx 300 \text{ В/м}$.

Оценим параметры генератора из предположения, что на расстоянии от источника излучения $R_1 = 1 \text{ м}$ необходимо обеспечить напряженность электрического поля $E = 300 \text{ В/м}$. Тогда в атмосфере этой величине соответствует $E_0 = 300 \cdot \varepsilon_r = 1,2 \text{ кВ/м}$, полученное из соображений непрерывности тангенциальной компоненты поля на границе раздела воздух – угольный пласт. Из выражения для E_{eff} (1) получим значение $I_A \cdot l = 13,2$ ($R = 1 \text{ м}$), что при токе $I_A = 50 \text{ А}$ приводит к длине диполя $l = 0,26 \text{ м}$. При таких параметрах возможно обеспечить величину эффективного поля на расстоянии $R = 10 \text{ м}$ от источника излучения, равную $E_{\text{eff}} = 300/10^3 = 0,3 \text{ В/м}$, которое создаст деформации угля за счет электрострикционного эффекта на величину $\Delta V/V = 10^{-8}$.

Какой на самом деле должна быть деформация среды при электромагнитных колебаниях? Связь деформации и напряжений в литосфере подчиняется универсальной зависимости, которая является линейной в логарифмических координатах [9] и охватывает большой интервал релаксационных процессов от слабых землетрясений до горных ударов, включающих напряжения от 10 МПа до 100 Па. Из зависимости релаксационного сброса напряжений от дифференциальной подвижки u [9] нами была получена зависимость

$$\ell g(\Delta\sigma) = 6,2 + 0,75 \ell g(u), \quad (21)$$

что позволило вычислить сбросы напряжений, происходящие при горных ударах, - $\Delta\sigma = 280 \text{ Па}$ при смещениях $u = 10^{-5} \text{ см}$; и при микросейсмических колебаниях $\Delta\sigma = 0,320 \text{ Па}$ ($u = 10^{-9} \text{ см}$). Из (21) следует, что смещения, равные 10^{-4} см приводят к сбросу напряжений $\Delta\sigma = 1,6 \cdot 10^3 \text{ Па}$.

Поскольку для однородной изотропной среды справедлив закон Гука для относительного изменения объема в виде

$$\varepsilon = \frac{\Delta V}{V} = \frac{12}{E(1-\nu)} \cdot P, \quad (22)$$

где E – модуль упругости, ν – коэффициент Пуассона, $P = \frac{1}{3}\sigma$, то при деформировании вдоль одного направления имеем равенство:

$$\varepsilon_x = \frac{2}{E(1-\nu)}\sigma, \quad (23)$$

которое удовлетворяет экспериментальным данным по одноосному деформированию угля [10]. Последнее равенство дает возможность вычислить относительные деформации для процессов, различающихся по энергии. Так, для горных ударов, исходя из [9], получаем $\varepsilon_x = 1,7 \cdot 10^{-6}$, а для $\Delta\sigma = 1,6 \cdot 10^3$ Па – $\varepsilon_x = 10^{-5}$. Здесь при вычислении были взяты величины $E = 5 \cdot 10^8$ и $\nu = 0.35$, характерные для углей.

Понятно, что при электромагнитном воздействии на угольный пласт деформации и напряжения не могут превышать величин, характерных для горных ударов, и должны приближаться к величинам, характерным для микросейсмов. Поэтому в дальнейшем будем исходить из следующих значений: максимальные напряжения равны 0,5 КПа, а наиболее целесообразно использовать для дальнейших вычислений значение $\Delta\sigma = 100$ Па. Для последнего значения $\varepsilon_x = 0,5 \cdot 10^{-6}$ и $\Delta V/V = 10^{-6}$. Поэтому создаваемые генератором относительные деформации среды при электрострикционном механизме должны быть заключены в интервале $10^{-8} < \Delta V/V < 10^{-6}$.

Методика проведения эксперимента

Для проведения эксперимента по исследованию электромагнитного воздействия (ЭМВ) в лабораторных условиях была создана экспериментальная установка, в состав которой входят следующие элементы:

- генератор сигналов высокочастотный; конденсатор, между обкладками которого размещается образец (рис.1);
- два канала выхода метана в опытном и контрольном образцах, в которых обеспечивается регистрация (рис.2).

В горном массиве система пор и трещин заполнена водно-газовой смесью. Представляет интерес изучить влияние электромагнитных колебаний непосредственно на воду, которая всегда входит в состав горных пород. Поэтому на первом этапе эксперимента весовым методом исследовалось изменение массы образцов угля без предварительного насыщения метаном в камере высокого давления. Для этого уголь размельчался до фракции размером 0.2-0.4 мм и помещался в контейнеры. Контрольный образец размещался на расстоянии около 0.5 м от опытного образца, который находился между



Рис. 1. Генератор и конденсатор лабораторной установки. Расстояние между обкладками конденсатора 2,5 см.

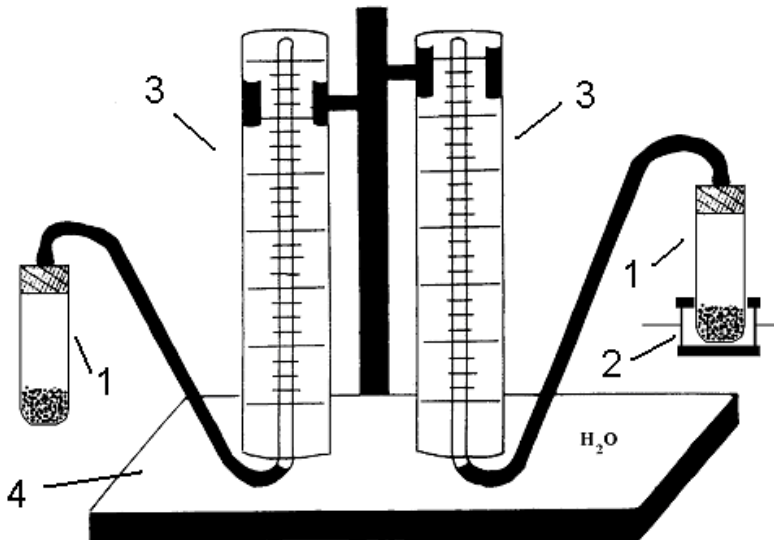


Рис. 2. Схема лабораторной установки для регистрации выхода метана: 1 – камеры для образцов; 2 – конденсатор; 3 – емкости для регистрации объема метана; 4 – ванна для воды.

обкладками конденсатора. Все эксперименты проводились в помещении, где поддерживалась постоянная температура. Режим воздействия был выбран исходя из теоретического рассмотрения предыдущего раздела и имеющегося в нашем распоряжении высокочастотного генератора. Измерения проводились при двух фиксированных частотах воздействия генератора 10 и 30 МГц и двух выходных напряжениях 0.5 и 1.0 В. Продолжительность воздействия на опытный образец – 3 часа

Масса контейнеров и фракций угля измерялась в трех повторностях до начала и по окончании эксперимента с помощью аналитических весов, имеющих цену деления 5 мкг. Изменение массы образцов мы связываем с изменением их влажности. Воздействие высокочастотных колебаний ускоряло процесс влагоотдачи, если влажность воздуха в помещении снижалась, или тормозило увеличение массы образцов, если влажность увеличивалась в помещении. Основные результаты этих экспериментов представлены в таблице 1 для частоты $f = 30$ МГц, оказавшейся наиболее эффективной.

Таблица 1.

**Результаты эксперимента по воздействию ЭМП
на фракцию угля 0.2-0.4 мм**

Дата	Измен. массы в контроле, $\times 10^{-5}$ г	Измен. массы в опытном образце, $\times 10^{-5}$ г	Относит. изменение. Контроль $\times 10^{-4}$	Относит. изменение. Опыт $\times 10^{-4}$	Опыт / контроль (контроль / опыт)	Режим воздействия. 30 МГц
26.09	106±11	81±8	2.3	1.7	0.74 (1.35)	1V, без модуляции.
28.09	80±7	115±5	1.6	2.2	1.38 (0.73)	0.5 V с модуляцией
2.10	-179±6	-162±7	4.1	3.6	0.88 (1.14)	1 V, с модуляцией
3.10	-190±8	-172±8	3.8	3.4	0.89 (1.12)	0.5 V, без модуляции

Примечание: Знак «минус» во втором и третьем столбцах означает увеличение массы образца после трех часов воздействия.

Наиболее эффективным оказался режим воздействия, при котором выходное напряжение составляло 1В и модуляция гармониче-

ского сигнала не проводилась. Из таблицы 1 следует, что отличие в относительном изменении массы $\Delta m/m$ контрольных и опытных образцов составило от 12 до 38 %.

Таким образом, первый этап эксперимента показал возможность изменения процесса гидратации (дегидратации) в результате воздействия колебаний электромагнитного поля в образцах угля, помещенных в межэлектродное пространство, даже при малой мощности токов, протекающих через образцы. Механизм воздействия имеет нетепловую природу, поскольку джоулевые потери здесь чрезвычайно малы. Действительно, эффективный ток, который протекает через образец при выходном напряжении генератора 1.0В не превышает 0.25 мА, что обеспечивает релаксационные потери в угольном веществе на частоте 30 МГц равные 4.2 Ватт/м³.

Второй этап эксперимента проводился с целью изучения эффекта воздействия электромагнитных колебаний на процесс десорбции метана из углей различной стадии метаморфизма. Режим воздействия был выбран в соответствии с результатами первого этапа эксперимента: частота $f = 30$ МГц и выходное напряжение генератора – 1В. При этом в межэлектродном пространстве обеспечивалось амплитудное значение электрического поля $E_A = 40$ В/м.

В качестве образцов были взяты три марки углей: 1) антрацит из шахты «2-2бис» управления «Шахтерскантрацит», пласт «Фоминской», h_8 ; 2) уголь марки Ж из шахты «Торецкая» ГП «Дзержинскуголь», пласт k_8 , запад, горизонт 810 м. Уголь измельчался до фракции 2-4 мм, насыщался метаном при давлении в камере 90 атмосфер. После семи (Ж) и десяти (А) суток уголь разделялся на три части. Две из них, равного объема, помещались в пробирки, которые подключались к каналам регистрации десорбции метана (см. рис.2). Третья часть помещалась в открытый контейнер и служила еще одним контрольным образцом, масса которого измерялась на аналитических весах с периодичностью один час в течение всего времени регистрации десорбции метана. Это позволило отделить от общей потерянной массы образцами ту ее часть, которая относится к метану и не включает массу воды.

В начальный момент регистрации выхода метана уровень воды в измерительных цилиндрах находится в их верхних частях. При десорбции метана давление в цилиндрах увеличивается, что приводит к понижению уровня жидкости. В процессе десорбции регистрировались как изменение объема метана в цилиндрах, так и уровень воды относительно уровня воды в плоской ванночке (4 на рис.2). Фик-

сировалось также атмосферное давление, что необходимо для вычисления количества выделившегося метана из образцов.

Поскольку в процессе десорбции объем и давление метана в измерительном цилиндре меняется, полное число молекул в каждый момент времени необходимо определять из уравнения Менделеева-Клапейрона:

$$N(t) = N_0 \cdot P(t) \cdot V(t) / RT, \quad (24)$$

где используются общепринятые обозначения, а N_0 – число Авогадро. Давление P и его относительное изменение вычислялись согласно равенствам:

$$P(t) = P_A - 9.81 \cdot H, \quad (25)$$

где P_A – атмосферное давление (Па), H – высота воды в цилиндре, которая вычислялась для каждого цилиндра согласно линейной зависимости $H = a_0 + a_1 V$, полученной методом наименьших квадратов, где V – показания объема метана в цилиндре. Коэффициенты имеют такие значения, чтобы обеспечить размерность объема в мл, высоты H – в мм.

Дальнейшая обработка измерений проводилась с целью определения различия в скорости и объеме десорбированного метана из контрольного образца и образца, на который в течение всего времени воздействовало высокочастотное электромагнитное излучение. С этой целью были построены зависимости от времени относительного изменения давления $\Delta P(t) = (P_k - P)/P_k$ и количества молекул метана $N(t)$. Изменение скорости десорбции со временем можно определить, если представить эти зависимости в логарифмических координатах:

$$\lg(Y) = b_0 + b_1 \lg(t). \quad (26)$$

Тогда коэффициент b_1 будет определять скорость десорбции на различных участках кривой десорбции. Экспериментальные зависимости можно представить в виде

$$\Delta P(t) = \exp(-\alpha_1 \cdot t) \quad (27)$$

или

$$N(t) = N_\infty (1 - \exp(-\alpha_2 t)), \quad (28)$$

где α_i , $i = 1, 2$ коэффициенты десорбции. В (28) величина N_∞ – предельное содержание газа в цилиндре при $t \rightarrow \infty$. Ясно, что на раз-

личных стадиях процесса выхода метана из образцов угля, скорость и коэффициенты десорбции будут иметь различные значения. Нас интересует конечный эффект воздействия электромагнитных колебаний. Поэтому имеет смысл сравнивать эти коэффициенты на последней стадии десорбции, определяя их методом наименьших квадратов.

При воздействии на уголь марки А выход метана прекратился в течение 6,5 ч, в то время как в контрольном образце – через 43,6 ч. Коэффициенты десорбции α_1 на конечной стадии выхода составили в соответствии с (27) $1,1 \cdot 10^{-10} \text{ м/с}^2$ и $3,9 \cdot 10^{-11} \text{ м/с}^2$ соответственно для опытного и контрольного образца. Если пользоваться термином «скорость десорбции», то из выражения (26) получаем на конечной стадии коэффициенты $b_1 = 0,36$ и $b_1 = 0,18$.

Аппроксимация изменения количества метана в измерительном цилиндре в виде

$$N(t) = N_0 \exp(\alpha_3 t) \quad (29)$$

дает для коэффициентов α_3 значения $1,85 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ и $1,36 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ для опытного и контрольного образца.

Попытка аппроксимировать выход метана единой зависимостью в виде (28) методом наименьших квадратов дала удовлетворительное описание процесса при значении коэффициента $\alpha_2 = 7,8 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ для опытного образца. Это означает, что для удаления метана из образца на 99,5 % потребовалось бы 26 часов. При тех же условиях аппроксимация зависимости $N(t)$ с коэффициентом $\alpha_2 = 1,85 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ для контрольного образца привела к значению времени выхода метана 41,6 час. Общая относительная масса десорбированного метана из образца в процессе эксперимента составила 0,69%, что при пересчете на одну тонну дает метаноемкость $10,6 \text{ м}^3/\text{т}$.

Заключение

В данной статье рассматривается проблема активирования выхода метана из угольного вещества с помощью воздействия высокочастотным электромагнитным излучением. Авторы предлагают применять такой диапазон частот, при котором на расстояниях до 10 м в угольный пласт для генератора справедливо приближение «ближней зоны», когда затухание энергии электромагнитного излучения достаточно мало в пределах зоны скважин.

Лабораторные эксперименты показали, что даже генератор малой мощности обеспечивает ускорение десорбции метана, когда согласно предлагаемому механизму деформация угля происходит на уровне $\varepsilon = 10^{-7}$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mingju Liu, Xueqiu He. Electromagnetic response of outburst-prone coal // *International Journal of Coal Geology* . - 2001. – V. 45. - P.155-162.
2. Бобин В.А. Оценка параметров волнового воздействия на микро- и макроструктурные образования в газонасыщенном угольном веществе с целью интенсификации добычи угольного метана // *Геотехническая механика*. –2000. -№ 17. – С.56-60
3. Минеев С.П., Прусова А.А., Корнилов М.Г. Оценка энергии волнового воздействия для активации молекул метана в микропористом пространстве угольного вещества // *Геотехническая механика*. – 2005. -№ 54. – С.31-37.
4. Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Элементы теории и численного расчета электромагнитных процессов в проводящих средах. Киев, 1999. – 361с.
5. Иванов В.В., Егоров П.В., Колпакова Л.А., Пимонов А.Г. Динамика трещин и электромагнитное излучение нагруженных горных пород // *ФТПРПИ*. – 1988. - №5. – С.20-27.
6. Molchanov O., Kulchitsky A., Hayakawa M. Inductive seismo-electromagnetic effect in relation to seismogenic ULF emission // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. – 2001. – N 1. - -P. 61-67.
7. Татур Т.А. Основы теории электромагнитного поля. М.: Высшая школа, 1989. – 271 с.
8. Алексеев А.А., Ульянова Е.В., Василенко Т.А. Возможности ЯМР в исследовании физических процессов в ископаемых углях // *УФН*. – 2005. –Т.175. - № 11. – С.1217-1232.
9. Спивак А.А. Релаксационные процессы и механическое состояние локальных участков земной коры // *ДАН*. - 1998. – Т. 363. - №2. – С. 246-249.
10. Кириллов А.К., Слюсарев В.В. Исследование процесса уплотнения ископаемых углей при деформировании образцов в камере высокого давления // *ФТВД*. - 2006. -№ 3,- С.137-143.