

ОБ ЭФФЕКТИВНОМ ГЕНЕРИРОВАНИИ ВОЛНОВОЙ ЭНЕРГИИ В ГАЗОНАСЫЩЕННОМ УГЛЕПОРОДНОМ МАССИВЕ

Проведена оцінка енергопровідності газонасиченого вуглепородного масиву як трьохфазного середовища з врахуванням вільного та сорбованого газу при технологічній дії гармонічного типу. Показано, що ефективно генерування волнової енергії у трьохфазному вугільному масиві, на відміну від однофазного, базується на його багаточастотній обробки.

ABOUT EFFECTIVE GENERATING OF WAVE ENERGY IN A GAS-SATURATED COAL MASSIF

The energy conductivity of the gas-saturated massif was estimated as a three-phase environment taking into consideration of free and sorbed gas at technological effect of harmonized type. It is demonstrated that effective generation of wave energy in three-phase coal massif is based on its multi-frequency processing if compare with one-phase massif.

В настоящее время для интенсификации газоотдачи углепородного массива в современных технологиях комплексной отработки угольных пластов широкое распространение получил комплекс методов, основанных на использовании волновых эффектов в массиве, реализующихся различными периодическими технологическими воздействиями: вибро-, газо-, и гидропульсационными источниками. При этом последствие указанных воздействий определяется параметрами волновой энергии, передаваемой пульсирующим источником горному массиву. Первостепенное значение при этом имеет генерация механических волн в среде, кинематическим показателем которых является распространение фазы колебаний, а динамическим – перенос энергии. В трещиновато-пористом газонасыщенном углепородном массиве проявляются существенно диссипативные характеристики, сопровождающиеся значительным поглощением энергии, что приводит к демпфированию колебаний вплоть до трансформации его в аperiodическое движение, когда система возвращается в равновесное состояние не совершив колебаний. В то время, как при практическом использовании виброэффектов интерес вызывает граница распространения колебаний, за которой энергии виброволны уже недостаточно для осуществления ожидаемого технологического результата.

В связи с этим, в работе проводилась оценка энергопроводящей способности газонасыщенного углепородного массива при воздействии на не-

го технологического воздействия гармонического типа. Энергопроводность определялась по значению отношения средней за период мощности потока энергии M_r° через замкнутую поверхность, расположенную на расстоянии r от источника возбуждения радиусом r_0 к средней за период мощности потока энергии через поверхность возбуждения $M_{r_0}^\circ$ в виде [1]:

$$\mathcal{E} = \frac{M_r^\circ}{M_{r_0}^\circ} \bar{r}^2 \quad (1)$$

где $\bar{r} = r/r_0$.

Среднее за период гармонического воздействия значение потока энергии в общем виде определяется согласно закону сохранения механической энергии

$$L = \frac{d}{dt}(K + U), \quad (2)$$

где L - сумма мощностей массовых сил F_i , действующих в области V , и поверхностных сил S_i , действующих по поверхности S :

$$L = \int_V F_i \dot{u}_i dV + \int_S S_i \dot{u}_i dS; \quad (3)$$

$$K - \text{кинетическая энергия объема: } \frac{dK}{dt} = \rho \int_V \dot{u}_i \ddot{u}_i dV; \quad (4)$$

$$U - \text{внутренняя энергия объема: } \frac{dU}{dt} = \int_V \sigma_{ij} \varepsilon_{ij} dV. \quad (5)$$

Известно [1], что, если объемные и поверхностные силы в области отсутствуют, то скорость изменения энергии объема определяется соотношением

$$\frac{d}{dt}(K + \Pi) = J, \quad (6)$$

где Π - потенциальная энергия деформирования, равная

$$\Pi = \frac{1}{2}(\sigma_{11}\varepsilon_{11} + \sigma_{22}\varepsilon_{22} + \sigma_{33}\varepsilon_{33} + \sigma_{12}\varepsilon_{12} + \sigma_{12}\varepsilon_{13} + \sigma_{23}\varepsilon_{23}); \quad (7)$$

J - поток вектора Умова-Пойтинга P_i через поверхность S , ограничивающую объем V : $M_i^\circ = \sigma_{ij}u_j$. (8)

Таким образом, скорость изменения полной энергии объема определяется потоком вектора Умова-Пойтинга через поверхность, ограничивающую этот объем. Среднее значение потока энергии определяется выражением [1]:

$$M_r^\circ = \frac{1}{T} \int_0^T \sigma_{ij} u_j dt. \quad (9)$$

Для определения функций σ_{ij} и u_j необходимо решение краевой задачи теории деформированных сред. Динамический процесс перераспределения напряжений в газонасыщенном углепородном массиве наиболее реально позволяет описать модель трехкомпонентной гетерогенной среды, представленной упругим скелетом, свободным и сорбированным газом

[2,3]. С учетом взаимовлияния твердой фазы и двух связанных потоков газа, согласно основным допущениям этой модели определяющую систему уравнений для скважинного технологического воздействия можно записать в цилиндрической системе координат, описывающей осесимметричное напряженное состояние, следующим образом:

Уравнения теории упругости, описывающие процесс деформирования трещиновато-пористой среды с учетом влияния двухфазного газа:

$$\begin{aligned}
 & (\lambda + 2\mu) \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + (2\lambda + 3\mu) \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial u}{\partial r} - (\lambda + \mu) \frac{u}{r^2} + \frac{\partial u}{\partial r} \cdot \frac{\partial(\lambda + \mu)}{\partial r} = \\
 & = m_1 \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + K_N \frac{\partial A}{\partial r} + \beta \left(\frac{P}{Z' RT} - \frac{a}{k_0(a_0^0 - a)} \right) \cdot \left(\frac{k}{\mu_1 m} \cdot \frac{\partial P}{\partial r} - \frac{D}{a} \cdot \frac{\partial a}{\partial r} \right) \quad (10)
 \end{aligned}$$

уравнение фильтрации свободного газа по системе макропор и трещин.

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial(m \cdot P)}{\partial t} - \frac{k}{\mu_1} \left[P \frac{\partial^2 P}{\partial r^2} + \left(\frac{\partial P}{\partial r} \right)^2 + \frac{P}{r} \cdot \frac{\partial P}{\partial r} \right] - \frac{P}{\mu_1} \cdot \frac{\partial P}{\partial r} \cdot \frac{\partial k}{\partial r} + \\
 & + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(rP \frac{\partial u}{\partial t} \right) + \beta \left(P - \frac{aZ' RT}{k_0(a_0^0 - a)} \right) = 0; \quad (11)
 \end{aligned}$$

уравнение диффузии сорбированного газа по системе микропор.

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial a}{\partial t} - D \left(\frac{\partial^2 a}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial a}{\partial r} \right) - \frac{\partial a}{\partial r} \cdot \frac{\partial D}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(ra \frac{\partial u}{\partial t} \right) + \\
 & + \frac{\beta}{Z' RT} \left(P - \frac{aZ' RT}{k_0(a_0^0 - a)} \right) = 0; \quad (12)
 \end{aligned}$$

Здесь λ, μ - коэффициенты Ляме, m - пористость скелета, равная отношению объема макропор и трещин; k - коэффициент газопроницаемости; μ_1 - вязкость газа; P - давление газа в макропорах и трещинах; D - коэффициент диффузии; β - коэффициент газоперетока; k_0, a_0^0 - постоянные изотермы сорбции; Z' - коэффициент сжимаемости газа; R - газовая постоянная; T - абсолютная температура; c_3 и a - соответственно, концентрация свободного газа и количество сорбированного газа в микропорах в единице объема среды; V_j^1 - компоненты вектора средней скорости движения скелета; A - изменение количества газа в единице объема среды; K_N - коэффициент объемного расширения среды; m_1 - объемное содержание микропор; ρ - плотность скелета; u_i - компоненты вектора перемещения среды.

В этой модели учтено, что состояние свободного газа описывается уравнением $P = \rho ZRT$ и в нарушенном угольном массиве он движется по трещинам и макропорам в условиях ламинарной фильтрации, описываемой законом Дарси. Диффузионный поток сорбированного газа по системе микропор описывается законом Фика, а его состояние - законом Ленгмюра. Учитывается также газопереток g из микропор в макропоры и трещины,

возникающий из-за разницы давлений и концентраций газа: $g = \beta P / (ZRT)$.

Изменение пористости оценивается по экспоненциальному закону в зависимости от гидростатического давления, а зависимость набухаемости угля - от изменения количества газа, а также учитываются силы обмена импульсом между фазами.

Считаем, что до проведения скважины газонасыщенный трещиновато-пористый углепородный массив находится в состоянии статического равновесия. Его макропоры и трещины заполнены свободным газом под давлением $P=P_0$, а в микропорах содержится сорбированный газ с плотностью в единице объема среды $a=a_0$. При этом давление газа в микропорах P_1 равно давлению газа в макропорах и трещинах. Тогда при передаче массиву волновой энергии посредством возбуждающего через скважину радиального перемещения, описываемого гармоническим законом $u = u^0 \sin \omega t$ (где u^0 - амплитуда перемещения, ω - частота колебаний), граничные и начальные условия для рассматриваемой задачи можно записать в виде:

$$(\lambda + 2\mu) \frac{du}{dr} \Big|_{r=r_0} + \lambda \frac{u}{r_0} - K_N A(r_0, t) = u^0 \sin \omega t; \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \tau_{r\varphi} = \tau_{rx} = 0; \quad P(r_0, t) = P_n(t); \quad a(r_0, t) = a_n(t); \quad (0 < t < \infty); \\ P(r, 0) = P_0; \quad a(r, 0) = a_0; \quad u(r, 0) = 0; \quad (r_0 < r), \end{aligned} \quad (14)$$

где P_n - давление газа на поверхности скважины; a_n - адсорбция на поверхности скважины; P_0 - давление газа в макропорах и трещинах ненарушенного массива; a_0 - количество сорбированного газа в микропорах единицы объема нетронутого массива.

Таким образом, представленная система уравнений (10) - (12) в сочетании с соотношениями (1), (9) позволяет выполнить количественную оценку энергопроводности газонасыщенного углепородного массива при скважинном технологическом воздействии гармонического типа.

Основной интерес при передаче горному массиву волновой энергии представляет установление частоты возбуждения ω_* , доставляющей массиву максимальную величину мощности потока энергии M_{\max}^* . При этом для выявления особенностей механизма энергопередачи в углепородной среде, насыщенной двухфазным газом, необходим сравнительный анализ с упрощенной модельной задачей – однофазной упругой средой.

Используя результаты работ [1,4], основные соотношения для оценки энергопроводности упругой среды при воздействии сферического источника гармонических волн можно записать в виде:

$$M_y^* = -\frac{i\omega}{4} (\bar{\sigma}_{rr} \bar{u}_r - \bar{\sigma}_{r\theta} \bar{u}_\theta), \quad (15)$$

где M_y^* - комплексно – сопряженные компоненты радиальных напряжений и перемещений, определяемые решением краевой задачи теории упругости в виде:

$$\begin{aligned}\hat{u}_r &= \frac{\hat{A}_1(1 + iKr)}{r^2} e^{-iKr} e^{iKr}; \\ \hat{\sigma}_{rr} &= \hat{A}_1 \left[2\mu \left(\frac{2}{r^3} - \frac{K^2}{r} + \frac{2K}{r^2} \right) - \lambda K^2 r \right] e^{-iKr} e^{i\omega r}; \\ \hat{A}_1 &= \frac{P_o e^{iKa} r_o^3}{4\mu(1 + iKa) - (\lambda + 2\mu)r_o^2 K^2},\end{aligned}\quad (16)$$

где $K = \frac{\omega}{C_1}$, $C_1^2 = \frac{\lambda + 2\mu}{\rho}$ - скорость продольных волн.

После тождественных преобразований выражения (15) с учетом (16) и разделения действительной и мнимой части получим:

$$M_y^2 = \frac{P_o r_o^6 (\lambda + 2\mu) \omega^4}{2r^2 c_1^3 [16\mu^2 - 8\mu\lambda r_o^2 K^2 + r_o^4 K^4 (\lambda + 2\mu)^2]}.\quad (17)$$

Из соотношения (17) видно, что средний за период поток энергии с увеличением расстояния от источника возбуждения убывает как r^{-2} , и при заданной частоте гармонического возбуждения величина этого потока энергии, проходящего через сферическую поверхность, удаленную на расстояние r от источника, в упругом пространстве остается неизменной. Выясним, существует ли частота возбуждения, при которой функция M_y^2 принимает максимальное значение. Введя замену переменной $z = \omega^2$ из уравнения $\frac{dM_y^2(z)}{dz} = 0$ следует, что $z_* = \frac{4\mu(\lambda + 2\mu)}{\lambda r_o^2 \rho}$.

$$\text{Поскольку } \frac{d^2 M_y^2}{dz^2} = -32\mu^2 < 0, \text{ то следовательно } \omega_* = \frac{1}{r_o} \sqrt{\frac{4\mu(\lambda + 2\mu)}{\lambda \rho}}\quad (19)$$

будет доставлять функции M_y^2 максимум, т.е. для упругого сплошного массива существует единственная частота, выраженная соотношением (19), которая является оптимальной с точки зрения передачи упругому массиву волновой энергии. Она определяется радиусом источника возбуждения и физико-механическими характеристиками углеродной среды λ, μ, ρ .

Расчет энергопроводности в газонасыщенном углеродном массиве, сформулированной модельной задачи, представленной системой нелинейных нестационарных уравнений второго порядка в частных производных проводился численным методом [5] с использованием последовательностей Ньютона. Численные расчеты параметра \mathcal{E} проводились для различных значений частоты вынужденных колебаний ω на различных расстояниях от источника гармонических волн. При этом принималось, что на поверхности скважины действует периодическая нагрузка $P = 9,8 \cdot 10^4 (1 + 0,2 \sin \omega t) \text{ Па}$, а распространение энергии, генерируемой источником, рассматривалось для угольного пласта со следующими параметрами: $E = 540 \text{ МПа}$; $\nu = 0,35$; $m = 0,02$; $\mu_1 = 1,2 \cdot 10^{-4} \text{ Па}$; $k = 10^{-14} \text{ м}^2$; $Z = 0,18$;

$$D = 10^{-5} \text{ м}^2 / \text{с}; \quad \beta = 3,5 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}; \quad K = 0,24 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3 / \text{кг}; \quad a_0^0 = 24 \text{ кг}^2 / \text{м}^3; \quad k_0 = 0,35 \text{ м}^3 / \text{кг};$$

$$R = 529 \text{ Дж} / (\text{кг} \cdot \text{К}); \quad T = 298^\circ \text{ К}.$$

Анализ численных расчетов показал, что в отличие от упругой однофазной модели угольного массива, где $\mathcal{E}=1$ и потерю энергии учесть не предоставляется возможным (кроме как за счет геометрического фактора), в трехфазной модели энергопроводность с удалением от источника возбуждения изменяется, как видно из рисунка 1, весьма существенно и ее рас-

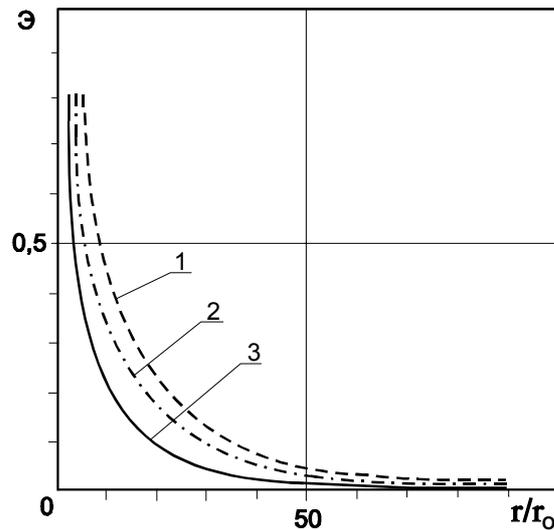
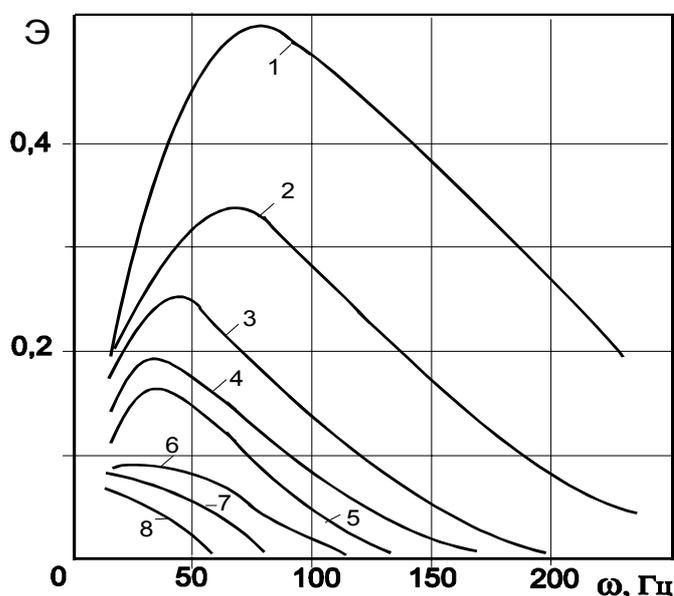


Рис. 1. Распределение энергопроводности в угольном массиве с удалением от источника волнового возбуждения при частоте: 1 – 50 Гц; 2 – 200 Гц; 3 – 400 Гц

пространение имеет экспоненциальный характер. Резкое падение энергопроводности происходит в прискважинной области (для расчетных данных до $5r_0$), с удалением от скважины затухание \mathcal{E} носит более плавный характер. Энергопроводящая способность углеродной среды существенно зависит от частоты вынужденных колебаний. Так, потери энергии, например до 90%, достигаются, в зависимости от частоты вынужденных колебаний, на существенно различных расстояниях от источника возбуждения (от $20r_0$ до $40r_0$). При этом потери энергии минимальны при некоторой критической частоте ω^* . Причем, как показывают расчеты, критическая частота ω^* , в отличие от упругой однофазной модели, не является одинаковой величиной для данной среды, а изменяется в зависимости от расстояния от центра волнового воздействия, т.е. от степени напряженности массива. Об этом свидетельствует то, что максимумы на графических зависимостях рисунка 2 располагаются не на одной вертикальной прямой, что соответствует одной частоте, а расположены со сдвигом (в данном случае – влево). При этом четко можно выделить сдвиговый частотный диапазон. Для представленных графических зависимостей он находится в пределах 25-85 Гц. С удалением от источника возбуждения значение критической частоты ω^* снижается. Кроме того, для одной и той же присква-

жиной области на частотах выше критической $\omega > \omega^*$, с увеличением частоты происходят большие потери энергии, а на частотах меньше критической $\omega < \omega^*$ наблюдается обратная зависимость. Следовательно, такой определяющий параметр волнового воздействия, как его частота, является весьма неоднозначным параметром для напряженного газонасыщенного углеродного массива. Установление его эффективного значения связано с оценкой передаваемой массиву волновой энергии. Эффективное же генерирование этой энергии в угольном массиве, как показали данные исследования, базируется на его многочастотной обработке. Рациональные частотные диапазоны волнового воздействия определяются критериальной оценкой интенсивности газоотдачи углеродного массива и горногеологическими условиями залегания газугольного месторождения.



*Рис. 2. Зависимость энергопроводности от частоты на различном удалении от источника воздействия:
1 - $10r_0$; 2 - $20r_0$; 3 - $30r_0$; 8 - $80r_0$*

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жарий О.Ю., Улитко А.Ф. Введение в механику нестационарных колебаний и волн.- Киев: Вища школа, 1989.- 184с.
2. Подильчук Ю.Н. К теории деформирования газонасыщенных пористых сред// Прикладная механика, 1976.-Т.12, №12.- С.42-47.
3. Минеев С.П., Лях В.В., Прусова А.А. Математическое описание деформирования углеродного массива как трехфазной среды при гармонич-

- ческом воздействии// Геотехническая механика. - Днепропетровск: ИГТМ НАН Украины.- 1999, - Вып.13. – С. 47-54.
4. Новицкий В. Теория упругости.- М.: Мир, 1975.- 872с.
 5. Дулан Э.,Миллер Дж.,Шилжерс У. Равномерночисленные методы решения задачи с пограничным слоем.-М.:Мир.-1983.-200с.

УДК 622.831.322

С.В. Кулинич,
ГХК «Артемуголь», Украина

**СНИЖЕНИЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ
ВЫБРОСООПАСНОГО ПОРОДНОГО МАССИВА
НАПРАВЛЕННЫМ ГИДРАВЛИЧЕСКИМ
ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЕМ**

Викладені результати експериментальних досліджень по використанню спрямованого гідравлічного тріщиноутворення з метою зниження газодинамічної активності викидонебезпечного масиву гірських порід

**THE REDUCTION OF THE GAS-DYNAMIC ACTIVITY OF THE
ROCK MASSIF WITH THE RISK OF EXPLOSION DIRECTED
BY HYDRRAULIC CRACKING**

The results of the experiments on applying a directed hydraulic cracking are presented with the aim to reduce the gas-dynamic activity of the rock massif with the risk of emission.

В практике ведения подземных горных работ в глубоких шахтах широко применяются скважинные методы силового воздействия на газоносный углепородный массив для осуществления региональных и локальных методов борьбы с газодинамическими явлениями.

Одним из эффективных методов изменения геомеханического состояния углепородного массива является гидравлический разрыв, осуществляемый путем гидростатического нагружения нагнетательных скважин заданных геометрических размеров и пространственной ориентации. На базе выполненных ИГТМ НАН Украины совместно с ИТР ГХК «Артемуголь» теоретических, лабораторных и шахтных исследований разработан метод направленного гидравлического трещинообразования в массиве горных пород.

Идея использования указанного метода для изменения геомеханического состояния горного (в том числе выбросоопасного) массива в призабойной части выработки заключается в создании на определенном удалении от свободной поверхности системы трещин заданной пространствен-