

УДК 539.3

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ «УГОЛЬ — ФЛЮИД» В ВЫБРОСООПАСНОЙ ЗОНЕ УГОЛЬНОГО ПЛАСТА

Ю. А. Устинов, В. Н. Труфанов

На основе обобщения результатов геолого-структурных, физических и термобарогеохимических исследований предлагается математическая модель выбросоопасных зон угольных пластов.

Ключевые слова: угольный пласт, выбросоопасная зона, активный композит.

Введение

Внезапные выбросы принадлежат к опасным газодинамическим явлениям, возникающим при вскрытии угольных пластов в сложных горно-геологических условиях на глубинах более 170–200 м. Они всегда приурочены к участкам тектонической нарушенности высокогазоносных угольных пластов, сложенных углями средних стадий метаморфизма [1]. Детальные исследования этого явления были начаты еще в начале 50-х годов прошлого века под руководством академика С. А. Христиановича большим коллективом ученых ИГД им. А. А. Скочинского, ВНИМИ, ИПКОН РАН и других институтов, однако кардинального решения данной проблемы не было найдено [3, 4].

В результате комплексных геолого-структурных, минералого-петрографических, физических и термобарогеохимических исследований [2], было установлено, что очаги внезапных выбросов локализуются в особых флюидоактивных зонах, образующихся в участках тектонической нарушенности угольных пластов под воздействием потоков глубинных флюидов при температурах до 300°С и давлениях порядка 50–60 МПа [5, 6]. В этих участках наблюдается глубокая трансформация структуры и технологических свойств угольного вещества, проявляющаяся в образовании «губчатого» угля, насыщенного газовой-жидкими и газовыми включениями под высоким давлением. В итоге уголь становится выбросоопасным и разрушается при снятии внешнего давления. Однако механизм этого процесса остается недостаточно изученным. Сложность проблемы усугубляется тем, что при исследованиях приходится иметь дело с конечным тонкодисперсным углем, образующимся при деструкции системы «уголь-флюид», т. е. с так называемой «бешеной мукой», которая дает очень мало информации об исходном материале даже с помощью современных физических средств исследования (ЭПР, ЯМР, рентгеноструктурный анализ, ВД-декриптометрия и др.).

Тем не менее, на основании анализа полученных данных, изучения известной литературы, особенно технических отчетов ВНИИГРИ-УГОЛЬ и соображений, высказанных профессором Ю. М. Гуфаном [7] было сделано несколько ключевых предположений, которые позволили применить математические методы для анализа проблемы.

Основное положение состоит в том, что метан всегда содержится в угле в сорбированном состоянии и в виде флюидных микровключений. В свободном состоянии он выделяется в результате микро- и макро повреждений угольной среды, выделяясь и заполняя при крупных повреждениях угольного слоя (например, типа «сброса» или «разлома») крупные полости, при микроповреждениях — микропоры и микротрещины, превращаясь в среду, насыщенную пузырьками метана с некоторым давлением. Такую среду можно рассматривать как «активный пористый композит».

Из технических отчетов следовало:

- 1) выбросоопасные зоны встречаются, как правило, на умеренных горизонтах;
- 2) они встречаются, как правило, в областях малых подвижек угольного слоя, т. е. в зонах, в которых в результате тектонической деятельности слой деформировался «слегка», но не разрушился полностью.

На основе этих данных можно полагать, что в зонах малых подвижек в результате образования микротрещин уголь превращается в «активный пористый композит». Следует полагать, что зона, занятая композитом, активно воздействует на окружающую среду. Для представления характера этого воздействия предлагается следующая математическая модель.

Рассмотрим две разномасштабные задачи.

Первая задача. На уровне масштаба отдельной микротрещины (поры) в предположении, что расстояние между порами значительно превосходит их линейные размеры. Для анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) окружающей среды каждую микротрещину можно рассматривать как сферическую полость радиуса a , наполненную газом с давлением p . Решение этой центрально-симметричной задачи можно получить путем предельного перехода в решении задачи теории упругости для полого шара, подверженного равномерному внутреннему давлению p [8, 9]. Имеем

$$u_r = \frac{pa^3}{4\mu r^2}, \quad \sigma_{rr} = -\frac{pa^3}{r^3}, \quad \sigma_{\theta\theta} = \frac{pa^3}{2r^3}, \quad (1)$$

где u_r — радиальное смещение, σ_{rr} , $\sigma_{\theta\theta}$ — напряжения, μ — модуль сдвига.

ЗАМЕЧАНИЕ. Микротрещина, наполненная газом, вообще говоря, порождает НДС, отличное от центрально-симметричного, которое вдали от нее может быть представлено в виде ряда по сферическим функциям [8]. Анализ такого представления показывает, что несимметричная часть решения с ростом r имеет порядок убывания: r^{-3} — для смещений и r^{-4} — для напряжений.

Вторая задача. На уровне масштаба пласта и прилегающего горного массива рассматривается следующая модельная задача: *в неограниченной упругой среде имеется шар радиуса A , наполненный пузырьками с давлением p и плотностью распределения*

$$K = \frac{N}{V}, \quad V = \frac{4}{3}\pi A^3, \quad (2)$$

где N — число пузырьков в шаре.

Центр большой сферы (рис. 1) совместим с декартовой системой координат $Ox_1x_2x_3$ и сферической r, θ, φ , которые связаны соотношениями

$$x_1 = r \sin \theta \cos \varphi, \quad x_2 = r \sin \theta \sin \varphi, \quad x_3 = r \cos \theta. \quad (3)$$

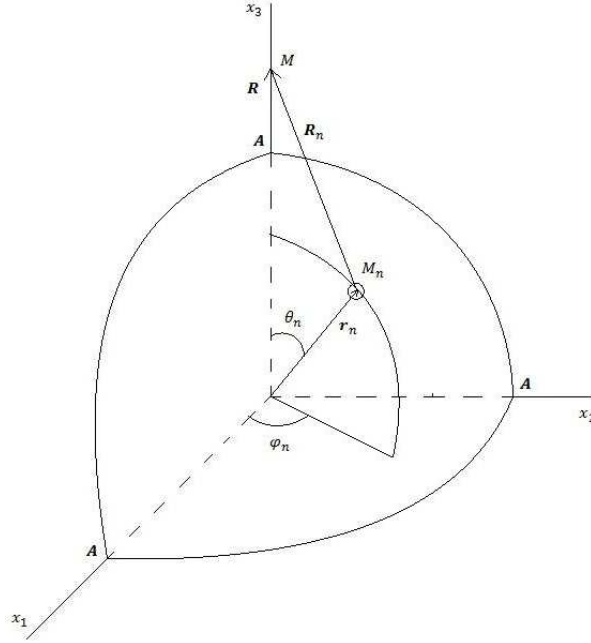


Рис. 1. Шар в неограниченной упругой среде.

Каждый отдельный пузырек снабдим индексом n ($n = 1, \dots, N$) и будем рассматривать как некоторую силовую сингулярность с радиусом-вектором \mathbf{r}_n . Во внешней по отношению к сфере среде выберем произвольную точку M — точку наблюдения с радиусом-вектором \mathbf{R} ($|\mathbf{R}| > A$). Для простоты вычислений ось Ox_3 проведем через точку наблюдения M . Введем обозначения

$$\mathbf{R}_n = \mathbf{R} - \mathbf{r}_n, \quad R_n = |\mathbf{R}_n| = \sqrt{R^2 + r_n^2 - 2Rr_n \cos \theta_n}. \quad (4)$$

Каждая сингулярность порождает в точке наблюдения смещение с вектором

$$\mathbf{u}_n = \frac{pa^3}{4\mu R_n^2} \frac{\mathbf{R}_n}{R_n}. \quad (5)$$

Используя принцип суперпозиции (задача линейная), радиальное смещение в точке M можно представить в виде

$$U_R = \sum_n |\mathbf{u}_n| \cos \alpha_n, \quad \cos \alpha_n = \sqrt{1 - \frac{r_n^2}{R_n^2} \sin^2 \alpha_n}, \quad (6)$$

где α_n — угол между \mathbf{u}_n и осью Ox_3 . Приближенное вычисление суммы (6) осуществляется с помощью формулы

$$U_R \approx \frac{Kpa^3}{4\mu} \int_V \frac{\cos \alpha}{R'^2} dV, \quad dV = r^2 \sin \theta dr d\theta d\varphi, \quad (7)$$

$$R'^2 = R^2 + r^2 - 2Rr \cos \theta, \quad \cos \alpha = \sqrt{1 - \frac{r^2}{R'^2} \sin^2 \theta}.$$

В результате вычисления интеграла (7) получаем

$$U_R = \frac{p'A^3}{4\mu R^2}, \quad p' = \gamma p, \quad \gamma = \frac{Na^3}{2A^3}. \quad (8)$$

Основной вывод, вытекающий из формулы (8), состоит в том, что сфера, наполненная «активным композитом», по отношению к внешней среде ведет себя как сфера, наполненная газом, диспергированным в структуре угля, с приведенным давлением p' .

Из этого следует, что выбросоопасная зона ведет себя аналогичным образом, при этом становятся очевидными следующие выводы:

1) обычные профилактические противовыбросные мероприятия типа вытеснения газа с помощью нагнетания воды мало эффективны в силу структуры системы уголь–флюид («активный пористый композит») выбросоопасной зоны;

2) при проходке толщина участка пласта, отделяющего «свободную» зону, образовавшуюся в результате выработки, от «выбросоопасной» флюидоактивной зоны уменьшается, что в конечном итоге приводит к разрушению стенки, и это разрушение принимает динамический характер, а «активный композит» превращается в «бешеную муку», в результате цепной реакции разрушения микровключений системы «уголь–флюид»;

3) в реальных условиях в зависимости от конкретных горно-геологических факторов полость выброса имеет сложную форму, что порождает зоны концентрации напряжений, которые активизируют процесс разрушения;

4) прогнозирование выбросоопасных зон может быть осуществлено термобарогеохимическими методами путем мониторинга и оценки уровня энергетической флюидоактивности исследуемых углей.

Полученные выводы из предложенной математической модели поведения системы «уголь–флюид» в выбросоопасной зоне угольного пласта представляют определенный интерес не только для прогнозирования и предотвращения опасных газодинамических явлений в угольных шахтах, но также в значительной мере для решения проблемы извлечения угольного метана как нетрадиционного углеводородного сырья [9, 10].

Этот интерес вызван тем, что флюидоактивные зоны с локализованными в них потенциальными очагами выброса являются наиболее перспективными участками для бурения дегазационных скважин при практическом решении данной проблемы, так как флюидизированные угли отличаются максимальной газоотдачей при минимальных энергетических затратах на интенсификацию процессов деструкции системы «уголь–флюид». При этом превентивная дегазация флюидизированных углей выступает как наиболее эффективный способ предотвращения внезапных выбросов угля, пород и газа при последующей отработке метанугольных месторождений. Оценка извлекаемых ресурсов угольного метана из таких месторождений — одна из актуальных задач ближайшего будущего.

Литература

1. Ходот В. В. Внезапные выбросы угля и газа.—М., 1961.—363 с.
2. Лосев Н. Ф., Труфанов В. Н., Смирнов В. Б., Фролков Г. Д. Процессы и явления, формирующие и сопровождающие выбросы угля и газа.—Ростов-на-Дону: СКНЦ ВШ, 1994.—22 с.—(Препринт).
3. Христианович С. А. О волне выброса // Изв. АН СССР.—1953.—Т. 12.—С. 1679–1688.
4. Васильчук М. П. Проблема борьбы с выбросами угля, пород и газа // Безопасность труда в промышленности.—1993.—Т. 9.—С. 2–6.
5. Труфанов В. Н., Лосев Н. Ф., Гамов М. И., Рылов В. Г., Славгородский Н. И. Особенности формирования и термобарогеохимические критерии прогнозирования выбросоопасных зон в угольных пластах.—Ростов-на-Дону: СКНЦ ВШ, 1993.—30 с.—(Препринт).
6. Труфанов В. Н., Гамов М. И., Рылов В. Г., Майский Ю. Г., Труфанов А. В. Углеводородная флюидизация ископаемых углей Восточного Донбасса.—Ростов-на-Дону: ИРУ, 2004.—272 с.
7. Гуфан Ю. М., Мощенко И. Н. Модель структурных превращений в углях при метаморфизме.—Ростов-на-Дону: СКНЦ ВШ, 1992.—24 с.—(Препринт).
8. Лурье А. И. Пространственные задачи теории упругости.—М.: ГИТТЛ, 1955.—491 с.
9. Новацкий В. Теория упругости.—М.: Мир, 1975.—872 с.

10. Труфанов В. Н., Труфанов И. В. Основные итоги и перспективы развития работ по проблеме угольного метана Восточного Донбасса // Разведка и охрана недр.—2006.—Т. 11.—С. 67–72.
11. Майский Ю. Г., Труфанов И. В. Термобарогеохимические условия формирования Краснодонского метанугольного месторождения (восточный Донбасс) // Изв. вузов. Сев.-Кав. рег. Естеств. науки.—2008.—Т. 2.—С. 113–117.

Статья поступила 14 марта 2014 г.

УСТИНОВ Юрий Анатольевич
Южный федеральный университет,
профессор каф. теории упругости
РОССИЯ, 344090, Ростов-на-Дону, ул. Мильчакова, 8 а;
Южный математический институт ВНЦ РАН и РСО-А,
главн. научн. сотр. отдела дифференциальных уравнений
РОССИЯ, 362027, Владикавказ, ул. Маркуса, 22
E-mail: ustinov_rsu@mail.ru

ТРУФАНОВ Вячеслав Николаевич
Южный федеральный университет,
профессор-консультант кафедры
месторождений полезных ископаемых
РОССИЯ, 344090, Ростов-на-Дону, ул. Зорге, 40
E-mail: trufanov_v37@mail.ru

A MATHEMATICAL MODEL OF THE SYSTEM STATUS «COAL-FLUID» FOR THE COAL-BEDS OUTBURST ZONE

Ustinov Yu. A., Trufanov V. N.

On the basis of generalized results of geological-structural, physical and thermo-geochemical researches the mathematical model of outburst zones of coal is suggested.

Key words: coal seam, zone ejection, active composite.