

РУДНИЧНАЯ АЭРОГАЗОДИНАМИКА И ГОРНАЯ ТЕПЛОФИЗИКА

УДК 550.834

DOI:10.7242/echo.2023.3.17

МОДЕЛЬ СКОРОСТНОГО РАЗРЕЗА АНОМАЛЬНОГО СКОПЛЕНИЯ МЕТАНА ПО ПЕТРОФИЗИЧЕСКИМ ДАННЫМ

Л.А. Иванов, В.В. Туманов

Республиканский академический научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт горной геологии, геомеханики, геофизики и маркшейдерского дела (РАНИМИ) Министерства образования и науки Донецкой Народной Республики (Донецк)

Аннотация: С аномальными скоплениями метана связана аварийность и гибель людей на угольных шахтах. Поэтому разработка новых методов и подходов к выявлению данных скоплений является актуальным вопросом. Их небольшие размеры и влияние многих факторов создают неблагоприятные условия для использования методов сейсморазведки. Повысить эффективность данных методов возможно путем петрофизического учета мешающих факторов и выделения в качестве определяющих факторов трещиноватости и газонасыщенности, а также за счет использования микросейсм при проведении пассивной сейсморазведки. Реализация данного пути предполагает построение модели скоростного разреза адекватной реальному скоплению метана. Предложен порядок построения данной модели в виде двух трансформаций: послойного геологического разреза в стратиграфическую последовательность пачек и петрофизического разреза в физико-геологический разрез. Модель показала существенное уменьшение скорости распространения продольных и поперечных упругих волн (до 45%) за счет трещиноватости и смены водного флюида газовым при прочих равных условиях, что может быть использовано для выявления аномальных скоплений метана в разрезе угленосных отложений по скоростным параметрам.

Ключевые слова: скоростной разрез, петрофизика угольных формаций, скопления метана на угольных шахтах.

Введение

Своевременное обнаружение и последующая дегазация аномальных скоплений метана (АСМ) позволяют избежать аварий, связанных с выбросами и лавинным поступлением метана в горные выработки угольных шахт. Поэтому обнаружение АСМ является актуальным вопросом, решение которого возможно при помощи передовых геолого-геофизических технологий.

Методы активной сейсморазведки нашли применение для изучения газонасыщенности на многих угольных шахтах. Данными методами уверенно выделяются ранее не обнаруженные разломы, а скопления газа определяются косвенно, допуская, что разломы являются газонасыщенными. Использование методов электромагнитного зондирования позволяет выявить скопления газа, отличающиеся своими электрическими свойствами, однако при условии их достаточного размера, что в целом сильно ограничивает возможности данных методов. Использование гравиразведки позволяет уточнить положение крупных геологических структур, к которым могут быть приурочены АСМ, однако размеры гравитационных аномалий, обусловленные этими структурами, значительно превышают АСМ. Попытки использования угольного комплекса ГИС также не дают желаемого результата из-за ограниченности набора методов по сравнению с нефтегазовым комплексом [1].

В настоящее время предпринимаются попытки расширить возможности использования традиционных методов сейсморазведки для выявления трещиноватых и газонасыщенных пород. При этом основное внимание акцентируется на использовании динами-

ческих характеристик отраженных волн [2] или атрибутов геометрии отражающих горизонтов [3].

Неоправданно менее распространенным является направление, в котором используются скоростные параметры сейсмических волн [4, 5]. Основная причина, сдерживающая развитие данного направления прежде всего связана с трудностью использования скоростных параметров, абсолютные величины которых изменяются в широком диапазоне и имеют неоднозначную интерпретацию [6]. Поэтому прогресс в рассматриваемом направлении видится в разработке петрофизических (геолого-геофизических) основ исследования трещиноватых коллекторов газа, определяющих геологические условия, при которых достигается однозначность связи скоростных параметров и показателей качества коллекторов.

Новая идея использования сейсморазведки для обнаружения АСМ в трещиноватых коллекторах заключается в совместном использовании активной и пассивной сейсморазведки, основанных, соответственно, на определении скоростных параметров и микросейсмического излучения объекта исследования. В основе реализации данной идеи лежит использование скоростной модели, адекватной реальному АСМ.

Цель исследования – построение априорной скоростной модели АСМ, расположенного на угольном месторождении в зоне динамического влияния разлома.

Подход к исследованию и расчет скоростных параметров

В качестве первоочередных объектов исследования рассматриваются зоны динамического влияния граничных разломов (ограничивающих поля угольных шахт), располагающиеся в свою очередь в зоне динамического влияния глубинного разлома. Выбор такой комбинации разломов и их тектоническая активность предполагают поступление по глубинному разлому метана и образование АСМ в зоне динамического влияния граничного разлома.

Для построения скоростной модели приняты определенные условия соответствующие реальной зоне динамического влияния разлома. К основным условиям, определяющим скоростные параметры, относятся литологический состав и катагенетическая зональность угленосного разреза, а также степень развития трещиноватости и смена водного флюида газовым.

Как правило, угольное месторождение, особенно вблизи разломов, характеризуется отсутствием петрофизических параметров, данных акустического метода геофизических исследований скважин (АК), вертикального сейсмического профилирования (ВСП) и метода отраженных волн (МОВ). Поэтому основным способом построения скоростного разреза является использование петрофизических связей скоростных характеристик с известными физическими свойствами и определенные закономерности их изменения.

Модель включает следующий перечень скоростей распространения продольных (V_p) и поперечных (V_s) упругих волн для четырех состояний пород:

- а) нетрещиноватого водонасыщенного (V_p, V_s);
- б) нетрещиноватого газонасыщенного ($V_{p.гп}, V_{s.гп}$);
- в) трещиноватого водонасыщенного ($V_{p.тр}, V_{s.тр}$);
- г) трещиноватого газонасыщенного ($V_{p.тр.гп}, V_{s.тр.гп}$).

Следует отметить, что из данного перечня лишь параметр V_p представляет собой предмет ранее проведенных систематических петрофизических исследований, в результате которых установлены генетические и эпигенетические закономерности изменения данного параметра в условиях естественного залегания пород по данным АК [7, 8]. Поэтому значения других скоростных параметров целесообразно определять, опираясь на параметр V_p , а также на коэффициенты общей (K_n) и трещинной ($K_{п.тр}$) пористости, параметр V_p флюида ($V_{p.ф}$), расчетные параметры V_p скелета ($V_{p.ск}$) и добротности по-

роды (Q). При этом для расчета неизвестных скоростных параметров приобщаются результаты определения параметров V_p и V_s методами АК, ВСП и МОВ на некоторых угольных месторождениях Донбасса, а также на образцах горных пород в камере высокого давления [9, 10].

Последовательность определения скоростных параметров состоит в следующем.

1. Параметр $V_{p.гп}$ рассчитывается по уравнению Уайлли при значении скорости газового флюида, равной 340 м/с:

$$\Delta T_{гп} = (1 - K_{п})\Delta T_{ск} + K_{п} \Delta T_{ф}, \quad (1)$$

где

$$\Delta T_{ск} = \frac{1}{V_{p.ск}}, \quad (2)$$

$$\Delta T_{ф} = \frac{1}{V_{p.ф}} \quad (3)$$

$$V_{p.гп} = \frac{1}{\Delta T_{гп}}, \quad (4)$$

2. Параметр $V_{p.ск}$ определяется также по уравнению Уайлли и значению скорости водного флюида, равному 1500 м/с:

$$\Delta T_{ск} = \frac{\Delta T - K_{п}\Delta T_{ф}}{1 - K_{п}}, \quad (5)$$

где

$$\Delta T = \frac{1}{V_p}, \quad (6)$$

$$V_{p.ск} = \frac{1}{\Delta T_{ск}}, \quad (7)$$

3. Параметр $V_{p.тр}$ рассчитывается, используя параметр $V_{p.ск}$ и добротность (Q):

$$V_{p.тр} = \frac{QV_{p.ск}}{100}, \quad (8)$$

где по данным [11]

$$Q = 100 - 1,6K_{п} - 22K_{п.тр}, \quad (9)$$

4. Параметр $V_{p.тр.гп}$ определяется при условии независимого влияния на параметр V_p факторов трещинообразования и смены водного флюида газовым:

$$V_{p.тр.гп} = V_p \left(\frac{V_{p.тр}}{V_p} \cdot \frac{V_{p.гп}}{V_p} \right), \quad (10)$$

5. Параметр V_s определяется по уравнению регрессии:

$$V_s = aV_p + b. \quad (11)$$

По данным АК на близлежащем участке разведки «Бутовский-Глубокий» коэффициент «а» для песчаников, алевролитов и аргиллитов равен соответственно 0,53; 0,54 и 0,59. Коэффициент «b» для тех же пород составляет -50, -50 и -150 [9].

6. Параметр $V_{s.гп}$ рассчитывается по параметру $V_{p.гп}$ и отношению V_s/V_p , известных для угленосных отложений участка работ, а также по отношению $V'_{s.гп}/V'_{p.гп}$, нормированному по V'_s/V'_p , равному 1,15 д. ед. по данным [10] для осадочных пород в целом:

$$V_{s.гп} = V_{p.гп} \frac{V_s \left(\frac{V'_{s.гп}}{V'_{p.гп}} \right)}{\left(\frac{V'_s}{V'_p} \right)}, \quad (12)$$

7. Параметр $V_{s.тр}$ также определяется по параметру $V_{p.тр}$ и отношению V_s/V_p для угленосных отложений участка работ, а также по отношению $V'_{s.тр}/V'_{p.тр}$, нормированного по V'_s/V'_p , равному 0,83 д. ед. для разлома в Западном Донбассе по данным [9]:

$$V_{s.тр} = V_{p.тр} \frac{V_s \left(\frac{V'_{s.тр}}{V'_{p.тр}} \right)}{\left(\frac{V'_s}{V'_p} \right)}, \quad (13)$$

Отметим, что нормирование отношений, используемое в выражениях (12) и (13), позволяет отношение V_s/V_p водонасыщенных пород участка работ привести соответственно к газонасыщенному и трещиноватому состоянию.

8. Параметр $V_{s.тр.гп}$, как и параметр $V_{p.тр.гп}$, рассчитывается при условии независимого влияния на параметр V_s факторов трещинообразования и смены водного флюида газовым:

$$V_{s.тр.гп} = V_s \left(\frac{V_{s.тр}}{V_s} \cdot \frac{V_{s.гп}}{V_s} \right), \quad (14)$$

Результаты исследования

Построение скоростного разреза представляет собой трансформацию ряда промежуточных конструкций: послойного геологического разреза; геологического разреза, расчлененного на пачки; петрофизического разреза и физико-геологического разреза. В качестве примера выбран разрез участка геофизических исследований, расположенного в висячем крыле Григорьевского надвига Донбасса. Следует отметить, что данный надвиг располагается в зоне динамического влияния Волновахско-Кадиевского глубинного разлома и характеризуется газопроявлениями в разведочных скважинах, положительными аномалиями газоносности угольных пластов и плотности теплового потока, изотопным составом углерода метана углей и проявлениями ацетилена, указывающими на глубинный источник газа, что проанализировано в работе [12].

Стратификация и катагенетическое зонирование разреза осуществлены, соответственно, путем укрупнения слоев и выделения зон метаморфизма по углехимическим показателям. Укрупнение слоев, выделенных по данным ГИС, до пачек мощно-

стью в несколько десятков и сотен метров выполнено в соответствии со следующей унифицированной схемой:

1. Первоначально в пачки объединены последовательности слоев, представленные разностями одного и того же типа породы (например, мелко-, средне- и крупнозернистые разности песчаника).

2. С соседними пачками объединены маломощные пачки по принципу близости типов пород (песчаник и алевролит) либо по минимальному различию литологического состава пачек. Объединение выполнялось в порядке увеличения мощности пачек и циклически повторялось, пока мощность оставалась менее критической величины.

3. Критическая мощность выбиралась с учетом разрешающей способности и погрешности геофизических методов.

4. По суммарной мощности слоев не менее 50% выделены песчаниковые, алевролитовые и аргиллитовые пачки, либо пачки смешанного состава.

Следуя унифицированному порядку и задавшись минимальной мощностью пачки, равной 30 м, 384 слоя, выделенные по данным ГИС, объединены в 17 пачек. Всего в разрезе выделены две песчаниковые, четыре алевролитовые, семь аргиллитовых и четыре пачки смешанного состава. Мощность данных пачек изменяется от 30 до 230 м. Средняя величина составляет 80 м (рис. 1).

Разрез вскрывает зоны метаморфизма углей (катагенеза пород) от 2Г до 4Ж и характеризуется изменением максимальной доинверсионной глубины погружения (H_{\max}), принятой по [13], в интервале от 2840 до 4180 м.

Петрофизический разрез (ПФР) участка исследований отражает непрерывное изменение фоновых значений физических свойств угленосных отложений. Построение ПФР участка работ выполнено путем извлечения определенного фрагмента из ПФР ближайшего участка разведки с такими же зонами метаморфизма углей [8]. Обоснованность использования ПФР базируется на его универсальности для различных угленосных районов бассейна и на подтверждении, полученном при исследовании глубоких углеразведочных скважин, пройденных до глубины 2-3 км. Достоверность построения ПФР участка работ также подтверждается по совпадению его параметров с диапазонами вариаций физических свойств пород, измеренных при проведении геологической разведки.

ПФР в количественной форме отражает закономерное уплотнение основных типов пород, обусловленное катагенезом (рис. 2).

Синтетическим параметром, отражающим уплотнение однотипных пород и определяющим изменение других физических свойств, является параметр K_{Π} . Сверху вниз по ПФР от стадии 2Г до 5К параметр K_{Π} песчаника мелкозернистого уменьшается от 9,4 до 3,3%, алевролита от 6,8 до 3,2% и аргиллита от 5,2 до 3,0%. Данное уменьшение пористости приводит к значительному увеличению параметров V_p и V_s .

Существенной особенностью ПФР участка геофизических исследований является то, что на глубине около 1000 м, параметр K_{Π} песчаников уменьшается до 5%. В результате начиная с указанной глубины и ниже по разрезу исчезают коллекторы гранулярного типа. Однако за счет увеличения хрупкости пород, обусловленной катагенезом, и проявления тектонического трещинообразования вблизи разломов создаются благоприятные условия для возникновения коллекторов трещинного типа, отличающихся высокой проницаемостью.

Следует отметить, что при построении скоростного разреза используется важная особенность ПФР: возможность определять физические свойства основных типов пород в любой части геологического разреза независимо от их стратиграфического пространства. Данная особенность позволяет рассчитать среднее значение физического свойства любой комбинации пород в произвольно заданной части геологического разреза.

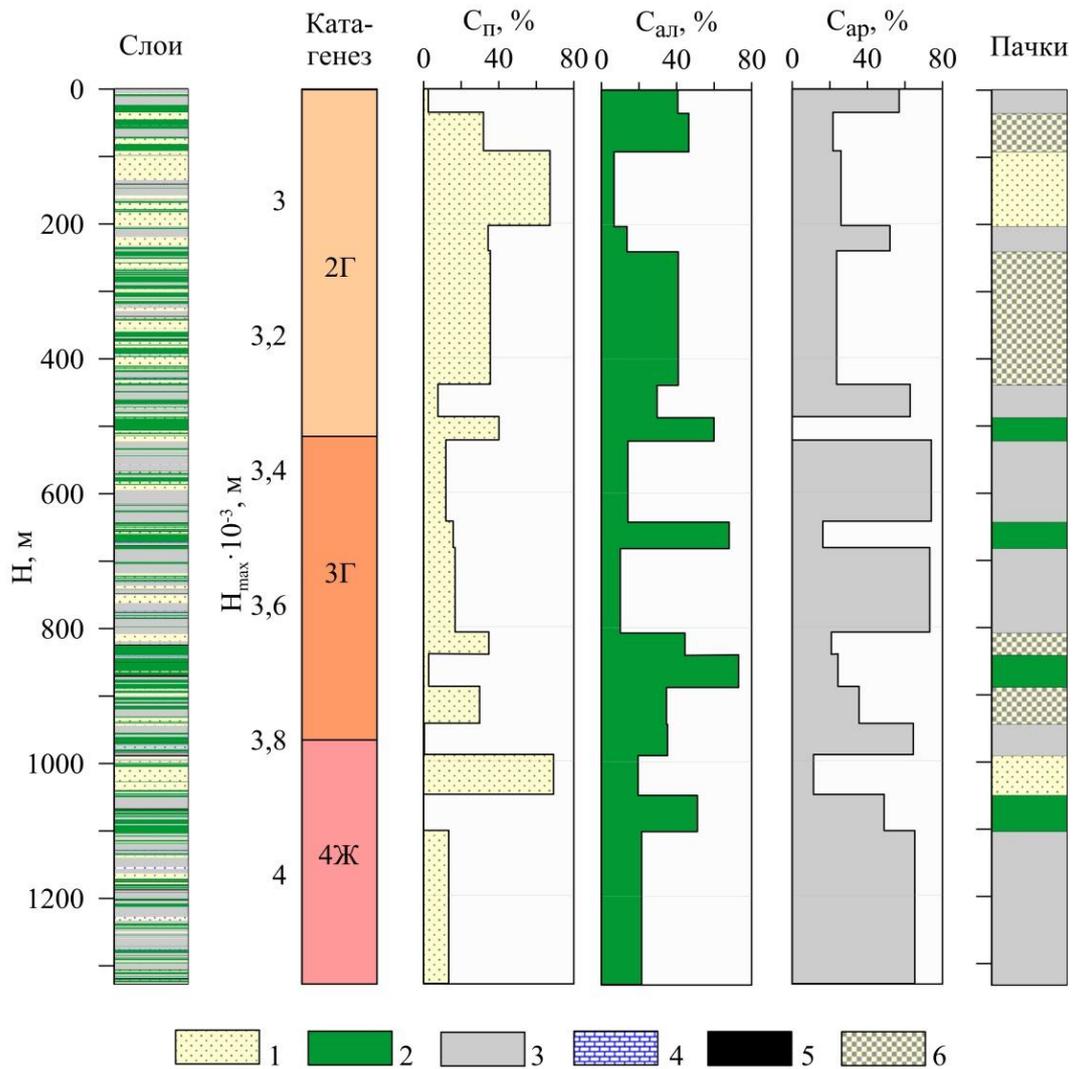


Рис. 1. Стратификация и катагенетическая зональность геологического разреза участка геофизических работ: 1 – песчаники; 2 – алевролиты; 3 – аргиллиты; 4 – известняки; 5 – угли; 6 – смешанные породы; H_{\max} – глубина максимального доинверсионного погружения; C_p – содержание песчаников; $C_{ал}$ – содержание алевролитов; $C_{ар}$ – содержание аргиллитов

Физико-геологический разрез (ФГР) отражает дискретное изменение фоновых значений физических свойств пачек, которое может быть получено при помощи геофизических методов. Последовательность пачек на ФГР соответствует рис. 1. Комплекс физических параметров состоит из K_p , V_p и V_s . Их величины определяются как средневзвешенные по содержанию в пачке значения физических свойств пород. При этом параметр K_p пачки рассчитывается по выражению:

$$K_p = \sum_{i=1}^n K_{p,i} C_i, \quad (15)$$

где K_p – средневзвешенный коэффициент общей пористости пачки;
 $K_{p,i}$ – коэффициент общей пористости i -го типа породы в пачке;
 C_i – содержание i -го типа породы в пачке;
 n – количество типов пород.

Скоростные параметры рассчитываются по формуле:

$$V_{p/s} = \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{V_{p/s_i}}, \quad (16)$$

где $V_{p/s}$ – средневзвешенная величина параметра V_p или V_s пачки;

V_{p/s_i} – параметр V_p или V_s i -го типа породы в пачке;

C_i – содержание i -го типа породы в пачке;

n – количество типов пород.

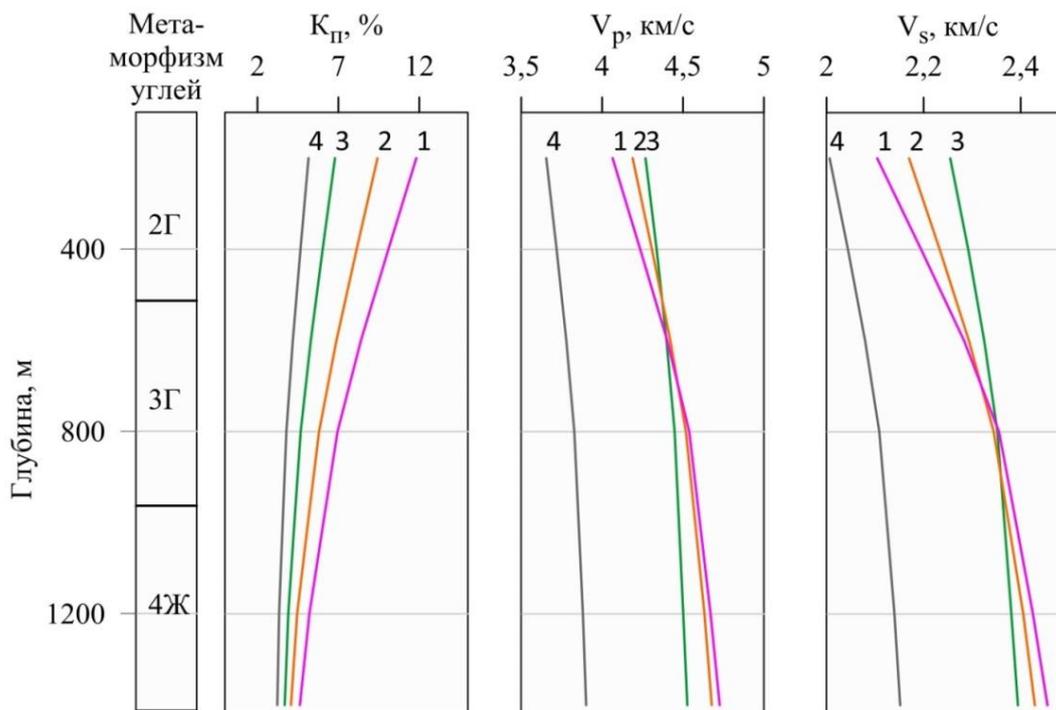


Рис. 2. Петрофизический разрез участка геофизических исследований: K_p – коэффициент общей пористости; V_p – скорость распространения продольных упругих волн; V_s – скорость распространения поперечных упругих волн; шифр кривых: 1 – песчаник среднезернистый с глинистым цементом; 2 – песчаник мелкозернистый с глинистым цементом; 3 – алевролит с глинистым цементом; 4 – аргиллит

При построении ФГР значения геофизических параметров типов породы снимались с ПФР (см. рис. 2), а содержание пород в пачке – на соответствующих глубинах в геологическом разрезе (см. рис. 1).

ФГР отражает образование положительных аномалий физических параметров алевролитовых и песчаниковых пачек на фоне аргиллитовых пачек (рис. 3).

При этом вниз по разрезу изменяется контрастность выделения алевролитовых и песчаниковых пачек. По параметру K_p контрастность уменьшается, по параметрам V_p и V_s для песчаниковых пачек она увеличивается, а для алевролитовых пачек практически не изменяется. Это означает, что используя методы сейсморазведки низкопористый (K_p менее 5%) разрез может быть расчленен на водонасыщенные нетрещиноватые песчаниковые, алевролитовые и аргиллитовые пачки.

Скоростная модель скопления метана представляет собой фрагмент ФГР, состоящий из четырех нижних пачек, содержащих целевой угольный пласт (рис. 4).

Две средние пачки являются трещинным коллектором газа, характеризующимся трещинной пористостью 0,9%. Верхняя пачка, перекрывающая коллектор, представляет собой покрывку. Нижняя пачка, подстилающая коллектор, также как и верхняя пачка, локализует скопление метана в двух средних пачках.

Сверху вниз пачки характеризуются следующим образом.

1. Аргиллитовая пачка содержит 35% алевролитов и 65% аргиллитов. Пачка нетрещиноватая и водонасыщенная. Параметр V_p составляет 4050 м/с, параметр V_s – 2202 м/с, отношение V_s/V_p – 0,54. Залегает в интервале глубин от 945 до 990 м. Мощность пачки равна 45 м.

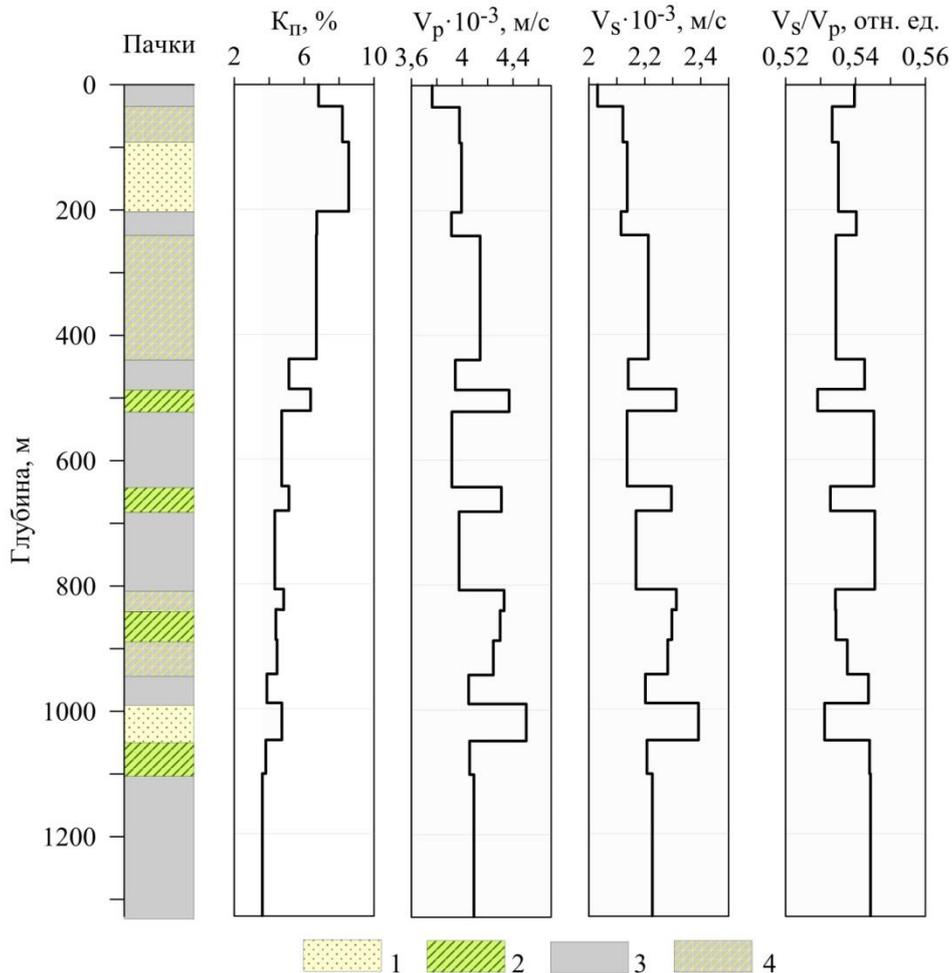


Рис. 3. Физико-геологический разрез участка геофизических исследований: 1 – песчаниковая пачка; 2 – алевролитовая пачка; 3 – аргиллитовая пачка; 4 – пачка смешанных пород; K_p – коэффициент общей пористости; V_p – скорость распространения продольных упругих волн; V_s – скорость распространения поперечных упругих волн

2. Песчаниковая пачка содержит 69% песчаников, 20% алевролитов и 11% аргиллитов. Моделью предполагается развитие в пачке процессов трещинообразования и смены водного заполнителя газовым. До трещинообразования и насыщения пачки газом параметр V_p составлял 4500 м/с, параметр V_s – 2390 м/с, отношение V_s/V_p – 0,53. В газонасыщенном и трещиноватом состоянии рассматриваемые параметры существенно уменьшились. Параметр V_p уменьшился до величины 2720 м/с, параметр V_s – до 1260 м/с, отношение V_s/V_p – до 0,45 д. ед. Пачка залегаєт в интервале глубин от 990 до 1050 м. Ее мощность равна 60 м.

3. Алевролитовая пачка по литологическому составу близка к аргиллитовой пачке. Содержание алевролитов и аргиллитов в данной пачке, соответственно, равно 51 и 49%. Пачка трещиноватая и газонасыщенная. В водонасыщенном состоянии параметр V_p составлял 4060 м/с, параметр V_s – 2210 м/с, отношение V_s/V_p – 0,54 д. ед. После трещинообразования и насыщения газом рассматриваемые параметры уменьшились и

приобрели следующие значения: $V_p - 2590$ м/с, $V_s - 1350$ м/с, $V_s/V_p - 0,52$ д. ед. Пачка содержит целевой угольный пласт m_3 . Она залегает в интервале глубин от 1050 до 1105 м. Ее мощность составляет 55 м.

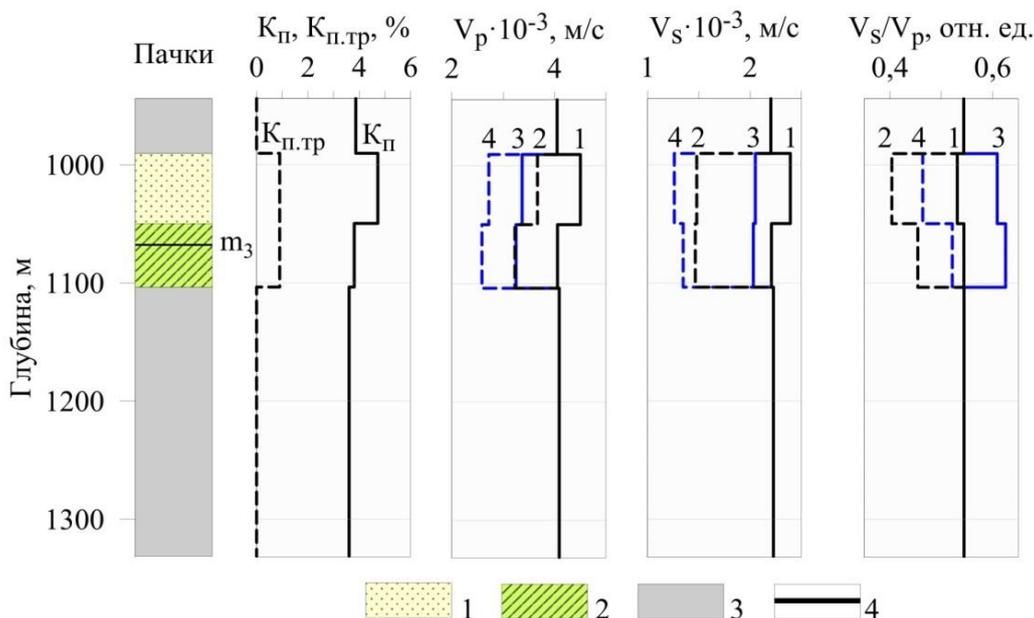


Рис. 4. Скоростная модель скопления свободного метана в трещинном коллекторе: 1 – песчановая пачка; 2 – алевролитовая пачка; 3 – аргиллитовая пачка; 4 – целевой угольный пласт (m_3); шифр кривых – состояние пород: 1 – водонасыщенное; 2 – водонасыщенное трещиноватое; 3 – газонасыщенное; 4 – газонасыщенное трещиноватое; K_p – коэффициент общей пористости; $K_{п.тр}$ – коэффициент трещинной пористости; V_p – скорость распространения продольных упругих волн; V_s – скорость распространения поперечных упругих волн

4. Аргиллитовая пачка содержит 13% песчаников, 21% алевролитов и 66% аргиллитов. Пачка водонасыщенная и не подвержена трещиноватости. Параметр V_p составляет 4090 м/с, параметр $V_s - 2230$ м/с. Отношение V_s/V_p равно 0,54. Пачка залегает в интервале глубин от 1105 до 1330 м. Ее мощность равна 225 м.

Анализ скоростной модели показывает, что в условиях низкопористого терригенного разреза трещинообразование и насыщение газом обуславливают существенное изменение скоростных параметров. Трещинообразование в песчановой пачке уменьшает параметр V_p на 19%, параметр V_s – на 38%, отношение параметров V_s/V_p – на 24%. В алевролитовой пачке уменьшение параметров V_p , V_s и V_s/V_p происходит близко к песчановой пачке и соответственно равняется 20%, 34% и 17%.

Смена водного флюида газовым в песчановой пачке сопровождается уменьшением параметра V_p на 25%, параметра V_s – на 14% и увеличением отношения параметров V_s/V_p – на 15%. В алевролитовой пачке уменьшение параметров V_p и V_s соответственно равно 20% и 8%, а увеличение отношения параметров V_s/V_p составляет, как в песчановой пачке, 15%.

Совместное и независимое влияние трещинообразования и смены водного флюида газовым обуславливает уменьшение всех рассматриваемых параметров. В песчановой пачке параметр V_p уменьшается на 40%, параметр V_s – на 47%, отношение параметров V_s/V_p – на 13%. В алевролитовой пачке уменьшение параметров V_p , V_s и V_s/V_p соответственно составляет 36%, 39% и 4%.

Сравнение факторов показывает, что трещинообразование по сравнению со сменой флюида больше влияет на параметр V_s и отношение параметров V_s/V_p , тогда как смена

водного флюида газом большее влияние оказывает на параметр V_p . При этом трещинообразование приводит к уменьшению, а насыщение газом – к увеличению отношения параметров V_s/V_p . Совместное влияние данных факторов наиболее сильно (на 39-47%) изменяет параметр V_s , несколько меньше (на 36-40%) – параметр V_p и заметно меньше (на 4-13%) отношение параметров V_s/V_p .

Обсуждение результатов исследования

Следует отметить, что полученные результаты базируются не на целостной петрофизической картине, описывающей в полном объеме изменение скоростных параметров трещиноватых и газоносных горных пород в условиях естественного залегания и во всем диапазоне изменения катагенеза. Исключением является лишь параметр V_p водонасыщенных нетрещиноватых пород, исследованный методом АК в комплексе с другими петрофизическими параметрами и показателями гранулометрического и вещественного состава. Параметр V_s исследован также в условиях естественного залегания пород, но на меньшем количестве типов пород и лишь по некоторым стадиям катагенеза. О влиянии трещиноватости имеются данные, полученные при проведении сейсморазведки методом отраженных волн на отдельных угольных месторождениях. Влияние газонасыщения оценивается по лабораторным данным в камере высокого давления. Поэтому при моделировании скоростных разрезов разлома возникает определенная проблема, заключающаяся в наличии лишь фрагментарных данных о скоростных параметрах трещиноватых и газонасыщенных пород Донбасса.

Идеальное решение указанной проблемы заключается в проведении экспериментальных геофизических исследований для измерения скоростных параметров в условиях естественного залегания пород во всем диапазоне катагенеза в зависимости от состава, трещиноватости и газонасыщенности пород. Однако трудоемкость и дороговизна сводят на нет данный способ решения проблемы.

Рациональным является подход на основе введения определенных допущений, позволяющих более широко использовать фрагментарные данные и результаты лабораторных исследований в камерах высокого давления.

Мы отдаем полный отчет, что на различных стадиях катагенеза скоростные параметры фоновых, трещиноватых и газонасыщенных пород характеризуются различными абсолютными значениями. Однако отношение скоростных параметров (V_s/V_p , $V_{p,тр}/V_p$ и др.) на различных стадиях изменяется в меньшей мере, чем их абсолютные величины. Также допускается, что отношение скоростных параметров, измеренных в камерах высокого давления, тоже является более стабильным по сравнению с абсолютными величинами. Такой подход является весьма эффективной процедурой минимизации влияния мешающих факторов. Он не является новым и, например, положен в основу определения проницаемости пород по петрофизическому инварианту, т.е. по отношению эффективной пористости к ее максимальному значению в изучаемом интервале пласта [14].

В модели игнорируется влияние вариаций тектонических напряжений на фоновые значения скоростных параметров. Основанием такого игнорирования являются несущественные вариации параметра V_p однотипных пород с одинаковой пористостью, измеренного в различных районах бассейна вне зон тектонических нарушений. Теоретически трудно представить, что эти породы характеризуются однотипным напряженным состоянием в юго-западной, центральной и северо-восточной части Донбасса. Тем не менее, географическое положение не оказывает существенного влияния на вариации параметра V_p при прочих равных условиях [15].

Напряженное состояние и тип флюида существенно изменяются в зонах влияния разломов. В целом об этом могут свидетельствовать результаты геофизического мониторинга разломов. Однако как сам мониторинг, так и исследование отдельного влия-

ния на скоростные параметры напряженного состояния, трещиноватости и типа флюида в зонах разломов угольного бассейна не проводилось.

В скоростной модели влияние напряженного состояния учитывается через изменение трещинной пористости, как главной реакции горных пород на изменение тектонического напряжения и порового давления. В модели выделяются два граничных условия. Первое условие соответствует трещинной пористости, рассчитанной как разница общей пористости в зоне разлома и за его пределами. При этом величины пористости получены лабораторным методом при атмосферных условиях, при которых происходит полная релаксация напряжений. Допускается, что этим условиям соответствует максимально возможное раскрытие трещин и увеличение трещинной пористости, обусловленное разрывообразованием в условиях естественного залегания пород.

Второе граничное условие предполагает закрытие трещин и нулевую величину коэффициента трещинной пористости. За данное граничное условие принято условие образования фоновых значений параметров K_p , V_p и V_s .

Не исключается, что второе граничное условие может быть превзойдено в результате увеличения эффективного давления (увеличения тектонического давления и уменьшения внутривпорового давления). Выявить указанное изменение возможно на основе сопоставления измеренных и смоделированных величин параметров V_p и V_s .

Правдоподобность приводимых петрофизических расчетов оценивается путем сравнения с результатами исследования разломов по отдельным участкам Донбасса, выполненным в условиях естественного залегания пород методом АК. Так, на Морозовском среднеамплитудном сбросе, нарушающем угленосные отложения 1Д-3Г стадий метаморфизма углей, происходит уменьшение параметра V_p на 20-30%. На участке «Фашевский» в зонах среднеамплитудных надвигов параметры V_p и V_s пород, вмещающих угли 7Т стадии метаморфизма, уменьшаются на 50%, а отношение параметров V_s/V_p составляет 0,26-0,29 д. ед. [9]. В нашем случае, соответствующем 4Ж стадии метаморфизма углей и стоящем ближе к Морозовскому сбросу, параметр V_p водонасыщенных пород за счет трещинной пористости, равной 0,9%, уменьшается на 19-21%, а за счет трещинообразования и насыщения газом – на 36-40%. Отношение параметров V_s/V_p водонасыщенных пород относительно фона (0,54 д. ед.) уменьшается до 0,4 д. ед. Следовательно, расчетные данные являются соизмеримыми с результатами измерений скоростных параметров в Донбассе, что свидетельствует о правдоподобности скоростных характеристик в зоне разлома, определенных по петрофизическим связям.

Отметим, что существенное изменение скоростных параметров также подтверждается результатами исследования разрывных нарушений в условиях естественного залегания в различных регионах и геологических условиях. Так, в работе [5] приводятся сведения, что зоны незалеченных разрывных нарушений отличаются значительным (до 40%) понижением параметров V_p и V_s , тогда как залеченные разрывные нарушения характеризуются неконтрастной зональностью, уменьшением параметра V_p на 7-10% и колебанием значений параметра V_s относительно фона в диапазоне $\pm 5\%$. В очагах локального роста напряжений в тектонически активных районах скоростные параметры увеличиваются и поэтому отдельные фрагменты разрывного нарушения могут не прослеживаться в сейсмическом поле.

В работах [16, 17] показано, что в низкоскоростной (V_p от 200 до 2000 м/с, V_s от 100 до 500 м/с) верхней (от 0 до 20 м) части разреза в зоне пониженных скоростей шириной до 30-50 м, расположенной в активном крыле вблизи сместителя, при относительно недавней подвижке уменьшение скоростных параметров достигает 50-60%, при давней подвижке (около 2500 лет назад) – не превышает 10%. В работе [6] приводятся сведения, согласно которым высокоскоростные известняки (V_p равняется 6152 м/с, V_s составляет 3375 м/с) с одной системой трещиноватости характеризуются уменьшением

параметра V_p на 0-18%, параметра V_s – на 16-48%, отношения параметров V_s/V_p – на 1-47%. При этом небольшое уменьшение одного из параметров компенсируется существенным увеличением другого параметра. При развитии трех и четырех систем трещиноватости параметр V_p уменьшатся на 12-16%, параметр V_s – на 30-40%.

Выводы

Выполненные исследования позволили получить следующие результаты.

1. Показан петрофизический путь построения скоростного разреза АСМ, адекватность которого реальному разрезу обеспечивается унифицированным объединением слоев в пачки, использованием петрофизического разреза и его трансформацией в физико-геологический разрез и скоростной разрез АСМ.

2. Представлена последовательность расчета скоростных параметров, опирающаяся на генетические и катагенетические закономерности изменения параметра V_p угленосных пород, уравнения Уайлли и добротности, а также фрагментарные данные по скоростным параметрам отдельных разломов Донбасса и горных пород в камере высокого давления.

3. Определены параметры скоростной модели скопления свободного метана на средних стадиях метаморфизма углей, определяемые литологическим составом пачек, степенью катагенеза, тектонической трещиноватостью и газонасыщенностью.

4. Установлено существенное уменьшение параметров V_p и V_s (на 35-45%) за счет трещиноватости и смены водного флюида газовым при прочих равных условиях, что может быть использовано для выявления АСМ в разрезе угленосных отложений по скоростным параметрам.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Анциферов А.В., Иванов Л.А., Туманов В.В., Анциферов В.А., Савченко А.В., Богак М.Ю. Достижения отдела эколого-геофизических исследований за последнее десятилетие в вопросе прогноза газоносности // Труды РАНМИ. – 2019. – № 8 (23). – Ч. 2. – С. 69-74.
2. Семерикова И.И. Методика распознавания трещиноватых сред в полях отраженных волн для прогноза коллекторов углеводородов // Экспозиция Нефть Газ. – 2015. – № 6 (45). – С. 44-48.
3. Орехов А.Н., Аmani М.М.М. Возможности геофизических методов для прогнозирования трещиноватости коллекторов // Изв. Томского политех. ун-та. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 6. – С.198-209. – DOI: 10.18799/24131830/2019/6/2140.
4. Устинова В.Н. Сейсмические данные на этапе разведки нефтяных и газовых месторождений // Изв. Томского политех. ун-та. – 2004. – Т. 307, № 1. – С. 67-72.
5. Кузин А.М. О некоторых закономерностях и особенностях распределения скорости продольных волн в зонах разрывных нарушений // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2015. – № 7. – С. 38-46.
6. Авербух А.Г., Граф С.Ю., Ахметова Э.Р., Гарнов А.В. Построение геофизической модели трещинного коллектора по данным сейсморазведки // Экспозиция Нефть Газ. – 2017. – № 3 (56). – С. 18-22.
7. Гречухин В.В. Изучение угленосных формаций геофизическими методами. – М.: Недра, 1980. – 360 с.: ил.
8. Гречухин В.В., Воевода Б.И., Дараган В.Н., Савченко А.В., Иванов Л.А. Петрофизические характеристики отложений с коксующимися углями Донбасса // Советская геология. – 1986. – № 9. – С. 99-108.
9. Хохлов М.Т., Харитонов О.М., Трифонов П.Г., Козельский И.Т., Байсарович М.Н. Многоволновые сейсмические исследования угольных месторождений Донбасса. – Киев: Наук. думка, 1990. – 132 с.: ил.
10. Грегори А.П. Физические свойства горных пород по лабораторным и промыслово-геофизическим исследованиям и их значение для интерпретации результатов сейсморазведки // Сейсмическая стратиграфия / под ред. Ч. Пейтона. – М., 1982. – С. 36-103.
11. Жуков В.С. Оценка трещиноватости коллекторов по скорости распространения упругих волн // Научно-технический сборник Вести газовой науки. – 2012. – Вып. № 1 (9). – С. 148-152.

12. Иванов Л.А., Туманов В.В., Савченко А.В. Структурно-геодинамические предпосылки использования микросейсм для поиска аномальных скоплений метана // Труды РАНИМИ. – 2022. – № 16-17 (31-32). – С. 46-59.
13. Комплект карт метаморфизма углей Донецкого бассейна / Левенштейн М.Л., Спирина О.И.; ПГО «Донбасгеология». ГлавКГУ «Укргеология». – Киев, ЦТЭ, 1991. – 104 с.
14. Коваленко К.В., Лазуткина Н.Е., Пономаренко О.М., Зарипова Л.Ф. Определение проницаемости по данным геофизических исследований скважин на основе петрофизического инварианта // Актуальные проблемы нефти и газа. – 2022. – Вып. 2 (37). – С. 17-26. – DOI: 10.29222/ipng.2078-5712.2022-37.art2.
15. Иванов Л.А., Воевода Б.И. Современная глубина как фактор изменения скорости распространения упругих продольных волн V_p угленосных пород Донбасса // Наукові праці ДонНТУ: серія гірничо-геологічна. – 2003. – Вип. 63. – С. 127-133.
16. Патрикеев В.Н., Ломтев В.Л. Разломы Северного Сахалина: особенности строения и сейсмическая опасность // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. – 2016. – № 3. – С. 44-58.
17. Ломтев В.Л., Патрикеев В.Н. Сейсмические признаки активных разломов Северного Сахалина // Геосистемы переходных зон. – 2017. – № 1. – С. 37-48.

УДК 622.4

DOI:10.7242/echo.2023.3.18

АНАЛИЗ МЕТОДОВ И ПОДХОДОВ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ИНТЕНСИВНЫХ ИСТОЧНИКОВ ТЕПЛОТЫДЕЛЕНИЯ В НАКЛОННЫХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ

М.Д. Попов

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: Данная статья посвящена анализу методов и подходов к моделированию интенсивных источников теплотыделения в наклонных горных выработках в программном комплексе Ansys. В статье рассмотрены основные этапы разработки математической модели от построения начальной геометрии до задания граничных условий и выбора требуемых моделей. Также в статье описаны основные недостатки и преимущества отдельных расчетных пакетов в привязке к решаемой задаче.

Ключевые слова: рудничная вентиляция, устойчивость проветривания, подземный пожар, аварийная ситуация, моделирование.

Введение

В настоящий момент требованием пункта двадцать шесть Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Инструкция по локализации и ликвидации последствий аварий на опасных производственных объектах, на которых ведутся горные работы» [5] устанавливается необходимость производства инженерных расчетов параметров развития пожара, а также определение устойчивости проветривания в вертикальных и наклонных горных выработках при пожаре. При этом данные расчеты целесообразны для выработок с нисходящим проветриванием. Возможная неустойчивость проветривания в таких выработках обусловлена наличием тепловых депрессий, возникающих вследствие интенсивного нагрева воздуха, проходящего по горной выработке. Опасность неустойчивого проветривания в данном случае заключается в изменении направления движения воздушного потока и, как следствие, изменение мероприятий, необходимых для локализации и ликвидации аварии, а также изменение направления движения горнорабочих и горноспасателей в момент аварийной ситуации [7].

При этом на данный момент набор инструментов, позволяющих оценить устойчивость проветривания наклонной выработки в аварийной ситуации в современных программах, предназначенных для расчета рудничной вентиляции, достаточно ограничен.