

УДК 622:833

М. А. ИЛЬЯШОВ, доктор техн. наук, **И. А. ДЕДИЧ**, инж. (ПрАО «Донецксталь» – металлургический завод)

Е. Н. ХАЛИМЕНДИКОВ, канд. техн. наук (ПАО «Шахтоуправление «Покровское»)

В. В. РАДЧЕНКО, канд. техн. наук (ОП «УкрНИИпроект» ГП «НТЦ «Углеинновация»)

В. В. НАЗИМКО, доктор техн. наук (ДонНТУ)

Обоснование методики прогноза мест разрушения стволов дегазационных скважин, пробуренных с поверхности

Предложена комплексная методика прогнозирования сосредоточенных сдвигов стволов дегазационных скважин, пробуренных с поверхности. Методика разработана по результатам исследований цифровой четырехмерной геомеханической модели массива горных пород и откалибрована по результатам натурных наблюдений деформации дегазационных скважин, пробуренных с поверхности. Описано исследование указанных геомеханических процессов комплексным методом, включающим: изучение физико-механических свойств вмещающих пород; анализ гидрогеологии подрабатываемого массива; мониторинг состояния скважин с помощью цифровой глубинной камеры; мониторинг дебита метана и его давления; контроль уровня затопления скважин подземными водами. Основное внимание уделено компьютерному моделированию динамики напряженно-деформированного состояния подрабатываемого массива, в котором размещены дегазационные скважины.

Ключевые слова: сдвижение подработанной толщи, дегазационные скважины, разрушение массива.

Контактная информация: dedich.ia@donetsksteel.com

Комплексное освоение газокугольных месторождений Украины – основа энергетической независимости государства [1]. На сегодня возможности подземной дегазации практически исчерпаны. Вместе с тем дегазация угольных пластов скважинами с земной поверхности сохраняет значительные резервы для повышения интенсивности извлечения ценного энергетического ресурса, особенно с учетом неограниченных возможностей увеличения скорости бурения дегазационных скважин [4]. Сооружение скважин направлено на решение комплекса проблем по обеспечению безопасности ведения подземных горных работ по газовому фактору, снижению негативного воздействия на окружающую природную среду, а также эффективному использованию ресурсов.

Шахтоуправление «Покровское» – угледобывающее пред-

приятие Украины, оснащенное современной горнодобывающей техникой, эффективно использующее возможности переработки угольной продукции. Предприятие отрабатывает полого залегающий угольный пласт d_4 средней мощности на глубине 700 – 900 м. Горно-геологические условия характеризуются как сложные и выражаются в интенсивной нарушенности пласта и вмещающих пород малоамплитудными геологическими нарушениями, высокой природной газоносностью угленосной толщи и агрессивностью подземных вод. Именно потому допустимая нагрузка на очистной забой ограничена по газовому фактору.

В связи с этим в шахтоуправлении применена комплексная система текущей дегазации, основанная на сооружении дегазационных скважин из выработок и с поверхности. Извлекаемая метановоздушная смесь направляется

на когенерационную установку и котельные для переработки в тепло- или электроэнергию генераторами фирмы GE Jenbacher GmbH (Германия).

Системные наблюдения за продолжительностью и интенсивностью дебита дегазационных скважин показали, что их эффективная работа наблюдается только после непосредственной подработки на протяжении от нескольких недель до нескольких месяцев, иногда более года. Существенная вариативность показателей суммарного объема извлечения метана из скважин в абсолютно идентичных на первый взгляд условиях свидетельствует о скрытых резервах способа дегазации.

На рис. 1 показана типичная динамика дебита для дегазационных скважин, пробуренных с поверхности. Газовыделение фиксируют в среднем через 7 дней после подработки скважи-

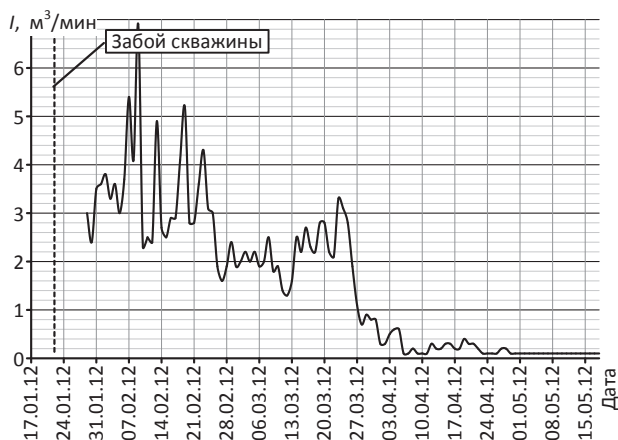


Рис. 1. Интенсивность выделения газа I из дегазационных скважин на примере скважины ДС12, пробуренной на шахтном поле шахтоуправления «Покровское».

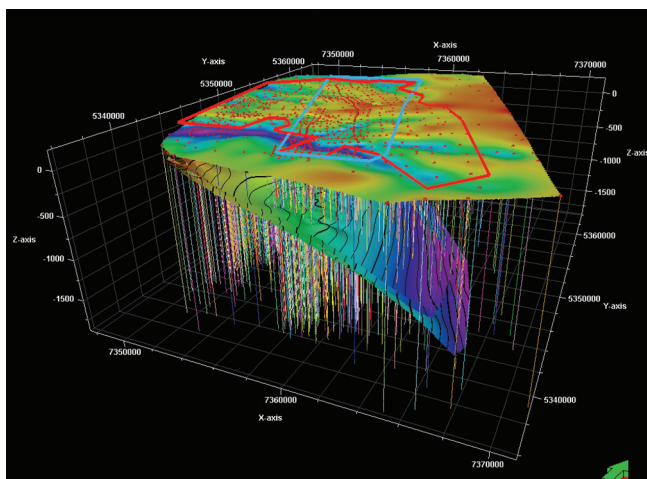


Рис. 2. Модель месторождения шахтного поля шахтоуправления «Покровское» с геологоразведочными и дегазационными скважинами.

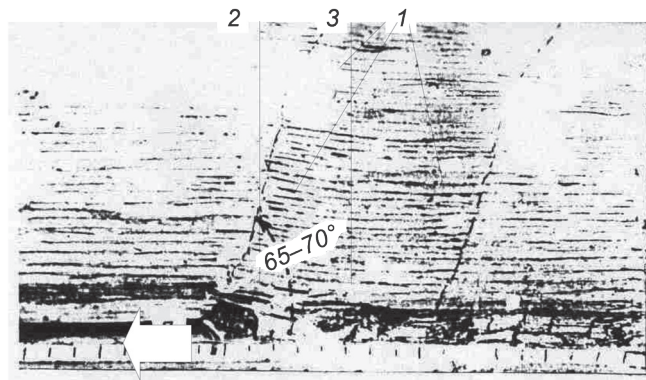


Рис. 3. Вертикальный разрез толщи в области активных сдвижений по результатам исследований ВНИМИ, ДонУГИ, ДонНТУ на моделях, изготовленных из эквивалентных материалов.

ны очистным забоем. Примерно через 10 – 20 сут дебит достигает максимума и составляет 7 – 10 м³/мин. После этого наступает неустойчивое затухание дебита, который практически полностью прекращается после удаления лавы от проекции скважины на 150 – 250 м. Неустойчивый характер дебита дегазационных скважин указал на возможное разрушение крепи скважины или ее затопление подземными водами. Ранее проведенные исследования [3, 4] подтверждают возможность таких явлений. Следовательно, проблемы прогноза разрушений скважин, пробуренных с поверхности, и обоснование способов повышения их устойчивости, которые на сегодня практически не изучены, актуальны.

В результате анализа данных, полученных по дебиту дегазационных скважин, выявлены ранее не исследованные процессы и факторы, во многом определяющие эффективность способа дегазации. Определить основные факторы и свойства изучаемого объекта оригинала, исследовать отклик моделируемой физической системы на изменение параметров и начальных условий позволяет компьютерное моделирование.

Трехмерная модель шахтного поля приведена на рис. 2, на которой показаны геологоразведочные скважины, пробуренные с поверхности, а также расположение разрабатываемого угольного пласта и пластов-спутников. База исходных данных о строении и свойствах толщи пород формируется не только на основе информации, полученной во время геологоразведки, но и по результатам исследований, проводимых в дегазационных скважинах.

Стратиграфический разрез подрабатываемой толщи в центре первой очереди блока № 10, интенсивно разрабатываемого в настоящее время, представлен перемежающимися слоями алевролитов, аргиллитов и песчаников в соотношении 3 : 2 : 1. Реже встречаются известняки, угольные пласты и их спутники нерабочей мощности. Прочность песчаников (пористость 2 – 5 %) на одноосное сжатие изменяется в пределах 40 – 90 МПа. Алевролиты имеют прочность 30 – 60 МПа и содержат от 10 до 60 % глинистых минералов в зависимости от типа цемента. Аргиллиты характеризуются сравнительно низкой прочностью, которая изменяется в диапазоне 20 – 50 МПа, и способны выполнять функции водоупоров и газовых покрышек.

Основной объем метановоздушной смеси, извлекаемой дегазационными скважинами, начинает поступать в скважину после подработки и попадания в зону активных сдвижений. Вид этой зоны в разрезе

зе, проиллюстрированный на рис. 3, получен по данным физического моделирования на эквивалентных материалах. Стрелками 1 указаны наиболее вероятные места разрушения дегазационных скважин. Анализ результатов моделирования свидетельствует, что наиболее вероятная форма разрушения канала скважины должна иметь форму сосредоточенного среза вдоль плоскости напластования. Такие разрушения обусловлены расслоением толщи в зоне активных сдвижений позади движущегося очистного забоя и взаимным проскальзыванием смежных слоев, которые находятся в контакте.

Поверхности расслоения, вдоль которых наиболее вероятно разрушение толщи, а значит и ствола скважины, выделены линиями, совпадающими со слоистостью подрабатываемого массива (см. рис. 3). Наиболее вероятный интервал разрушения любой скважины зависит от расстояния, на которое очистной забой удалился после ее подработки. На рис. 3 условно показан ствол скважины 2, у которого может разрушиться только нижняя или донная часть, поскольку она уже попала в зону наибольших изгибов с возможным расслоением сплошности. В отличие от этого скважина 3 может разрушиться на всем интервале своей длины, поскольку ее нижняя часть уже перешла в зону полных сдвижений, а верхняя часть находится в зоне максимальных изгибов.

Важно, что сосредоточенный срез ствола имеет максимальную амплитуду в зоне наибольших изгибов, а после перехода скважины в зону полных сдвижений амплитуда среза может уменьшиться или исчезнуть. Эти явления сопровождают сложный процесс необратимых сдвижений массива пород. При этом размеры сосредоточенного среза ствола скважины зависят от механических свойств горных пород, физико-механических свойств контактов между смежными породными слоями, а также перепада значений указанных свойств, степени обводненности подрабатываемого массива, скорости подвигания очистного забоя, который подрабатывает скважину, места расположения скважины относительно боковых границ выработанного пространства, т. е. относительно вентиляционного или конвейерного штрека, расстояния до кровли отрабатываемого пласта и других факторов.

Исследование процесса разрушения стволов подрабатываемых скважин находится в плоскости геомеханики необратимых сдвижений подрабатываемой толщи. В качестве алгоритма компьютерного моделирования применен метод конечных разностей для решения системы дифференциальных урав-

нений, описывающих второй закон Ньютона в дифференциальной форме, а также необратимое поведение горных пород в условиях трехмерного напряженного состояния. Таким образом, в явном виде учитывалось время протекания процессов необратимых сдвижений массива горных пород, что дало возможность учесть влияние скорости подвигания лавы.

Расчетная схема модели, с помощью которой изучалась эволюция напряженно-деформированного состояния толщи в процессе отработки лавы, имела ширину 300 м, высоту 700 м, длину вдоль направления подвигания очистного забоя 600 м. Указанные габаритные размеры предоставили возможность расположить выработанное пространство лавы длиной 200 м в модели так, чтобы не нарушить граничные условия моделирования.

Строение толщи вокруг лавы принято в виде типичного слоистого массива, отражающего характерную стратиграфию для условий Донецко-Макеевского и Красноармейского угленосных районов. Мощность наносов составила 40 м, вынимаемая мощность пласта 2 м, длина лавы 200 м, скорость подвигания очистного забоя 100 м/мес. Подвигание моделировалось в пять этапов по 40 м. Рассчитывали напряженно-деформированное состояние с учетом состояния, достигнутого на начало каждого этапа, а в качестве начального состояния системы принимали состояние, полученное на предыдущем этапе подвигания.

На первом этапе решали задачу о напряженном состоянии нетронутого массива и только после этого осуществляли первую выемку заходки на длину 40 м. Такой подход существенно повысил достоверность результатов моделирования, поскольку задача решалась в неупругой постановке. Неупругий вариант решения учитывал запредельное деформирование пород с учетом их дилатансии (изменение объема материала при сдвиговой деформации) и длительной прочности, что также содействовало достоверности результатов моделирования.

На рис. 4 приведен дисбаланс сил в узлах расчетной области по мере подвигания очистного забоя. Первый пик нарушения равновесия массива приурочен к решению задачи о нахождении напряженного состояния нетронутого массива. Далее следуют пять пиков нарушения равновесия, связанных с подвиганием лавы, причем пик 1 отвечает моменту первичной посадки основной кровли. Как видим, эти закономерности хорошо отражают поведение

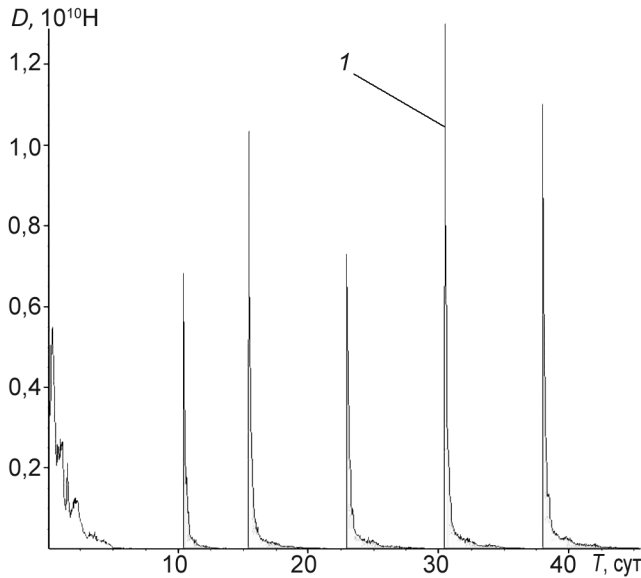


Рис. 4. Изменение неравновесных сил вокруг выработанного пространства лавы по мере ее подвигания.

толщи при отработке лавы в реальном массиве горных пород.

Поскольку предварительный анализ результатов физического моделирования показал, что основной причиной разрушения и возможного перекрытия каналов скважин являются сосредоточенные сдвиги толщи, основное внимание уделялось изучению касательных деформаций. Именно интенсивность касательных деформаций – одна из главных компонент большинства моделей прочности горных пород. Максимум интенсивности деформаций со-

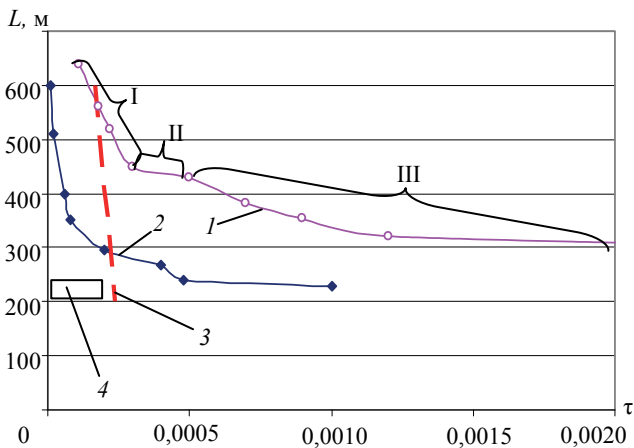


Рис. 5. Распределение интенсивности касательных деформаций по глубине L : 1 и 2 – при отходе лавы на 200 м и на 40 м; 3 – допустимые деформации; 4 – выработанное пространство лавы; I – III – номера интервалов.

ставляет 0,00154 (0,15 %) и наблюдается в окрестности выработанного пространства лавы позади монтажной камеры, от которой отошел очистной забой.

По мере удаления в сторону кровли касательные деформации быстро затухают и на расстоянии 150 м от кровли отработанного пласта на порядок уменьшаются. При дальнейшем отходе лавы от монтажной камеры максимум интенсивности касательных деформаций перемещается в подработанную толщу и они существенно увеличиваются. Так, при достижении расстояния 200 м деформации максимально возрастают до 2 % в непосредственной близости к выработанному пространству обрабатываемой лавы, причем положение максимума приурочено к области, расположенной примерно над средней частью общего выработанного пространства, которое сформировалось на текущий момент.

Анализ сводных распределений касательных деформаций в подработываемой толще для разных расстояний отхода лавы от монтажной камеры (рис. 5) показывает, что они имеют подобную форму кривых и характерные особенности:

интенсивность касательных деформаций, ответственных за возникновение сосредоточенного сдвига вдоль напластования, возрастает с увеличением выработанного пространства или отходом лавы от монтажной камеры;

для одного и того же отхода лавы деформации затухают по мере удаления вверх от кровли отработанного пласта;

максимум деформаций приурочен к области, расположенной примерно над средней частью выработанного пространства;

графики распределения максимальных деформаций имеют особенности, в частности, следующие.

По мере удаления вверх от кровли отработанного пласта деформации вначале затухают с замедлением (интервал III, см. рис. 5). На этом участке темпы падения деформаций изменяются от $6 \cdot 10^{-4}$ до $1 \cdot 10^{-5}$. Затем на интервале II опасные деформации затухают с ускорением $4 \cdot 10^{-6}$. Характерно, что конец интервала II приурочен к высоте, примерно равной длине лавы, которая подработывает толщу. При дальнейшем увеличении расстояния от кровли отработываемого пласта деформации уменьшаются в затухающем темпе $1 \cdot 10^{-5} - 1 \cdot 10^{-6}$ (интервал I), падение которого пропорционально удалению от кровли. В наносах интенсивность касательных деформаций затухает практически до нуля.

Исследования также показали [5], что с увеличением темпов подвигания лавы касательные деформации в подрабатываемой толще существенно уменьшаются. Характерно, что степень затухания амплитуды касательных деформаций в непосредственной близости к отработываемому пласту (т. е. в районе основной и непосредственной кровель) максимальна. На большем удалении от кровли отработываемого пласта касательные деформации тоже падают с ростом скорости подвигания лавы, однако темпы ее падения меньше.

Полученные закономерности дают возможность сделать предварительные выводы:

наиболее вероятно, что ствол скважины будет поврежден деформацией сосредоточенного среза после подработки скважины и удаления лавы от проекции скважины на расстояние, не меньше половины длины лавы;

вероятность сосредоточенного среза ствола скважины при прочих равных условиях увеличивается с приближением к кровле отработываемого пласта (чем ближе участок скважины к кровле пласта, тем больше вероятность ее сосредоточенного среза). Кроме того, вероятность сосредоточенного среза ствола скважины возрастает по мере отхода лавы от монтажной камеры и стабилизируется на максимуме после отхода лавы на расстояние, равное ее длине.

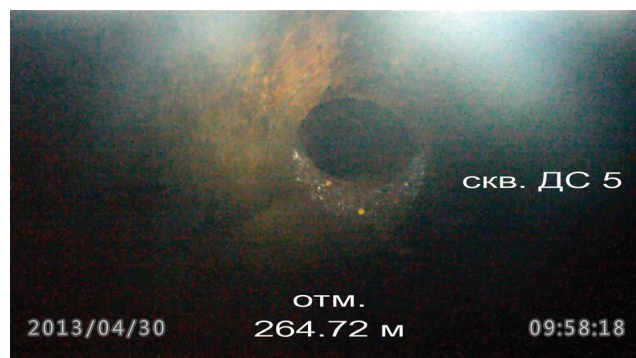
С практической точки зрения представляет интерес определение допустимого уровня интенсивности касательных деформаций, при превышении которого возможен сосредоточенный сдвиг в слоистой толще вдоль напластования, а следовательно, ствол дегазационной скважины нарушится сосредоточенным срезом. Для выполнения прогноза сосредоточенных срезов ствола следует учитывать,

что разрушение слоистого массива в виде сосредоточенного сдвига происходит в условиях трехмерного напряженного состояния, которое реализуется во времени (т. е. зависит от скорости подработки массива), и в условиях влияния подземных вод (они, как известно, уменьшают прочность вмещающих пород).

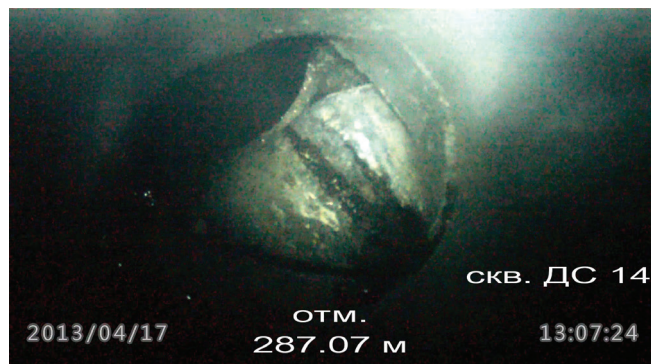
Для учета указанных факторов использованы результаты испытаний горных пород в условиях трехмерного напряженного состояния [6]. Прогноз усложняется тем, что деформирование и даже разрушение подрабатываемой толщи происходит как правило в режиме заданной деформации. Образцы горных пород в данном случае необходимо испытывать на жестких прессах. В статье использованы результаты испытаний зарубежных лабораторий.

В условиях одноосного сжатия образец разрушается при достижении деформации 0,2 % в направлении действия испытательной силы и 0,1 % в поперечном направлении. При всестороннем сжатии, уровень которого соответствует глубине примерно 1300 м, предельно допустимая деформация, при превышении которой начинается разрушение образца породы, увеличивается в 5 раз и доходит до 1 %.

Предельное значение деформаций сопоставимо с деформациями, которые возникают в подрабатываемой толще горных пород, а значит сосредоточенный срез ствола дегазационной скважины, пробуренной с земной поверхности, весьма вероятен. С ростом глубины вероятность сосредоточенного сдвига быстро увеличивается и на глубине 100 м (это соответствует всестороннему напряжению сжатия примерно на уровне 2,5 МПа) в 5 раз превышает вероятность разрушения породы от растяжения.



а



б

Рис. 6. Результаты мониторинга скважин ДС 5 (а) и ДС 14 (б).

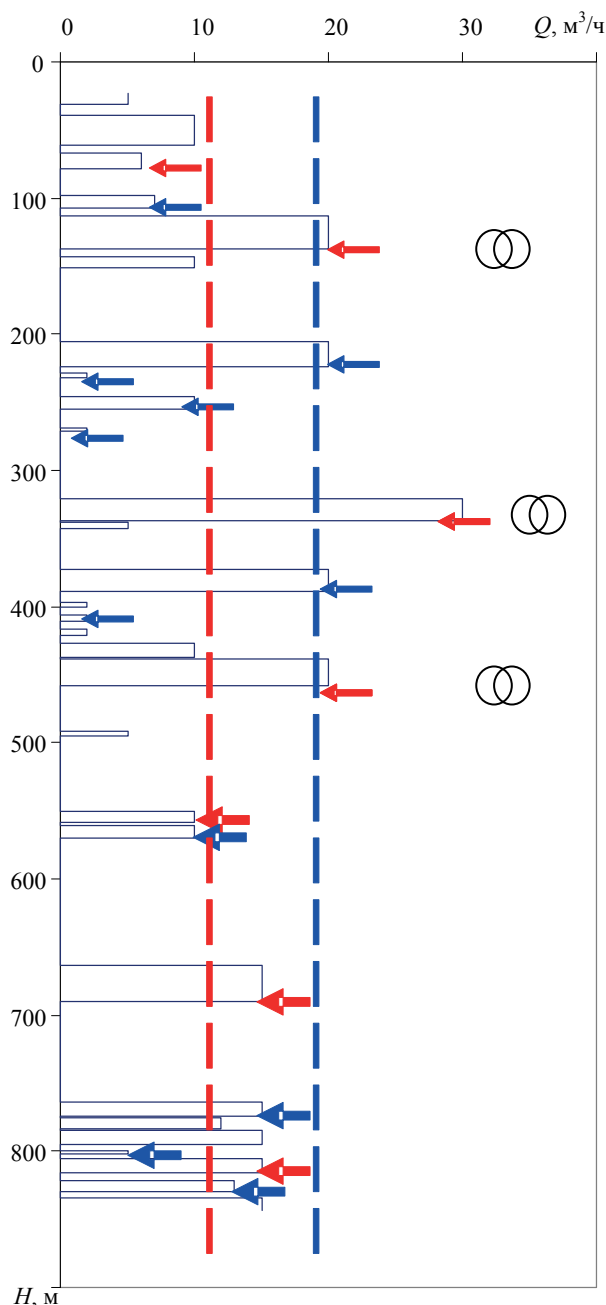


Рис. 7. Совмещенная схема распределения водопритоков и положения слоев аргиллитов и алевролитов, содержащих глинистый цемент.

Дополнительно существуют три фактора, которые значительно понижают допустимый уровень деформаций:

первый – обводнение массива горных пород. Наиболее чувствительны к обводнению породы, содержащие значительное количество глинистого цемента (например, аргиллиты и алевролиты с гли-

нистым цементом). Предел прочности породы может снизиться в несколько раз при ее размокании, особенно в случае, когда она содержит значительное количество глинистых минералов;

второй – связан с масштабным эффектом [7, 8]. Фактически масштабный эффект влечет за собой ослабляющее действие трещин и отдельностей, в результате прочность породы, определенная в образце, может быть в несколько раз меньше при переходе к массиву от образца;

третий – зависит от скорости нагружения образца: чем она меньше, тем предел прочности ниже [9 – 10]. Фактически скорость нагружения зависит от темпов подвигания лавы [11]. Экспериментально подтверждено, что с уменьшением скорости деформирования образца падает его прочность, хотя в обводненных образцах эффект выражен слабо.

При сопоставлении расчетных деформаций массива на сдвиг для отхода лавы от монтажной камеры на 200 м и оценку допустимого уровня этих деформаций следует однозначный вывод, что вероятность сосредоточенного среза ствола вертикальной скважины, пробуренной с поверхности и подверженной прямой подработке длинным очистным забоем, весьма высока на любой глубине. Возможно, исключение касается только наносов, где интенсивность касательных деформаций незначительна.

Для экспериментального подтверждения полученной теоретической оценки были выполнены специальные инструментальные наблюдения полостей 20 дегазационных скважин, подработанных лавами. Мониторинг полостей скважин осуществляли путем опускания глубинной цифровой камеры с помощью ручной лебедки на глубину 100 – 750 м. Специальная капсула для герметизации цифровой камеры прошла специальные испытания в МакНИИ на герметичность и гидростатическую стойкость.

Данные мониторинга подтвердили результаты теоретических исследований, выполненных авторами статьи. На рис. 6 приведены характерные снимки участков дегазационных скважин, на которых произошел сосредоточенный срез стволов. В некоторых случаях срез превышал 150 мм, а это больше радиуса скважины. Доказано [12], что при перерезывании ствола дегазационной скважины сосредоточенной деформацией сдвига на величину более, чем радиус этой скважины, резко возрастает ее аэродинамическое сопротивление, в результате она практически перестает каптировать метан.

На рис. 7 приведена диаграмма водопритоков из водоносных слоев песчаника, привязанная к структурной колонке одной из скважин (не показана), пробуренной с земной поверхности на отводе шахтоуправления «Покровское». Водопритоки колеблются в пределах от 2,5 до 30 м³/ч. Красными стрелками выделены водоносные слои, которые подстилаются аргиллитами, и синими стрелками – алевролитами с глинистым цементом. Вертикальными штриховыми линиями обозначены цветом уровни, отвечающие допустимым сочетаниям водопритоков и содержанию глинистых минералов в подстилающих породных слоях. При превышении указанных уровней весьма вероятно сосредоточенный срез скважины на участке контакта водоносного слоя с глинистой подстилающей породой.

На трех участках, расположенных на глубинах 137, 328 и 457 м, цифровая глубинная камера зафиксировала сосредоточенные срезы скважины. Именно здесь фактическое сочетание водопритоков значительно превышало допустимые уровни, что свидетельствует о достоверности результатов исследований и подтверждает надежность разработанной методики.

Выводы. С учетом выполненных исследований разработана методика оценки возможных участков и интервалов дегазационных скважин, пробуренных с земной поверхности, в пределах которых возможно нарушение ствола в виде сосредоточенной деформации – среза, которая учитывает: стратиграфическое строение массива горных пород, подрабатываемого длинным очистным забоем; физико-механические свойства вмещающих пород и их контактов; степень обводненности массива и отдельных слагающих его породных слоев, темпы подвигания лавы, глубину расположения участков дегазационных скважин и другие факторы, которые существенно влияют на вероятность разрушения ствола скважины.

Дальнейшими исследованиями предусмотрено уточнение параметров методики в целях повышения ее надежности и точности получаемых результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Радченко В. В. Извлечение и использование метана – энергетическое будущее Донбасса / В. В. Радченко // Уголь Украины. – 2012. – № 3. – С. 47 – 49.
2. Кожушок О. Д. Скоростное сооружение дегазационных скважин с поверхности / [О. Д. Кожушок, М. А. Ильяшов, А. В. Агафонов и др.] // Уголь Украины. – 2013. – № 3. – С. 35 – 37.
3. Бокий Б. В. Исследование физики потока газа к поверхностным скважинам / Б. В. Бокий, П. Е. Филимонов, С. Г. Ирисов // Уголь Украины. – 2013. – № 5. – С. 26 – 30.
4. Кулибаба С. Б. Деформации крепи технических скважин при их подработке / С. Б. Кулибаба, Б. В. Хохлов // Проблеми гірського тиску: зб. наук. пр. – Донецьк: ДонНТУ, 2007. – Вип. 15. – С. 141 – 150.
5. Назимко И. В. Исследование влияния скорости подвигания очистного забоя на характер деформирования покрывающих пород / И. В. Назимко // Вісник КТУ: зб. наук. пр. – Кривий Ріг, 2006. – Вип. 5 (15). – С. 41 – 45.
6. Kwaśniewski M. Volume changes in sandstone under true triaxial compression conditions / M. Kwaśniewski, M. Takahashi, X. Li // The 10-th International Society for Rock Mechanics Congress–Technology roadmap for rock mechanics. – South African Institute of Mining and Metallurgy, 2003. – P. 124 – 130.
7. Bohat D. Fracture characterization of chalk in uniaxial und triaxial tests by rock mechanics, fractographic and electromagnetic radiation methods / D. Bahat, A. Rabinovich, V. Frid // Journal of Structural geology. – 2001. – Vol. 23. – P. 1531 – 1547.
8. Шашенко А. Н. Масштабный эффект в горных породах / А. Н. Шашенко, Е. А. Сдвижкова, С. В. Кужель. – Днепропетровск: Арт-пресс, 2004. – 132 с.
9. Ильницкая Е. И. Свойства горных пород и методы их определения / Е. И. Ильницкая, Р. И. Тедер, Е. С. Ватолин, М. Ф. Кунтыш. – М.: Недра, 1969. – 392 с.
10. Díaz-Rodríguez J. Strain-Rate Effects in Mexico City Soil / J. Díaz-Rodríguez, Martínez-Vasquez, J. Santamarina // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. – 2009. – Vol. 135. – No. 2. – P. 300 – 305.
11. Назаренко В. А. Влияние скорости подвигания очистного забоя на движение земной поверхности / В. А. Назаренко // Наук. вісник НГА України. – № 13. – 2002. – С. 16 – 20.
12. Назимко В. В. Исследование связи между деформацией дегазационной скважины и ее аэродинамическими параметрами / В. В. Назимко, А. И. Демченко, П. А. Брюханов // Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах: сб. науч. тр. – Макеевка: МакНИИ, 2010. – № 2 (26). – С. 25 – 42.