

УДК 621.3:622

А.А. Яйцов (инж.),

ПрАО «Донецксталь», г. Донецк, Украина

И.В. Назимко (канд. техн. наук),

УкрНИМИ НАН Украины, г. Донецк, Украина

Д.М. Никулин (студ.), **В.В. Назимко** (д-р техн. наук, проф.)

ДонНТУ, г. Донецк, Украина

ОБОСНОВАНИЕ ГЛУБИНЫ ГЕРМЕТИЗАЦИИ ДЕГАЗАЦИОННОЙ СКВАЖИНЫ КАК ФУНКЦИИ ГОРНОГО ДАВЛЕНИЯ

Деформации устья дегазационной скважины рассмотрено как функцию деформаций пород кровли подготовительной выработки, с которой эта скважина пробурена. Установлена зависимость необходимой глубины герметизации скважины от уровня утечек метана и величины деформации. Обоснованы мероприятия по обеспечению устойчивости скважины.

ВВЕДЕНИЕ

Энергетическая независимость Украины неразрывно связана с развитием угольной отрасли. Практически все отечественные месторождения каменного угля характеризуются высокой газоносностью, находятся на значительных глубинах и разрабатываются подземным способом. В связи с этим высокопроизводительная подземная добыча угля невозможна без дегазации спутников и газоносных песчаников, из которых поступает в рабочее пространство действующего забоя от 30 до 80% дополнительного взрывоопасного газа [1 - 2].

Наибольшая часть взрывоопасного шахтного метана улавливается через подземные дегазационные скважины, которые бурят из подготовительных выработок. К сожалению, в условиях украинских угольных шахт основная доля метана каптируется дегазационными скважинами после подработки, расслоения и разрушения массива горных пород позади действующей лавы. На рис. 1 приведены типичные результаты мониторинга газовыделения из дегазационных скважин по данным [2 - 4]. Положительными числами обозначено расстояние до скважины впереди ла-

вы, отрицательными после прохода лавы. Скважины отличались углом разворота относительно оси выработки, из которой они были пробурены. Видно, что независимо от параметров дегазационных скважин дебит газа впереди лавы до ее подхода на 10 м является несущественным и составляет в среднем $0,5 \text{ м}^3/\text{мин}$. Лишь после прохода лавы и подработки массива дегазационная скважина стала каптировать значительное количество метана, причем максимум составил $4-5 \text{ м}^3/\text{мин}$ после отхода лавы на 30-40м. При последующем отходе лавы от скважины интенсивность газоулавливания начала затухать и на удалении 100м от очистного забоя упала до $1-2 \text{ м}^3/\text{мин}$.

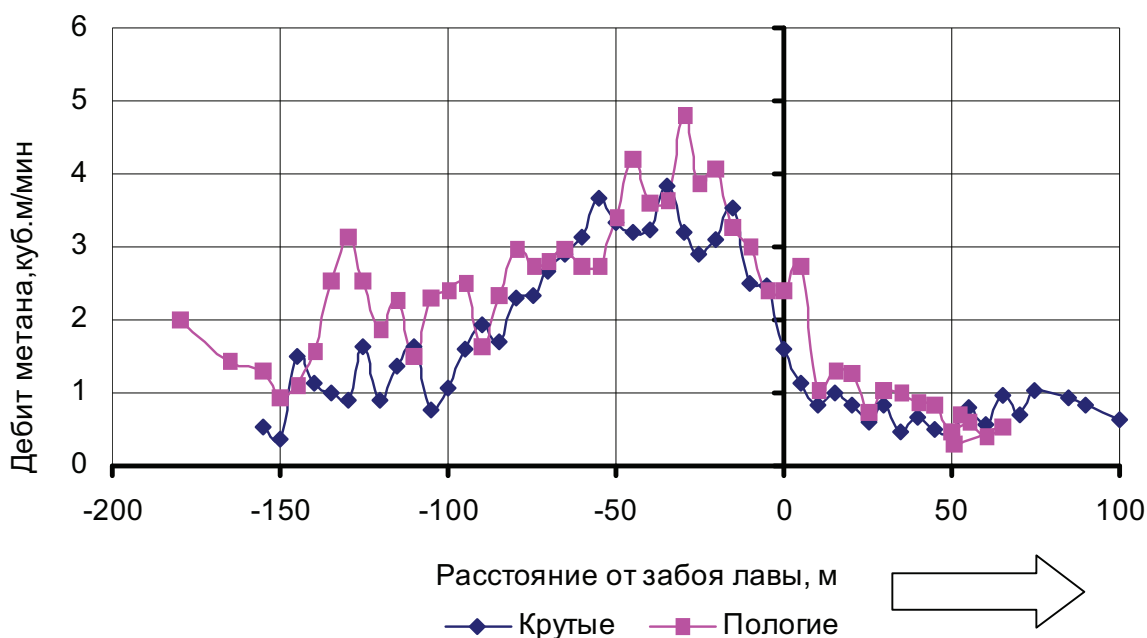


Рис. 1. Изменение дебита подземных дегазационных скважин в зависимости от расстояния до очистного забоя [3]

Очень похожая динамика газоотвода регистрируется на угольных шахтах Германии [5] (рис. 2). Максимум интенсивности улавливания метана наблюдается после подработки толщи и удаления лавы на расстояние 30м. Наиболее активная стадия газовыделения наблюдается до отхода лавы на 120м.

Интегрируя скорость газовыделения на рис. 1 и 2, можно показать, что более 90% газа улавливается дегазационными скважинами позади лавы. Геомеханическая причина такого эф-

фекта объясняется расслоением и разрушением подработанной толщи позади движущейся лавы в зоне активных сдвижений. Это содействует интенсивному газовыделению благодаря раскрытию сообщающихся пор, раскрытию существующих и образованию новых трещин в массиве горных пород. Указанный геомеханический эффект сопровождается десорбцией газа и увеличением интенсивности его фильтрации в сторону выработанного пространства благодаря возрастанию проницаемости массива на несколько порядков. Так согласно [1, 6] проницаемость угленосного массива на глубинах 600-1000м составляет доли дарси в то время как после его подработки она может увеличиться до тысяч и десятков тысяч миллидарси.

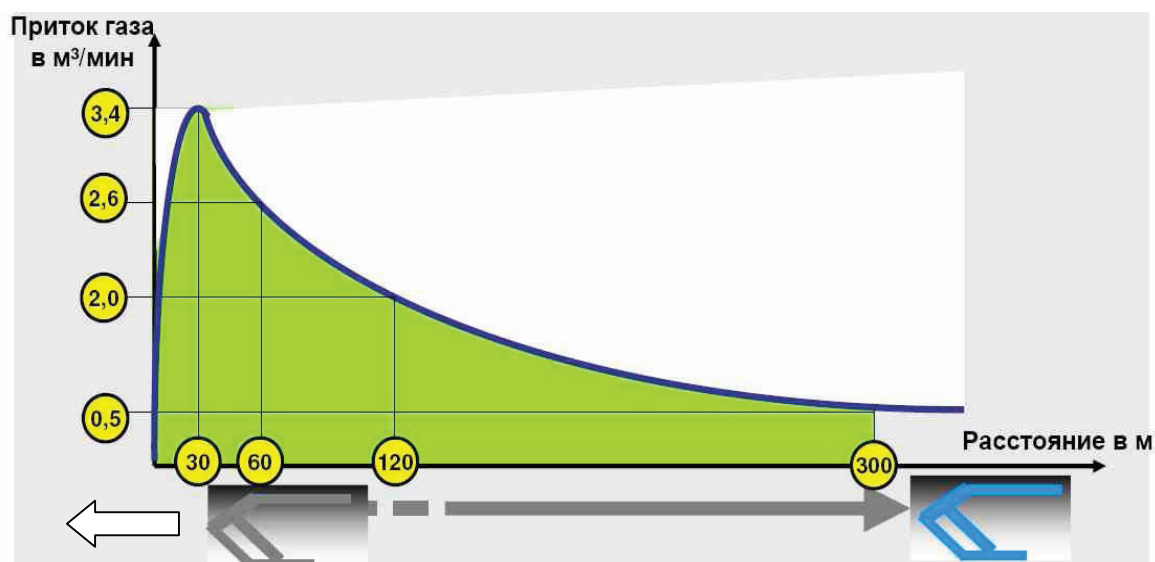


Рис. 2. Изменение дебита подземных дегазационных скважин в зависимости от расстояния до очистного забоя по типичным данным из опыта германской угольной шахты [5]

В зоне активных сдвижений действуют два противоречивых геомеханических фактора: с одной стороны разрушение подработываемой толщи содействует активизации десорбции и фильтрации газа, а с другой разрушению дегазационных скважин, которые пробурены именно в область активных сдвижений, где процесс разрушения пород является наиболее интенсивным. Поскольку дегазационные скважины бурятся из подготовительных

выработок, находящихся под негативным влиянием горного давления, наибольшему разрушению подвержены устья скважин. В связи с этим главное внимание исследователей должно быть уделено изучению процесса совместного разрушения вмещающих подготовительную выработку пород и устья дегазационной скважины, которое находится в области влияния подготовительной выработки. Решение этой задачи описывается в настоящей статье.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ ТОЛЩИ В ОКРЕСТНОСТИ СОПРЯЖЕНИЯ ЛАВЫ С ПОДГОТОВИТЕЛЬНОЙ ВЫРАБОТКОЙ НА КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ

В связи с тем, что задача совместного разрушения пород вокруг подготовительной выработки и устья дегазационной скважины, которая пробурена из этой выработки является сложной и должна решаться только в трехмерной постановке, использовался метод конечных элементов.

На рис. 3 приведена расчетная схема, на которой позицией 1 показан очистной забой,двигающийся в направлении, указанном стрелкой. Позиция 2 обозначает выработанное пространство, в окрестности которого происходят активные сдвигения, содействующие разрушению вмещающих выработку 3 пород и дегазационной скважины 4, которая пробурена с данной выработки. Процесс разрушения вмещающих пород моделировался с помощью модели Дракера-Прагера с применением теории прочности Кулона-Мора и учетом разуплотнения разрушенных пород.

Следует подчеркнуть, что массив горных пород вокруг подготовительной и очистной выработки, а также в окрестности ствола дегазационной скважины испытывает как непрерывные, так и дискретные деформации. Непрерывные деформации характеризуются плавным их изменением в пространстве (производные от величин этих деформаций всегда имеют определенное конечное значение). Дискретные деформации характеризуются скачкообразностью, прерывистостью (производная таких деформаций по координатам пространства неопределенна и терпит разрыв). Дискретные деформации еще называют сосредоточенными. Наиболее характерными сосредоточенными деформациями

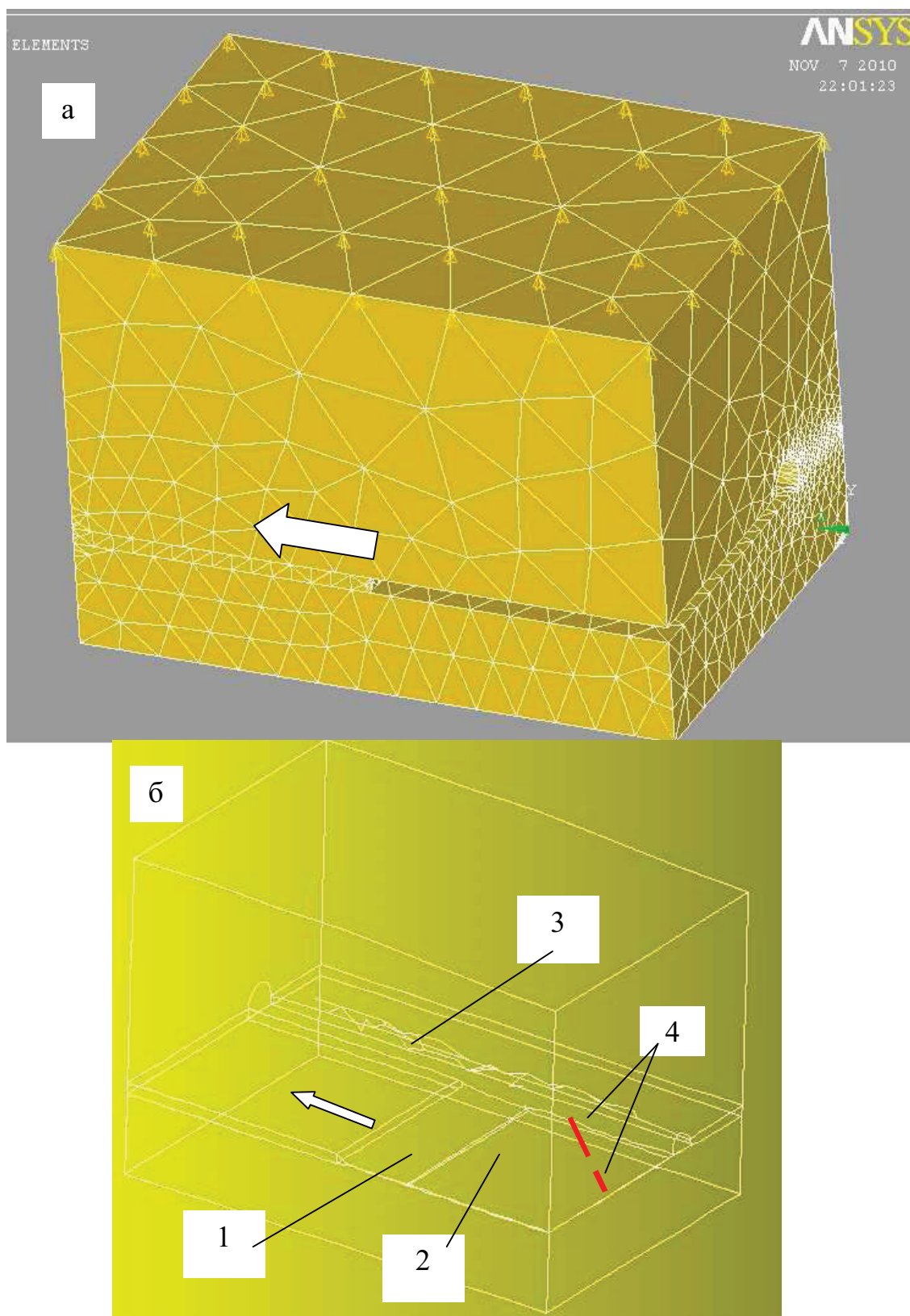


Рис. 3. Цифрова модель для дослідження напружено-деформованого стану сопряження лави со штреком: 1- робоче простір очистного забоя, 2 – виробане простірство, 3 – дегазаційна скважина

являются расслоения по контактам смежных слоев и сосредоточенный сдвиг по контакту берегов трещины, который является следствием скольжения одного берега трещины относительно другого.

Анализ непрерывных деформаций. На рис. 4 приведена эволюция распределения касательных напряжений в плоскости сечения подготовительной выработки по мере подвигания очистного забоя. Эти напряжения являются наиболее опасными с точки зрения возможного разрушения массива горных пород в объемном напряженном состоянии. На фрагменте А видно, что как только окно лавы подходит к точке наблюдения, со стороны нетронутого массива в кровле выработки возникает область 1 повышенных касательных напряжений. После удаления лавы на расстояние 50м происходит сжатие угольного пласта и охранного сооружения и возникает несколько зон повышенных касательных напряжений (фрагмент Б). Так в кровле со стороны нетронутого массива 2 наблюдается максимальный уровень касательных напряжений, которые возбуждают угловую деформацию вмещающих пород против часовой стрелки и вращают массив в сторону полости выработки. Указанные напряжения ответственны за разрушение пород непосредственной кровли и в первую очередь за деформации устьев дегазационных скважин, если они бурятся на массив. Аналогичные касательные напряжения и противоположные по знаку возникают в почве (область 3). Эти напряжения возбуждают пучение пород почвы и выдавливание их в полость штрека.

Наиболее интенсивная динамика касательных напряжений наблюдается вокруг охранного сооружения. Повышенные напряжения сдвига возникают как со стороны подготовительной выработки (зоны 4 и 5), так и у границы с выработанным пространством (зоны 6 и 7). Эти напряжения ответственны за обрез непосредственной кровли за охранным сооружением (область 6), а также за разрушение устьев дегазационных скважин, которые бурятся на выработанное пространство.

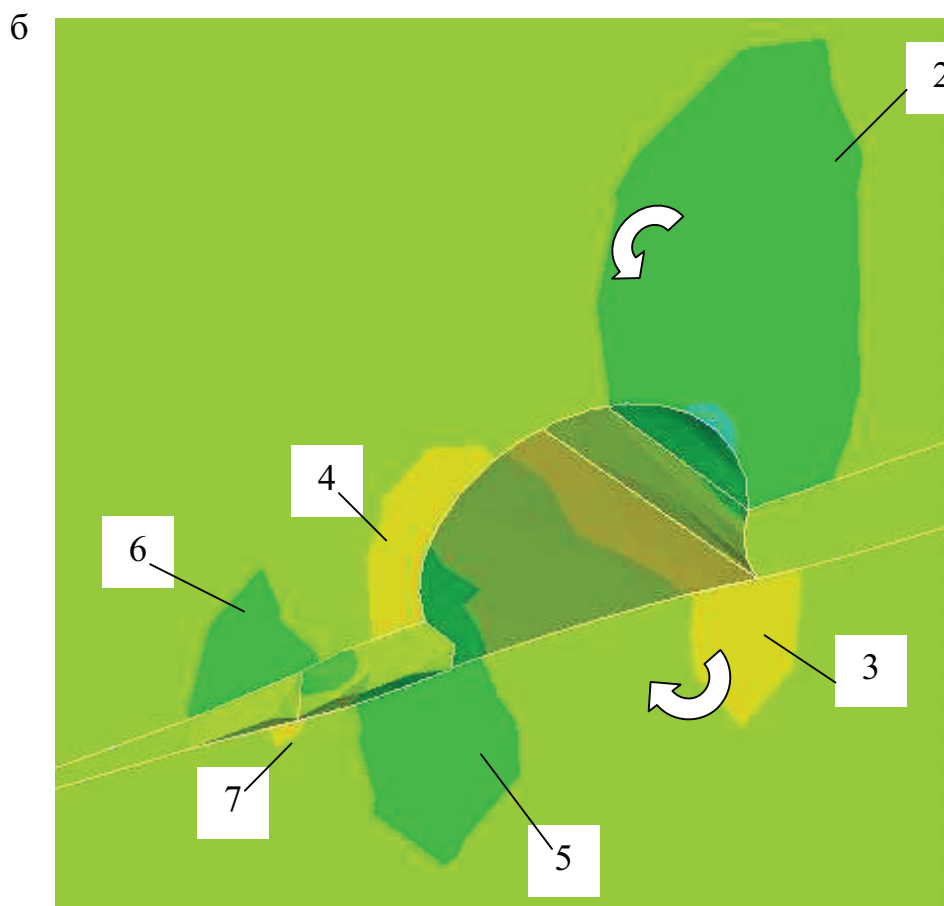
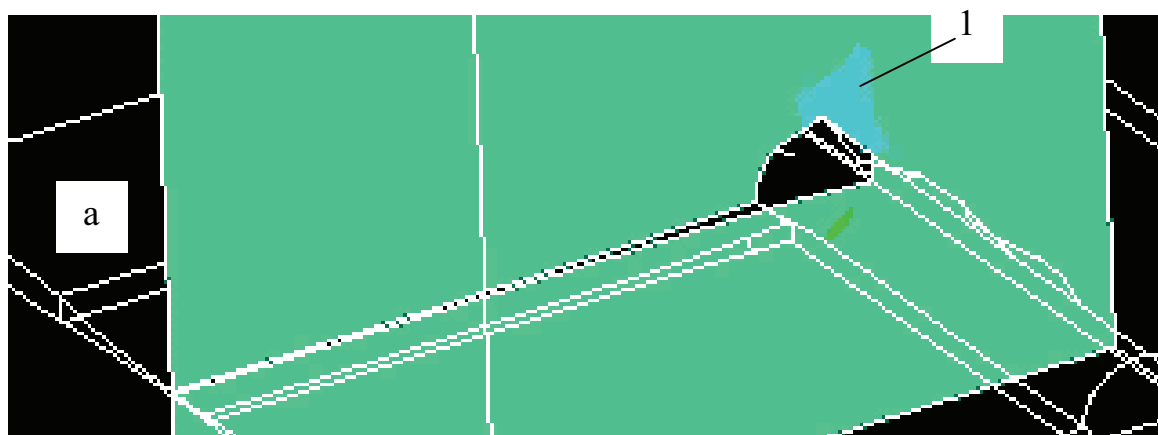


Рис. 4. Изменение касательных напряжений в плоскости сечения выработки

На рис. 5 показана серия слайдов, иллюстрирующих процесс развития разрушений. Так напротив окна лавы и до момента заметного сжатия охранного сооружения разрушения развиваются в основном со стороны нетронутого массива 1, где наблюдается как уже отмечалось высокий уровень нормальных и касательных напряжений (фрагмент А). Породы непосредственной кровли пласта, примыкающие к штреку на его сопряжении с лавой оседают без особого разрушения.

Наиболее выраженным на этой стадии будет расслоение пород кровли, что может негативно сказаться в виде увеличения подсосов воздуха через устья дегазационной скважины и снижение эффективности ее работы. Именно против такой деформации применяют герметизацию устья дегазационной скважины. Моделирование дает возможность обосновать необходимую и достаточную глубину герметизации, поскольку достаточно обоснованных рекомендаций по выбору глубины герметизации нет.

Однако как только охранное сооружение принимает на себя основную нагрузку подработанной и оседающей толщи, процесс разрушения пород вокруг охранного сооружения становится преобладающим (позиция 2 на фрагменте Б). После удаления лавы на значительное расстояние в боковой стенке выработки со стороны нетронутого массива и в окрестности охранного сооружения развиваются зоны интенсивного разрушения вмещающих пород, а в кровле выработки происходит расслоение, что является потенциальной опасностью для устья дегазационной скважины (фрагмент в).

Впереди движущегося очистного забоя возникает зона отжима пласта и опережающего разрушения пород кровли 3, а позади посадочного ряда механизированной крепи возникает область обрушения подработанных пород кровли 4.

Видно, что при податливом охранном сооружении больше разрушаются породы кровли со стороны нетронутого массива, а породы непосредственной кровли со стороны выработанного пространства оседают с расслоением. Расслоение в окрестности устья дегазационной скважины приводит к подсосам воздуха и снижению эффективности дегазации из-за разбавления метана, а также падения вакуума.

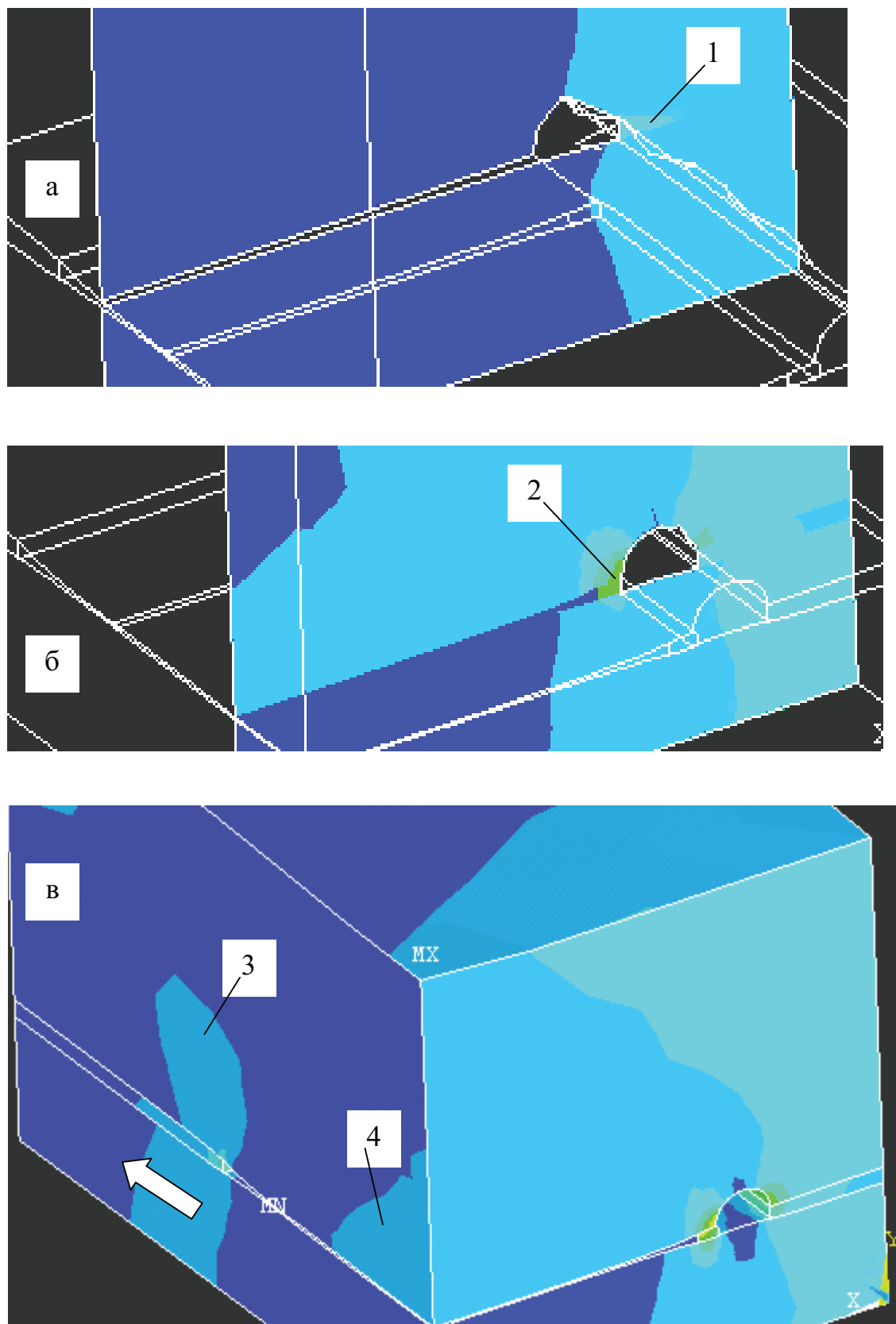


Рис. 5. Развитие зон запердельного состояния вокруг выработки и сопряжения ее с лавой

На рис. 5а показан процесс необратимого деформирования толщи вокруг выемочного штрека. На данном фрагменте лава с охранным сооружением расположены справа. Возможное положение дегазационных скважин показано пунктирными линиями. По деформациям элементов хорошо заметно, что при интенсивном деформировании вмещающих пород опасность разрушения устья дегазационной скважины существует при любых вариантах ее заложения относительно контура выемочного штрека. Это свидетельствует о сложности проблемы обеспечения устойчивости ствола подземной дегазационной скважины.

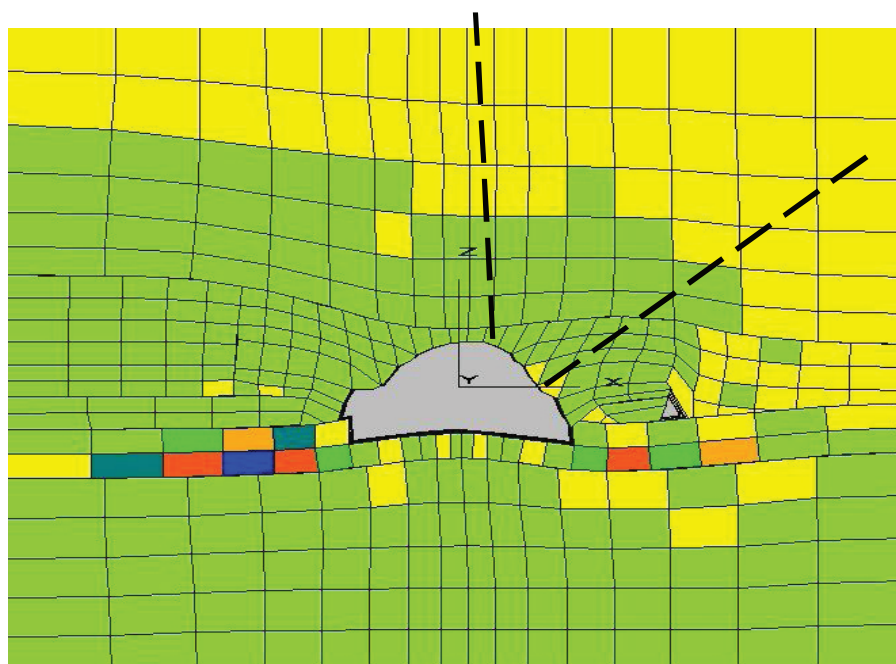


Рис. 5а. Характер динамики разрушения крепи и вмещающих пород в зоне активных сдвижений

Сосредоточенные деформации. Анализ перераспределений горизонтальных сдвижений массива вокруг выработки и скважины свидетельствует о том, что заметные сдвигения в плоскости напластования вдоль линии падения (рис. 6) и простирания (рис. 7) начинаются только после прохода лавы, то есть в зоне активных сдвижений. При этом примыкающие породы непосредственной кровли к контуру подготовительной выработки имеют тенденцию смещаться в сторону падения (указано стрелкой вправо на рис. 6), что является следствием смещений массива у сопря-

жения в полость штрека. Вышележащие же породы основной кровли смещаются в сторону восстания, то есть на выработанное пространство отработываемой лавы (стрелка влево). Вторая тенденция является следствием процесса сдвижения массива вокруг выработанного пространства лавы. Таким образом, две противоположные тенденции являются следствиями сдвижений подрабатываемой толщи вокруг малой (подготовительная выработка) и большой (лава) геомеханических систем.

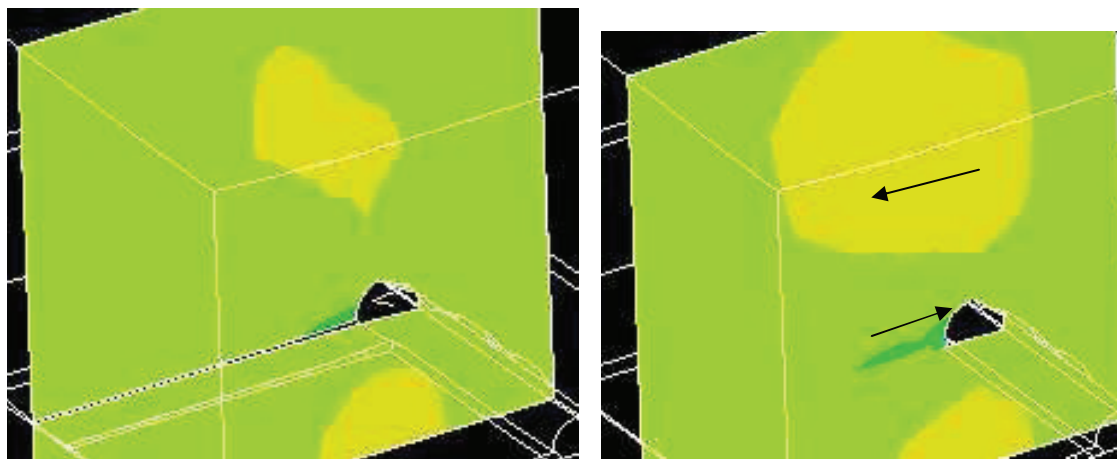


Рис. 6. Распределение горизонтальных сдвижений в плоскости сечения штрека

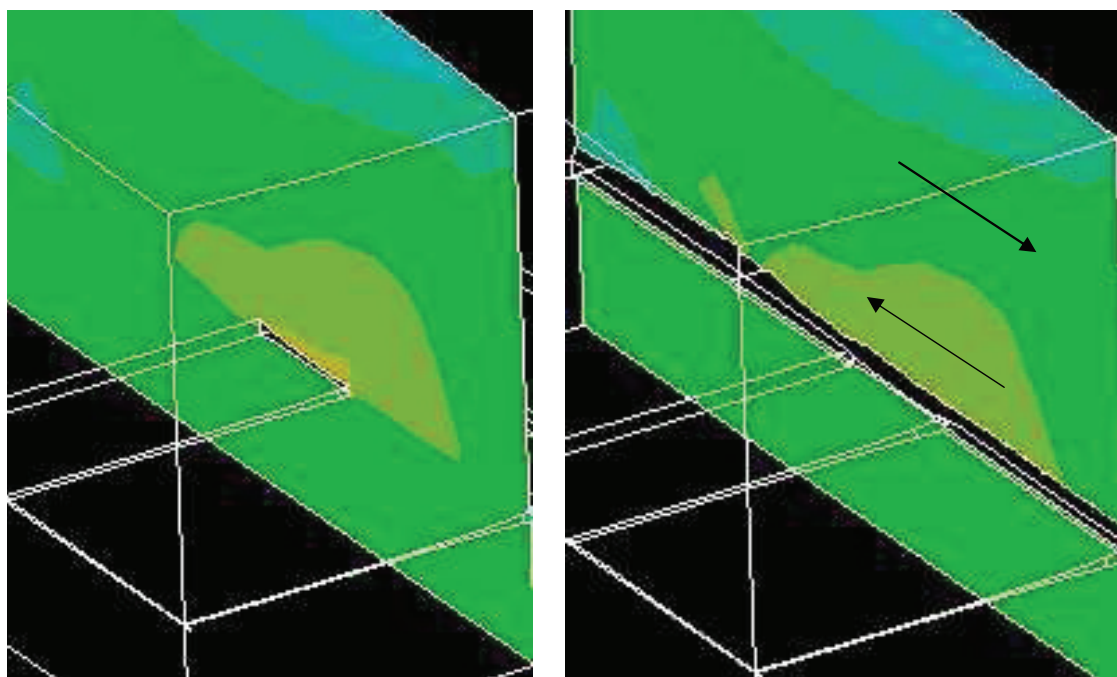


Рис.7. Распределение сдвижений вдоль оси выработки

С позиций охраны устья дегазационной скважины такие тенденции сдвижений в плоскости напластования весьма опасны, поскольку очевидно, что они порождают сосредоточенный срез ствола скважины. На рис. 7 видно, что сдвигения в плоскости напластования вдоль линии простирания или вдоль оси выработки порождают аналогичные сосредоточенные сдвиги толщи в плоскости породных слоев подрабатываемой кровли. При этом в непосредственной кровле сдвигение вдоль напластования направлено в сторону движения лавы, то есть массив движется вдогонку за лавой.

Породы же основной кровли наоборот, сдвигаются в сторону выработанного пространства, то есть в направлении, противоположном движению лавы. Характерно, что наибольшие величины сдвижений наблюдаются на расстоянии нескольких метров от сопряжения лавы со штреком со стороны выработанного пространства (см. левый фрагмент рис. 7). Значительные градиенты сдвижений вдоль оси выработки отмечаются также над полостью подготовительной выработки (правый фрагмент). Именно через указанные области бурится подавляющее число дегазационных скважин (то есть на выработанное пространство действующей лавы). Поскольку устье скважины при этом неизбежно пересекает данные области, это увеличивает вероятность сосредоточенного сдвига ствола скважин и выхода ее из строя, или, по крайней мере, снижения эффективности дегазации.

Указанные тенденции смещений пород кровли в плоскости напластования весьма опасны для ствола дегазационной скважины, так как сосредоточенные срезы возникают под углом, близким к перпендикулярному к оси скважины, и кроме этого максимум опасных деформаций сосредоточенного среза наблюдается в зоне активных сдвижений, в пределах которой происходит наиболее интенсивная дегазация спутников и газоносных песчаников, залегающих в кровле отрабатываемого пласта.

Учитывая важность установленных закономерностей на цифровой модели, они проверялись шахтными инструментальными наблюдениями.

ИЗМЕРЕНИЕ СОСРЕДОТОЧЕННЫХ ДЕФОРМАЦИЙ СТВОЛОВ ДЕГАЗАЦИОННЫХ СКВАЖИН

Для измерения пространственных параметров деформаций дегазационных скважин использованы основанные на аналитической геометрии преобразования координат при повороте координатных систем на угол разворота дегазационной скважины и угол ее подъема. На рис. 8 показано соотношение таких систем. Система координат, в которой производятся непосредственные измерения, привязана к скважине. При этом ось X^1 совпадает с осью измеряемой скважины, ось Y^1 ориентирована вдоль простирания то есть горизонтальна а ось Z^1 перпендикулярна им. Ось OO направлена вдоль оси горизонтальной выработки, с которой пробурена дегазационная скважина.

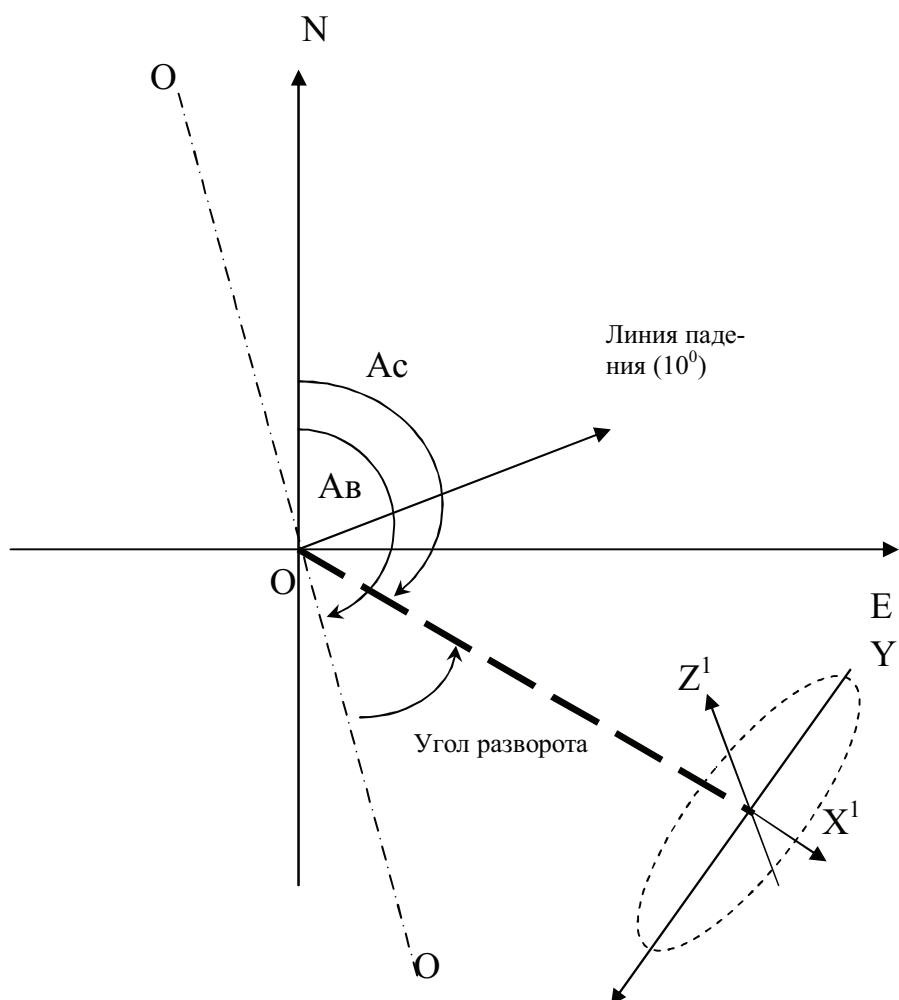


Рис.8. Соотношение координат основной системы и скважины

Исчерпывающая информация об элементах залегания сосредоточенного сдвига заключается в пространственном положении его плоскости, величине и направлении сдвига. Все эти элементы можно получить внутри скважины в системе координат, связанной со скважиной. На рис. 9 приведен вид внутреннего пространства дегазационной скважины, если смотреть в нее через устье. При сосредоточенном сдвиге из устья будет виден полумесяц породного уступа 1F23, который образовался в процессе перерезания ствола скважины. Для минимизации погрешности определения координат целесообразно определять положения точек 1, 2 и 3, поскольку они максимально разнесены.

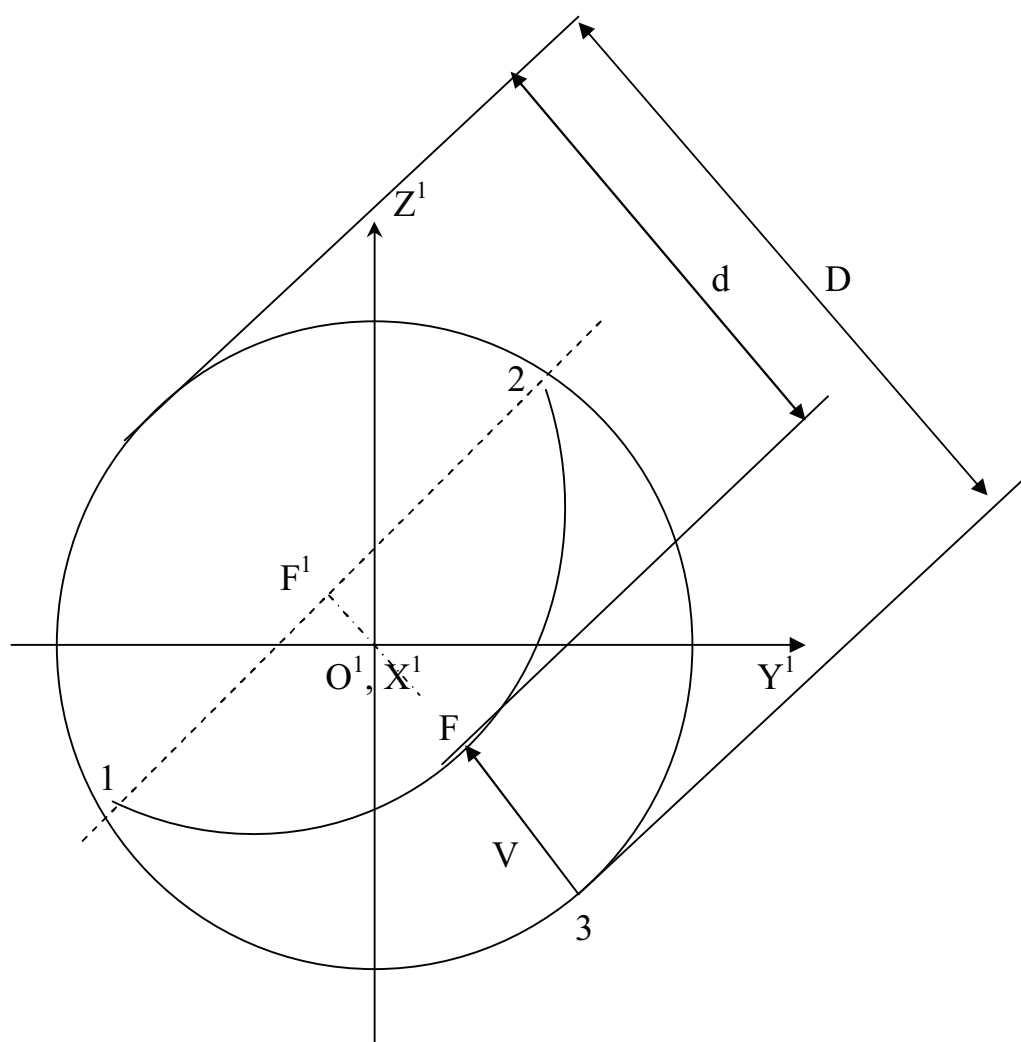


Рис. 9. Схема снятия координат в системе скважины

Имея координаты $x_1^1 y_1^1 z_1^1$, $x_2^1 y_2^1 z_2^1$, $x_3^1 y_3^1 z_3^1$, определенные в системе $OX^1Y^1Z^1$ пересчитываем эти координаты в системе $OXYZ$ с помощью направляющих косинусов и получаем окончательно $x_1 y_1 z_1$, $x_2 y_2 z_2$, $x_3 y_3 z_3$. Имея координаты указанных трех точек составляем уравнение плоскости сосредоточенного сдвига по зависимости

$$Ax + By + Cz - D = 0 \quad (1)$$

где

$$A = \begin{vmatrix} y_1 & z_1 & 1 \\ y_2 & z_2 & 1 \\ y_3 & z_3 & 1 \end{vmatrix} \quad B = \begin{vmatrix} z_1 & x_1 & 1 \\ z_2 & x_2 & 1 \\ z_3 & x_3 & 1 \end{vmatrix} \quad C = \begin{vmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & 1 \end{vmatrix} \quad D = \begin{vmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ x_3 & y_3 & z_3 \end{vmatrix}$$

По полученным данным определяют направляющие косинусы нормали к плоскости сосредоточенного сдвига

$$\cos\alpha_x = \frac{A}{\pm\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}} \quad \cos\alpha_y = \frac{B}{\pm\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}} \quad \cos\alpha_z = \frac{C}{\pm\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}} \quad (2)$$

и расстояние к плоскости по нормали

$$p = \frac{D}{\pm\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}} \quad (3)$$

При этом знак выбирается таким образом, чтобы p было положительным. Направление сдвига определяют исходя из координат двух точек: Z и F^1 . При этом координаты точки F^1 вычисляют по зависимости

$$x_f = 0,5(x_1 + x_2); \quad y_f = 0,5(y_1 + y_2); \quad z_f = 0,5(z_1 + z_2)$$

тогда

$$\begin{aligned} \cos\alpha_x &= \frac{x_3 - x_f}{\sqrt{(x_3 - x_f)^2 + (y_3 - y_f)^2 + (z_3 - z_f)^2}} \\ \cos\alpha_y &= \frac{y_3 - y_f}{\sqrt{(x_3 - x_f)^2 + (y_3 - y_f)^2 + (z_3 - z_f)^2}} \\ \cos\alpha_z &= \frac{z_3 - z_f}{\sqrt{(x_3 - x_f)^2 + (y_3 - y_f)^2 + (z_3 - z_f)^2}} \end{aligned} \quad (4)$$

Величину сосредоточенного сдвига определяют по зависимости

$$V=(D-d)/\cos\alpha_x, \quad (5)$$

где D - первоначальный диаметр скважины, d – остаточная величина наибольшего размера поперечного сечения скважины в месте сосредоточенного сдвига (см. рис. 8). При этом направляющий косинус определяется во вспомогательной системе координат

$$\cos\alpha_x = \frac{x_3^1 - x_f^1}{\sqrt{(x_3^1 - x_f^1)^2 + (y_3^1 - y_f^1)^2 + (z_3^1 - z_f^1)^2}} \quad (6)$$

Таким образом, для определения всех параметров сосредоточенного сдвига необходимо измерить координаты трех точек 1, 2 и 3 в системе координат дегазационной скважины, величину поперечного сечения d скважины в месте сосредоточенного сдвига и знать диаметр скважины D , а также углы ее подъема и разворота.

Для осуществления таких измерений авторами сконструирован и испытан специальный инструмент, схема которого показана на рис. 10. Измеритель состоит из трубчатого досыльника 1, имеющего на конце шарнир 2, к которому присоединен шарнирный четырехзвенник 3. К противоположному шарниру 4 присоединен толкатель 5, вставленный вовнутрь досыльника 1 и имеющий выступающую из него ручку 6.

Разработанное устройство дает возможность измерить все виды деформаций дегазационной скважины: элементы залегания нескольких плоскостей сосредоточенных сдвигов в одной и той же скважине, а также участки сужения или расширения дегазационной скважины. Так после измерения параметров очередного сдвига четырехзвенник инструмента складывается и продвигается через узкое место скважины, а затем раскрывается опять на величину диаметра скважины.

Этот же инструмент применяется для измерений каверн, образовавшихся в результате обрушений стенок скважины или местных сужений, которые сформировались из-за потери устойчивости сечения скважины под действием горного давления.

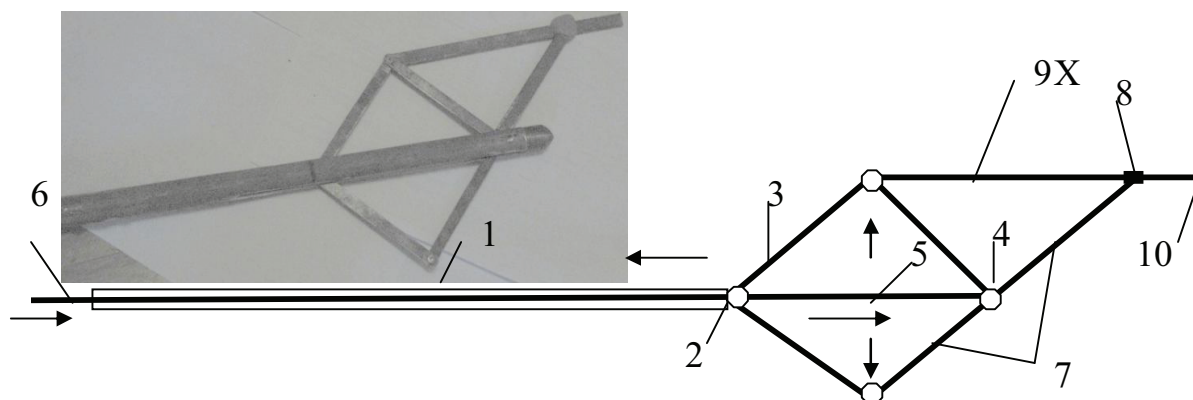


Рис.10. Схема устройства измерителя параметров сосредоточенного сдвига

В таблице 1 приведены примеры измерений координат плоскости сосредоточенного сдвига в натуральных условиях.

Результаты измерений наносились на стереографическую равнопромежуточную сетку Каврайского (рис. 11) и обрабатывались методами математической статистики. При этом группа точек 1, расположенная в первом квадранте стереографической проекции принадлежит лавам, которые обрабатывались в условно южном направлении (или вниз на чертеже), а группа 2, расположенная в четвертом квадранте, обусловлена обработкой лав в условно северном направлении. Отмеченные особенности означают, что плоскости сосредоточенных сдвигов сформированы в основном вдоль слоистости пород подрабатываемой толщи, причем сами плоскости сосредоточенного сдвига слегка завалены на выработанное пространство. Частично завал направлен вдоль линии очистного забоя и частично назад в противоположную сторону относительно направления подвигания лавы. Такой завал плоскостей сосредоточенного сдвига относительно плоскостей напластования обусловлен изгибом слоистой толщи в указанных направлениях.

Таблица 1

Типичные результаты измерений координат плоскости сосредоточенного сдвига

Шахта, выработка	Длина скважины, м	Диаметр скважины, мм	Угол разворота, град	Угол подъема, град	Размер сечения в точке среза, мм	Полярные координаты точек					
						1		2		3	
						X, мм	угол, град	X, мм	угол, град	X, мм	угол, град
им. Засядько, 17 восточная лава	45	150	35	20	123	12742	15	12754	190	12720	105
им. Засядько, 18 восточная лава	56	150	42	26	130	9462	45	9458	230	9492	140
им. Засядько, восточная разгрузочная лава	73	120	112	30	102	8928	56	8925	230	8891	140
им. Засядько, 17 восточная лава	34	120	32	24	96	6073	130	6069	305	6121	210
ш/у им. Кирова, 1 вентиляционный штрек восточной лавы	36	72	38	31	58	7392	45	7390	235	7415	145
Шахта Красноармейская-Западная №1, 4 южный вентиляционный штрек	48	96	92	40	76	5094	235	5084	55	5063	145
Шахта Красноармейская-Западная №1, 5 южный вентиляционный штрек	65	96	24	45	81	14105	305	14111	120	14046	220
Шахта Красноармейская-Западная №1, 4 северный вентиляционный штрек	68	112	37	23	92	8013	85	8021	260	8110	280

На рис. 12 приведен график изменения плотности сосредоточенных деформаций в виде среза или расслоения ствола скважин и шпуров в зависимости от расстояния до контура подготовительных выработок, из которых пробурены скважины. Измерения производились в выработках, поддерживаемых позади движущихся лав. Смещения кровли в этих выработках были значительными и находились в пределах 250-420мм. Видно, что с приближением к контуру выработки расстояние между сосредоточенными деформациями существенно уменьшается. Значительное

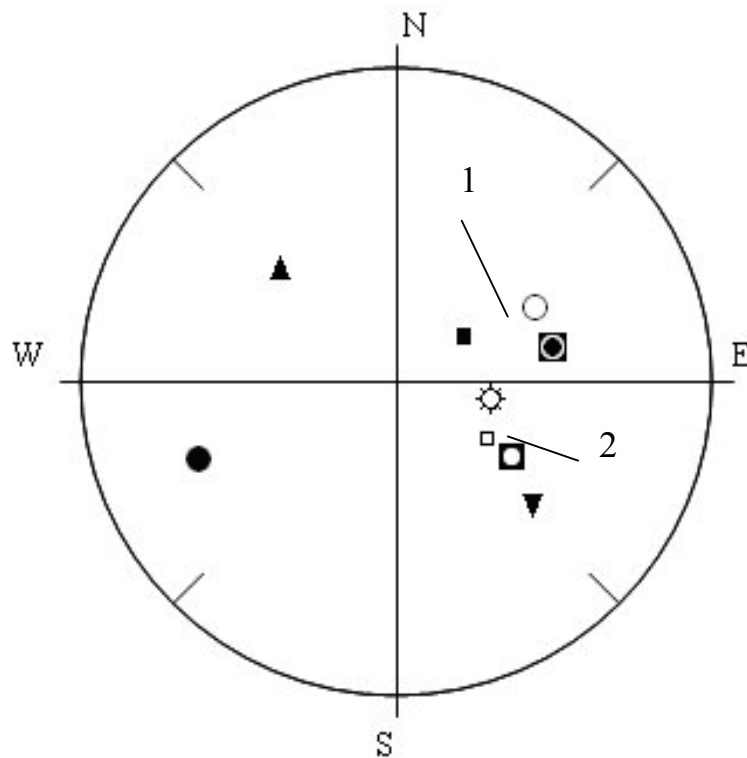


Рис. 11. Стереографическая проекция элементов ориентации плоскостей сосредоточенного сдвига на сетке Каврайского

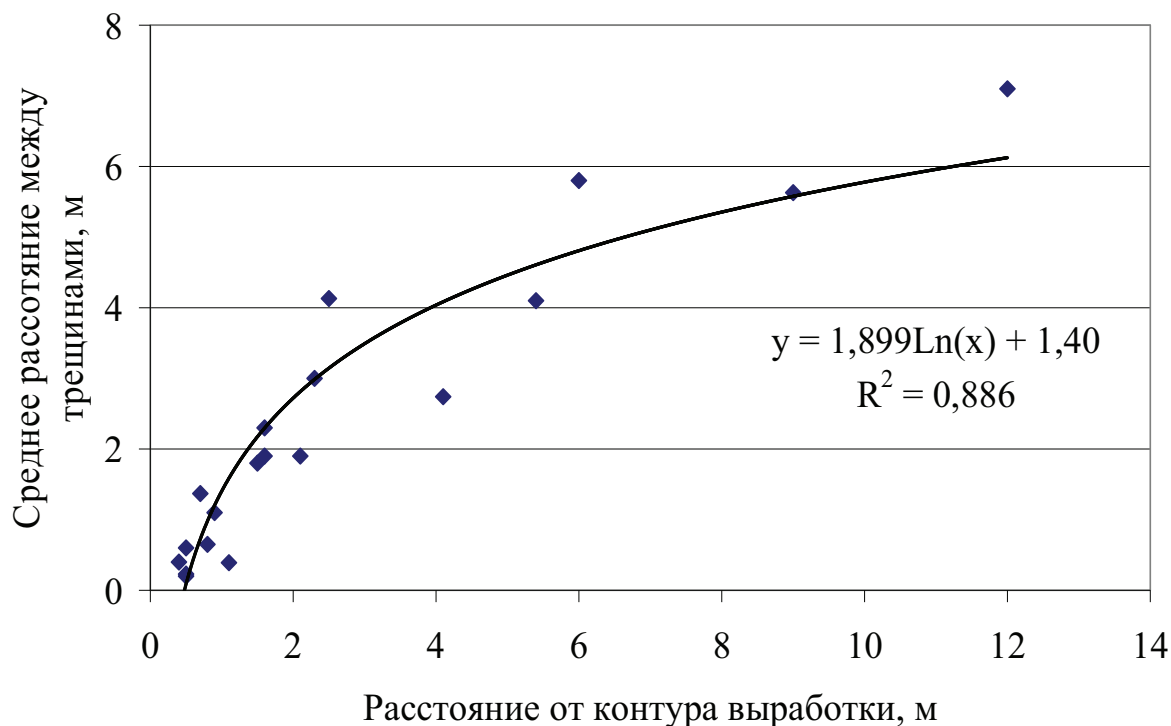


Рис. 12. Изменение плотности сосредоточенных деформаций вдоль дегазационных скважин

влияние выработки на устье дегазационной скважины распространяется на глубину 10м. С удалением от контура подготовительной выработки расстояние Y между соседними сосредоточенными деформациями ствола скважин увеличивается согласно логарифмической зависимости:

$$Y = 1,899 \ln(x) + 1,40, \text{ м} \quad (7)$$

где x – расстояние от контура выработки вглубь массива, м

Таким образом, выполненные инструментальные наблюдения по кавернометрии плоскостей среза скважин и шпуров, пробуренных с контура подготовительных выработок, подтвердили закономерности, найденные с помощью компьютерного моделирования, а именно: подавляющее большинство срезов и расслоений стволов скважин и шпуров ориентировано параллельно напластованию пород, причем в зоне влияния подготовительной выработки плотность таких деформаций существенно увеличивается, что повышает вероятность разрушения устья дегазационной скважины.

Для изучения деформаций стволов дегазационных скважин были выполнены натурные инструментальные наблюдения растяжений вдоль оси скважин с помощью глубинных реперов, а также общей деформационной картины с помощью физического моделирования. На рис. 13 показаны результаты измерения деформаций расслоения в кровле выработки вдоль осей дегазационных скважин. На оси абсцисс отложено безразмерное расстояние от контура выработки вглубь массива в величинах радиуса сводовой части выработки арочной формы. На оси ординат показаны безразмерные или относительные деформации растяжения оси скважины, приведенные к величине смещений кровли выработки.

Видно, что деформации растяжения оси дегазационной скважины уменьшаются по экспоненте с удалением от контура выработки вглубь массива. С приближением к контуру выработки на расстояние полтора ее радиуса деформации растяжения оси экспериментальной скважины резко увеличиваются, а у контура достигают величины 0,25 и более. Такие интенсивные расслоения

пород приводят к утечкам газа и подсосам воздуха, что снижает эффективность работы дегазации. Именно поэтому дегазационные скважины необходимо герметизировать на указанном интервале. Это хорошо согласуется с результатами измерений проницаемости массива согласно данным [6] (рис. 14).

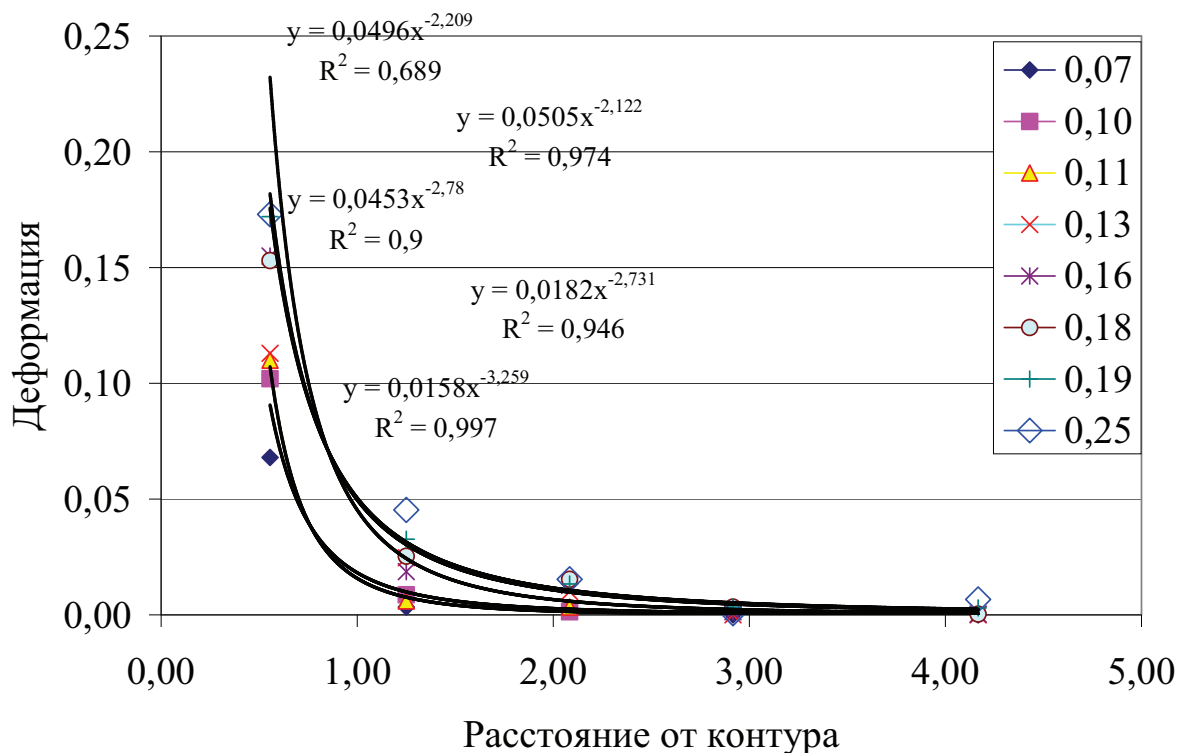


Рис. 13. Результаты статистического анализа данных натуральных наблюдений по глубинным реперам

Исследования на моделях из эквивалентных материалов.

Для проверки достоверности результатов шахтных инструментальных наблюдений и возможности их обобщения были проанализированы данные физического моделирования, выполненного авторами статьи (рис. 15) и специалистами фирмы ДМТ [7] (рис. 16). На снимках приведены состояния сечения выработки на моделях из эквивалентных материалов после их интенсивной деформации. Отчетливо видны деформации расслоений (3) и сосредоточенных срезов (1 и 2). Такие же деформации показаны на породном обнажении расщелины выработки в натуральных условиях на рис. 17. Смещения кровли настолько интенсивны, что анкер изогнулся на участке, примыкающем к полости

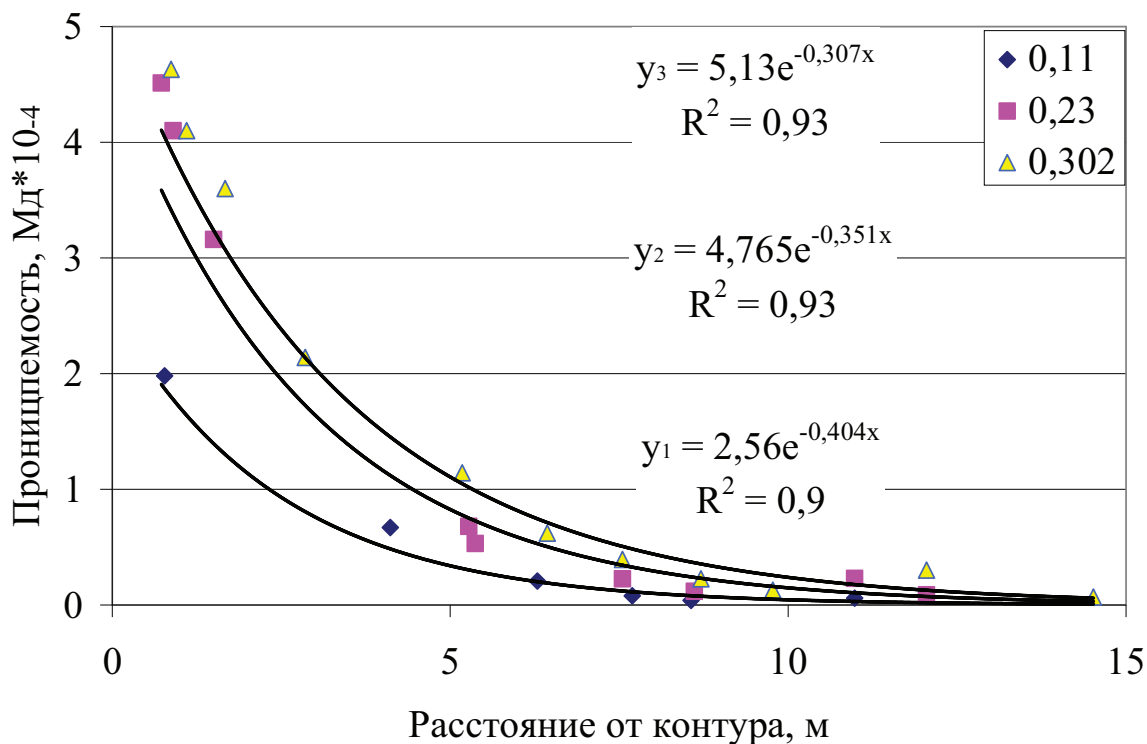


Рис. 14. Распределение проницаемости вокруг подготовительной выработки по Айруни: [6]

подготовительной выработки на угол, достигающий 40° . Точно такие же деформации испытывают и устья дегазационных скважин. Видно, что даже участок плавного изгиба формируется за счет деформации сосредоточенного среза и расслоения вмещающих пород.

Обобщение результатов изучения сосредоточенных деформаций показано на рис. 18.

Величина сосредоточенных деформаций распределена согласно нормальному закону (рис. 19), но практически не зависит от расстояния относительно контура выработки (рис. 20). Это значит, что на любой глубине от контура выработки может реализоваться сосредоточенная деформация любой величины в диапазоне от 0,01 до 0,3. Зато средняя величина сосредоточенной деформации T_c дегазационной скважины определяется величиной смещений U на контуре подготовительной выработки (рис. 21) и может быть найдена по логарифмической зависимости (дающей результат с погрешностью 27% и надежностью 72%):

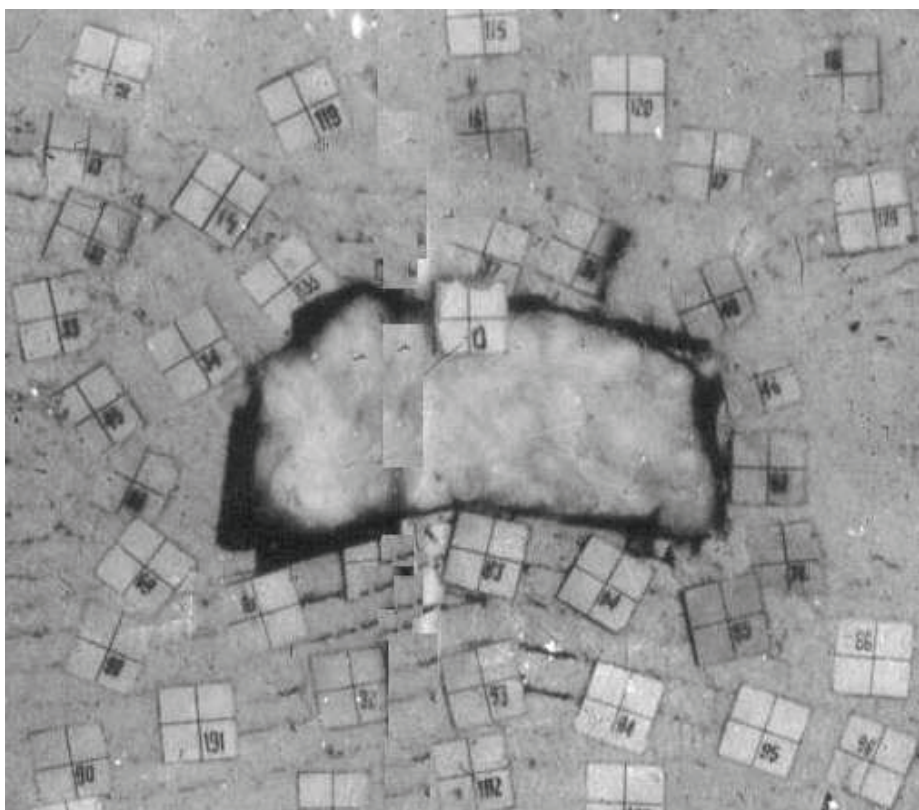


Рис. 15. Состояние модельной выработки после деформирования вмещающих пород

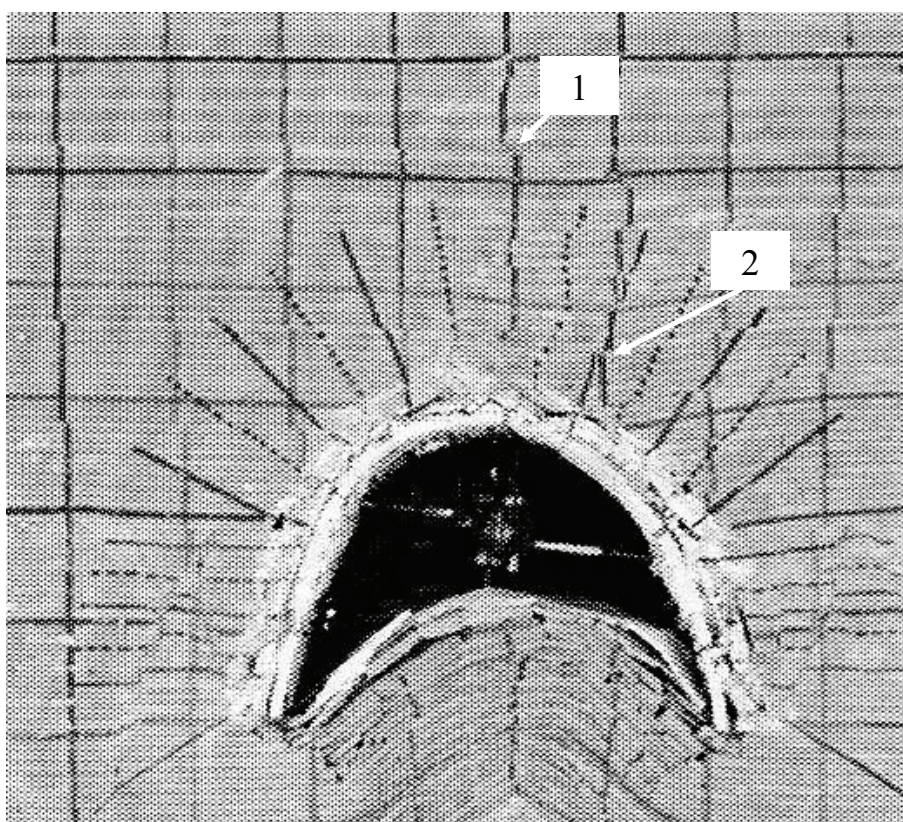


Рис. 16. Примеры сосредоточенных сдвигов на физической модели по данным фирмы ДМТ

$$T_c = 0,056 * \ln(U + 0,0046) + 0,3 \quad (8)$$

Поскольку сосредоточенные деформации указаны в долях от величин смещений кровли выработки, можно сделать вывод о том, что указанный диапазон деформаций является весьма опасным для ствола дегазационной скважины.



Рис. 17. Характер изгиба стадеполимерного анкера в кровле выработки

Чаще всего диаметр дегазационных скважин находится в диапазоне 72-150мм. При смещении кровли выработки равном 300мм сосредоточенная деформация среза составит $300 * 0,3 = 90$ мм. Очевидно, что такая деформация может перерезать ствол дегазационной скважины полностью или существенно уменьшить его живое сечение. Поскольку у контура выработки таких участков сужения скважины по крайней мере около десятка (см. график на рис. 12), местные сопротивления от отдельных

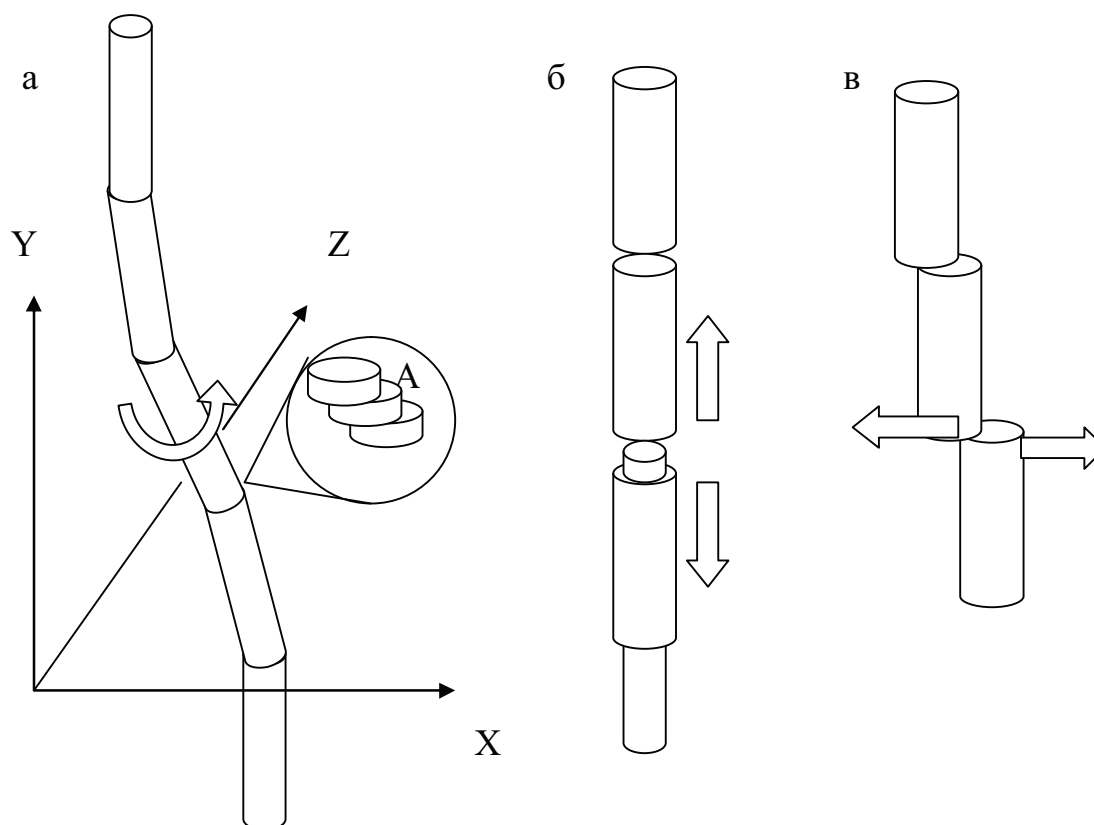


Рис. 18. Формы деформации ствола дегазационной скважины: а – изгиб, искривление; б – растяжение; в – сосредоточенный срез

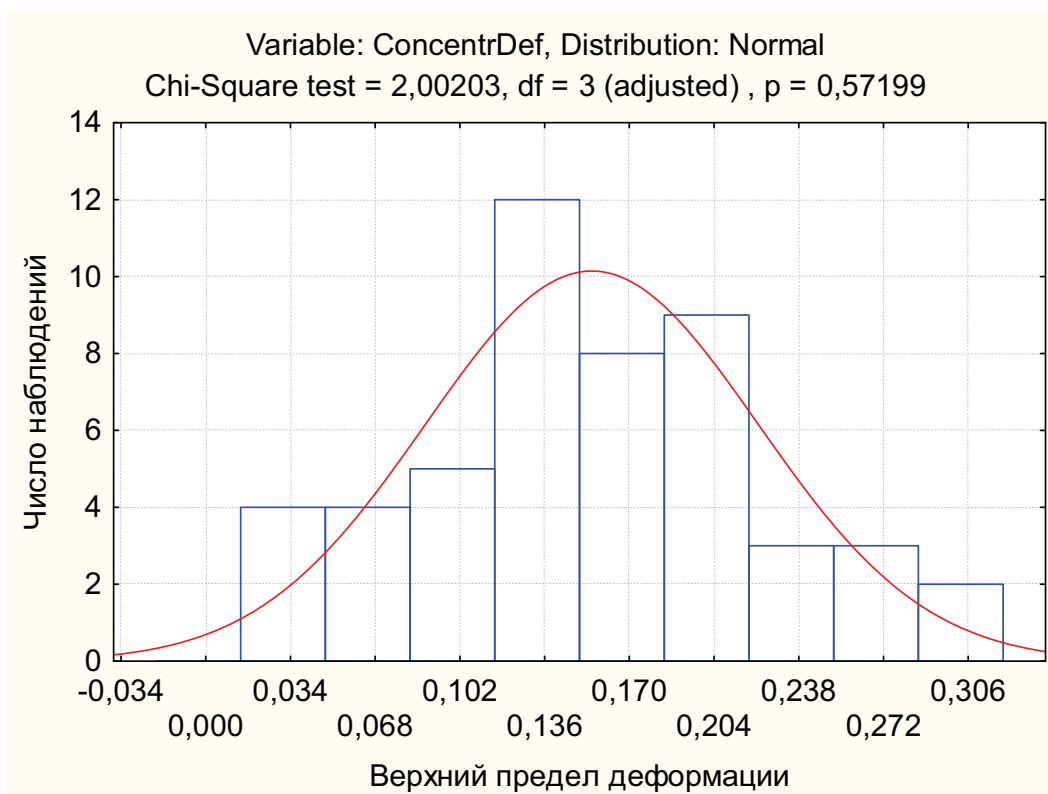


Рис. 19. Распределение величин безразмерной деформации сосредоточенного сдвига

сосредоточенных деформаций суммируются, а ее аэродинамическое сопротивление увеличится до такой степени, что скважина практически перестанет выполнять свои функции. Это приведет к фильтрации газа в рабочее пространство горных выработок, возникновению местных скоплений метана у кровли выработки и может послужить причиной взрыва метановоздушной смеси.

Полученный результат подтверждается исследованием зависимости аэродинамического сопротивления скважины от величины сосредоточенной деформации среза ее ствола [8]. Установлено, что при уменьшении диаметра живого сечения дегазационной скважины на величину, не превышающую радиуса скважины, местное аэродинамическое сопротивление на участке сужения увеличивается незначительно. Однако при дальнейшем перерезывании ствола скважины ее аэродинамическое сопротивление возрастает скачкообразно, а дебит скважины уменьшается во много раз.

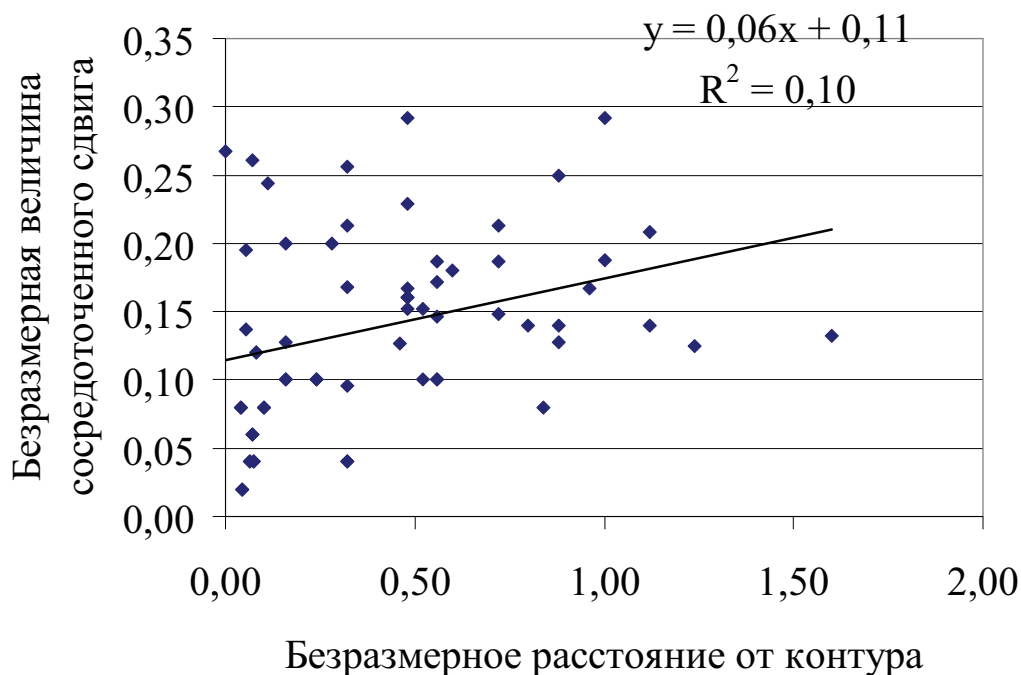


Рис. 20. Зависимость относительной величины сосредоточенного сдвига от расстояния от контура выработки

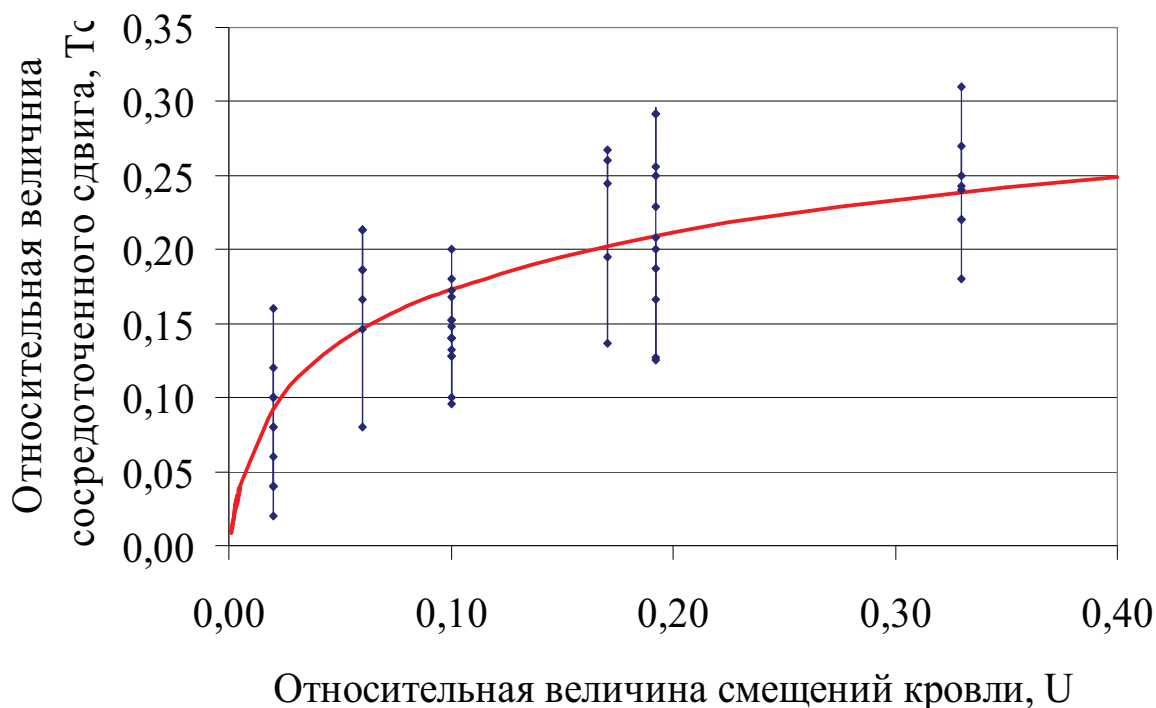


Рис. 21. Зависимость величины сосредоточенного сдвига от смещений кровли выработки

ОБОСНОВАНИЕ ГЛУБИНЫ ГЕРМЕТИЗАЦИИ ДЕГАЗАЦИОННОЙ СКВАЖИНЫ

Одним из важнейших параметров, который обеспечивает эффективную работу дегазационной скважины, является глубина ее герметизации. СОУ [9] рекомендует принимать глубину герметизации не менее 6 – 10 м. Величина этого параметра по существу взята из Руководства [10], в котором рекомендуется такой же диапазон глубин герметизации. Меньший предел глубины герметизации в СОУ рекомендуется для пологих пластов, больший для крутых.

Тот же принцип выбора глубины герметизации заложен и в Руководстве. При этом в п. 6.1.3 Руководства [10] уточняется, что глубина герметизации принимается не менее 6 м при углах разворота дегазационной скважин относительно оси подготовительной выработки в пределах 60° – 90° . Если же угол разворота меньше 60° , тогда глубина герметизации должна быть не менее 10 м. Этим положением косвенно подтверждается решающая роль сдвижений

пород вокруг подготовительной выработки в формировании негативных условий, снижающих устойчивость ее устья. Другими словами, глубина интенсивного разрушения вмещающих выработку пород принимается равной не менее 6м.

В данной работе обоснованы параметры дегазационных скважин и разработана методика для их выбора. На рис. 22 показан график для выбора глубины герметизации дегазационной скважины в зависимости от допустимой величины деформаций расслоения пород кровли выработки. Эта зависимость получена на основе результатов исследований, описанных в предыдущем разделе. Если в качестве допустимых величин деформаций принимается 0,002, тогда глубина герметизации должна быть максимальной. Так при величине безразмерных деформаций, равных 0,11 (при радиусе выработки 3м это соответствует 330мм), глубина герметизации должна составлять 2,54 радиуса выработки (в данном примере $2,54 \cdot 3\text{м} = 7,62\text{м}$). Однако уже при величине смещений кровли 0,22 (660мм) необходимая глубина герметизации увеличивается до 4,60 радиуса сводовой части выработки (13,8м).

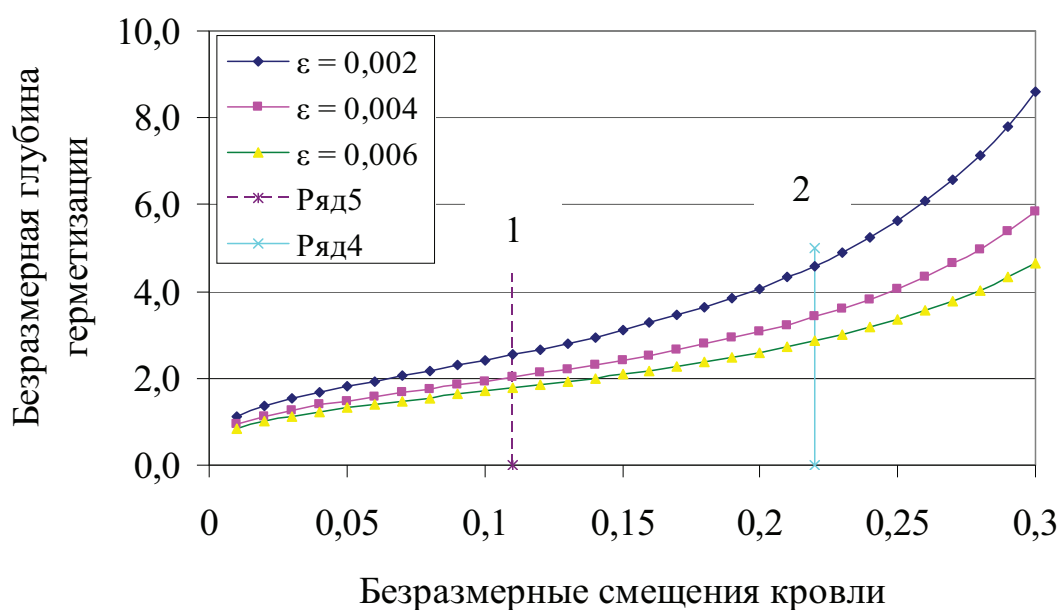


Рис. 22. Рациональный диапазон глубин герметизации дегазационных скважин

Величина допустимой деформации расширения пород кровли выработки равная 0,002 принята исходя из результатов много-

численных испытаний пород на растяжение. Доказано [11] что предел упругости осадочной породы на растяжение в среднем составляет 0,002. При таких деформациях кровля останется еще целой, а сосредоточенные деформации расслоения не возникнут. Это значит, что проницаемость пород при указанном уровне деформаций не превысит проницаемости нетронутого массива.

При бóльших величинах деформации (например 0,004 и более – см. рис. 22) в кровле возникнут трещины расслоения, что приведет к подсосам воздуха, снижению вакуума и соответственно концентрации, а также дебита метана.

Диапазон смещений пород кровли выбран неслучайно. На рис. 22 видно, что вначале с ростом смещений кровли необходимая длина герметизации увеличивается затухающими темпами (от нуля до границы 1 на рис. 22). При величине смещений более 0,11 прирост рациональной длины герметизации происходит с точностью до третьего знака примерно линейно до величины смещений 0,22. Однако после этого начиная с границы 2 необходимая глубина герметизации дегазационной скважины продолжает увеличиваться ускоренными темпами.

Это позволило выделить рациональный диапазон деформаций подготовительной выработки, из которой пробурена дегазационная скважина. Границы этого диапазона находятся в пределах от нуля до 0,11-0,22 радиуса сводовой части подготовительной выработки, из которой пробурена дегазационная скважина. При бóльших величинах смещений кровли подготовительной выработки дегазацию из подземных скважин пробуренных с контура данной выработки осуществлять нецелесообразно по нескольким причинам.

Во-первых, необходимая длина герметизации скважины становится слишком большой, причем каждый сантиметр дополнительных смещений кровли требует все больше и больше приращения длины герметизации. Во-вторых, при величине смещений, больше 0,22 радиуса сводовой части выработки сосредоточенные деформации устья скважины становятся более 22% от величины смещений кровли (см. рис. 21). Это значит, что в выработке шириною вчерне 6м средние сосредоточенные деформации

ствола дегазационной скважины составят $3\text{м} \cdot 0,22 \cdot 0,22 = 142\text{мм}$. Практически любая дегазационная скважина при такой деформации среза закроется полностью и прекратит свое функционирование. Таким образом, лучше всего вести дегазацию через подземные скважины при смещениях кровли выработки не превышающих $0,11$ от радиуса выработки. Эту границу можно увеличить до $0,22$, но тогда придется сосредоточенные деформации устья скважины компенсировать увеличением диаметра и дополнительными мерами, что может оказаться нерациональным.

Еще одним ограничением при выборе глубины герметизации дегазационной скважины являются утечки или подсосы воздуха в трещины, образующиеся на участке устья скважины, близко расположенном к полости выработки, а значит и к атмосфере. Для расчета таких утечек были выполнены специальные исследования.

Рассматривался участок устья дегазационной скважины длиной 20м , что превышает все рекомендуемые и встречающиеся в практике глубины герметизации. Вначале устья задавали вакуум на уровне $0,08$ от атмосферного давления, что соответствовало примерно 70мм рт. ст. На удаленном участке устья вакуум принимался равным $0,09$ от атмосферного давления, то есть учитывалось аэродинамическое сопротивление рассматриваемого участка скважины при дебите равном $4\text{м}^3/\text{мин}$ и диаметре скважины 100мм .

На основании полученных в предыдущем разделе результатов задавался экспоненциальный закон распределения проницаемости вдоль устьевого участка скважины (см. рис. 14). При этом множитель перед экспонентой принимался равным 4 , а показатель экспоненты $-0,35$, что соответствовало наиболее вероятному значению указанных параметров при больших смещениях кровли выработки. Принимался ламинарный закон течения воздуха через трещины в результате его подсоса в устье дегазационной скважины.

При таких начальных условиях и исходных данных рассчитаны подсосы воздуха по длине устьевого участка дегазационной скважины (рис. 23). За единицу принят объем подсоса при усло-

вии отсутствия герметизации. Практически это означает, что в скважину вставлена обсадная труба длиной не более 1 м для подключения к дегазационному ставу. Полученные авторами результаты хорошо согласуются с данными измерения давления газа в дегазационных скважинах в зависимости от глубины их герметизации [12] (рис. 24). Если подсосы воздуха считать обратно пропорциональными давлению и сопоставить с графиком на рис. 23, расхождение результатов расчета подсосов и измеренных падений давления не превышает 13%, что свидетельствует о достоверности полученного расчетного распределения подсосов воздуха.

Полученный график имеет большое прикладное значение, поскольку дает возможность точнее и с большей надежностью оценить необходимую глубину герметизации дегазационной скважины от следующих исходных условий: прочности вмещающих выработку пород, размера ее сечения, вчерне, паспорта крепления, способа и параметров охраны.

В таблице 2 приведены величины подсосов воздуха из атмосферы подготовительной выработки, из которой пробурена дегазационная скважина в зависимости от глубины герметизации ее устья. Эти данные приводятся для больших смещений кровли выработки, в диапазоне от 0,11 до 0,22 радиуса выработки. За единицу приняты объемы подсосов при отсутствии герметизации скважины, пробуренной перпендикулярно к кровле подготовительной выработки. Видно, что при глубине герметизации равном 2,31 радиуса выработки подсосы воздуха составят 12,62%. Это очень много с учетом того, что дебит газа через скважину составляет всего 10-30% от общей величины подсосов в случае отсутствия герметизации. Фактически это означает, что каптируемый метан будет разбавляться воздухом до низкой концентрации порядка 20-30%, а эффективность дегазации (вакуум, КПД системы) будет падать, что и наблюдается на практике при недостаточной глубине герметизации скважин.

Глубина герметизации равная 2,31 радиус выработки принят не случайно и при ширине сечения подготовительной выработки

вчерне равном 5,2м (радиус 2,6м) составляет 6м, рекомендуемых СОУ и Руководством.

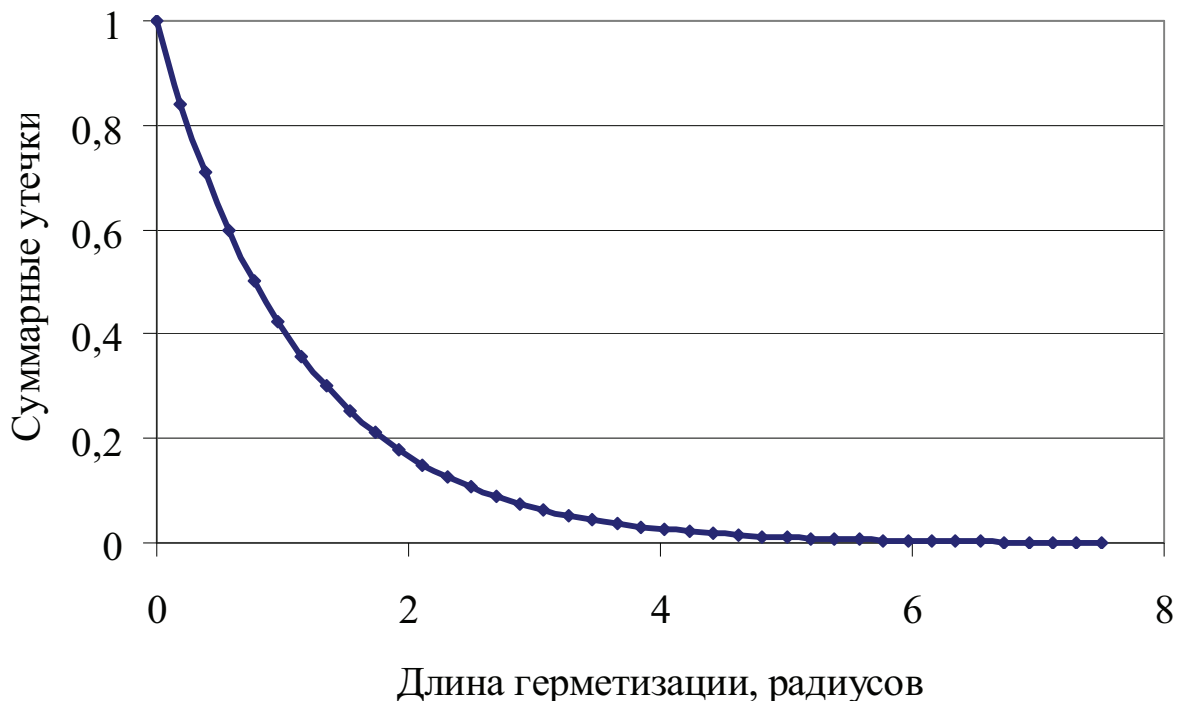


Рис. 23. График для выбора необходимой длины герметизации

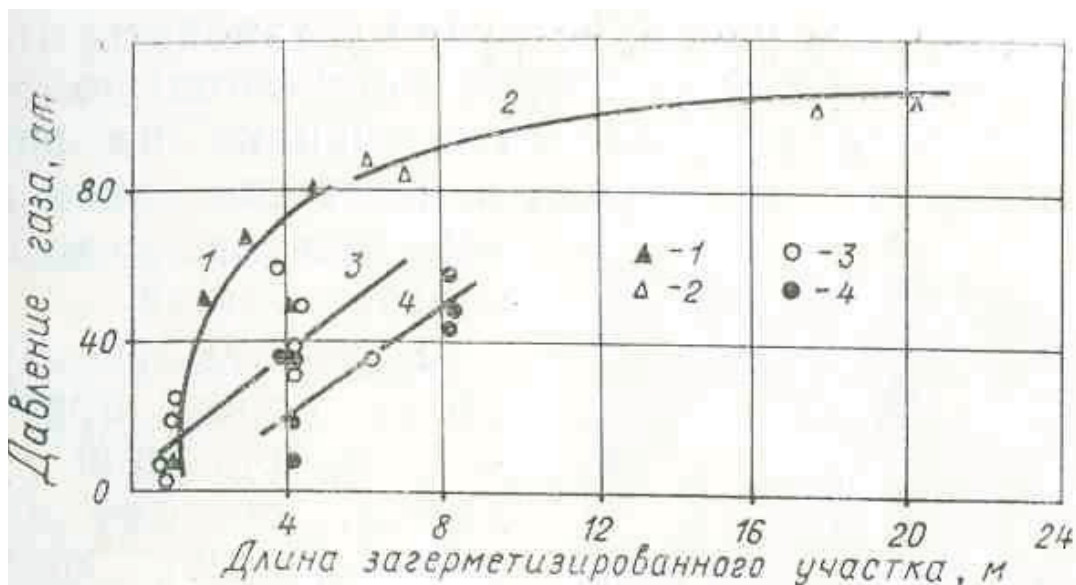


Рис. 24. Изменение проницаемости массива горных пород с увеличением расстояния от контура выработки вглубь массива по Волощину и др. [12]

Это не означает, что 6 метров герметизации будет недостаточно для обеспечения эффективной дегазации спутников и газоносных песчаников и сохранения высокой эффективности работы дегазационной системы в целом. Для этого необходимо уменьшить смещения на контуре выработки ниже уровня 0,11 от радиуса выработки.

Из таблицы видно, что увеличение глубины герметизации до 3,85 радиусов выработки (это для типичных сечений подготовительных выработок составляет примерно 10м, рекомендуемых СОУ и Руководством) подсосы воздуха уменьшаются до 3,12%, а при глубине герметизации равной 5,77 радиусов (15м для типичных сечений выработок) подсосы становятся пренебрежимо малыми.

Таблица 2

Зависимость величины утечек от глубины герметизации дегазационной скважины

Глубина герметизации		Утечки (подсосы воздуха в скважину), %
В метрах для типичной выработки	В радиусах выработки	
6	2,31	12,62
10	3,85	3,12
15	5,77	0,49

Важно подчеркнуть, что управлять эффективностью дегазации подземными скважинами можно не только величиной смещений кровли подготовительной выработки, но и размерами ее сечения. Так при ширине выработки в проходке 4,4м глубина герметизации 6м соответствует 2,73 радиуса выработки, тогда как при ширине выработки в черне 6м глубина герметизации составит всего 2 радиуса, что приводит при одних и тех же смещениях кровли выработки к недопустимо большим утечкам и подсосам во втором случае.

Как показали исследования, глубина герметизации устья дегазационной скважины зависит не только от величины смещений кровли подготовительной выработки, но и от допустимого уровня утечек воздуха в скважину через трещины, образующиеся вокруг ее устья. В связи с этим были построены графики изменения необходимой глубины L герметизации дегазационной скважины от величины смещений кровли U подготовительной выработки при разных уровнях утечек воздуха (рис. 25). Видно, что указанные зависимости удовлетворительно описываются степенными функциями вида $L = aU^b$.

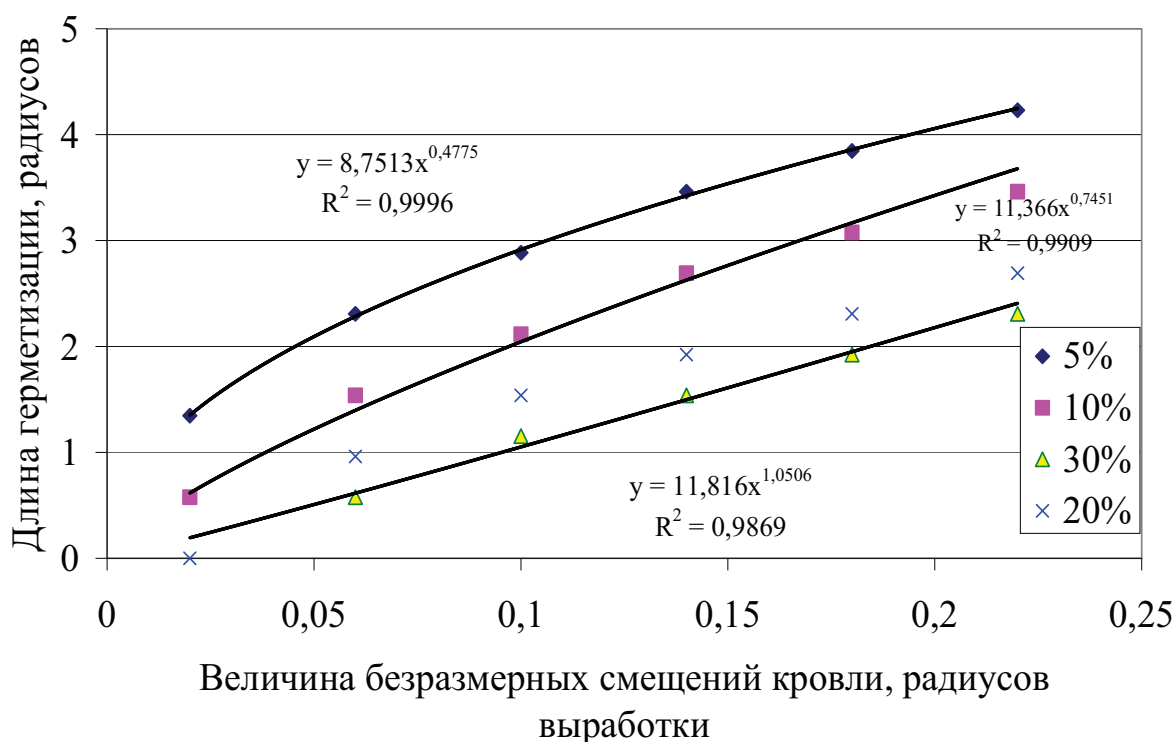


Рис. 25. График изменения необходимой длины герметизации в зависимости от величины смещений кровли и уровня утечек воздуха

Зависимости эмпирических коэффициентов a и b от допустимого уровня Δ утечек были найдены путем обработки экспериментальных данных (рис. 26). В итоге была получена зависимость необходимой глубины герметизации устья дегазационной скважины от величины смещений кровли подготовительной выработки и уровня утечек воздуха:

$$L = 6,69\Delta^{0,173} U^{0,25}\Delta^{0,435} \quad (9)$$

где L - необходимая глубина герметизации, радиусов выработки;
 Δ – допустимый уровень утечек (подсосов) воздуха через устье дегазационной скважины, %; U – смещения кровли выработки в ее радиусах.

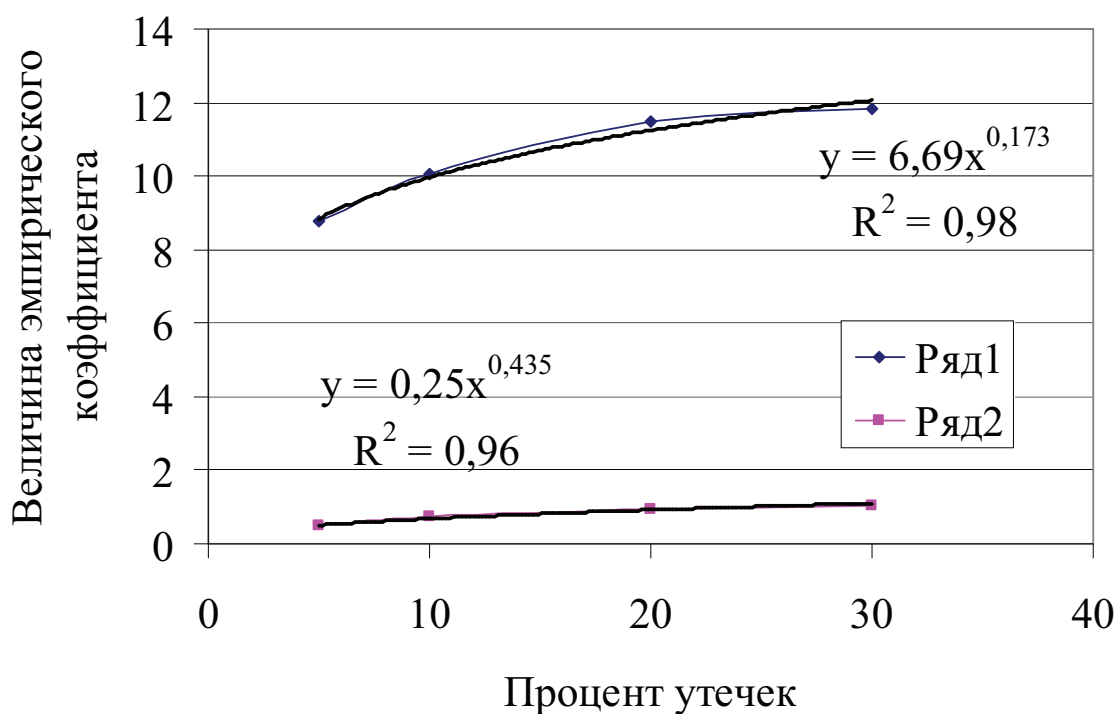


Рис. 26. График для определения эмпирических коэффициентов в зависимости от уровня утечек

МЕТОДИКА ВЫБОРА РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДЕГАЗАЦИОННОЙ СКВАЖИНЫ

Расчет рациональных параметров дегазационной скважины ведется в следующем порядке. Производится по Указаниям ВНИМИ [13] расчет смещений кровли в подготовительной выработке, которая будет поддерживаться или эксплуатироваться позади действующей лавы.

В качестве исходных данных для расчета учитывают глубину разработки, размеры сечения примыкающей к действующей лаве подготовительной выработки, имеющей сечение арочной формы, тип крепи и ее несущую способность, способ охраны вы-

работки и его параметры, строение толщи пород вокруг выработки, угол их залегания и прочность каждого породного слоя, а также срок службы выработки.

Рассчитанные смещения кровли нормируют на величину радиуса сводовой части выработки и по полученной приведенной величине смещений кровли по графику рис. 21 определяют величину сосредоточенной деформации устья дегазационной скважины, которая ориентирована перпендикулярно породному обнажению кровли выработки. Если эта деформация превышает половину диаметра скважины, выполняют три следующих действия:

- увеличивают диаметр дегазационной скважины;
- принимают меры по повышению устойчивости пород кровли выработки;
- сокращают участок выработки позади лавы, в пределах которого производят дегазацию, а затем отключают скважину от дегазационного става;
- дегазационную скважину бурят позади лавы с таким расчетом, чтобы часть смещений на контуре выработки уже реализовалась, а оставшаяся часть смещений имела допустимый уровень.

Указанные четыре варианта просчитывают с точки зрения затрат на их реализацию для экономического сравнения вариантов. Принимают наиболее приемлемый с технической и экономической точки зрения вариант и определяют по формуле (9) глубину герметизации устья дегазационной скважины с учетом заданного уровня допустимых утечек воздуха.

Уточняют окончательную глубину герметизации устья дегазационной скважины с учетом углов ее подъема и разворота.

ВЫВОДЫ

В данной работе впервые исследованы деформации устья дегазационной скважины в зависимости от деформаций пород вокруг подготовительной выработки, из которой она пробурена.

Экспериментально доказано, что в зоне активных сдвижений позади действующей лавы, где выделяется основное количество взрывоопасного метана из массива устья дегазационных

скважин претерпевают следующие основные виды необратимых деформаций:

- деформации растяжения вдоль оси скважины, которые содействуют утечкам метана и подсосам воздуха из шахтной атмосферы;

- деформации сосредоточенного сдвига, которые перерезывают живое сечение канала дегазационной скважины, повышают ее аэродинамическое сопротивление и уменьшают дебит метана;

- такой же негативный эффект оказывает обрушения стенок скважин и заполнение ее живого сечения обломками;

- искривление оси скважины.

Установлено, что с удалением от контура подготовительной выработки расстояние между соседними сосредоточенными деформациями ствола скважин увеличивается согласно логарифмической зависимости, а величина указанных деформаций распределена согласно нормальному закону. Средняя величина сосредоточенной деформации дегазационной скважины находится в логарифмической зависимости от величины смещений на контуре подготовительной выработки.

Величина деформаций растяжения оси дегазационной скважины уменьшается по экспоненте с удалением от контура выработки вглубь массива. Расслоения пород приводят к утечкам газа и подсосам воздуха, что снижает эффективность работы дегазации. Именно поэтому дегазационные скважины необходимо герметизировать на указанном интервале.

Установлено, что при уменьшении диаметра живого сечения дегазационной скважины на величину, не превышающую радиуса скважины, местное аэродинамическое сопротивление на участке сужения увеличивается незначительно. Однако при дальнейшем перерезывании ствола скважины ее аэродинамическое сопротивление возрастает скачкообразно, а дебит скважины уменьшается во много раз. Именно это обстоятельство накладывает ограничения на допустимую величину сосредоточенных деформаций ствола дегазационной скважины.

Установлена эмпирическая степенная зависимость необходимой длины герметизации дегазационной скважины от величи-

ны допустимых утечек и смещений кровли подготовительной выработки, из которой пробурена скважина.

Обоснована методика расчета необходимой глубины герметизации дегазационной скважины и предложены мероприятия по повышению ее устойчивости.

Список литературы

1. Пучков Л.А., Каледина Н.О. Динамика метана в выработанных пространствах угольных шахт.- М.: Издательство МГГУ, 1995.- 314 с.
2. Булат А.Ф., Звягильский Е.Л., Бокий Б.В., Радченко В.В., Яценко И.А., Ефремов И.А., Торопчин О.С., Бунько Т.В., Красник В.Г., Кокоулин И.Е. Совершенствование вентиляции и дегазации угольных шахт. //Днепропетровск: Лира, 2005. – 214с.
3. Касимов О.И., Бокий Б.В. Эффективность направленных дегазационных скважин большого диаметра // Геотехническая механика. Днепропетровск, -2002, -вып. 32. -С. 161-166.
4. Бокий Б. В, Белый В.А., Касимов О.И., Управление газовыделением в высокопроизводительных лавах. // Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах. Сборник научных трудов. Часть 1. Макеевка-Донбасс -2004. С. 16-27.
5. Тонелье Э.Б. Технология дегазации и утилизации / Доклады Международного семинара по дегазации угольных пластов: шахта им. Засядько.- Донецк, 2010.
6. Проблемы разработки метаноносных угольных пластов, промышленного извлечения и использования шахтного метана в Карагандинском бассейне/Айруни А.Т. и др.-М.: РАН, 2002-320с.
7. Studeny A., Wittenberg D. Numerical modeling for roadway support systems – a coparison for single and multiple seam mining/ Proceeding 26th Int. Conf. on ground control in mining. West Virginia University, USA, 2007.- Pp.42-48.
8. Назимко В.В., Демченко А.И., Брюханов П.А. Исследование связи между деформацией дегазационной скважины и ее аэродинамическими параметрами// Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах. Сб науч тр/-.-Макеевка: МакНИИ, 2010, №2(26).-с. 25-42.
9. Дегазация угольных шахт. Требования к способам и схемы дегазации. СОУ 10.1.00174088.001-2004.- Киев: Минтопэнерго Украины, 2004.- 162с.
10. Руководство по дегазации угольных шахт. –М.:Минуглепром СССР.- 1990.-186с.
11. Ильницкая Е.И. и др. Свойства горных пород и методы их определения. –М.: Недра, 1969.-392с.

12. Повышение безопасности труда в глубоких шахтах/Волошин Н.Е., Воронин В.А. Петренко С.Я и др. – Донецк: Донбасс, 1973. -164с.

13. Указания по рациональному расположению, охране и поддержанию горных выработок на угольных шахтах СССР. – Л.: ВНИМИ, 1985. –222 с.

Стаття надійшла до редакції 02.10.2012.

Рекомендовано до друку д-ром техн.наук Александровим С.М.

О.О. Яйцов

ПрАТ «Донецьксталь», м.Донецьк, Україна

І.В. Назимко

УкрНДМІ НАН України, м.Донецьк, Україна

Д.М. Нікулін, В.В. Назимко

ДонНТУ, м.Донецьк, Україна

ОБҐРУНТУВАННЯ ГЛИБИНИ ГЕРМЕТИЗАЦІЇ ДЕГАЗАЦІЙНОЇ СВЕРДЛОВИНИ ЯК ФУНКЦІЇ ГІРСЬКОГО ТИСКУ

Деформації гирла дегазаційної свердловини розглянуто як функцію деформацій порід покрівлі підготовчої виробки, з якої ця свердловина пробурена. Встановлено залежність необхідної глибини герметизації свердловини від рівня витоку метану та величини деформацій покрівлі виробки. Обґрунтовані заходи по забезпеченню стійкості свердловини.

A.A. Yaitsov

PrJSC "Donetskstal", Donetsk, Ukraine

I.V. Nazimko

Ukrainian Research Institute of National Academy of Sciences of Ukraine, Donetsk

D.M. Nikulin, V.V. Nazimko

Donetsk National Technical University, Donetsk, Ukraine

CHOICE OF AN ISOLATION DEPTH FOR DEGASSING WELL AS A FUNCTION OF GROUND PRESSURE

Deformation of degassing well mouth was investigated as a function of roadway roof deformation. Main volume of methane emits behind a moving longwall face at the zone where active ground subsidence occurs. The next types of the degassing well deformations develop at this zone: extension of the well axis causes leakage of the methane into roadway atmosphere; local discontinuous shear which cuts the well and reduces its section, increase aerodynamic resistance and diminish methane production; same effect has been produced by spilling of the well walls; the axis of the well becomes curve. Space period be-