

УДК 622.841:622.831.3

## Обоснование параметров безопасного пересечения горными выработками крупноамплитудного тектонического нарушения

Рассмотрен комплекс исследований по обеспечению безопасности пересечения горными выработками разрывных тектонических нарушений. С использованием метода математического моделирования геофильтрации и напряженно-деформированного состояния горного массива оценены параметры проницаемости и емкости горных пород тектонически нарушенной зоны, выполнен прогноз размеров водопритоков и деформаций контура откаточного квершлага, применен специальный гидрогеомониторинг проведения квершлага через зону Богдановского сброса.

**Ключевые слова:** породный массив, фильтрация, численная модель, идентификация, прогноз водопритоков.

**Контактная информация:** [timvnm@mail.ru](mailto:timvnm@mail.ru)

Границами шахтных полей или блоков, как правило, являются крупноамплитудные тектонические нарушения, которые могут быть как водонепроницаемыми экранами, так и зоной повышенной водопроводимости. Кроме того, у геологических нарушений наблюдается снижение прочности и устойчивости горных пород, поэтому их относят к опасным зонам.

Изучению особенностей тектоники геолого-промышленного района Западного Донбасса посвящены работы [1, 2 и др.], в которых рассматриваются вопросы генезиса нарушений, их классификации, систематизации опыта ведения горных работ. При этом вскрытие и пересечение крупноамплитудного тектонического нарушения влечет за собой гидро- и геодинамические риски, минимизировать которые можно путем комплексного изучения опыта вскрытия нарушенных зон и прогнозирования поведения массива горных пород методом математического моделирования.

**Цель исследования** – обоснование гидродинамических и геомеханических параметров устойчивости зоны вскрытия разрывных тектонических нарушений в Западном Донбассе с использованием средств численного математического моделирования.

Проблема возникла в связи с необходимостью вскрытия блока шахты «Западно-Донбасская» из капитальных выработок горизонта 300 м шахты «Самарская». Отсутствие опыта пересечения крупноамплитудного (более 300 м) Богдановского сброса, сложность и неопределенность его геологического строения и гидрогеологических условий, технологические риски определили решение следующих задач:



**И. А. САДОВЕНКО,**  
доктор техн. наук  
(Национальный горный университет)



**А. Н. ЗАГРИЦЕНКО,**  
канд. техн. наук  
(Национальный горный университет)



**Е. О. ПОДВИГИНА,**  
канд. техн. наук  
(Национальный горный университет)



**В. И. ТИМОЩУК,**  
канд. техн. наук  
(Национальный горный университет)

**первая задача** – оценка параметров проницаемости и емкости горных пород тектонически нарушенной зоны, а также количественного определения размеров прогнозных водопритоков в горные выработки;

**вторая задача** – создание гидрогеомеханической модели породного массива на участке пересечения зоны тектонического нарушения;

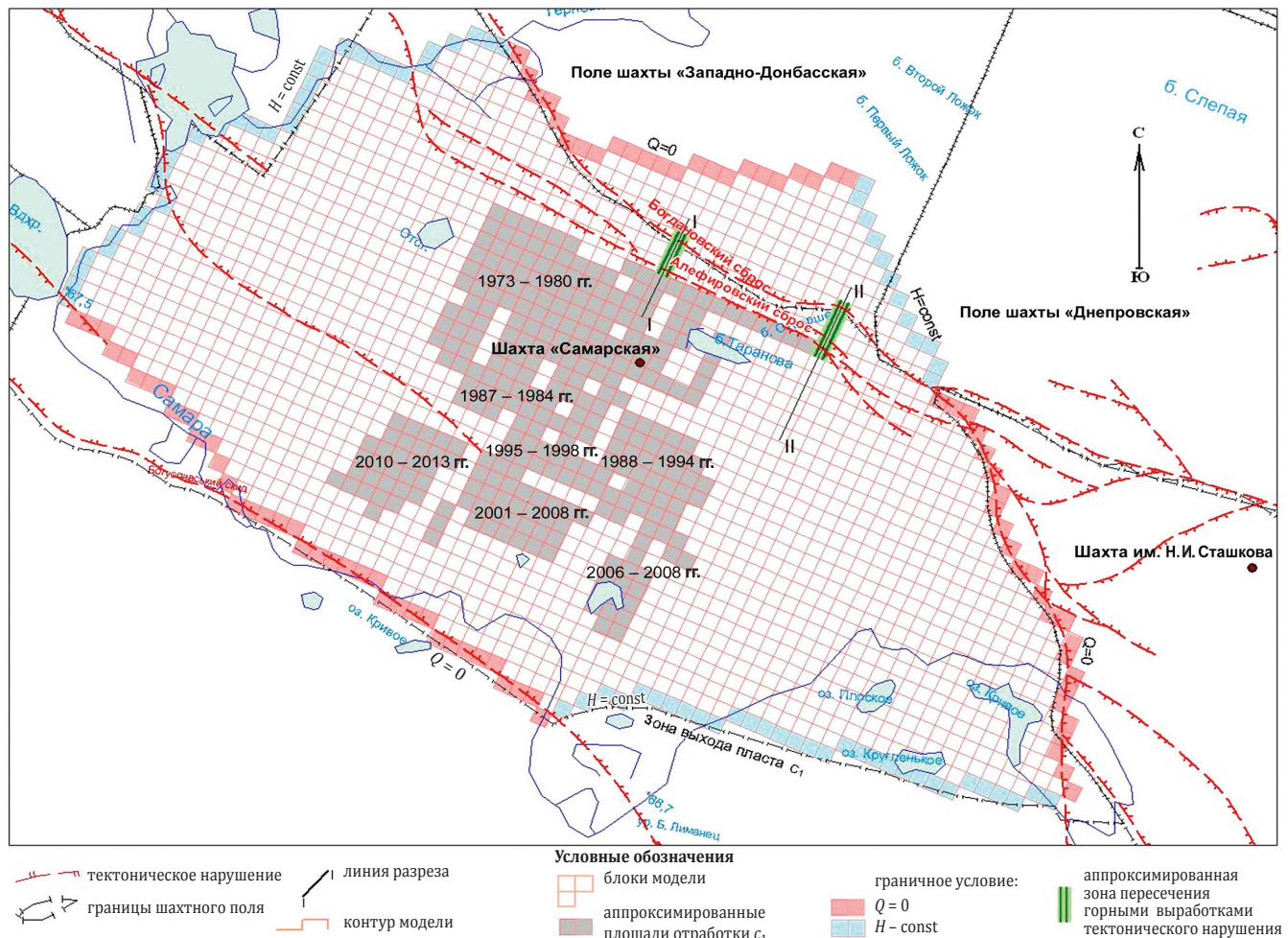
**третья задача** – разработка практических рекомендаций по реализации системы мониторинга пересечения горными выработками зоны Богдановского сброса.

Актуальность решения указанных задач обусловлена также необходимостью интерпретации полученных результатов для условий других шахт Западного Донбасса, в планах разви-

тия которых намечено пересечение горными выработками зоны Богдановского сброса.

Результаты анализа и систематизации фондовых материалов показали, что на шахтах Западного Донбасса задокументировано 346 точек пересечения зон тектонических нарушений скважинами (из них 51 раз был вскрыт Богдановский сброс) и 356 случаев вскрытия зон других тектонических нарушений выработками [2].

В большинстве случаев при пересечении тектонически нарушенных пород водопроявления не наблюдались. Реже фиксировались увлажненные породы, капез, струи и пластовое просачивание воды. Увеличение интенсивности водопритоков (до  $30 \text{ м}^3/\text{ч}$ ) связано с гидродинамикой вскрытия перемятых пород шахтными стволами, при котором происходит быстрое



**Рис. 1.** Схема фильтрационной модели и проектное положение выработок при пересечении зоны тектонической нарушенности (пласт  $c_1$ ) шахты «Самарская».

обнажение стоковой поверхности большой площади с максимальным понижением уровня.

Для решения *первой задачи* использован метод математического моделирования геофильтрации, основанный на численном решении основного уравнения движения подземных вод при заданных граничных условиях [3].

Геофильтрационная модель поля шахты «Самарская» ЧАО «ДТЭК Павлоградуголь» представляет собой шестислойную толщу, отражающую мезокайнозойские и карбоновые отложения. Расчетные слои аппроксимируют отработанные, обрабатываемые угольные пласты ( $c_6, c_5, c_4, c_1$ ) и породы зоны водопроницающих трещин, имеющие непосредственный выход под мезокайнозойские отложения. В плане шахтное поле представлено сеткой ячеек размерами 78×60 и шагом 200×200 м.

Согласно программе горных работ шахты «Самарская» предусматривается с горизонта 300 м пересечение четырьмя горными выработками Богдановского сброса по двум коридорам. Особое внимание уделено решению обратных задач по установлению емкостных и фильтрационных параметров тектонически нарушенной зоны. Для этого на модели шахтного поля воспроизведены опытные откачки с дебитом и понижением, аналогичным опробованию Богдановского сброса на участке между шахтами «Благодатная» и имени Героев космоса [2]. Их вели в породах продуктив-

ной толщи карбона в шести скважинах гидрогеологического створа.

По результатам выполненных гидрогеологических исследований сделан вывод об отсутствии прямой гидравлической взаимосвязи между водоносными горизонтами песчаников пластов  $c_7^{H+B}$  и  $c_4^{H+B}$  висячем и лежащем блоках Богдановского сброса. Это подтверждается:

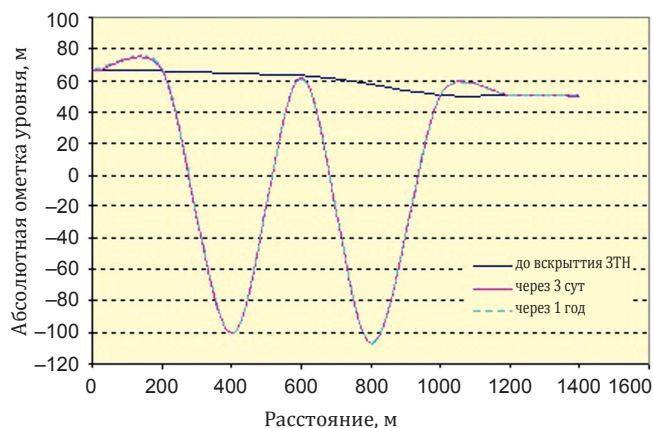
- перепадом уровней 75–80 м в лежащем и висячем боках сброса;
- отсутствием гидродинамического влияния откачек из скважин, расположенных в висячем боку, на скважины за границей сброса;
- различными минерализацией и температурой подземных вод в лежащем и висячем боках сброса.

При отсутствии других сведений о проницаемости зоны тектонического нарушения (ЗТН) были основания считать, что Богдановский сброс – слабопроницаемый экран на пути движения подземных вод для шахт центральной части Западного Донбасса, включая шахту «Самарская». На фильтрационной модели поля этой шахты интервалам опробования Богдановского сброса (на глубине 206 и 330 м) соответствуют угольные пласты  $c_6$  и  $c_1$  (рис. 1).

Воспроизведение серии вычислительных экспериментов по динамике откачки и восстановления уровня позволило определить параметры фильтрационных и емкостных свойств нарушенной зоны.

### Гидродинамические параметры зоны тектонического нарушения

Дебит, м <sup>3</sup> /сут:		в засбросовой площади:	
пласт $c_6$	2,6	пласт $c_6$	10 <sup>-2</sup>
пласт $c_1$	0,086	пласт $c_1$	10 <sup>-2</sup>
Время, сут:		Коэффициент упругой водоотдачи:	
пласт $c_6$	3	в зоне тектонического нарушения:	
пласт $c_1$	4	пласт $c_6$	10 <sup>-6</sup>
Понижение уровня, м:		пласт $c_1$	10 <sup>-7</sup>
фактическое:		в засбросовой площади:	
пласт $c_6$	92,1	пласт $c_6$	10 <sup>-5</sup>
пласт $c_1$	128	пласт $c_1$	10 <sup>-5</sup>
моделируемое:		Коэффициент перетока разделяющей толщи, м <sup>-1</sup> :	
пласт $c_6$	93	в зоне тектонического нарушения:	
пласт $c_1$	124	пласт $c_6$	2,3×10 <sup>-7</sup>
Коэффициент фильтрации, м/сут:		пласт $c_1$	1,6×10 <sup>-8</sup>
в зоне тектонического нарушения:		в засбросовой площади:	
пласт $c_6$	10 <sup>-4</sup>	пласт $c_6$	10 <sup>-5</sup>
пласт $c_1$	10 <sup>-6</sup>	пласт $c_1$	10 <sup>-5</sup>



**Рис. 2.** Понижение уровня в выработках северо-западного коридора (линия разреза I–I, см рис. 1).

Установленные параметры проницаемости заданы на модели на участках распространения нарушенной зоны Богдановского сброса при решении прогнозных задач.

Зафиксированная динамика откачки и восстановления уровня характерна для упругого режима фильтрации с низкими параметрами упругоёмкости ( $\mu^* = 10^{-6} \dots 10^{-7}$ ) и проницаемости ( $k_{\phi} = 10^{-4} \dots 10^{-6}$  м/сут) для ЗТН. В таких условиях скорость распространения гидродинамических возмущений на порядок выше скорости реакции безнапорных пластов, и режим фильтрации быстро переходит в стационарный. Это подтверждают результаты прогнозных решений для периода ведения горных работ в зоне тектонических нарушений.

Уровни подземных вод реагируют на проведение выработок в ЗТН понижением напоров до 165 м, при этом в течение трех суток устанавливается стационарный режим фильтрации.

Характер понижения напора над выработкой объясняется сопряжением зон с проницаемостью и емкостью, отличающихся на несколько порядков (см. выше). Поэтому понижение уровня между тектоническими зонами составляет 2,49 м в северо-западном коридоре (рис. 2) и 6,8 м – в юго-восточном. При этом прогнозные водопритоки по выработкам северо-западного коридора суммарно составят 2–4 м<sup>3</sup>/сут (0,08–0,1 м<sup>3</sup>/ч) и по выработкам юго-восточного – 3–6 м<sup>3</sup>/сут (0,12–0,25 м<sup>3</sup>/ч). Согласно классификации водопроявлений прогнозный водоприток может проявляться в виде увлажненных стенок выработок и редкого капежа.

К аварийным водопритокам (прорывам) в горные выработки относятся такие, которые влекут внезапную остановку производственного цикла горных работ и требуют дополнительных ресурсов для их ликвидации. Опыт и исследования [4] показывают, что в шахтах Западного Донбасса формирование аварийного притока можно обобщить в виде трех типовых схем: 1 – подработка некачественно затампованных скважин; 2 – гидравлическая перегрузка приконтурной зоны выработки; 3 – обнажение водоносных горных пород с аномальной водопроницаемостью.

Наиболее изучены аномально высокие водопритоки в Западном Донбассе при совмещении схем 2 и 3 – участок поля шахты имени Н. И. Сташкова. На этом участке в кровле угольных пластов  $c_2$ ,  $c_5 + c_5^B$  и  $c_{10}^B$  залегают мощные толщи песчаников, а в пластах  $c_8^B$ ,  $c_8^H + c_8^{H1}$ ,  $c_6^1$ ,  $c_6$ ,  $c_5 + c_5^8$ , по результатам геологоразведочных работ, на значительной площади шахтного поля отмечены глубокие русловые размывы – русла древних рек шириной до 700–1000 м, вытянутых как по простиранию, так и вкрест простирания. Наиболее водообильные русловые песчаники мощностью 30–50 м залегают в кровле угольного пласта  $c_5 + c_5^B$  (рис. 3) и имеют выход под мезокайнозойские отложения. Эти песчаники по признакам (характеру распространения и изомощностям, гипсометрии кровли и подошвы, проницаемости, составу цемента) характеризуются как аллювиальные или русловые. Результатами предыдущих исследований установлено [5], что аллювиальные песчаники палеорусел древнего карбона, залегающие в непосредственной и основной кровле пласта  $c_5$ , – основной источник обводнения горных выработок.

По данным опробований, проведенным в процессе геологоразведочных работ, получены значения коэффициентов фильтрации угольных пластов (0,036–3,74 м/сут) и песчаников (0,004–1,8 м/сут). В интервале опробований 95,8–97,5 м по пласту  $c_5$  и 118–135 м по пласту  $c_4$  получены значения коэффициентов фильтрации, соответственно равные 10,7 и 10,8 м/сут.

Коэффициенты фильтрации водосодержащих пород карбона в разрезе рассчитаны как средневзвешенные с учетом наличия водопроявляющих песчаников в кровле (0,1–3,1 м/сут).

Для оценки максимальных рисков водопроявлений при проведении выработок через

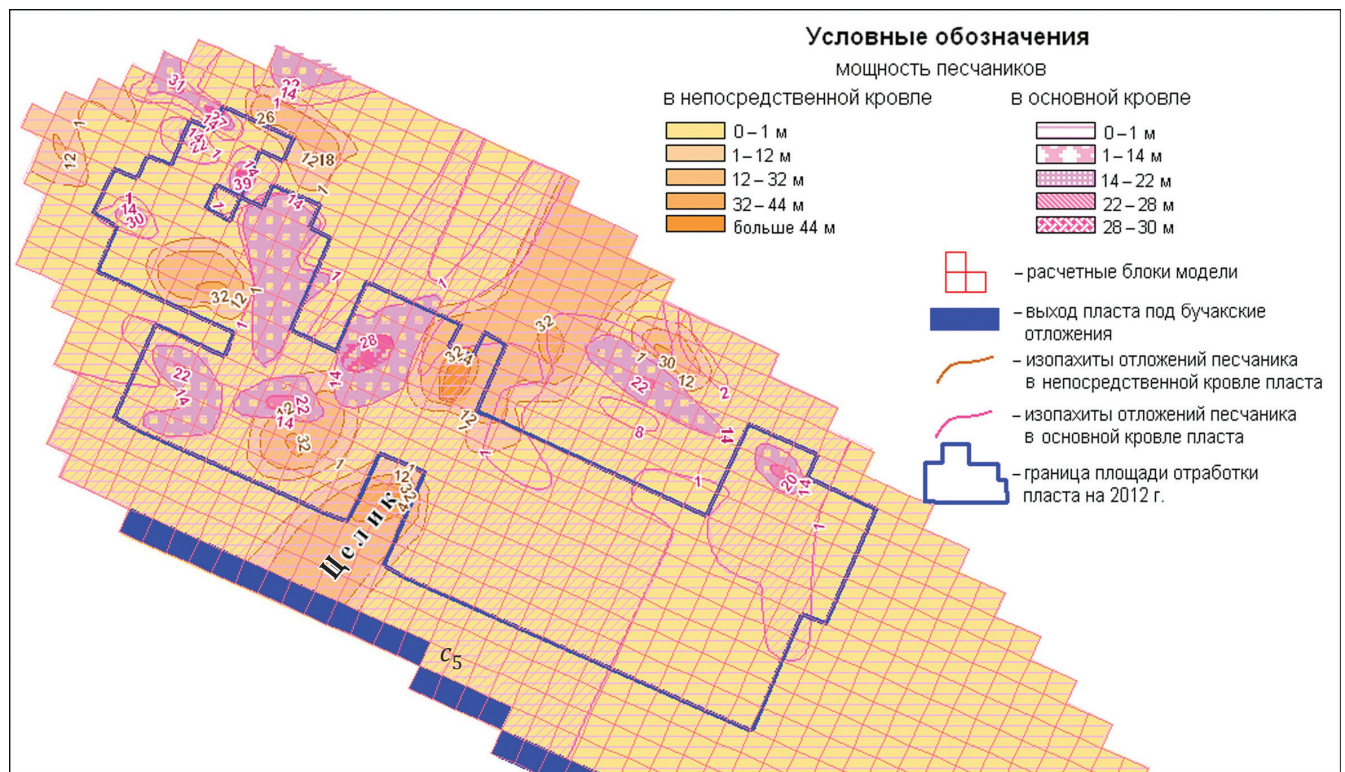
зону Богдановского сброса на компьютерной модели воспроизведены два неблагоприятных варианта. Допущения приняты исходя из того, что зона тектонического нарушения заполнена палеорусловыми песчаниками, хотя явных геологических предпосылок для этого нет. При условии, что обводненные палеорусловые песчаники имеют гидравлическую связь с зоной тектонического нарушения, за счет емкостного ресурса песчаника приток воды по выработкам северо-западного коридора увеличится до  $3 \text{ м}^3/\text{ч}$  и юго-восточного – до  $4 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

С учетом привлекаемого через предполагаемый геологический контакт ресурса бучакских отложений водоприток через зону тектонического нарушения составит по выработкам северо-западного коридора  $17,1 \text{ м}^3/\text{ч}$ , юго-восточного –  $23,5 \text{ м}^3/\text{ч}$ . При этом водопритоки практически постоянны и стабилизируются в течение первых трех суток.

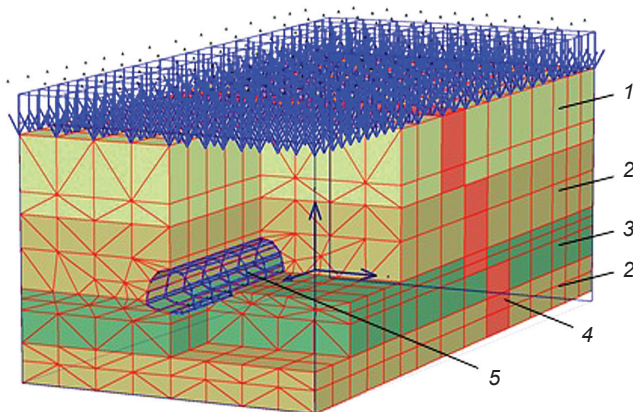
Совмещение моделей фильтрации и геомеханики (*задача 2*) при ведении мониторинга

пересечения зоны Богдановского сброса проводилось с учетом уже имеющегося опыта моделирования [4, 6]. Построение объемной гидрогеомеханической модели позволяет прогнозировать во времени и пространстве напряженно-деформированное состояние вокруг выработки с учетом удерживающего влияния ее забоя, нейтральных и эффективных напряжений, действующих в нестационарном фильтрационном поле заданием напоров, полученных из решения фильтрационной модели. Результаты тестирования такой модели применительно к условиям пересечения Богдановского сброса.

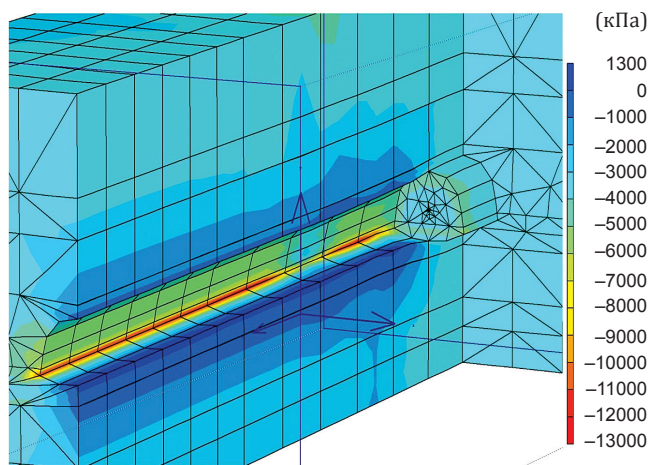
Использована численная геомеханическая модель в упругопластической постановке для объемного деформирования. Структура модели представлена слоистой неоднородной толщей с заданными контактами между расчетными слоями в соответствии с геологическим строением породного массива (рис. 4). Размеры моделируемой области по координатным осям  $x$ ,  $y$  и  $z$  установлены исходя из минимизации



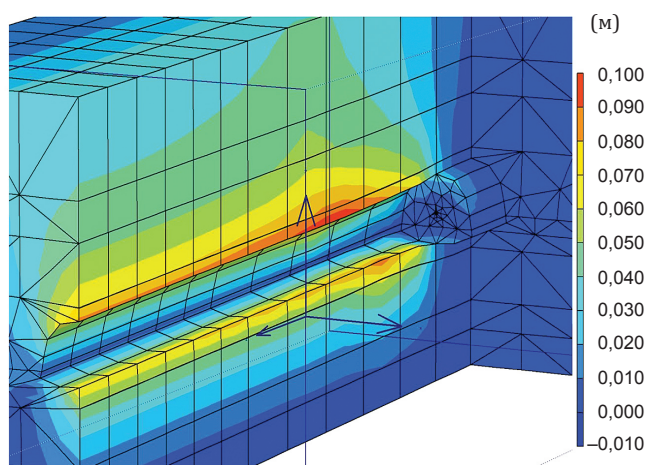
**Рис. 3.** Схема фильтрационной модели на площади распространения палеорусловых песчаников в непосредственной и основной кровле пласта  $c_5$  шахты имени Н. И. Сташкова.



**Рис. 4.** Структура моделируемой области: 1 – песчаник; 2 – алевролиты; 3 – аргиллит; 4 – тектоническое нарушение; 5 – контур выработки.



**Рис. 5.** Напряжения в массиве и на контуре выработки, кПа.



**Рис. 6.** Перемещения точек в массиве и на контуре выработки, м.

влияния краевых зон модели на ее напряженно-деформированное состояние и составили соответственно 29, 19 и 60 м.

Геостатическое давление, соответствующее глубине ведения горных работ (300 м), реализовано пригрузкой на верхнем контуре моделируемой области, равной 6000 кПа.

Наличие тектонического нарушения и его ориентация воспроизведены положением и конфигурацией зоны с пониженными значениями деформационных и прочностных характеристик. Ширина зоны сместителя установлена равной 5 м, ориентация в плане – перпендикулярна к оси выработки с падением под углом 60°.

Значения физико-механических характеристик породных слоев в численной модели установлены согласно данным, полученным на этапе разведки шахтного поля (таблица). Коэффициент структурного ослабления породного массива при оценке расчетных параметров принят 0,5. Прочность перемятого материала в зоне сместителя варьировали в диапазоне пониженных до 0,5–0,1 значений прочности пород в ненарушенном массиве.

Проведение выработки на модели имитировалось последовательным перемещением забоя и контура выемки с последующим заданием на ее боковых контурах отпора, равного 120 кПа, что соответствует отпору арочной крепи КШПУ-М площадью сечения 11,7 м<sup>2</sup> (рабочее сопротивление крепи – 250–270 кН на арку). Шаг перемещения контура выемки и интервалы между расчетными сечениями приняты 5 м.

Объемное напряженно-деформированное состояние породного массива на участке пересечения тектонического нарушения контролировалось значениями перемещений, деформаций и напряжений в окрестности выработки при подходе линии забоя к нарушению, его пересечению и выходе из него. Конечно-элементная схема модели и напряженно-деформированное состояние породного массива после удаления забоя от сместителя на 15 м показаны на рис. 5 и 6.

Проанализировав результаты моделирования, можно увидеть, что:

- смещения на верхнем незакрепленном контуре выработки вне зоны влияния тектонического нарушения находятся в диапазоне 8,3–8,5 см;

Показатель	Удельный вес, кН/м <sup>3</sup>	Модуль деформации, МПа	Коэффициент Пуассона, доли ед.	Удельное сцепление, кПа	Угол внутреннего трения, ... °
Песчаник	23,9	50	0,20	14750	37
Алевролит	24,6	40	0,20	13100	35
Аргиллит	26,6	40	0,20	4750	25
Зона нарушения	25,0	20	0,25	2000–400	25

- при приближении забоя к контуру тектонического нарушения смещения на незакрепленном своде выработки возрастают до 9,7 см, достигая 10 см при смещении опорной зоны забоя за пределы интервала нарушения;

- после пересечения нарушения закрепленной выработкой с отпором крепи 120 кПа смещения на своде продолжают расти и при отходе забоя на расстояние 10 м достигают 10,2 см;

- при снижении прочности породного материала нарушения до 400 кПа и неблагоприятном варианте водопритока смещения на верхнем контуре выработки достигают 13,1 см, а увеличение отпора крепи до 240 кПа на контуре крепи их существенно не уменьшает.

- в 10-метровом интервале пересечения сместителя прослеживается разнонаправленный характер деформирования пород в приконтурной зоне, что связано с силовым взаимодействием породных блоков лежачего и висячего боков тектонического нарушения;

- наиболее ощутимое влияние на состояние контура выработки тектоническое нарушение оказывает после его пересечения, что объясняется смещением зоны опорного давления впереди забоя на расстояние более 10 м и формированием над закрепленным контуром выработки зоны разгрузки в интервале, соответствующем положению сместителя.

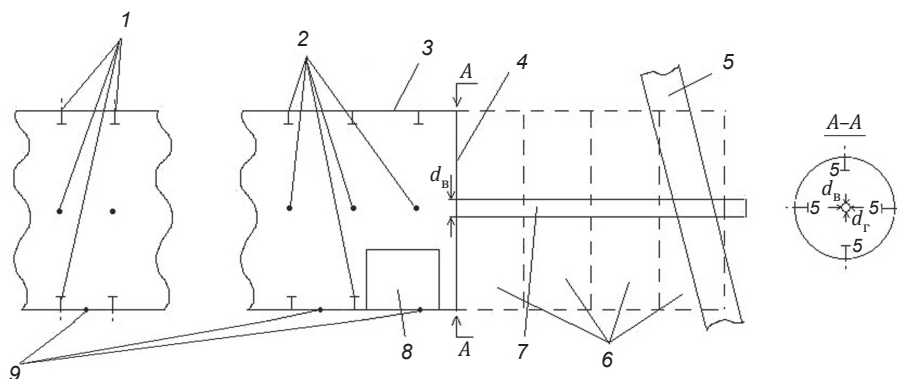
Полученные результаты не рассматриваются как абсолютный прогноз, так как модель требовала идентификации, которая в дальнейшем реализовалась на замерах контуров в мониторинговом режиме.

Несмотря на приемлемые результаты представленного гидрогеомеханического прогноза, специалисты шахты «Самарская» разработали усиленный вариант крепления откаточного квершлага [7]. Это признано оправданным в связи с назначением выработки и проектным сроком ее эксплуатации.

Выполненный в спецпроекте прогноз водопритока по нормативной методике составил более 50 м<sup>3</sup>/ч, что предполагало вскрытие мезокайнозойских отложений зияющим сместителем.

Система гидрогеомеханического мониторинга, основанная на результатах моделирования (*задача 3*), предусматривала разведочное бурение при подходе и пересечении опасной зоны Богдановского сброса. На основании нормативных требований, опережающие скважины у разрывных нарушений располагаются как по нормали к поверхности сместителя, так и по ходу выработки.

При приближении выработки к опасной зоне на расстояние 80 м было начато ведение гидрогеомеханического мониторинга (рис. 7).



**Рис. 7.** Схема гидрогеомеханического мониторинга: 1 – реперные створы вне опасной зоны; 2 – реперы; 3 – контур выработки; 4 – плоскость забоя выработки; 5 – сброс; 6 – интервалы прогнозирования устойчивости выработки и оценки необходимых параметров крепления; 7 – скважина-лидер (длина не менее 40 м);  $d_B$  и  $d_T$  – вертикальный и горизонтальный диаметры скважины-лидера; 8 – комбайн; 9 – интервалы калибровки модели (решение обратных задач).

Моделирование с поинтервальной калибровкой гидрогеомеханической модели в интервалах 9 (рис. 7) на основе результатов замеров и последующий прогноз водопритока и устойчивости выработки в интервалах 6 (см. рис. 7) выполняли один раз в три дня специалисты технической службы шахты и экспертно-аналитической мониторинговой группы. Было предусмотрено, что в случаях, когда прогнозные смещения выработки впереди забоя, полученные в результате решения обратной гидрогеомеханической задачи, уменьшают площадь его сечения ниже нормативной, цикл прогнозов повторяется с заданием по паспорту усиленного варианта крепления и его реализации.

В каждом цикле мониторинга проводили геологическую документацию, фиксировали характер водопроявлений и размеров водопритока. За весь период ведения мониторинга наблюдались водопроявления в виде увлажненных участков забоя и породного контура, а в наклонной разведочной скважине был зафиксирован водоприток  $0,2 \text{ м}^3/\text{ч}$  при приближении к сместителю тектонического нарушения. Анализ показал, что дренируются емкостные запасы воды из малопродуктивного песчаника с коэффициентом фильтрации менее  $10^{-3} \text{ м/сут}$ .

На момент завершения наблюдений конвергенция контуров выработки в зоне сброса не превысила фоновую [7].

**Выводы.** Опытно-фильтрационными работами на участке Богдановского сброса между шахтами «Благодатная» и имени Героев космоса установлено, что зона сброса является водоупором. Математическим моделированием доказано, что Богдановский сброс – слабопроницаемый экран на пути движения подземных вод и для шахт центральной части Западного Донбасса, включая шахту «Самарская».

Для зоны тектонически нарушенных пород характерны гидродинамические возмущения упругого характера с параметрами упругости ( $\mu^* = 10^{-6} \dots 10^{-7}$ ) и проницаемости ( $k_{\phi} = 10^{-4} \dots 10^{-6} \text{ м/сут}$ ), сопоставимыми с ненарушенным слабопроницаемым массивом горных пород из аргиллитов, алевролитов, пес-

чаников. В мониторинговом режиме гидрогеомеханическая модель пересечения ЗТН учитывает возможность гидравлической перегрузки приконтурной породной зоны и обнажение древних русловых отложений.

Компьютерное воспроизведение наиболее неблагоприятного варианта формирования повышенного (до  $23,5 \text{ м}^3/\text{ч}$ ) водопритока в выработку с возможностью самотечного водоотведения и опережающего дренажа или водоупора не является критическим при строгом соблюдении паспорта крепления и мониторинге ситуации по разработанной схеме, примененной на шахте «Самарская». Эффективные результаты проведения откаточного квершлага детально представлены в работе [7].

### ЛИТЕРАТУРА

1. Чемакина М. В. Водопроявления дизъюнктивных нарушений Западного Донбасса / М. В. Чемакина // Геотехн. механіка: міжвід. зб. наук. пр. / Ін-т геотехн. механіки ім. М. С. Полякова НАН України. – 2010. – Вип. 90. – 198 с.
2. Заключение о результатах работ по изучению условий обводненности зон тектонических нарушений Западного Донбасса (Павлоградско-Петропавловский углепромышленный район). – Павлоград: Павлоградская ГРЭ, 1983. – 51 с.
3. Гавич И. К. Теория и практика применения моделирования в гидрогеологии / И. К. Гавич. – М.: Недра, 1980. – 350 с.
4. Садовенко И. А. Синтезирование численных моделей при решении задач управления геофильтрационным состоянием горного массива / И. А. Садовенко // Изв. вузов. Горн. журн. – 1991. – № 12. – С. 19–22.
5. Пасечный В. Г. Роль палеорусел в формировании водопотоков шахт Западного Донбасса / В. Г. Пасечный // Геоэкологічні дослідження: стан і перспективи: зб. наук. пр. Міжнарод. наук.-практ. конф., Ч. 2, 23–25 трав., 1995 р., Івано-Франківськ. – К.: Знання, 1995. – С. 25–26.
6. Садовенко И. А. Исследование геофильтрационного состояния подрабатываемого горного массива на геомеханических моделях / И. А. Садовенко, В. И. Тимошук // Изв. вузов. Геология и разведка. – 1991. – № 2. – С. 92–97.
7. Проведение и мониторинг откаточного квершлага при пересечении региональных геологических нарушений в условиях ПСП «Самарская» ПАО «ДТЭК Павлоградуголь» / В. Г. Снигур, В. В. Панченко, С. Н. Гапеев [и др.] // Форум-гірників: матеріали Міжнарод. наук.-техн. конф., 5–8 жовтня 2016 р., м. Дніпро. – Дніпро: Нац. гірн. ун-т, 2016. – Т. 1. – С. 62–71.