

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования**

**«Сибирский государственный индустриальный университет»**

**ВК «Кузбасская ярмарка»**

**НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ  
РАЗРАБОТКИ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ  
МИНЕРАЛЬНЫХ РЕСУРСОВ**

**НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ**

**№ 8 - 2022**

Главный редактор  
д.т.н., проф. Фрянов В.Н.

Редакционная коллегия:  
чл.-корр. РАН, д.т.н., проф. Клишин В.И., д.т.н., проф. Никитенко С.М.,  
д.т.н. Павлова Л.Д. (технический редактор), д.т.н., проф. Домрачев А.Н.,  
д.э.н., проф. Петрова Т.В.

Н 340 Научно-технические технологии разработки и использования минеральных ресурсов : науч. журнал / Сиб. гос. индустр. ун-т; под общей ред. В.Н. Фрянова. – Новокузнецк, 2022. - № 8. – 390 с.

Рассмотрены аспекты развития инновационных наукоемких технологий диверсификации угольного производства и обобщены результаты научных исследований, в том числе создание роботизированных и автоматизированных угледобывающих и углеперерабатывающих предприятий, базирующиеся на использовании прорывных технологий добычи угля и метана, комплексной переработке этих продуктов в угледобывающих регионах и реализации энергетической продукции потребителям в виде тепловой и электрической энергии.

Журнал предназначен для научных и научно-технических работников, специалистов угольной промышленности, преподавателей, аспирантов и студентов вузов.

Номер подготовлен на основе материалов Международной научно-практической конференции «Научно-технические технологии разработки и использования минеральных ресурсов», проводимой в рамках специализированной выставки технологий горных разработок «Уголь России и Майнинг» (Новокузнецк, 7-10 июня 2022 г).

Основан в 2015 г.  
Выходит 1 раз в год

Учредитель - Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Сибирский государственный индустриальный университет»

УДК 622.2  
ББК 33.1

Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия.....	287
<b>ПРОМЫШЛЕННАЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ</b>	<b>291</b>
<b>О ПЕРСПЕКТИВАХ И НАПРАВЛЕНИЯХ ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ БУРЫХ УГЛЕЙ КЕМЕРОВСКОЙ ОБЛАСТИ.....</b>	<b>293</b>
д.т.н. Прошунин Ю.Е. ....	293
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия.....	293
<b>О ПЕРСПЕКТИВАХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ГАЗА ПОДЗЕМНОЙ ГАЗИФИКАЦИИ КАМЕННЫХ И БУРЫХ УГЛЕЙ .....</b>	<b>300</b>
д.т.н. Прошунин Ю.Е. ....	300
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия.....	300
<b>К ВОПРОСУ ПОЛУЧЕНИЯ ВОСТРЕБОВАННОЙ ПРОДУКЦИИ НА ОСНОВЕ БУРОУГОЛЬНОГО ПОЛУКОКСА .....</b>	<b>308</b>
д.т.н. Прошунин Ю.Е. ....	308
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия.....	308
<b>ИССЛЕДОВАНИЯ ГАЗОКИНЕТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПРИРОДНОГО УГЛЯ.....</b>	<b>314</b>
к.т.н. Козырева Е.Н., к.т.н. Плаксин М.С., Родин Р.И., Альков В.И. ....	314
Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, г. Кемерово, Россия .....	314
<b>КОМБИНАЦИЯ ПОДСИСТЕМ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ БЕЗОПАСНОСТИ ШАХТЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ .....</b>	<b>320</b>
д.т.н. Шадрин А.В. ....	320
Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, г. Кемерово, Россия .....	320
<b>МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ХЕМОСОРБЦИИ КИСЛОРОДА ИСКОПАЕМЫМИ УГЛЯМИ .....</b>	<b>325</b>
д.т.н. С.П. Греков, к.т.н. В.П. Орликова.....	325
Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» г. Донецк, Донецкая народная республика .	325
<b>РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ САМОВОЗГОРАНИЯ УГОЛЬНОГО СКОПЛЕНИЯ НА ВЫЕМОЧНОМ УЧАСТКЕ .....</b>	<b>329</b>
Головченко Е.А., Момот Д.И., Белокобыльский М.А. ....	329
Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор», г. Донецк, Донецкая Народная Республика	329
<b>БАЛЛИСТИКА КАПЕЛЬ МЕЛКОРАСПЫЛЕННОЙ ВОДЫ В ВЕНТИЛЯЦИОННОМ ПОТОКЕ ГОРНОЙ ВЫРАБОТКИ.....</b>	<b>332</b>
д.т.н. Агеев В.Г., Коляда А.Ю. ....	332
Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор», г. Донецк, Донецкая народная республика .	332
<b>ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНЫХ УСЛОВИЙ ТРУДА РАБОТНИКОВ УГОЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ ПРИ НЕЗАКОННОЙ ДОБЫЧЕ И ПЕРЕВОЗКЕ УГЛЯ .....</b>	<b>336</b>
<sup>1</sup> д.т.н. Фомин А.И., <sup>2</sup> к.т.н. Бесперстов Д.А., <sup>1</sup> д.т.н. Ли А.А.....	336
1 – АО «НЦ ВостНИИ», г. Кемерово, Россия.....	336
2 – Кемеровский государственный университет, г. Кемерово, Россия .....	336
<b>ОЦЕНКА ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ И УДАРООПАСНОСТИ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ НА ОСНОВЕ КИНЕТИЧЕСКОЙ КОНЦЕПЦИИ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД .....</b>	<b>340</b>
к.т.н. Ли К.Х., д.т.н. Иванов В.В. ....	340
АО «Научный Центр ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности в горной отрасли», г. Кемерово, Россия.....	340
<b>РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ОЧИСТНЫХ РАБОТ В ДЛИННОМ КОМПЛЕКСНО-МЕХАНИЗИРОВАННОМ ЗАБОЕ ПРИ ПЕРЕХОДЕ РАЗРЫВНОГО НАРУШЕНИЯ .....</b>	<b>352</b>
к.т.н. Говорухин Ю.М., д.т.н. Домрачев А.Н., к.т.н. Криволапов В.Г., д.т.н. Палеев Д.Ю., Поздеева И.М.....	352
ФГКУ «Национальный горноспасательный центр», г. Новокузнецк, Россия.....	352
<b>К ВОПРОСУ ОБ ОЦЕНКЕ АДЕКВАТНОСТИ МОДЕЛИ ШАХТНОЙ ВЕНТИЛЯЦИОННОЙ СЕТИ.....</b>	<b>349</b>

<sup>1</sup> к.т.н. Говорухин Ю.М., <sup>1,2</sup> д.т.н. Домрачев А.Н., <sup>1</sup> к.т.н. Криволапов В.Г., <sup>1,3</sup> д.т.н. Палеев Д.Ю., <sup>1</sup> Поздеева И.М. ....	349
1 – ФГКУ «Национальный горноспасательный центр», г. Новокузнецк, Россия.....	349
2 – Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия .....	349
3 – Горный институт УрО РАН, г. Пермь, Россия .....	349
ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МОНИТОРИНГА ПРОИЗВОДСТВА РАБОТ ПО ЛЕСНОЙ РЕКУЛЬТИВАЦИИ НА ТЕРРИТОРИИ КРАСНОЯРСКОГО КРАЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕСУРСОВ СПУТНИКОВОЙ СЪЕМКИ .....	355
<sup>1,2,3</sup> д.т.н. Зеньков И.В.....	355
1 - Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва, г. Красноярск, Россия.....	355
2 - Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия.....	355
3- Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, г. Красноярск, Россия .....	355
РЕЗУЛЬТАТЫ КОНТРОЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТ ПО ЛЕСНОЙ РЕКУЛЬТИВАЦИИ В ИРКУТСКОЙ ОБЛАСТИ С ПРИВЛЕЧЕНИЕМ РЕСУРСОВ ДИСТАНЦИОННОГО МОНИТОРИНГА ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА.....	358
<sup>1,2,3</sup> д.т.н. Зеньков И.В.....	358
1 - Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва, г. Красноярск, Россия.....	358
2 - Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия.....	358
3- Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, г. Красноярск, Россия .....	358
ГИДРОТЕРМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ РЕКУЛЬТИВИРОВАННЫХ ПОЧВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОТХОДОВ УГЛЕБОГАЩЕНИЯ .....	362
к.б.н. Семина И.С., к.с.н. Шипилова А.М., Турмий Я.А., Рязанова Е.М. ....	362
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия .....	362
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЖИЗНЕПРИГОДНОСТИ ЭМБРИОЗЕМОВ ЗАРАСТАЕМЫХ ХВОСТОХРАНИЛИЩ АБАГУРСКОЙ ОБОГАТИТЕЛЬНОЙ ФАБРИКИ.....	369
<sup>1</sup> Глумова Е.С., <sup>1</sup> Булавина М.С. <sup>2</sup> д.б.н. Андроханов В.А. ....	369
1 – Лицей № 34, г. Новокузнецк, Россия.....	369
2 – Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, г. Новосибирск, Россия .....	369
ПОТЕНЦИАЛ ГЕНЕРАЦИИ «ПАРНИКОВЫХ» ГАЗОВ УГОЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТЬЮ КУЗБАССА .....	376
Дробышев В.К., к.т.н. Стерлигов В.В.....	376
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия .....	376
ПОТЕНЦИАЛ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ НА БАЗЕ УГОЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ. ....	380
Дробышев В.К., к.т.н. Кузнецова Е.С., Романова В.А., Алюханов А.А., Полянский К.В. ....	380
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия .....	380
ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИИ ОТКРЫТОЙ УГЛЕДОБЫЧИ В БУНГУРО- ЧУМЫШСКОМ РАЙОНЕ КУЗБАССА.....	385
Горбунова А.Р., Мишин С.А. ....	385
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия .....	385

8. Троллоп Г.Х., Бок Х., Бест Б.С. Введение в механику скальных пород. – М.: Мир, 1983. – 276 с.
9. Косевич А.М. Основы механики кристаллической решетки. – М.: Наука, 1972. – 280 с.
10. Хямяляйнен В.А., Иванов В.В., Дудко К.В., Шиканов А.И. Прогноз геодинамических проявлений горного давления в тектонических блоках шахтного поля // Горный журнал. – 2013. – № 5. – С. 16–21.
11. Руппенейт К.В. Деформируемость трещиноватых массивов. – М.: Недра, 1975. – 221 с.
12. ГОСТ 25494-82. Породы горные. Метод определения удельного электрического сопротивления. – Введ. 4.11.1982.

УДК 622.451:004.942

### К ВОПРОСУ ОБ ОЦЕНКЕ АДЕКВАТНОСТИ МОДЕЛИ ШАХТНОЙ ВЕНТИЛЯЦИОННОЙ СЕТИ

<sup>1</sup>к.т.н. Говорухин Ю.М., <sup>1,2</sup>д.т.н. Домрачев А.Н., <sup>1</sup>к.т.н. Криволапов В.Г.,  
<sup>1,3</sup>д.т.н. Палеев Д.Ю., <sup>1</sup>Поздеева И.М.

1 – ФГКУ «Национальный горноспасательный центр», г. Новокузнецк, Россия

2 – Сибирский государственный индустриальный университет,  
г. Новокузнецк, Россия

3 – Горный институт УрО РАН, г. Пермь, Россия

**Аннотация.** Статья посвящена результатам исследования адекватности компьютерных моделей вентиляционных сетей действующих шахт, используемых при расчетах нормального и аварийного воздухораспределения. На основании результатов анализа сформированы критерии и разработана методика оценки адекватности шахтной вентиляционной сети фактическому состоянию системы вентиляции шахты.

**Ключевые слова:** шахтная вентиляционная сеть, оценка адекватности, критерии оценки, расчёт, воздухораспределение.

Широкое использование компьютерного моделирования воздухораспределения в вентиляционных системах шахт при перспективном планировании горных работ, проверке аварийных вентиляционных режимов и прогнозировании развития аварийной ситуации при ведении горноспасательных работ [1, 2] предопределяет повышенные требования к оценке соответствия моделей фактическому состоянию системы вентиляции шахты и делает весьма актуальной задачу разработки методологии оценки адекватности моделей шахтных вентиляционных сетей (ШВС).

Для анализа текущего состояния моделей ШВС выбрано 10 опасных производственных объектов ведения подземных горных работ. В качестве источника моделей предложено использование базы данных «Информационно-аналитическая система ВГСЧ» (ИАС ВГСЧ). Версия ИАС ВГСЧ – апрель 2021 года.

Для оценки адекватности моделей ШВС при моделировании воздухораспределения в горных выработках при нормальном и аварийном режимах определены наиболее характерные признаки несоответствия между фактическими и модельными характеристиками. К таким признакам отнесены:

1. Совпадение значений аэродинамических сопротивлений, указанных в таблице ветвей с расчётным сопротивлением для этих же ветвей, полученных в редакторе (или что тоже, контрольное сопротивление).

2. Очень низкие значения аэродинамических сопротивлений для вентиляционных перемычек. Для сравнения возможно использование Альбома вентиляционных сооружений

[3], Руководства по проектированию вентиляции угольных шахт [4], где приведены аэродинамические сопротивления различных вентиляционных сооружений. Ориентировочные минимальные сопротивления отрицательных регуляторов  $R$ , кп, составляют:

- изолирующие перемычки –  $10 \div 15$  кп.
- шлюзы в капитальных выработках –  $1,5 \div 2,5$  кп.
- шлюзы в участковых выработках –  $0,8 \div 1,5$  кп.
- шлюзы в конвейерных выработках –  $0,3 \div 0,6$  кп.

3. Значения аэродинамических сопротивлений для вентиляционных сооружений без дробной части (10,0; 2,0; 0,8; 0,1 кп и т. д.), что получается при отсутствии непосредственных замеров, т. к.  $R = h / Q^2$ .

4. Различные значения сопротивлений при нормальном воздухораспределении  $R_{п}$  и реверсии  $R_{р}$  для глухих перемычек и перемычек с окнами.

5. Равные значения  $R_{п}$  и  $R_{р}$  для регуляторов с дверями, или  $R_{р}$  выше  $R_{п}$ . Основной вентиляционный режим на шахте нормальный, реверсивный режим применяется или два раза в год при плановой реверсии или ещё реже при возникновении аварии. Реверсивные сооружения часто технически находятся в худшем состоянии, чем вентиляционные сооружения в нормальном режиме, поэтому, как правило значение  $R_{р}$  ниже  $R_{п}$ .

По результатам анализа адекватности ШВС предложена Fuzzy-модель, основанная на алгоритме Sugeno [5-8]. В качестве функций принадлежности в модели были использованы функции Гаусса, основные параметры модели приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры функций принадлежности модели на основе нечёткой логики

№ п/п	Вход/выход модели	Функция принадлежности	Параметры функции принадлежности (σ,с)
1	Число ветвей, сопротивление которых равно расчётному	gaussmf	[2,684 -5,551 e-17] [2,654 7,5] [2,654 15]
2	Число перемычек без дверей с сопротивлениями, различными в нормальном и реверсивном режимах		
3	Число перемычек с дверями и сопротивлениями, совпадающими в нормальном и реверсивном режимах		
4	Число перемычек с сопротивлением менее 0,3 кп		
5	Число ветвей с сопротивлением более 10 кп	gaussmf	[2,684 -2,082 e-16] [2,654 7,5] [2,654 15]
6	Балльная оценка адекватности ШВС	В соответствии с алгоритмом Сугено (Sugeno)	

На основании результатов моделирования получена регрессионная зависимость адекватности модели ШВС от ряда её параметров, которая имеет вид

$$mA = 114,1 - 4,2N_{расч} - 2,6N_{бд,рев} - 0,26N_{R10} - 0,92N_{д,рев} - 0,52N_{R03}, \quad (1)$$

где  $mA$  – значение балльной оценки;  $N_{расч}$  – число ветвей с расчётным сопротивлением;  $N_{бд,рев}$  – число перемычек без дверей с сопротивлениями, различными в нормальном и реверсивном режимах;  $N_{R10}$  – число ветвей с сопротивлением более 10 кп;  $N_{д,рев}$  – число перемычек с дверями и сопротивлениями, совпадающими в нормальном и реверсивном режимах;  $N_{R03}$  – число перемычек с сопротивлением менее 0,3 кп.

По результатам расчётов коэффициент множественной корреляции составил 0,96.

Для оценки адекватности модели ШВС предлагается шкала, разработанная на основе сводного графика результатов оценки по видам недостоверности, приведённого на рис. 1.

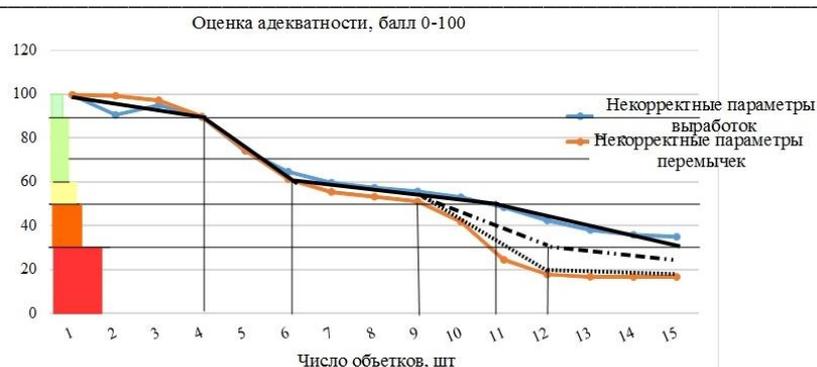


Рис. 1. Сводный график результатов оценки адекватности модели ШВС по видам недоуверности

Выделение диапазонов баллов производилось на основе линеаризации по изменению угла наклона линии тренда. Предлагаемая шкала приведена в табл. 2.

Таблица 2

Шкала оценки адекватности модели ШВС

Баллы	Адекватность	Рекомендации
100-90	Модель ШВС адекватна	Корректирующие действия не требуются
90-60	Модель ШВС адекватна только в нормальном режиме	Расчёты аварийных режимов вентиляционной сети не рекомендуются. Необходимо проверить и скорректировать сопротивления перемычек в нормальном и реверсивном режимах
60-50	Модель ШВС неадекватна	Требуется корректировка модели ШВС прежде всего в части проверки обоснованности использования расчётных сопротивлений выработок. Корректировка может потребовать частичной депрессионной съёмки
50-30	Модель ШВС неадекватна	Необходима корректировка с частичной или полной депрессионной съёмки
Менее 30	Модель ШВС несостоятельна	Модель ШВС не соответствует топологии шахты

**Вывод.** Таким образом, в ходе выполнения исследований разработана методика оценки адекватности моделей ШВС, использование которой позволит принимать оперативные решения об возможности их применения в ходе ведения аварийно-спасательных работ на опасном производственном объекте ведения горных работ.

### Список литературы

1. Домрачев А.Н., Говорухин Ю.М., Криволапов В.Г., Палеев Д.Ю. Анализ и прогноз динамики аварий и инцидентов на предприятиях горной промышленности и подземного строительства Российской Федерации // Научно-технические разработки и использования минеральных ресурсов. – 2019. – № 5. – С.448-450.
1. Домрачев А.Н., Криволапов В.Г., Говорухин Ю.М., Палеев Д.Ю. К вопросу о формализации оценки действий руководителя ликвидации аварии при ведении аварийно-спасательных работ на горных предприятиях // Научно-технические разработки и использования минеральных ресурсов. – 2018. – № 4. – С.476-479.
3. Альбом вентиляционных сооружений для угольных шахт / ВостНИИ по безопасности работ в горной промышленности. – Кемерово: ВостНИИ, 1978. – 85 с.
4. Руководство по проектированию вентиляции угольных шахт / Кол. авторов. – Макеевка-Донбасс: МакНИИ, 1989. – 319 с.
5. Fuzzy Logic Toolbox// The MathWorks, Inc., 2017. – 472с.
6. Дьяконов В.П., Круглов В.В. Математические пакеты расширения MATLAB. Специальный справочник. – СПб.: Питер, 2001. – 488 с.

7. Domrachev A.N., Paleev D.Y., Govorukhin Y.M., Krivolapov V.G., Lipatin V.I. The use expert methods and game theory methods when making decisions during rescue works // Bulletin of Research Center for Safety in Coal Industry (Industrial Safety). – 2014. – № 1. – С.33-36.

8. Домрачев А.Н., Палеев Д.Ю., Говорухин Ю.М., Криволапов В.Г., Липатин В.И. Использование аппарата нейронных сетей и нечёткой логики при оценке вероятности взрыва пылеметановоздушной смеси // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2014. – № 1. – С.40-43.

УДК 622.83:004.42

**РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ  
ОЧИСТНЫХ РАБОТ В ДЛИННОМ КОМПЛЕКСНО-МЕХАНИЗИРОВАННОМ  
ЗАБОЕ ПРИ ПЕРЕХОДЕ РАЗРЫВНОГО НАРУШЕНИЯ**

**к.т.н. Говорухин Ю.М., д.т.н. Домрачев А.Н., к.т.н. Криволапов В.Г.,  
д.т.н. Палеев Д.Ю., Поздеева И.М.**

**ФГКУ «Национальный горноспасательный центр», г. Новокузнецк, Россия**

*Аннотация.* Рассмотрена имитационная модель работы длинного КМЗ при переходе разрывного нарушения, позволяющая учесть влияние геометрических параметров смещения пласта, изменение условий выемки угля и функционирования очистного оборудования. С использованием модели выполнен проверочный расчет нагрузки на забой и оценено влияние угла встречи с нарушением на показатели очистных работ.

*Ключевые слова:* имитационная модель, разрывное нарушение, очистной забой, угол встречи с нарушением

В основе модели лежит геометризация нарушения по системе оценки его параметров на основе данных профилирования выемочных выработок (рис. 1) [1].

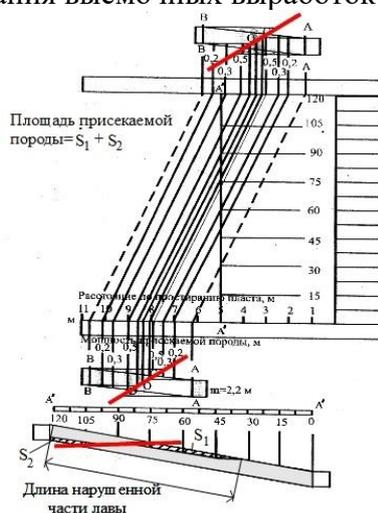


Рис. 1. Геометризация разрывного нарушения

В развитии данного подхода разработана расчетная схема, приведенная на рис. 2, которая положена в основу модели оценки параметров резания при работе очистного комбайна в зоне разрывного нарушения [4-6].

$$\begin{aligned}
 f_1 &= k_1(y - y_{нач}); \\
 f_2 &= k_2(y - y_{нач} - y_1); \\
 f_3 &= b - k_3(y - y_{нач} - y_3),
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

где  $b$  – длина разрывного нарушения.