

ОТЗЫВ

Официального оппонента на диссертацию Стародубова Алексея Николаевича
«Обоснование технологии и оборудования выемки мощных пологих пластов
средствами компьютерного моделирования» по специальности 2.8.8 –
«Геотехнология, горные машины»

1. Актуальность темы исследования

При подземной разработке мощных пологих угольных пластов очистные работы, сопровождающиеся непрерывным подвиганием забоя, оказывают существенное влияние на изменение структурных характеристик углепородного массива. Такое техногенное воздействие приводит к трансформации геомеханического состояния вмещающих пород, что, в свою очередь, обуславливает необходимость разработки и внедрения комплекса мероприятий, направленных на исключение простоев горно-шахтного оборудования. При применении технологии с выпуском угля из подкровельной или межслоевой толщи возникают дополнительные риски, связанные с загазированием очистных участков, образованием значительных полостей в выработанном пространстве вследствие зависания труднообрушающейся кровли либо формирования куполов сводообразования. Кроме того, при выпуске угля из мощных пластов невозможно обеспечить его полное извлечение и часть угольной массы остается в завальном пространстве, что не только снижает технико-экономические показатели разработки, но и создает предпосылки для повышения метановыделения и увеличения пожароопасности в очистном забое.

Перечисленные технологические ограничения выпуска угля подкровельной толщи на забойный конвейер способны при определенных горно-геологических условиях существенно снизить практическую ценность ее очевидных преимуществ, что предопределяет необходимость научного обоснования выбора рациональных параметров как самой технологии, так и специализированного очистного оборудования, предназначенного для отработки мощных пологих угольных пластов.

Объект исследования – специализированный очистной механизированный комплекс, включающий от нескольких десятков до сотен секций крепи специальной конструкции, которые обеспечивают одновременный выпуск угля в различных режимах на забойный конвейер. Указанный комплекс представляет собой сложный технологический объект, не имеющий прямых аналогов и функционирующий в сложных горно-геологических условиях, что существенно осложняет как его проектирование, так и обоснование режимных параметров работы.

Дополнительную сложность вносит стохастическая природа процесса выпуска угля, которая обуславливает значительную вариабельность показателей полноты извлечения и качества выдаваемой горной массы в зависимости от множества случайных факторов. Данное обстоятельство практически исключает возможность формализации процесса в виде аналитических зависимостей и делает некорректным применение

детерминированных математических моделей для прогнозирования его эффективности. В этой связи обоснование рациональных параметров технологии и оборудования требует привлечения современных средств цифрового моделирования, позволяющих адекватно учитывать вероятностную природу процесса и вариативность горно-геологических условий.

Как показано в диссертационной работе, в настоящее время существует ряд теоретических подходов и программных средств, обеспечивающих воспроизведение процессов движения разупрочненной горной массы через выпускные окна питателей секций крепи. Наиболее физически обоснованным из них является метод дискретных элементов (МДЭ), реализованный в таких программных пакетах, как EDEM, Rocky DEM, Ansys, LAMMPS и других. Однако, как справедливо отмечает автор, непосредственное применение МДЭ для решения задач выбора рациональных параметров выемки сопряжено с высокими вычислительными затратами, что существенно ограничивает его использование для проведения многовариантных расчетов с приемлемыми затратами машинного времени.

Исходя из этого, автором предложен оригинальный подход, основанный на комбинировании нескольких парадигм моделирования на разных уровнях абстракции, что позволяет кратно сократить требования к вычислительным и временным ресурсам без потери достоверности получаемых результатов. Разработанные методики и компьютерные модели обеспечивают проведение комплексного обоснования технологии и оборудования выемки мощных пологих пластов, при котором достигаются минимальные потери и разубоживание угля с соблюдением требований промышленной безопасности.

Таким образом, представленное исследование направлено на разработку новых научно обоснованных технических и технологических решений по повышению эффективности технологий выемки мощных угольных пластов с выпуском угля подкровельной толщи на забойный конвейер, а его результаты имеют существенное теоретическое и практическое значение для угольной отрасли.

2. Общая характеристика работы

Во введении автором обоснована актуальность темы диссертационного исследования, поставлены цель и задачи работы, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, охарактеризованы научная новизна, практическая значимость полученных результатов и их достоверность.

В первой главе рассматривается современное состояние, технологии и перспективы подземной разработки мощных пологих угольных пластов. Особое внимание уделено анализу существующих конструкций секций механизированной крепи и критериям выбора оборудования для реализации технологии с выпуском угля на забойный и завальный конвейеры. Автор исследует теоретические проблемы описания процессов выпуска и истечения сыпучих материалов, эволюцию научных представлений о ведении горных

работ в данных условиях, а также возможности применения компьютерного моделирования для исследования и оптимизации процесса выпуска угля.

На основании изложенного автором сформулированы цель диссертационного исследования, выявлены и обоснованы противоречия, подлежащие разрешению, а также определены задачи, решение которых обеспечивает достижение поставленной цели.

Во второй главе разработан научно-методологический подход к предиктивному анализу и оценке параметров геотехнологий, основанный на синергетической интеграции метода дискретных элементов (DEM), дискретно-событийного моделирования и оптимизационных алгоритмов. Подход позволяет с высокой достоверностью прогнозировать показатели выемки мощных угольных пластов с выпуском угля подкровельной толщи в сложных горно-геологических условиях при высоком уровне неопределенности факторов и отсутствии прямых технологических аналогов.

В третьей главе научно обоснованы границы эффективного применения технологии выемки мощных пологих пластов с управляемым выпуском угля на забойный конвейер с использованием специальной механизированной крепи. На основе комплексного анализа горно-геологических и горнотехнических факторов установлены области значений параметров, обеспечивающие максимальную производительность очистного забоя и минимальные потери полезного ископаемого.

В четвертой главе определены кинематические и геометрические закономерности гравитационно-стимулированного истечения разрушенного горного массива через выпускной механизм крепи. Показано, что при полном открытии створа системы «питатель-заслон» формируются три кинематические зоны с переменным градиентом скоростей (минимальная скорость зафиксирована в среднем слое, ниже показателей верхнего и нижнего слоев в 2,8 и 1,3 раза соответственно). Установлен сегрегационный эффект распределения фракций по высоте потока, определяющий повышенную концентрацию мелкодисперсных частиц у основания питателя и обуславливающий динамику его повышенного износа, а также интенсивность сопутствующего пылевыведения, отсутствующих при использовании традиционных технологий. В связи с этим автором предложен принцип выбора материалов питателя, а также разработан и запатентован способ пылеподавления в зоне нового источника интенсивного образования пыли, что способствует повышению безопасности применения технологии с выпуском угля подкровельной толщи.

В пятой главе обосновано преимущество волнового режима выпуска угля подкровельной толщи при многосекционной работе крепи. Установлено, что этот режим, в отличие от альтернативных технологических схем, обеспечивает наиболее стабильное, равномерное и полное заполнение забойного конвейера без критических колебаний грузопотока. Разработана инженерная методика адаптации волнового режима к конкретным горно-геологическим условиям ведения работ. Методика позволяет аналитически

определять рациональное количество одновременно задействованных управляемых секций механизированной крепи, последовательность их запуска и величину массового расхода угля на каждой секции.

В шестой главе диссертации автором установлены математические закономерности, связывающие длительность единичного цикла выпуска угля с интегральными показателями эффективности рассматриваемой геотехнологии, а именно:

- объем извлеченной горной массы изменяется по кусочно-заданной зависимости, характеризующейся линейным ростом на начальном этапе с последующим выходом на плато;
- уровень разубоживания возрастает по квадратичному закону;
- объем потерь угля в завальном пространстве убывает в соответствии с полиномиальной зависимостью второй степени;
- вероятность образования статических сводов над выпускным окном увеличивается по экспоненциальному закону под действием сил трения между частицами сыпучей среды.

На основе полученных зависимостей автором доказано существование рационального временного интервала выпуска, обеспечивающего наибольшую эффективность геотехнологического процесса. Кроме того, в работе приведен конкретный пример реализации предложенного подхода для определения указанного интервала применительно к заданным горно-геологическим и горнотехническим условиям, что подтверждает практическую применимость разработанных рекомендаций.

В Заключении диссертации и соответствующем разделе автореферата соискатель квалифицирует представленную работу как научно-квалификационное исследование, в котором нашли свое решение актуальные научно-технические задачи. Как убедительно показано автором, разработанные технологические и технические решения по выемке мощных пологих пластов с управляемым выпуском подкровельного угля не только обеспечивают повышение эффективности и безопасности горных работ, но и обладают выраженным хозяйственным потенциалом, позволяя улучшить технико-экономические показатели угледобычи за счет увеличения полноты извлечения запасов и сокращения потерь и разубоживания.

Структура диссертации выстроена логически последовательно, все главы связаны единой методологической основой и подчинены достижению сформулированной цели. Методический аппарат исследования характеризуется корректностью и адекватностью решаемым задачам, а совокупность использованных научных методов обеспечивает необходимую глубину проработки вопросов и обоснованность выводов и практических рекомендаций, представленных автором.

3. Новизна исследования и полученных результатов

1. Разработан алгоритм математического и компьютерного моделирования, интегрирующий метод дискретных элементов, дискретно-

событийное моделирование и алгоритм оптимизации параметров. Оригинальность подхода заключается в синергетическом сочетании указанных методов, что обеспечивает предиктивную оценку геотехнологических процессов при выпуске подкровельной толщи угля при значительном сокращении временных и вычислительных ресурсов, что дает возможность внедрения алгоритма в систему автоматизации очистного комплекса.

2. Определены и научно обоснованы граничные условия эффективной реализации технологии отработки мощных пологих пластов с регулируемым выпуском угля на забойный конвейер. Обоснование базируется на установленных закономерностях пространственного соотношения мощностей угольной толщи и обрушающихся вмещающих пород, а также определении величины шага подвигания специализированного очистного механизированного комплекса перед инициацией выпуска.

3. Установлены пространственно-динамические закономерности распределения скоростей перемещения горной массы в новой конструктивной системе «питатель-заслон» специальной механизированной крепи в составе специализированного очистного механизированного комплекса. Выявлены параметры исполнительных механизмов крепи, обеспечивающие высокую производительность и безопасность управления потоком угля при работе очистного комплекса.

4. Теоретически и экспериментально обоснованы технологические регламенты и режимные параметры выпуска угля подкровельной толщи. Установлено, что реализация волнового режима обеспечивает наилучшую стабильность, непрерывность и максимальный коэффициент заполнения забойного конвейера в условиях интенсифицированного совместного выпуска угля из группы смежных секций специальной механизированной крепи.

5. Сформулированы базовые параметры алгоритма управления программируемым выпуском угля. Установлено существование интервала параметров, при котором минимизируются риски статического сводообразования над выпускным окном секции и максимизируются интегральная эффективность геотехнологии по критериям полноты объема извлечения при минимизации показателей разубоживания и эксплуатационных потерь за крепью.

4. Обоснованность и достоверность научных положений

Диссертантом сформулированы пять научных положений, отражающих содержание диссертации и автореферата.

В первом научном положении утверждается, что скорость и достоверность предиктивного анализа геотехнологий, исследования и программируемого управления движением горной массы достигается при использовании разработанного комплекса компьютерных моделей в соответствии с созданным алгоритмом применения разных видов моделирования.

Представленные в научном положении методы (метод дискретных элементов, дискретно-событийное моделирование, методы оптимизации) широко известны и корректное их использование для решения соответствующих им задач способствует сокращению временных и вычислительных ресурсов. Интеграция этих методов в единую систему обработки данных является целесообразным и обоснованным в рамках предлагаемых автором решений.

Во втором научном положении утверждается, что высокая производительность и полнота выемки мощных угольных пластов с выпуском угля подкровельной толщи с использованием специальной механизированной крепи на забойный конвейер обеспечивается за счет формирования разворота потока угля, образуемого рядом передвижек комплекса на величину, близкую к удвоенному значению малой полуоси эллипсоида выпуска, при постоянном площадном подпоре породой не менее 3 т/м^2 при выпускаемой мощности угля более 2,5 м и в отношении по массе не менее 1:1 при меньшей мощности.

Выводы автора относительно необходимого числа передвижек секции механизированной крепи представляются вполне обоснованными, поскольку они базируются на фундаментальных положениях классической теории выпуска сыпучих сред, развитой в трудах Р. Квапила, Г.М. Малахова, В.В. Куликова и других исследователей. При этом соискатель адаптирует указанные теоретические положения к конкретным условиям технологии с выпуском угля на забойный конвейер с использованием специализированной секции крепи, что придает полученным результатам не только теоретическую состоятельность, но и практическую направленность. Необходимость наличия «подпора породой» обоснована физической природой процесса. Приводимые конкретные значения горнотехнических параметров требуют верификации, что практически невозможно осуществить в условиях действующего забоя. Однако их обоснованность подтверждается необходимым объемом проведенных численных экспериментов.

В третьем научном положении утверждается, что массовый расход угля управляется сочетанием параметров системы «питатель-заслон» специальной механизированной крепи, в которой формируются три зоны потока с различной крупностью и линейной скоростью кусков: зона ускоренного истечения преимущественно большей крупности в верхнем слое, поддерживаемая и ускоряемая возвратно-поступательным движением питателя; зона нижнего слоя с высокой концентрацией мелких кусков, сдвигаемых ступенями питателя, и средний слой, движущийся медленнее, чем нижний и верхний слои в 1,3 и 2,8 раза соответственно.

Достоверность и обоснованность выводов автора подтверждается их согласованностью с установленными закономерностями механики гетерогенных сред. В работе показано, что движение выпускаемой горной массы характеризуется скоростной дифференциацией, что коррелирует с классическими гидродинамическими моделями течения многофазных систем. Более того, соискателем выявлена и обоснована глубокая аналогия между

поведением вибрирующей гранулированной среды и суспензий, что свидетельствует о единстве физических принципов, лежащих в основе наблюдаемых эффектов. Сегрегационное разделение частиц по крупности, детально проанализированное автором, рассматривается как проявление внутренней неустойчивости сыпучего потока, обусловленной различиями в механических характеристиках компонентов. Главным достижением данной части исследования следует считать количественное определение геометрических характеристик потоков — их размеров, пространственной ориентации и формы, что позволяет обоснованно перейти к разработке инженерных решений, адаптированных к конкретным условиям эксплуатации и обеспечивающих эффективное управление процессом выпуска.

В четвертом научном положении утверждается, что управляемым волновым режимом выпуска подкровельной толщи одновременно из нескольких секций специализированного очистного механизированного комплекса, с убывающим по длине очистного забоя значением массового расхода угля, обеспечивается регулируемое равномерное и максимальное заполнение забойного конвейера.

Научное положение имеет прикладную направленность, при этом содержание исследования показывает, что установлены аналитические зависимости параметров волнового режима выпуска угля от локальных горно-геологических условий. Они определяют структуру и динамику формирования призабойного грузопотока и позволили создать методику адаптации технологии к конкретным условиям работ через расчетное обоснование количества одновременно работающих секций крепи, регламента их поочередного включения и целевых значений массового расхода на выпускных окнах.

В пятом научном положении утверждается, что объем выпущенной горной массы имеет вид кусочно-заданной функции от длительности выпуска — прямая пропорциональность с выходом на постоянную величину, при дальнейшем квадратичном росте процента разубоживания выпускаемого угля, но снижении его потерь, описываемом полиномиальной зависимостью второй степени, сопровождающимся экспоненциальным ростом вероятности образования статических сводообразований над выпускным окном секции специальной механизированной крепи. При этом существует интервал продолжительности выпуска, на котором обеспечиваются лучшие показатели эффективности специализированных очистных механизированных комплексов.

В положении представлено описание физически обоснованной зависимости параметров эффективности единичного выпуска угля от его длительности. Установлено существование критического временного интервала, разграничивающего зоны линейного роста объема извлечения и последующей стабилизации грузопотока, которая сопровождается квадратичным ростом разубоживания и экспоненциальным увеличением

вероятности фрикционного заклинивания (сводообразования) кусков горной массы над выпускным окном механизированной крепи.

5. Практическая значимость

Работа имеет выраженную практическую направленность. Результаты всех разделов исследования могут быть положены в основу обоснования принимаемых технических решений и способствовать внедрению специализированных очистных механизированных комплексов с выпуском угля подкровельной толщи, оснащенных специальной механизированной крепью, для разработки мощных угольных пластов.

6. Личный вклад автора

Автор лично участвовал во всех этапах разработки, апробации и практической реализации результатов научных исследований, представленных в диссертации, выполнял обработку и интерпретацию полученных исследовательских данных.

7. Замечания по диссертационной работе

1. Автором использованы известные методы – дискретное моделирование в Rocky DEM и дискретно-событийное имитационное моделирование в GPSS, которые были разработаны в 1960-1970-х годах и с тех пор широко применяются на практике. В связи с этим научная новизна предлагаемого подхода представляется недостаточно обоснованной, а причины, по которым известные методы проектирования в данном случае неприменимы, – недостаточно раскрыты.

2. В работе рассматривается выпуск мелкораздробленной горной массы, тогда как реальный массив такими характеристиками не обладает. При этом не указано, какими мероприятиями обеспечивается предварительное разупрочнение массива.

3. Что понимается под термином «разворот потока угля», приведенным в тексте диссертации и выведенным во второе научное положение?

4. Не вполне корректно указаны предельные границы m_y , m_n – мощности угля подкровельной толщи и разупрочненных пород кровли в формуле (11) на странице 184. Логичнее указать их максимальное значение в числовом выражении, а не задавать интервал $(0; +\infty)$, поскольку не существует горного массива такой мощности.

5. Требуется пояснения, почему средний слой потока движется с наименьшей скоростью, т.к. согласно классическим представлениям о движении сыпучих сред и законам гидравлики, торможение у стенок (в верхней и нижней частях потока) должно быть более выраженным вследствие трения, а максимальная скорость – наблюдаться в центральной части. Неясно

также, почему частицы крупной фракции концентрируются именно в верхнем слое потока, если при движении к выпускному окну крупные куски, особенно пустой породы, обладают более высокой скоростью и должны опускаться вниз раньше.

6. Остается невыясненным механизм интенсивного износа поверхности питателя мелкими частицами. Не получила объяснения и практическая ценность полученных данных, если применяемая эмпирическая модель расчета абразивного износа поверхностей трения Джона Ф. Арчарда позволяет определить относительную скорость износа, а не абсолютное время его протекания.

7. Требуется раскрытия физический смысл математических закономерностей, полученных в последней главе, в контексте выпуска угля. В частности, необходимо пояснить, почему объем выпущенного угля при увеличении времени выпуска описывается именно кусочно-заданной функцией, в чем состоит физический смысл квадратичного роста разубоживания после стабилизации объема угля и каким образом полиномиальная зависимость второй степени описывает снижение потерь угля в завале. Кроме того, следует указать практическую значимость знания этих математических закономерностей.

8. Оценка языка, стиля диссертации и автореферата

Оформление диссертационной работы выполнено аккуратно, текст сопровождается качественным иллюстративным материалом, в достаточной мере раскрывающим содержание проведенных исследований. Изложение отличается логической последовательностью и структурной упорядоченностью. Язык и стиль диссертации и автореферата соответствуют нормам, принятым в научно-технической литературе. Терминология употребляется корректно и единообразно.

9. Соответствие содержания автореферата основным положениям диссертации

Содержание автореферата полностью соответствует содержанию диссертационной работы, а также структуре и логике изложения материала. Научные положения и основные результаты исследования в полной мере отражены в опубликованных работах автора.

10. Заключение

Высказанные замечания носят уточняющий характер и не затрагивают существа защищаемых научных положений, в связи с чем не оказывают влияния на общую положительную оценку диссертационной работы.

Диссертационная работа «Обоснование технологии и оборудования выемки мощных пологих пластов средствами компьютерного моделирования»

Стародубова Алексея Николаевича является законченной научно-квалификационной работой, в которой изложены новые научно обоснованные технические и технологические решения по повышению эффективности технологий выемки мощных угольных пластов с выпуском угля подкровельной толщи на забойный конвейер.

Содержание диссертации соответствует требованиям паспорта специальности 2.8.8 – «Геотехнология, горные машины», по пунктам 1, 12, 14 области исследований:

– п. 1. Научные основы создания и развития технологий и оборудования для комплексного освоения и сохранения недр в различных горно-геологических и природно-климатических условиях.

– п. 12. Организация производства при открытой и подземной разработке месторождений твердых полезных ископаемых и развитие механизации технологических процессов.

– п. 14. Критерии и технологические требования при создании новых и совершенствования применяемых горных машин с учетом особенностей условий их эксплуатации при разработке месторождений твердых полезных ископаемых.

Диссертация соответствует критериям, установленным пп. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней» для ученой степени доктора наук, а ее автор Стародубов Алексей Николаевич достоин присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.8.8 – «Геотехнология, горные машины».

Официальный оппонент,

Доктор технических наук, профессор, генеральный директор АО «Научный центр ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности в горной отрасли»

10.09.2026



Тайлаков Олег Владимирович

Акционерное общество «Научный центр ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности в горной отрасли». 650002, Кемеровская область - Кузбасс, г.о. Кемеровский, г. Кемерово, ул. Институтская, здание 3, помещение 1. Телефон: 8(3842) 64-30-99 Телефон/факс: 8(3842) 64-44-42 e-mail: main@nc-vostnii.ru

Подпись Тайлакова О.В. заверяю
Начальник отдела кадров



М.П. Волобуева