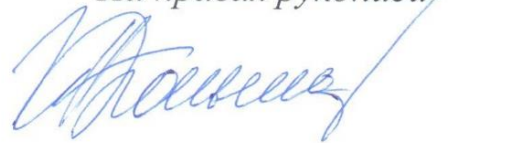


*На правах рукописи*



**КОПЫЛОВ Константин Николаевич**

**ОБОСНОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОПТИМАЛЬНОГО  
УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ  
ОТБОЙКИ И ТРАНСПОРТИРОВКИ УГЛЯ КОМПЛЕКСНО-  
МЕХАНИЗИРОВАННОГО ЗАБОЯ**

Специальность 25.00.22 – «Геотехнология (подземная, открытая и  
строительная)»

**АВТОРЕФЕРАТ**  
**диссертации на соискание ученой степени**  
**кандидата технических наук**

Москва 2019



## Общая характеристика работы

**Актуальность исследования.** Процесс добычи твердых полезных ископаемых подземным способом относится к особо опасным видам производственной деятельности человека на планете. Показательной в этом случае является угольная промышленность. В Российской Федерации добыча угля по данным на 01 января 2018 года ведется на 161 предприятии, в том числе 53 угольных шахтах и 108 разрезах. При этом доля добычи угля подземным способом за последние годы остается на высоком уровне и составляет примерно четвертую часть от всего добываемого угля. В основном удельный вес добычи угля подземным способом приходится на комплексно-механизированные забои и составляет более 90%. Среднесуточная нагрузка на комплексно-механизированные забои растет из года в год и составляет в Кузнецком бассейне 5006 т. Среди угольных компаний России по этому показателю лидирует АО «СУЭК» - 10843 т. В настоящее время на предприятиях АО «СУЭК» уровень комплексно-механизированной добычи составляет 100%. Увеличение среднесуточных нагрузок на комплексно-механизированные забои требует обязательного обеспечения нормативного уровня безопасной эксплуатации. В то же время, хронометраж работы комплексно-механизированного забоя свидетельствует о возможности повышения эффективности его работы. И в первую очередь это касается эффективности использования оборудования на выемочных участках.

Анализ работы технологического оборудования показывает, что его простои при добыче угля подземным способом составляют 30% от общего времени. На очистные работы приходится половина (15%) простоев при подземных горных работах. Детальный анализ распределения рабочего времени в течение суток и причин простоев машин и механизмов показал, что максимальное число простоев приходится на организационные, горно-геологические причины и неисправность машин и механизмов. По потерям времени максимальные значения приходятся на организационные и технологические причины. Среднее время простоя единицы оборудования составляло 0,9 часов в сутки.

Таким образом, особую значимость приобретает правильный выбор режима оперативного управления комплексно-механизированным забоем при интенсивной отбойки угля. Поэтому, *обоснование и доказательства необходимости оперативного управления высокопроизводительным комплексно-механизированным забоем является актуальной научной задачей.* Перспективным направлением решения поставленной задачи является использование методов моделирования работы комплексно-механизированного забоя. Разработанные модели работы технологического оборудования выемочного участка шахты позволят осуществлять планирование и оперативное управление работой выемочного участка, выявлять негативные тенденции изменения техногенной среды и ранних предвестников

аварийных происшествий, оценивать риски возможных простоев и аварийных происшествий, разрабатывать превентивные мероприятия по нейтрализации или минимизации возможных негативных проявлений.

Основной **целью научного исследования** является обоснование и оптимизация технико-технологических решений, повышающих эффективность добычи угля при эксплуатации комплексно-механизированных забоев.

**Идея работы** заключается в использовании оперативного управления комплексно-механизированным забоем на основе математического моделирования для оптимизации загрузки технологического оборудования при отработке выемочного участка.

Для достижения сформулированной цели научного исследования в работе **решались следующие задачи:**

- анализ причин и продолжительности простоев выемочных участков, обрабатывающих запасы комплексно-механизированными забоями;
- исследование неравномерности загрузки забойно-транспортного технологического оборудования выемочных участков;
- определение возможности повышения производительности комплексно-механизированных забоев при отработке выемочных столбов;
- определение влияния на производительность комплексно-механизированного забоя геометрических, технологических и техногенных параметров выемочного участка;
- разработка метода оперативного управления комплексно-механизированным забоем при отработке выемочных столбов.

**Объектом исследования** является горнотехническая система, включающая в себя массив горных пород (уголь, вмещающие породы) и технологическое оборудование комплексно-механизированного забоя (выемочной комбайн, скребковый конвейер, перегружатель с дробилкой, часть ленточного конвейера, находящегося в пределах выемочного участка до вентиляционной сбойки).

**Предмет исследований** – технологические режимы работы оборудования комплексно-механизированного забоя и параметры горнотехнической системы на выемочном участке.

Для решения поставленных задач в работе использовались **методы исследований:** планирование и проведения шахтных экспериментов, инструментальные наблюдения за параметрами состояния горнотехнической системы, технологического оборудования на выемочном участке, статистические методы обработки экспериментальных данных и оценки погрешности расчетов, теория вероятности, методы имитационного и математического моделирования, методы оптимизации.

**Основные научные положения, выносимые на защиту:**

1. Разработано математическое описание движения угля на выемочном участке, отличающееся возможностью учета неравномерности отбойки угля и позволяющее определять объемы угля, находящиеся на каждом элементе транспортной линии в любой момент времени, с ошибкой в среднем не более 8%.

2. Для обеспечения оптимальной производительности выемочного участка скорость подачи выемочного комбайна во время рабочего прохода должна изменяться таким образом, чтобы обеспечить наибольшую загрузку транспортной линии отбитым углем в кратчайший срок до объема, суммарное выделение метана из которого не превышает нормативного уровня безопасной эксплуатации.

3. Использование оптимального режима подачи выемочного комбайна во время рабочего прохода, обеспечивающего оптимальную загрузку технологического оборудования, увеличивает интенсивность отбойки угля на 20-30%.

4. Оперативное управление работой высокопроизводительного технологического оборудования комплексно-механизированного забоя должно выполняться на основе найденного с помощью математического моделирования оптимального режима изменения скорости подачи комбайна.

**Научная новизна проведенного исследования** заключается в обосновании необходимости оперативного управления режимами работы комплексно-механизированного забоя, при отработке выемочных участков, на основе использования математического моделирования для оптимизации загрузки транспортной линии; в разработке метода определения технологических режимов эксплуатации комплексно-механизированного забоя, обеспечивающих повышение производительности.

**Научная новизна полученных результатов** заключается:

1. В обосновании необходимости оперативного управления работой высокопроизводительного комплексно-механизированного забоя при отработке выемочных участков по причине возрастания неоднородности загрузки технологического оборудования при рабочем проходе комбайна.

2. В разработке метода определения режимов работы комплексно-механизированного забоя, обеспечивающего безопасную и наиболее производительную работу очистного участка.

3. В определении резерва производительности комплексно-механизированного забоя, обеспечивающего повышение нагрузки и рост добычи угля при рабочем проходе комбайна до 20 - 30%, рассчитанного на основе компьютерного моделирования.

4. В обосновании влияния на производительность комплексно-механизированного забоя неравномерности загрузки забойно-транспортного комплекса.

**Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций**

подтверждается:

- использованием апробированных методик, средств и аппаратуры при проведении производственных экспериментальных исследований и наблюдений за изменением горнотехнической системы в ходе работы комплексно-механизированного забоя на выемочном участке;

- использованием при расчете классических положений по определению параметров горнотехнической системы при техногенном преобразовании массива горных пород;

- сходимостью результатов расчетов с фактически определенными параметрами горнотехнической системы и показателями работы комплексно-механизированного забоя в ходе производственных экспериментов на выемочном участке с точностью до 10-12%;

- положительным опытом практического применения разработанного метода определения режимов работы комплексно-механизированного забоя на шахтах АО «СУЭК».

**Личный вклад автора** заключается:

- в проведении комплекса производственных экспериментальных исследований на шахтах АО «СУЭК»;

- в установлении закономерностей изменения параметров горнотехнической системы при техногенном преобразовании массива горных пород на выемочном участке;

- в разработке метода определения режима работы комплексно-механизированного забоя с учетом неравномерности загрузки технологического оборудования выемочного участка;

- в оценке адекватности алгоритма расчета характеристик и параметров горнотехнической системы выемочного участка в зависимости от режима работы комплексно-механизированного забоя.

**Отличие от ранее выполненных работ** заключается: в проведении теоретических исследований технологических параметров, характеризующих работу выемочного участка, учитывающих состояние горнотехнической системы, обосновании метода определения оптимальных режимов работы комплексно-механизированного забоя и проведением его опытной промышленной проверки на шахтах, в обосновании необходимости оперативного управления комплексно-механизированным забоем при отработке выемочных участков высокопроизводительным оборудованием.

**Практическая ценность результатов** работы состоит в разработке метода определения технологических режимов эксплуатации комплексно-механизированного забоя, обеспечивающих повышение производительности при отработке выемочных столбов.

**Реализация работы.** Положения, разработанные в диссертационной работе, реализованы в «Технической политике АО «СУЭК» в области организации управления

комплексным механизированным забоем» на основе разработанной автором математической модели» и используются на шахтах АО «СУЭК» на выемочных участках.

**Апробация работы.** Результаты работы докладывались и обсуждались на XXIV, XXV и XXVI Международных научных симпозиумах «Неделя горняка», 13 Международной научной школе молодых ученых и специалистов. Института проблем комплексного освоения недр РАН, XXVII Международной научной школе им. академика С. А. Христиановича, Международной научно-практической конференции «Поземная угледобыча XXI век», III-rd International Innovative Mining Symposium (IIMS 2018), 39-th international symposium application of computers and operation research in the mineral industry (APCOM 2019)

**Публикации.** Результаты работы опубликованы в 20 научных статьях, в том числе 13 в рецензируемых ВАК РФ журналах.

**Структура и объем диссертационной работы:** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 110 наименований, приложения, изложенных на 157 страницах машинописного текста, содержит 66 рисунков, 11 таблиц

#### **Основное содержание работы.**

**В первой главе** дан анализ работ, направленных на повышение эффективности работы комплексно-механизированного забоя в условиях высокопроизводительной отработки запасов. Выемочный участок является сложной горнотехнической системой, на состояние и поведение которой оказывают влияние угольный пласт и вмещающие породы, планировочные решения, применяемые средства механизации, состояние рудничной атмосферы и интенсивность выделения метана. В работах Ткачева В.В., Качурина Н.М., Калединой Н.О., Качурина А.Н., Сластунова С.В., Каркашадзе Г.Г., Мазаника Е.В., Лупия М.Г., Борщевич А.М., Ковалева Р.А., Бухтиярова А.А., Сарычевой И.В., Воробьева С.А., Полевщикова Г.Я., Шинкевича М.В., Суфиярова А.М., Шевченко Л.А., Ливинской С.Н., Пугачева Е.В., Червякова Е.В., Червякова А.Е., Гуляева В.Г., Жукова К.В., Рубана А.Д., Артемьева В.Б., Забурдяева В.С., Забурдяева Г.С., Руденко Ю.Ф., Мельника В.В. и других авторов рассмотрены вопросы уменьшения удельных энергозатрат на резание, транспортирование и погрузку угля шнеком, выполнены исследования процессов автоматического управления выемочным комбайном, обоснован алгоритм автоматического управления скоростями подачи и резания с позиции стабилизации погрузочной производительности исполнительных органов, но не с точки зрения загрузки технологического оборудования комплексно-механизированного забоя. Разработаны математические модели выделения метана с поверхности угольного пласта, полей концентраций метана в очистном забое, прогнозирования и управления аэрогазовым режимом выемочных участков, параметров выемочного участка, зависимость метановыделения из отбитого угля в очистной забой и т.д. Доказано, что основным

источником метановыделения при интенсивной добыче угля в очистных забоях, является отбитый уголь, расположенный на транспортной магистрали (скребковый конвейер, перегружатель, дробилка и часть ленточного конвейера, расположенного до вентиляционной сбойки).

Детальный анализ полученных результатов показывает, что, они не могут быть использованы для создания модели технологического процесса, способной обеспечить текущее управление выемочным комбайном для достижения максимально возможной энергоэффективной работы выемочного участка. Одна часть выполненных работ имеет чисто теоретический характер, а в других в расчетах используются усредненные значения. Используя только усредненные данные загрузки транспортной магистрали (скребковый конвейер, перегружатель, дробилка и часть ленточного конвейера, расположенного до вентиляционной сбойки) невозможно в произвольный момент времени вычислить сколько угля находится на каждом элементе технологического оборудования для оптимизации загрузки.

Использование математических методов моделирования и прогнозирования технологической системы имеют высокую достоверность получаемой информации. Поэтому для определения параметров работы выемочного участка следует использовать математическое моделирование, позволяющее количественно описать процессы транспортировки угля по транспортной магистрали (скребковый конвейер, перегружатель, дробилка и часть ленточного конвейера, расположенного до вентиляционной сбойки). При этом модель работы комплексно-механизированного забоя должна учитывать неравномерность подачи выемочного комбайна, и как следствие неравномерность загрузки углем транспортной магистрали, то есть пространственное распределение угля на транспортной магистрали и позволять определять общую текущую загрузку углем в произвольный момент времени.

Проведено исследование влияние видов, количества и продолжительности простоев на производственные показатели работы шахт. Выявлено, что наибольшее число простоев на шахтах АО «СУЭК» происходит по технологическим причинам 61% и соответственно наибольшие потери рабочего времени 64%. Это связано с производством монтажно-демонтажных работ в лаве, укорачиванием конвейерной линии и подрывкой почвы выработок. Для более детального анализа причин остановки технологического процесса добычи угля, на выемочном участке на шахте Полысаевская АО «СУЭК» были произведены наблюдения за режимами технологического процесса и хронометраж работы комплексно-механизированного забоя. Исследовались режимы работы комплексно-механизированного забоя в течение месяца. Анализ сведений о номинальных параметрах электрооборудования выемочного участка



шахты «Полысаевская» показал, что производительность выемочного комбайна завышена по отношению к номинальным параметра средств транспортировки на 33%, что дает возможность, изменяя скорость подачи выемочного комбайна, оптимизировать загрузку транспортной магистрали (скребковый конвейер, перегружатель, дробилка и часть ленточного конвейера, расположенного до вентиляционной сбойки).

Сопоставление нормативных и фактических показателей по добыче, количеству стружек и машинному времени свидетельствует о неэффективной работе выемочной оборуования (выполнение суточного плана 11,5 тыс. тонн возможно в среднем за 12 часов). Результаты корреляционного анализа скорости перемещения выемочного комбайна относительно секции крепи с показаниями датчиков метана выявил существенную зависимость. Так при скорости подачи выемочного комбайна 7 м/мин показание забойного датчика составит 0,52 %, куткового датчика 0,8 % содержания метана. Поэтому, повышения производительности в этом случае, возможно, добиться только с помощью оперативного управления работой комплексно-механизированного забоя при рабочем цикле движения выемочного комбайна выдерживая оптимальное изменение скорости его подачи вдоль лавы.

*Во второй главе* выполнено исследование основных параметров технологического процесса транспортировки угля в пределах выемочного участка. Для этого изучены стадии и операции технологического процесса работы выемочного участка при однопроходной схеме работы комбайна. При создании математической модели описания основных технологических операций выемочного комплекса входными факторами являются: скорость подачи комбайна, скорости скребкового лавного конвейера, перегружателя, дробилки, ленточного конвейера, концентрация метана на входе и выходе из очистного забоя, относительная текущая метанообильность разрабатываемого пласта; выходным параметром является производительность комбайна. В общем случае движение выемочного комбайна вдоль линии забоя происходит с некоторой скоростью  $V_k$ , изменяющейся по неизвестному закону  $V_k = V_k(t)$ . Тогда местоположение выемочного комбайна определяется как координата  $x(t)$  и находится из решения дифференциального уравнения  $\frac{dx}{dt} = V_k(t)$ . Требуется найти такой закон изменения скорости подачи комбайна, который обеспечит наибольшую загрузку транспортной линии отбитым углем, суммарное выделение метана из которого не превысит нормативного уровня безопасной эксплуатации.

Следует отметить особенности задачи. Так при движении выемочного комбайна связь координаты от времени  $x_k = x_k(t)$  и связь времени от координаты  $t = t(x_k)$  являются однозначной. Однако, при остановке выемочного комбайна однозначность зависимости  $t = t(x_k)$  пропадает. Вторая особенность возникает в том, что процесс перемещения угля

скребковым конвейером при изменяемой скорости подачи выемочного комбайна, обладает памятью. То есть, для того, чтоб определить общую текущую загрузку скребкового конвейера необходимо использовать предисторию состояния процесса на предыдущих шагах. То есть общий вес отбитого угля в лаве в момент времени  $t_j$  определяется интегрированием элементарных порций отбитого угля, для которых выполняется условие – время перемещения от точки отбойки до конвейерного штрека меньше времени транспортировки на скребковом конвейере.

Анализ процесса перемещения угля скребковым конвейером при неравномерной его загрузке выемочным комбайном обладает свойством необратимости (рис. 1) из-за того, что данные об объемах перегружаемого угля на следующее технологическое оборудование пропадают, то для возможности описания процесса с обратимым временем требуется дополнительно сохранять данные об ушедших со скребкового конвейера объемах угля. Операция сдвига объемов угля вдоль скребкового конвейера не допускает описание в конечном виде. В математике не существует такого оператора преобразования, так как для различных значений аргументов функции загрузки конвейера, в зависимости от координаты, он должен действовать по-разному (грузить уголь, перемещать уголь, перегружать уголь). При этом область действия (по координате  $x$ ) изменяется при движении выемочного комбайна.

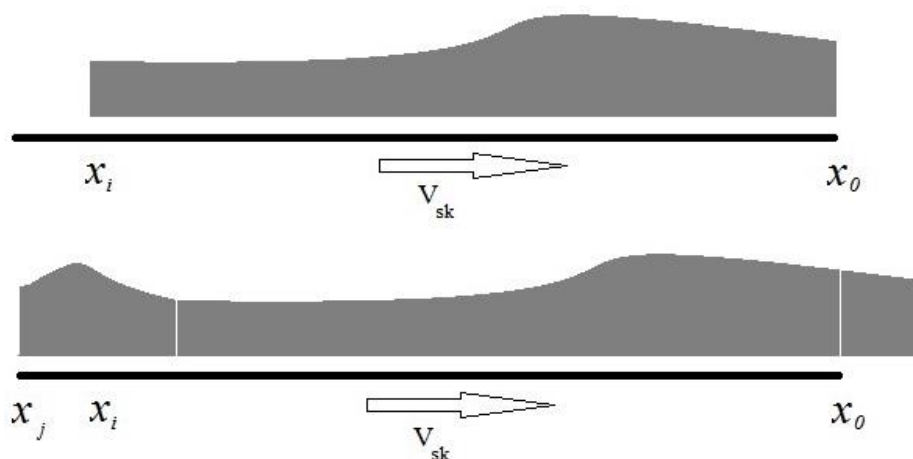


Рисунок 1. Схема перемещения угля скребковым конвейером.

Верхняя часть соответствует загрузке скребкового конвейера углем в момент времени  $t_i$

Нижняя часть соответствует загрузке скребкового конвейера углем в момент времени  $t_j = t_i + dt$ . Координата  $x_0$  место сочленение скребкового конвейера с перегружателем,  $x_i$  – место нахождения выемочного комбайна в момент времени  $t_i$ ,  $x_j$  место расположения выемочного комбайна в момент времени  $t_j$ .  $V_{sk}$  - скорость скребкового конвейера.

Используя дискретное представление объемов угля, то есть, рассматривая многочисленые порции угля, которые «загружаются выемочным комбайном на скребковый конвейер», «перемещаются скребковым конвейером», «перегружаются со скребкового конвейера» необходимо в задачу вводить уравнения движения каждой порции. Такой подход

ведет, во-первых, к резкому увеличению размерности задачи на несколько порядков, во-вторых, возникает необходимость постоянно генерировать зависимости, описывающие движения вдоль забоя вновь отбитой порции угля скребковым конвейером, и после перегрузки элементарной порции со скребкового конвейера удалять эти зависимости. Все эти обстоятельства оставляют только один способ представления распределенной по протяженности загрузки скребкового конвейера в виде выборочных различных действий над элементами функции загрузки. При этом следует увеличить размерность функции распределения угля на скребковом конвейере, добавив время  $t$ , представив её в виде  $\varphi = \varphi(x, t)$ .

Тогда, с учетом того, что скорость у большинства лавных (скребковых) конвейеров постоянна и не может быть изменена ( $V_{sk} = const$ ), увеличение объема угля в результате отбивки его выемочным комбайном (в приближении, что весь отбитый уголь перемещается на скребковый конвейер и пренебрегая габаритами выемочного комбайна) запишется выражением  $\varphi = \varphi(x_k, t) = \varphi(x_{ki}, t_i) + dM = \varphi(x_i, t_i) + \gamma h m V_k dt$  ( $\gamma$  – объемный вес угля,  $h$  – длина шнека,  $m$  – мощность пласта). Перемещение груза скребковым конвейером (со скоростью  $V_{sk}$ ) – операция сдвига - преобразование функции  $\varphi(x, t)$ , которое описывается выражением  $\varphi(x_i, t + dt) = \varphi(x_i - V_{sk} dt, t)$  для всего пространства лавы (то есть для всех  $x_0 \leq x_i \leq x_n$ ,  $x_0$  – координата начала скребкового конвейера, расположенного у нижнего штрека в месте, где происходит пересып угля со скребкового конвейера на перегружатель,  $x_n$  – координата конца скребкового конвейера, расположенного у верхнего штрека). При этом часть конвейера, расположенная у верхнего штрека, и представляющая собой участок, который появился за отрезок времени  $dt$ , остается пустой  $\varphi(x, t) = \varphi(x_n \div x_n - V_{sk} dt, t + dt) = 0$ .

Уголь, который находился на скребковом конвейере, в нижней части штрека, перегружается на перегружатель, сочленённый с дробилкой. Этот объем угля равен  $\varphi_{out}(x, t) = \varphi(x_1 \div x_1 + V_{sk} dt, t)$ . Аналогично скребковому конвейеру, как потоковое устройство перемещения горной массы работают перегружатель, дробильный комплекс и, ленточный конвейер. Соотношения, описывающие поступление угля на технологическое оборудование (скребковый и ленточный конвейера, перегружатель, дробилку) имеют вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi_{sk}(x_i, t_i) + dM = \varphi_{sk}(x_i, t_i) + \gamma hm V_k dt \quad (x_i = x_k) \\ \varphi_p(x_i, t_i) + dM = \varphi_p(x_n \div x_n - V_p dt, t_i) = \varphi_{sk}(x_1 \div x_1 + V_{sk} dt, t_i) \frac{V_{sk}}{V_p} \\ \varphi_d(x_i, t_i) + dM = \varphi_d(x_n \div x_n - V_d dt, t_i) = \varphi_p(x_1 \div x_1 + V_p dt, t_i) \frac{V_p}{V_d} \\ \varphi_{lk}(x_i, t_i) + dM = \varphi_{lk}(x_n \div x_n - V_{lk} dt, t_i) = \varphi_d(x_1 \div x_1 + V_d dt, t_i) \frac{V_d}{V_{kl}} \end{array} \right. \quad (1)$$

В соотношении (1 - 3) следующие обозначения: индекс sk - скребковый конвейер; индекс p – перегружатель; индекс d – дробилка; индекс lk - ленточный конвейер.

Соотношения, описывающие перемещение угля по технологическому оборудованию имеют вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \left\{ \begin{array}{l} \varphi_{sk}(x_i, t + dt) = \varphi_{sk}(x_i - V_{sk} dt, t) \quad (x_i < x_n - V_{sk} dt) \\ \varphi_{sk}(x_n \div x_n - V_{sk} dt, t + dt) = 0 \quad (x_i \geq x_n - V_{sk} dt) \end{array} \right. \\ \left\{ \begin{array}{l} \varphi_p(x_i, t + dt) = \varphi_p(x_i - V_p dt, t) \quad (x_i < x_n - V_p dt) \\ \varphi_p(x_n \div x_n - V_p dt, t + dt) = 0 \quad (x_i \geq x_n - V_p dt) \end{array} \right. \\ \left\{ \begin{array}{l} \varphi_d(x_i, t + dt) = \varphi_d(x_i - V_d dt, t) \quad (x_i < x_n - V_d dt) \\ \varphi_d(x_n \div x_n - V_d dt, t + dt) = 0 \quad (x_i \geq x_n - V_d dt) \end{array} \right. \\ \left\{ \begin{array}{l} \varphi_{lk}(x_i, t + dt) = \varphi_{lk}(x_i - V_{lk} dt, t) \quad (x_i < x_n - V_{lk} dt) \\ \varphi_{lk}(x_n \div x_n - V_{lk} dt, t + dt) = 0 \quad (x_i \geq x_n - V_{lk} dt) \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (2)$$

Соотношения, описывающие перемещение (пересып) угля с одного на другое технологическое оборудование:

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi_{out \rightarrow p}(x, t) = \varphi_{sk}(x_1 \div x_1 + V_{sk} dt, t) \\ \varphi_{out \rightarrow d}(x, t) = \varphi_p(x_1 \div x_1 + V_p dt, t) \\ \varphi_{out \rightarrow lk}(x, t) = \varphi_d(x_1 \div x_1 + V_d dt, t) \\ \varphi_{out}(x, t) = \varphi_{lk}(x_1 \div x_1 + V_{lk} dt, t) \end{array} \right. \quad (3)$$

Результаты моделирования рабочего прохода выемочного комбайна при использовании номинального режима на участке № 17-49 пласта Бреевский шахты Полысаевская АО «СУЭК» представлены на рис. 2. Выемочной участок №17-49 шахты «Полысаевская» отрабатывает запасы по пласту «Бреевский», мощность которого (вместе с высокозольной пачкой) изменяется от 1,56 м до 1,80 м. Мощность «ложной» кровли от 0,20 до 0,45 м. Выемочный столб по физическим свойствам условно разбит на три участка. Исследования проводились при работе комплекса в зоне третьего участка наиболее однородного по физическим свойствам. Основные параметры выемочного участка, принятые к расчету, следующие: мощность пласта средняя 1,74, мощность пласта вынимаемая 1,74, угол падения 12 - 17°, сопротивление резанью 140 кг/см<sup>2</sup>, объемный вес угля 1,29 т/м<sup>3</sup>, длина лавы 304 м, количество секций крепи 177; добыча за цикл 740 тонн.

Проветривание выемочного участка осуществляется через вентиляционную сбойку, отстоящую от лавы на 220 метров.

Объем угля на перегружателе (син.), скребковом (чер.), ленточном (зел.) конвейерах и всего (кр.) при скорости подачи 6 м/м

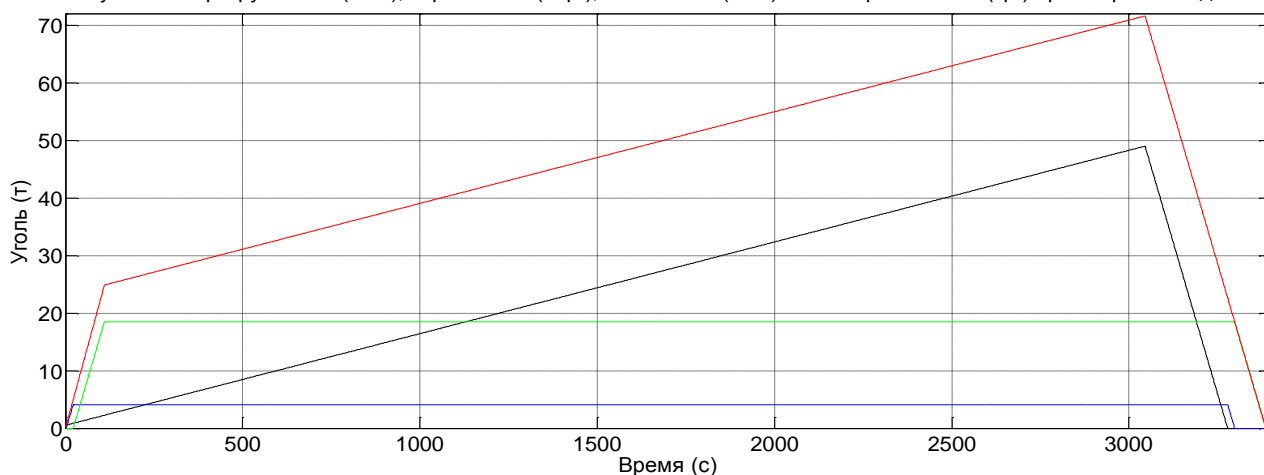


Рисунок 2 – объемы угля в лаве № 17-49 при рабочем проходе выемочного комбайна

*В третьей главе* представлены результаты шахтных экспериментов по определению параметров работы комплексно-механизированного забоя на выемочном участке № 17-49 шахты «Полысаевская» АО «СУЭК». Цель эксперимента – проверка работоспособности разработанной математической модели работы комплексно-механизированного забоя и оценка её адекватности.

Отработка запасов выемочного участка № 17-49 шахты «Полысаевская» ведется выемочным комплексом в составе: механизированная крепь FRS-GLINIK-12/25, переходные секции крепи FRS-GLINIK-12/27, секции крепи штрековые FRS-GLINIK-16/34, забойный скребковый конвейер FFC-9, угледобывающий комбайн SL-300 фирмы «Айкхофф» германского производства, перегружатель FSL-9, дробилка FLB-10B. При проведении экспериментов использовалась однопроходная схема отбивки угля. Уголь отбивается выемочным комбайном SL-300 и по забойному скребковому конвейеру перемещается к перегружателю, затем на дробилку и на ленточный конвейер. Далее уголь ленточными конвейерами доставляется на поверхность. Для проветривания выемочного участка применяется комбинированная схема проветривания. Свежий воздух для проветривания выемочного участка подается по конвейерному штреку 17-49, проветривание конвейерного штрека обособленное (расстояние до воздухоподающей сбойки изменяется от 0 до 200 м), движение воздуха по очистному забою восходящее, исходящая струя воздуха выдается на вентиляционный штрек 17-49 и далее на поверхность. Применяется изолированный отвод метановоздушной смеси из выработанного пространства по частично сохраняемому вентиляционному штреку 17-49.

В ходе экспериментов фиксировалось: положение комбайна относительно секций крепи, токи и напряжения двигателей технологического оборудования (подачи и шнеков комбайна,

скребкового конвейера, перегружателя, дробилки), показания датчиков азрогазового контроля (рис. 3),



Рисунок 3. Параметры работы выемочного комбайна и показания датчиков метана за период шахтных экспериментов

Эксперименты производились при различных скоростях подачи выемочного комбайна (рис. 4). Фактический вес угля определялся с помощью конвейерных весов. Сравнение результатов шахтного эксперимента по определению общей загрузки углем транспортной магистрали (скребковый конвейер, перегружатель, дробилка и часть ленточного конвейера, расположенного до вентиляционной сбойки) комплексно-механизированного забоя с данными, полученными с помощью математической модели (табл. 1), показало, что в среднем погрешность в определении загрузки не превышает 8%. Увеличение погрешности в определении объемов угля на транспортной магистрали при скорости подачи выемочного комбайна 10 м/мин объясняется большой её вариативностью при проведении эксперимента (на рис 4. выделено овалом).

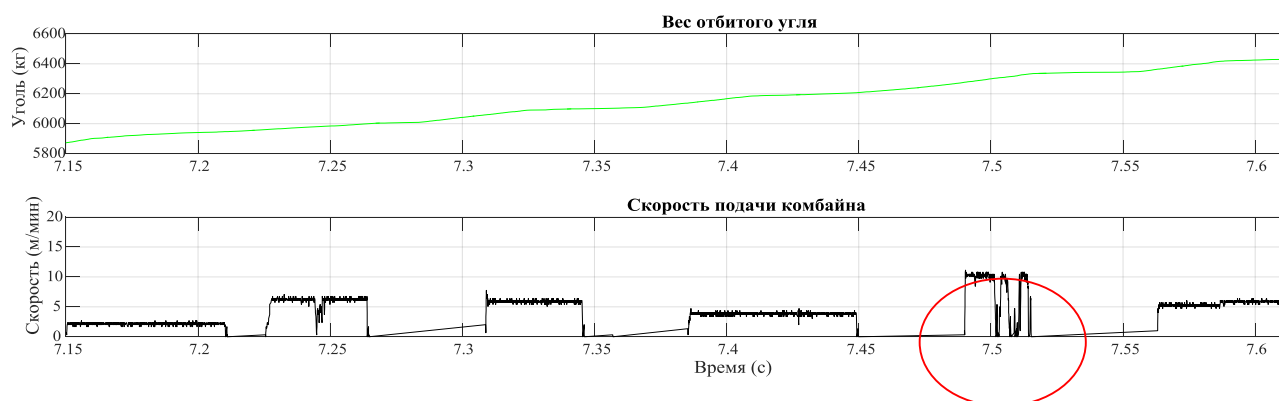


Рисунок 4. Параметры работы выемочного комбайна и показания датчиков метана за период шахтных экспериментов

Таблица 1. Сопоставление расчетных объемов угля с фактическими.

Средняя скорость подачи выемочного комбайна (м/мин)	Продолжительность наблюдений (с)	Вес угля (т)		Погрешность
		Вычисленный с помощью модели	Фактический	
2,15	595	47,86	44,5	7%
5,9	363	78,76	71,5	9,2%
3,83	629	90,12	85,2	5,5%
10,15	112	42,52	37,5	11,8%
5,26	234	46,06	48,1	4,6%

Таким образом, ставится оптимизационная задача по нахождению режимов подачи выемочного комбайна, которые обеспечивали бы наибольшую производительность при рабочем проходе с учетом ограничений по объему угля, находящегося в лаве. То есть, необходимо найти такие режимы изменения скорости подачи выемочного комбайна, при которых время прохода вдоль забоя (от нижнего штрека к верхнему штреку) была бы минимальна с учетом ограничений по объему угля, находящегося в лаве. Очевидно, чем больше начальная скорость подачи выемочного комбайна, тем меньше время его рабочего прохода вдоль забоя. По всей видимости, максимальная производительность комплексно-механизированного забоя достигается при выемке угля на максимально возможной скорости подачи выемочного комбайна. Однако из-за увеличения объемом отбитого угля на конвейерах выемочного участка значительно увеличивается выделение метана. Вследствие чего суммарное выделение метана может превысить нормативный уровень безопасной эксплуатации. В общем случае выделение метана на выемочном участке определяется суммой выделения метана из обнажения пласта, вмещающих пород и пластов спутников, отработанного пространства и из отбитого угля. При этом первые три во время рабочей смены при неизменных горно-геологических условиях остаются неизменными. Объем метана, выделяющегося из отбитого угля, напрямую зависят от его объема. В силу того, что отбитый уголь в пределах выемочного участка находится не более 5 минут, выделение из него метана в первом приближении можно считать постоянным. Поэтому, ограничительным условием оптимизационной задачи по поиску оптимального режима подачи выемочного комбайна будет допустимый объем угля, находящийся на участке. Результаты решения поставленной оптимизационной задачи представлены на рис. 5.

Простое сравнение объемов угля, находящегося в пределах выемочного участка, при работе с номинальным режимом подачи комбайна (рис. 2) по сравнению с найденным

оптимальным режимом подачи (рис. 6), свидетельствует о более равномерной (горизонтальная фрагмент красно линии) загрузке транспортной магистрали во втором (оптимальном) случае.

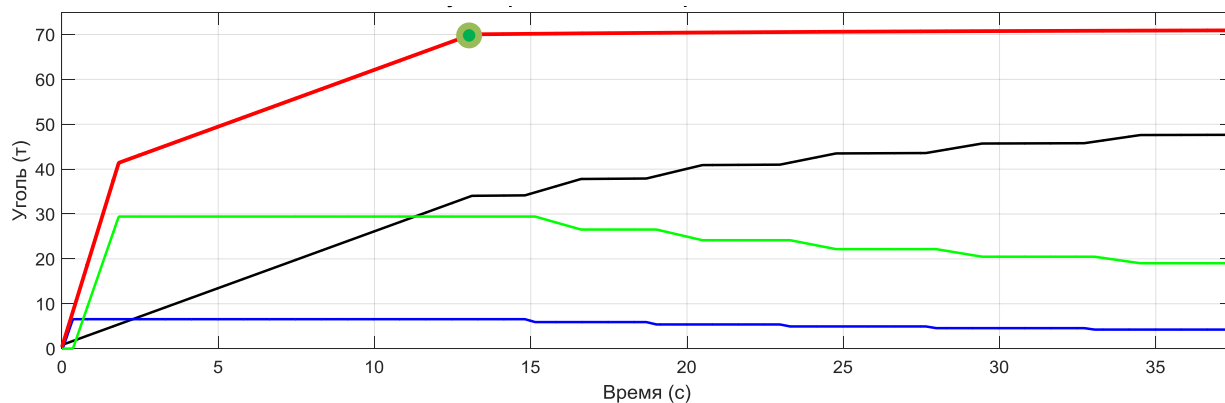


Рисунок 5 – Объемы угля на выемочном участке (син. на перегружателе, зел. на ленточном конвейере, чер. на скребковом конвейере, кр. общий объем угля) при использовании оптимального режима подачи комбайна с первоначальной скоростью 10 м/мин.

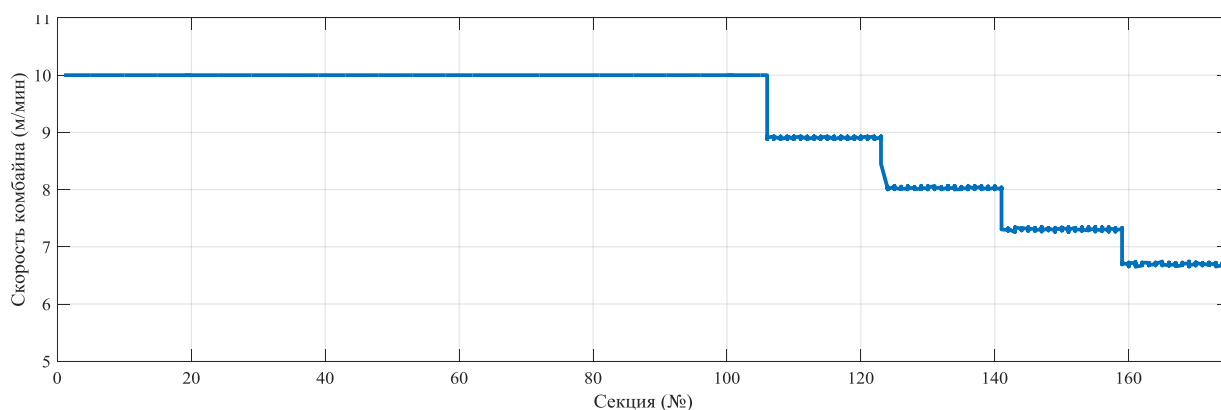


Рисунок 6 – Оптимальный режим изменения скорости подачи выемочного комбайна (первоначальная скорость 10 м/мин) относительно секций крепи.

Интерес представляют результаты вычислительного эксперимента, выявившие потерю устойчивости технологического процесса, при попытке увеличить начальную скорость подачи выемочного комбайна при рабочем проходе, заключающиеся в периодических остановках комбайна (рис. 7, 8).

По результатам проведенных компьютерных экспериментов найдены оптимальные режимы изменения скорости подачи выемочного комбайна при отработке запасов выемочных блоков высокопроизводительными комплексно-механизированными забоями для различных параметров выемочного участка. Определен прирост производительности рабочего прохода, величина которого от 15% до 28%. Прирост производительности добычи угля при использовании оптимального режима изменения скорости подачи выемочного комбайна для условий лавы № 17-49 шахты Полысаевская АО «СУЭК» с начальной скоростью подачи выемочного комбайна 10 м/мин на рабочем проходе и в целом с учетом прохода для зачистки составят соответственно 25% и 20%.



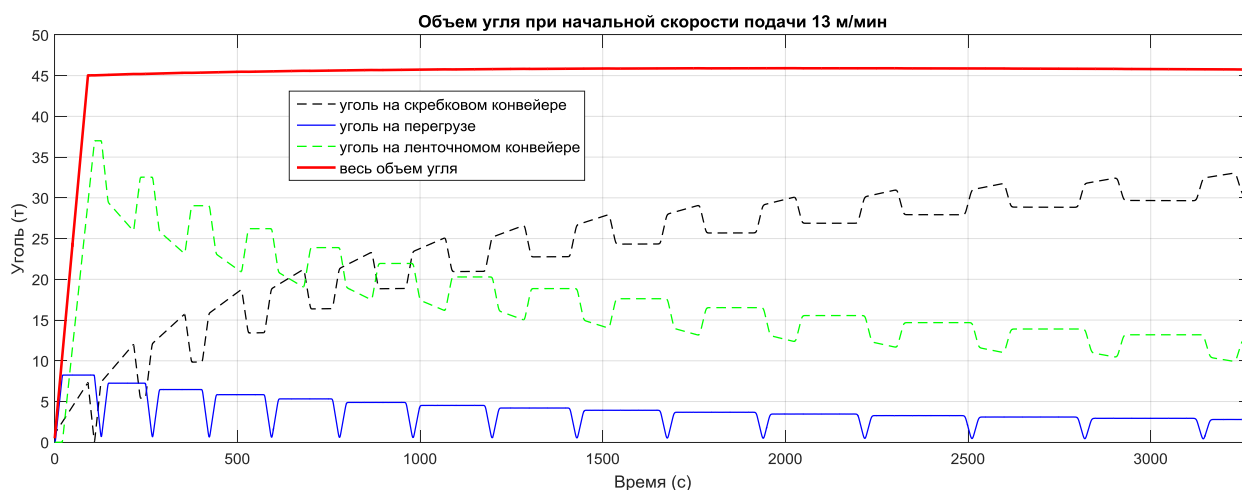


Рисунок 7 – Объемы угля на выемочном участке (син. на перегружателе, зел. на ленточном конвейере, чер. на скребковом конвейере, кр. общий объем угля) при использовании оптимального режима скорости подачи комбайна (с первоначальной скоростью 13 м/мин.)

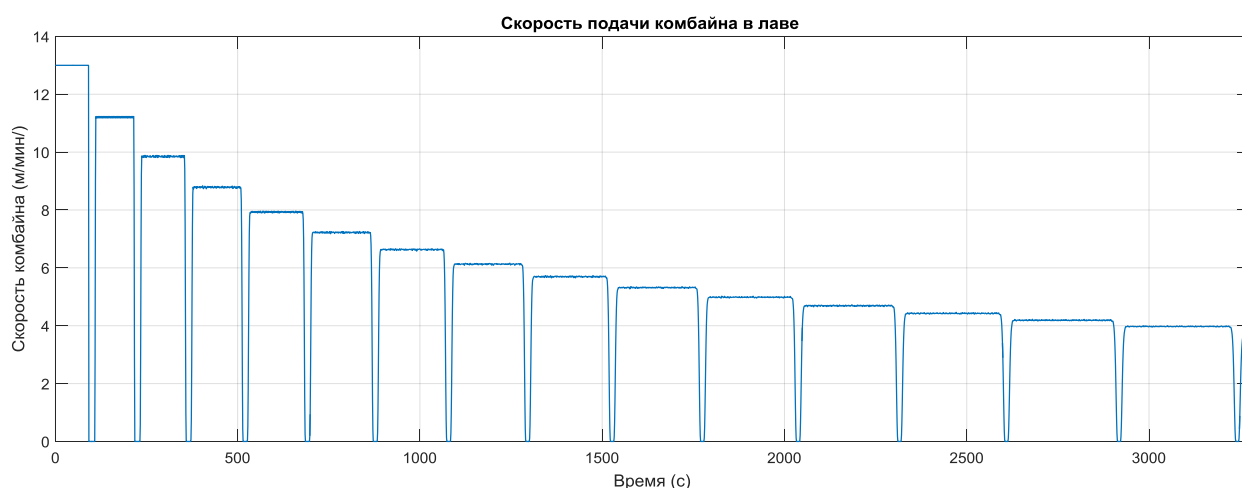


Рисунок 8 – Потеря устойчивости технологического процесса. Для поддержания наибольшей производительности необходимы остановки выемочного комбайна.

В работе приведено сравнение оптимальных режимов работы выемочных комбайнов, оснащенных шнеком 1000 мм и шнеком 800 мм, которые показали производительность соответственно 14,08 т/мин и 12,53 т/мин. Кроме этого, проведен поиск оптимального режима работы комплексно-механизированного забоя при челночной схеме отработки запасов выемочного столба. Оптимальный режим изменения скорости подачи комбайна при движении вверх имеет тот же вид, что при односторонней схеме отработки запасов. При движении выемочного комбайна вниз, оптимальный режим изменения скорости подачи комбайна имеет более сложный вид, представляющий собой увеличение в несколько этапов скорости подачи. Каждый этап состоит из первичного увеличения скорости подачи и последующего небольшого её снижения. Это объясняется тем, что скорость скребкового конвейера меньше скорости ленточного конвейера.

Разработанный метод определения оптимального режима изменения скорости подачи выемочного комбайна реализован в «Технической политике АО «СУЭК» в области организации управления комплексным механизированным забоем» на основе разработанной автором математической модели и используются на шахтах АО «СУЭК».

### **Заключение**

В диссертации, являющейся законченной научно-квалификационной работой, на основании выполненных автором научных теоретических и экспериментальных исследований решена актуальная задача по разработке метода определения режимов оптимального управления процессами отработки высокопроизводительных выемочных участков для условий угольных месторождений Кузбасса, что обеспечивает повышение интенсивности работы комплексно-механизированного забоя при рабочем проходе выемочного комбайна до 28% при этом суммарное выделение метана из отбитого угля, находящегося на технологическом оборудовании не превышает нормативного уровня безопасной эксплуатации.

Основные научные и практические результаты выполненных исследований заключаются в следующем:

1. Выявлено, что при постоянной скорости подачи выемочного комбайна возрастает неравномерность загрузки забойно-транспортного технологического оборудования выемочных участков.

2. Установлено, что оптимальная скорость подачи выемочного комбайна, обеспечивающая наиболее интенсивную отбойку угля во время рабочего хода, должна изменяться таким образом, чтобы объем отбитого угля, находящийся в пределах выемочного участка, оставался постоянным и не превышал объема угля, суммарное выделение метана из которого превысил бы нормативный уровень безопасной эксплуатации.

3. Увеличение интенсивности отбойки угля при рабочем проходе комбайна в единицу времени до 20-30%, достигается выбором расчетного режима подачи выемочного комбайна.

4. Выбор технологических режимов эксплуатации комплексно-механизированного забоя определяется на основе решения оптимизационной задачи, использующей математическую модель, позволяющую учесть неравномерность загрузки забойно-транспортного технологического оборудования выемочных участков.

5. Оперативное управление работой высокопроизводительного выемочного участка должно выполняться на основе контроля, анализа и сопоставления параметров работы комплексно-механизированного забоя, полученных на основе моделирования с учетом параметров горнотехнической системы.

7. Для обеспечения интенсивной отбойки угля, при рабочем проходе комбайна, в случае возникающих отклонений от режимов определенных при моделировании работы комплексно-механизированного забоя необходимо оперативно корректировать режим работы комплекса для обеспечения стабильной нагрузки на забой (увеличением скорости или её снижением с целью обеспечения нормативного уровня безопасной эксплуатации).

8. Проведенные производственные эксперименты подтвердили полученные в ходе теоретического исследования результаты и показали, что ошибка в среднем не превышает 7,6%.

### **Основное содержание диссертации опубликовано:**

#### **в изданиях, рекомендованных ВАК России**

1. Артемьев В.Б., Ютяев Е.П., Мешков А.А., Лупий М.Г., Ясюченя С.В., Копылов К.Н., Демура В.Н. Путь шахты «Галдинская –Западная-1» к всероссийскому рекорду – один миллион тон из лавы за месяц. Уголь. – М.: 2013, № 8 (1049). С.92-93.
2. Копылов К.Н., Закоршменный И.М., Кубрин С.С., Корчак А.В. Управление рисками при подземной добычи угля. Уголь. - М.: 2016. № 7 (1084). С.39-43.
3. Кубрин С. С. Решетняк С. Н. Копылов К. Н. Энергоэффективное операционное управление очистным участком. Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – Екатеринбург: Уральский государственный горный университет. – 2016. №5 С. 4-10.
4. Копылов К. Н., Решетняк С. Н., Кубрин С. С. Имитационное моделирование системы электроснабжения выемочного участка угольной шахты. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). - М.: Горная книга. - 2016. Выпуск № 12. С. 40-50
5. Копылов К.Н., Закоршменный И.М., Кубрин С.С. Вопросы управления очистным комплексом при отработке высокогазоносных пластов на примере шахты «Полысаевская» АО «СУЭК-Кузбасс». Уголь. 2016. № 12 (1089). С. 32-36.
6. Копылов К.Н., Решетняк С.Н., Кубрин С.С. Инновационная структура управления выемочного участка угольной шахты. Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2017. № 1. С. 5-10.
7. Копылов К.Н., Кубрин С.С., Решетняк С.Н. Повышение уровня учета и контроля потребления электроэнергии подземными потребителями шахт и рудников. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2017. № 3. С. 97-105.
8. Артемьев В.Б., Ютяев Е.П., Копылов К.Н., Мешков А.А., Демура В.Н., Смирнов О.В. Достижение наивысших показателей по добыче угля в месяц в условиях АО "СУЭК-КУЗБАСС". Уголь. 2017. № 8 (1097). С. 82-88.

9. Копылов К.Н., Кубрин С.С., Загоршменный И.М., Решетняк С.Н. Экспериментальные исследования параметров работы очистного комбайна угольной шахты при различных скоростях подачи. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2017. № S29. С. 48-55.
10. Копылов К.Н., Кубрин С.С., Решетняк С.Н. Актуальность повышения уровня энергоэффективности и безопасности выемочного участка угольной шахты. Уголь. 2018. № 10 (1111). С. 66-71.
11. Копылов К.Н., Кубрин С.С., Загоршменный И.М. Вопросы оперативного управления комплексным механизированным забоем высокопроизводительных выемочных участков. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2018. № S48. С. 208-216.
12. Копылов К.Н., Кубрин С.С., Загоршменный И.М., Решетняк С.Н. Резервы повышения эффективности работы выемочных участков угольных шахт. Уголь. 2019. № 3 (1116). С. 46-49.
13. Копылов К.Н., Кубрин С.С., Загоршменный И.М. Использование моделирования для управления очистным комбайном в высокопроизводительных лавах. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2019. № 4. С. 30-40.

**в прочих изданиях и материалах конференций**

14. Решетняк С.Н., Копылов К.Н., Плащанский Л.А., Кубрин С.С., Решетняк М.Ю. Актуальность исследования параметров качества электрической энергии в подземных сетях угольных шахт. В сборнике: Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых Материалы 13-ой Международной научной школы молодых ученых и специалистов. 2016. С. 129-134.
15. Решетняк С.Н., Копылов К.Н., Плащанский Л.А., Решетняк М.Ю., Кубрин С.С., Актуальность повышения энергоэффективности оборудования выемочного участка угольной шахты. В сборнике: Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых Материалы 13-ой Международной научной школы молодых ученых и специалистов. 2016. С. 142-145.
16. Копылов К.Н., Решетняк С.Н., Кубрин С.С. Актуальные аспекты повышения энергоэффективности оборудования выемочного участка угольной шахты. В сборнике: электропривод, электротехнологии и электрооборудование предприятий Сборник научных трудов III Международной (VI Всероссийской) научно-технической конференции. Редакционная коллегия: В.А. Шабанов (отв. редактор). С.Г. Конесев (зам. отв. редактора), В.М. Сапельников., М.И. Хакимьянов., П.А. Хлюпин., Р.Т. Хазиева. 2017. С. 529-533.
17. Копылов К.Н., Кубрин С.С. Управление очистным комплексом на основе анализа рисков. В сборнике: Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках Материалы XXVII Международной научной школы.

Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского; Институт проблем комплексного освоения недр РАН. 2017. С. 129-133.

18. Копылов К.Н., Кубрин С.С. Учет влияния метановыделения из отбитого угля при работе высокопроизводительного участка. В сборнике: Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках Материалы XXVII Международной научной школы. Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского; Институт проблем комплексного освоения недр РАН. 2017. С. 125-128.

19. Kopylov Konstantin, Kubrin Sergey, Modelling of coal transportation technological processes at excavation. IIIrd International Innovative Mining Symposium (IIMS 2018), Kemerovo, Russian Federation, Edited by Tyulenev, M.; Zhironkin, S.; Khoreshok, A.; Vöth, S.; Cehlár, M.; Nuray, D.; Janocko, J.; Anyona, S.; Tan, Y.; Abay, A.; E3S Web of Conferences, Volume 41, id.01017. DOI 10.1051/e3sconf/20184101013 .June 2018.

20. Kopylov K.N., Kubrin S.S., Blokhin D.I. The simulation of the excavation sites of coal mines. Mining goes digital. Proceeding in Earth and geosciences. Proceeding of the 39-th international symposium application of computers and operation research in the mineral industry (APCOM 2019) Wroclaw, Poland, 406 June 2019. Vol 3 P. 473-480. ISSN 2639-7749, eISSN 2639-7757

Подписано в печать с оригинал-макета \_\_\_\_\_ 2019 г. Формат 60x84 1/16. Бумага «Мега Сору Office». Печать офсетная. Набор компьютерный. Объем 1,25 п.л. Тираж 100 экз. Заказ № \_\_\_\_\_.

---

Издание ИПКОН (РАН)  
111020 г. Москва Крюковский тупик, д.4