

СТАБИЛИЗАЦИЯ КАЧЕСТВА ДОБЫВАЕМОГО УГЛЯ В УСЛОВИЯХ СЛОЖНОСТРУКТУРНЫХ ЗАЛЕЖЕЙ

С. П. Пушкин, канд. техн. наук (НТУУ «КПИ»)

Запропоновані технологічні рекомендації щодо стабілізації якості вугілля, що добувається з складноструктурних пластів роторними екскаваторами в комплексі з залізничним транспортом, які базуються на комплексі оптимізаційних моделей задач поточного (місячного) та оперативного (добового, змінного) планування видобутку вугілля.

Ключові слова: стабілізація, якість вугілля, модель, кар'єр.

Предложены технологические рекомендации по стабилизации качества угля, добываемого из сложноструктурных пластов роторными экскаваторами в комплексе с железнодорожным транспортом, базирующиеся на комплексе оптимизационных моделей задач текущего (месячного) и оперативного (суточного, сменного) планирования добычи угля.

Ключевые слова: стабилизация, качество угля, планирование, модель, карьер.

Recommendations for stabilization quality of coal mined from the complex structural layers by bucket wheel excavators in conjunction with the railway transport, based on optimization modes for the task of current (monthly) and operational (daily and per shift) planning of coal mining are suggested.

Key words: stabilization, coal quality, planning, mode, open-pit.

Введение. Валовая выемка мощных сложноструктурных залежей, пласты которых характеризуются переслаиванием прослоев разного качества и мощности, с одной стороны, уменьшает потери угля в недрах, объемы отвалов вскрышных пород и увеличивает производительность роторных экскаваторов и угольных карьеров, а с другой – приводит к значительным колебаниям качественных показателей (зольность, теплотворная способность) товарного угля. Сжигание угля с нестабильным качеством на тепловых электростанциях вызывает повышенный износ и снижение производительности основного и вспомогательного оборудования, увеличение эксплуатационных затрат на выработку электроэнергии и выбросы золы и других вредных веществ в атмосферу [1].

В связи с этим возникает необходимость проведения на угольных карьерах мероприятий, направленных на стабилизацию качества добываемого угля.

Анализ исследований, в которых рассматривалось решение данной проблемы. В работе [2] для стабилизации качества товарного угля рекомендуется применять забойное усреднение путем раздельной выемки качественно разнородных участков забоя с дальнейшим усреднением угля в железнодорожных вагонах, в [3] – осуществлять усреднение угля на усреднительных складах.

При валовой выемке сложноструктурных пластов использование рекомендаций [2] приведет к значительному снижению производительности мощных высокопроизводительных роторных экскаваторов; усреднение угля на

усреднительных складах без планирования добычи угля в режиме усреднения качества значительно увеличит объем усреднения и, как следствие, капитальные и эксплуатационные затраты.

В отмеченных работах не рассматриваются вопросы оптимизации планирования добычи угля для разных групп потребителей в режиме усреднения качества с учетом выбора резерва горнотранспортного оборудования и рациональных параметров выемки в зависимости от горно-геологических условий залегания сложноструктурных залежей.

Цель работы – разработать технологические рекомендации по стабилизации качества угля, добываемого из сложноструктурных пластов роторными экскаваторами в комплексе с железнодорожным транспортом, базирующиеся на комплексе оптимизационных моделей задач текущего (месячного) и оперативного (суточного, сменного) планирования добычи угля с учетом выбора резерва горнотранспортного оборудования, рациональных параметров выемки, наличия нескольких групп потребителей.

Изложение основного материала исследования. При валовой разработке сложноструктурных пластов в комплексе с железнодорожным транспортом однородность качества угля в вагонах обеспечивается выбором рациональных способов и параметров выемки экскаваторных заходов в зависимости от горно-геологических условий залегания пластов.

При разработке добычных заходов вертикальными стружками количество прослоев, загружаемых в вагон, определяется, с одной стороны, параметрами стружки (высотой, толщиной, шириной), с другой – углом падения прослоев. Поэтому изменчивость качественных показателей угля по вагонам зависит от мощности экскаватора (диаметра ротора) и условий залегания пластов.

Рациональные параметры выемки можно установить на основании имитационного математического моделирования на компьютере процесса отработки роторными экскаваторами разных типов сложных забоев, геологическая структура которых представлена математической моделью [4]. Так, в результате расчетов по геолого-технологическим картам забоев, разрабатываемых роторными экскаваторами разной мощности по разным технологическим схемам, выполненных для условий карьеров Экибастузского бассейна, установлены корреляционные зависимости, характеризующие изменения зольности добытого угля в зависимости от вида стружки, применяемого выемочно-погрузочного оборудования и величины угла падения пластов [5]. Анализ этих зависимостей показал следующее.

Валовая разработка сложноструктурных угольных пластов с углом падения от 0 до 60...70° вертикальными стружками обеспечивает снижение коэффициента вариации повагонной зольности на 10...30 % по сравнению с разработкой горизонтальными стружками; при угле падения, превышающем 70°, коэффициент вариации зольности угля отличается незначительно.

Повышение стабилизации качества достигается использованием экскаваторов с диаметром ротора 10...13 м на участках с углом падения залежи от 0 до 40...50° и экскаваторов с диаметром ротора 6...7 м – на участках с углом падения залежи в диапазоне 50...90°.

Для дальнейшего повышения стабилизации качества добытого угля осуществляют оперативное управление добычными работами в режиме усреднения качества, на стадии подготовки к которому предусматривается решение задач текущего (месячного) и оперативного (суточного, сменного) планирования добычи угля.

Решение задачи месячного планирования добычи угля осуществляется на основе цифровой модели месторождения или базы данных, включающей геологическую, маркшейдерскую и нормативно-справочную информацию. При этом учитываются такие факторы: положение фронта горных работ на начало планируемого периода, график плано-предупредительных ремонтов экскаваторов, перемещение железнодорожных путей, подготовленные запасы горной массы, плановые задания по объему и качеству угля и другие технико-экономические показатели.

В общем виде решение задачи сводится к определению оптимальных объемов добычи угля для каждого экскаватора на каждые сутки при условии достижения экстремального значения такого критерия:

$$F = \sum_{t=1}^T \sum_{l=1}^P \left(\frac{\sum_{i=1}^n K_{cit}^l V_{it} A_{it}^{d(l)}}{\sum_{i=1}^n V_{it}} - A^{d(l)} \right)^2 \rightarrow \min, \quad (1)$$

где T – число дней в планируемом периоде; P – число групп потребителей; n – число экскаваторных заходок; K_{cit}^l – коэффициент соотношения угля l -ой группы потребителей в i -ой заходке в t -е сутки; V_{it} – план добычи угля для i -го экскаватора в t -е сутки, т/сутки; $A_{it}^{d(l)}$ – зольность угля l -й группы потребителей в i -й заходке в t -е сутки, %; $A^{d(l)}$ – плановое значение средней зольности угля по карьере по l -й группе потребителей.

Минимизация критерия (1) выполняется при условии выполнения экскаваторами месячных объемов добычи, обеспечения плана добычи по карьере по каждой группе на t -е сутки $Q_{пл}^l$, равномерности распределения объемов добычи для каждого экскаватора на протяжении всего периода планирования, заданных карьером качественных показателей, учете пропускной способности транспортных коммуникаций.

Для реализации модели разработан специальный алгоритм, который базируется на задаче нелинейного программирования.

Результаты решения задачи с помощью компьютера печатаются в виде таблиц, в которых приводятся объемы угля по группам потребителей, объемы пород вскрыши в каждом экскаваторном забое, зольность угля по группам, объемы добычи по карьере и т.д. Выходные данные таблиц используются для нанесения на план карьера положения фронта добычных работ на начало и конец планируемого периода.

На уровне суточного и сменного планирования добычных работ возникает необходимость корректировать объемы добычи по экскаваторам из-

за изменения геологических характеристик обрабатываемых забоев (зольности угля, коэффициентов соотношения различных групп, коэффициентов внутренней вскрыши) вследствие аварийных остановок экскаваторов, отклонения объемов добычи угля от месячного плана-графика. Поэтому на этом уровне планирования решается задача межзабойного усреднения качества угля.

Эта задача решается на основе геолого-технологических карт забоев. Количественные и качественные показатели угля, согласно принятой технологии, рассчитываются при помощи имитационной модели процесса разработки сложного забоя.

При отсутствии сведений о поступлении вагонов Министерства транспорта, в которых перевозится уголь к электростанциям, необходимо стремиться к максимальному выполнению объема добычи угля по карьере:

$$\sum_{i=1}^n V_i \rightarrow \max. \quad (2)$$

В том случае, если количество поступающих вагонов Министерства транспорта известно, решение задачи сводится к оптимальному распределению известного объема добычи угля по забоям.

В качестве функции цели применяется выражение

$$\sum_{i=1}^n K_{ci}^l V_i (A_i^{d(l)} - A^{d(l)})^2 \rightarrow \min. \quad (3)$$

Кроме упомянутых выше ограничений, в модели учитывают работу аккумулирующего и усреднительного складов по каждой группе потребителей.

На втором уровне планирования решается задача усреднения угля в отправляемых потребителям маршрутах. Решение задачи сводится к расчету графика работы транспорта, позволяющего устанавливать последовательность подачи к забоям угольных и породных составов, а также формировать на углесборочных станциях карьеров маршруты Министерства транспорта с минимальными отклонениями средневзвешенной зольности от планового значения при наименьших затратах времени. График служит основой для оперативного управления добычными работами в режиме усреднения качества угля.

Задача составления графика формирования маршрутов в общем виде может быть сформулирована следующим образом. На приемные пути углесборочной станции карьера прибывают партии вагонов от разных потребителей. Партия расформируется на составы, каждый из которых направляется в забой с качеством угля соответствующей группы. Грузеные углем составы l -ой группы X_{ijk}^l с зольностью $A_{ijk}^{d(l)}$ в определенной последовательности поступают на углесборочную станцию. Требуется сформировать из составов отправительские маршруты таким образом, чтобы соблюдался критерий оптимальности. В качестве критерия оптимальности может быть

предложен известный критерий минимизации максимального отклонения средневзвешенной зольности угля в j -ом маршруте от планового значения:

$$\max_{i \leq j \leq m} \left| \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^l x_{ijk}^l q_{ik}^l A^{d(l)}}{\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^l x_{ijk}^l q_{ijk}^l} - A^{d(l)} \right| \rightarrow \min, l = \overline{1, P}. \quad (4)$$

При этом должны соблюдаться следующие ограничения:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^l \sum_{j=1}^R x_{ijk}^l = F^l, l = \overline{1, P}; \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^l x_{ijk}^l = H_j, j = \overline{1, m}; \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^m x_{ijk}^l = 1, i = \overline{1, n}; k = \overline{1, l}; l = \overline{1, P}; \quad (7)$$

$$\max_{i, k} \{T_{i, k} \mid x_{ijk}^l = 1\} \leq \min_{i, k} \{\tau_{ik} \mid x_{ijk}^l = 1\}, j = \overline{1, m}, l = \overline{1, P}, \quad (8)$$

где $x_{ijk}^l = 1$, если k -ый состав с i -го забоя включается в j -й маршрут; 0 – в противном случае; i – номер забоя; j – номер маршрута; k – номер груженого состава из i -го забоя l -й группы; q_{ik}^l – грузоподъемность k -го состава из i -го забоя l -й группы; $A^{d(l)}$ – плановое значение зольности угля в маршруте l -ой группы; F^l – общее число составов, отправляемых в течение планового отрезка времени l -й группы; H_j – число груженных составов в маршруте; T_{ik} – время прибытия k -го состава из l -го забоя на углесборочную станцию; τ_{ik} – планируемое время отправления k -го состава потребителям.

В приведенной математической модели при выполнении условия (4) достигается стабильность качества угля в маршрутах, отправляемых потребителям в течение планового отрезка времени. Смысл условий (5) и (6) очевиден, а выражение (7) показывает условие включения груженого состава только в один маршрут. При формировании маршрутов необходимо учитывать время нахождения составов на углесборочной станции, которое не должно превышать значения t_{ik} (ограничение 8).

Решение задачи в приведенной постановке общеизвестными математическими методами программирования затруднительно. Поэтому согласно приведенной математической модели разработан эвристический

алгоритм, расчет по которому производится в следующей последовательности (рис. 1).

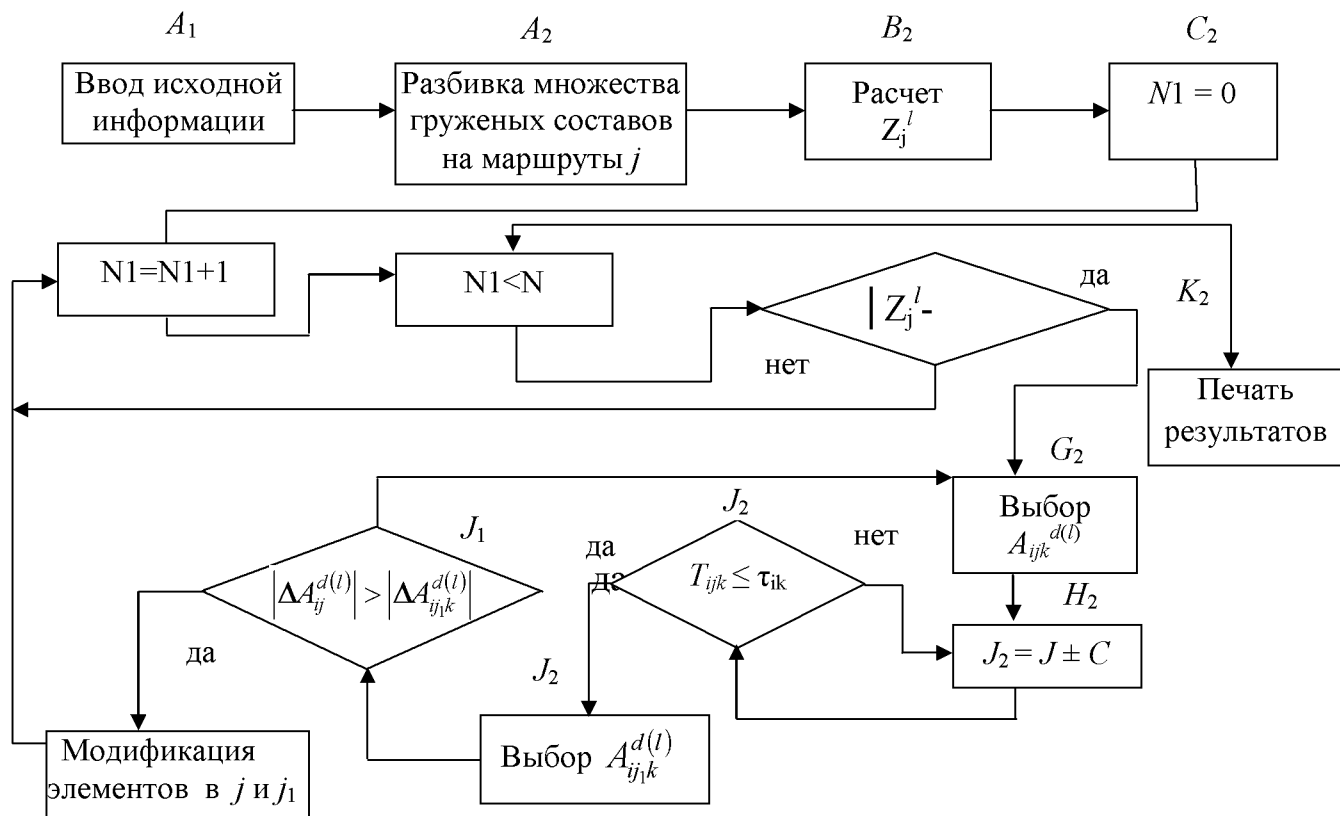


Рис. 1. Блок-схема алгоритма расчета графика формирования маршрутов

1. В компьютер вводится исходная информация (блок A_1). В качестве исходной используется нормативно-справочная информация по выемочно-погрузочному и транспортному оборудованию карьера, данные о распределении зольности угля по составам в каждом забое, полученные по результатам моделирования отработки забоев, сведения о времени прибытия и количестве вагонов каждой группы, требования к качеству угля каждой группы, допустимое время простоя вагонов и т.д.

2. Вычисляется время поступления грузеных составов на углесборочную станцию с учетом времени прибытия порожних вагонов Министерства транспорта в карьер, порядка загрузки угольных и породных вагонов в добычных забоях, времени задержек в пути, времени на выполнение маневровых операций на карьерах и погрузку состава в забое.

При расчете могут использоваться статистические показатели, получаемые по хронометражным наблюдениям или диспетчерским графикам. Согласно времени поступления грузеных угольных составов на углесборочную станцию множество локомотивосоставов F^l разбивается на непересекающиеся подмножества j (маршруты) таким образом, чтобы выполнялось условие (6). Каждому элементу подмножества соответствует зольность состава $A_{ijk}^{d(l)}$ потребителей l -й группы, грузоподъемность q_{ik}^l , время поступления T_{ik} и планиру-

емое время отправления состава потребителям τ_{ik}^l . Строится матрица $\|A_{ijk}^{d(l)}\|$ для каждой группы, в которой число строк соответствует числу добычных забоев, а число столбцов – количеству отправляемых потребителям маршрутов (блок A_2).

3. Для каждого столбца (маршрута) l -ой группы вычисляется средневзвешенная зольность угля z_j^l (блок B_2).

$$z_j^l = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^l A_{ijk}^{d(l)} q_{ik}^l}{\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^l q_{ik}^l}, \quad l = \overline{1, P}. \quad (9)$$

4. Определяется j -й столбец с $|A_{ijk}^{d(l)}| \geq \Delta A_{nli}^{d(l)}$, где $\Delta A_{nli}^{d(l)}$ – допустимое отклонение зольности угля в маршруте l -ой группы от планового значения (блоки C_2, D_2, E_2, F_2). В случае просмотра всех столбцов выполняется печать результатов решения задачи (блок K_2).

5. Из j -го столбца выбирается очередной элемент матрицы $A_{ijk}^{d(l)}$ (блок G_2). Если просмотрены все элементы столбца, осуществляется переход к следующему этапу расчета.

6. Выбирается очередной столбец $j_1 = j \pm C (1 \leq C \leq m)$, (блок H_2).

7. Проверяются условия

$$\begin{cases} T_{ijk}^l \leq \min \tau_{ijk}^l; & \tau_{ij_1k}^l \geq \max T_{ijk}^l, \text{ при } j_1 < j \\ \tau_{ijk}^l \leq \max T_{ijk}^l; & T_{ij_1k}^l \leq \min \tau_{ijk}^l, \text{ при } j_1 > j, \end{cases}$$

где $\max T_{ijk}^l, \max T_{ij_1k}^l$ – максимальные значения времени прибытия составов, входящих в j -й, j_1 -й маршруты; $\min \tau_{ijk}^l, \min \tau_{ij_1k}^l$ – минимальные значения планируемого времени отправления составов, входящих в j -й, j_1 -й маршруты (блок I_2). В случае выполнения условий осуществляется переход к следующему этапу расчета. Если условия не соблюдаются, возвращаемся к 6-му этапу.

8. В столбце $j_1 = j \pm c$ выбирается очередной элемент (блок j_2). Для сокращения времени расчета при выборе элемента должны соблюдаться условия

$$\begin{aligned} A_{ij_1k}^{d(l)} &> A_{ijk}^{d(l)}, \quad \text{при } \Delta A_{ijk}^{d(l)} > 0; \\ A_{ij_1k}^{d(l)} &> A_{ijk}^{d(l)}, \quad \text{при } \Delta A_{ijk}^{d(l)} < 0. \end{aligned}$$

Если в столбце j_1 просмотрены все элементы, возвращаемся к 5-му этапу расчета (блок G_2).

9. Проверяется условие

$$|\Delta A_{ijk}^{d(l)}| > |\Delta A_{ij_1k}^{d(l)}|,$$

где $\Delta A_{ijk}^{d(l)}$ и $\Delta A_{ij_1k}^{d(l)}$ – показатели, характеризующие отклонение средневзвешенной зольности угля от планового значения в j -м и j_1 -м столбцах (маршрутах) при взаимной перестановке элементов $\Delta A_{ijk}^{d(l)}$ и $\Delta A_{ij_1k}^{d(l)}$ (блок j_1).

При соблюдении данного условия – переход к следующему этапу расчета, в противном случае – возврат к 5-му этапу.

10. Элемент $\Delta A_{ijk}^{d(l)}$ исключается из j -го столбца и заносится в j_1 -й, а $\Delta A_{ij_1k}^{d(l)}$ исключается из j_1 -го столбца и заносится в j -й (блок K_1). Выполняется переход к 5-му этапу расчета, то есть происходит поиск нового маршрута, зольность которого превышает допустимую.

11. Осуществляется печать результатов решения задачи.

При перестановке элементов (составов) в различных столбцах (маршрутах) получаем решение, удовлетворяющее условиям (4)–(8).

Обоснование рационального метода стабилизации качества добытого угля, резерва производительности экскаваторов K_p , количества отправочных путей на углесборочной станции карьера n_0 осуществляется по минимуму суммарных затрат на добычу, транспортировку, сжигание угля с учетом колебаний качественных показателей и замыкающих (компенсационных) затрат на производство равного количества электроэнергии.

Суммарные затраты целесообразно определять на основе имитационного моделирования на компьютере процесса функционирования добычного выемочно-транспортного комплекса карьера. Моделирование выполняется с использованием конкретной схемы транспортной сети карьера по суткам отдельных месяцев на основе графика планово-предупредительных ремонтов экскаваторов [6].

На основании расчетов установлено, что выбор рационального метода в значительной степени определяется резервом производительности роторных экскаваторов.

Эффективным является сочетание способов стабилизации качества угля. Целесообразно сочетать распределение объемов добычи угля по заходкам с его усреднением в маршрутах при резерве производительности экскаваторов 10...20 % и наличии 4...5 запасных отправочных путей на углесборочной станции карьера (рис. 2). Это дает возможность уменьшить среднее квадратическое отклонение зольности угля по маршрутам на 30...35 %, сократить продолжительность простоев вагонов на 30...40 %, снизить затраты на добычу угля с последующим его сжиганием на электростанциях на 4...6 %.

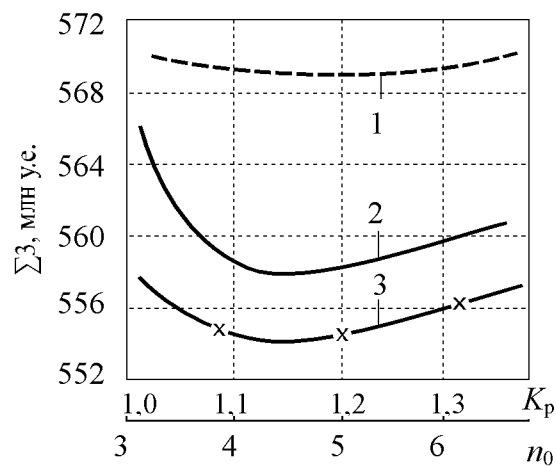


Рис. 2. Изменение суммарных приведенных затрат на производство электроэнергии ΣZ при разных вариантах стабилизации качества угля: 1 – усреднение угля в маршрутах; 2 – межзабойное усреднение угля; 3 – сопоставление указанных способов

Выводы

1. При разработке сложноструктурных пластов роторными экскаваторами в комплексе с железнодорожным транспортом однородность угля в вагонах обеспечивается выбором рациональных способов и параметров выемки экскаваторных заходок в зависимости от горно-геологических условий залегания пластов.

2. Рациональное распределение объемов добычи угля по добычным заходкам и отправительским маршрутам при помощи решения комплекса задач месячного и оперативного планирования добычных работ в режиме усреднения качества угля позволяет снизить изменчивость качественных показателей товарного угля соответственно на 20 и 12 %.

3. В условиях сложноструктурных залежей целесообразно сочетать распределение объемов добычи угля по заходкам с его усреднением в маршрутах при резерве производительности экскаваторов 10...20 % и наличии 4...5 резервных отправочных путей на углесборочной станции карьера, что обеспечивает уменьшение изменчивости зольности угля по маршрутам на 30...35 %, снижение расходов на добычу угля с последующим его сжиганием на электростанциях на 4...6 %.

1. Дахов А. И. Некоторые проблемы, возникающие при сжигании низкосортных топлив на ТЭС / А. И. Дахов, Ю. М. Михайловский // Электрические станции. – М., 1983. – №3. – С. 14–18.

2. Шаль Р. Р. Обоснование рациональной технологической схемы усреднения угля сложноструктурных пластов, разрабатываемых роторными экскаваторами: дис... канд. техн. наук. – М., 1985. – 218 с.

3. Кузин Ю. С. Разработка технологических схем и методов расчета усреднительных складов угля для разрезов большой производственной мощности: дис... канд. техн. наук. – М., 1985. – 180 с.

4. Беляков Ю. И. Проектирование экскаваторных работ. – М.: Недра, 1983. – 349 с.

5. Пушкін С. П. Обґрунтування раціонального методу стабілізації якості вугілля в умовах складноструктурних покладів / С. П. Пушкін, А. О. Водяник // Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Гірництво». – К., 2008. – Вип. 17. – С. 66–73.

6. Кривцов М. В. Комп'ютерне моделювання процесу функціонування добувного виймально-транспортного комплексу кар'єру / М. В. Кривцов, С. В. Ковалевич, С. П. Пушкін // Проблеми охорони праці в Україні. – Вип. 12. – К.: ННДІОП. – 2006. – С. 91–96.