

Раздел 4. Техничко-экономические проблемы горного производства

УДК 621.629

В.Б. Гого, Ю.Ф. Булгаков, О.Н. Данильчук

ИННОВАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ШАХТНОГО ТЕХНОЛОГО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА (ШАТЭК)

Донецкий Национальный технический университет

Изложена суть инновационной модели энергообеспечения угольной шахты необходимыми видами энергии на основе создания шахтного технолого-энергетического комплекса (ШАТЭК), который использует собственные энергетические ресурсы.

Развитие национальной угольной отрасли невозможно без поиска путей модернизации шахт, всех звеньев технологической цепи энергопроизводства с целью решения задач минимизации экономических затрат, максимализации экологической безопасности и охраны труда. Как важный шаг в этой работе следует рассматривать этап создания моделей для аргументированного анализа новых решений.

Для работы шахты необходимы основные виды энергии: электрическая, тепловая, пневматическая и гидравлическая. Разумеется, что первичными являются электрическая и тепловая. В существующей системе энергоснабжения шахты электрическая энергия покупается во внешней энергосистеме, а тепловая вырабатывается котельной шахты. При этом как внешняя энергосистема, так и внутренняя теплосистема работают на различных видах источников энергии, в том числе на угле, добываемом шахтой. Возникает актуальная проблема комбинированного производства тепловой и электрической энергии для потребностей шахты в модернизированных условиях шахтной котельной. Решить эту проблему возможно путем создания шахты-миниТЭЦ. Рациональной с технических, экономических, социальных и экологических позиций является организация шахтных автономных технолого-энергетических комплексов (ШАТЭК) [1, 2] в их сочетании с имеющимися централизованными тепловыми электрическими станциями.

Сущность предлагаемой модели энергообеспечения угольной шахты состоит в том, что необходимую энергию, как электрическую, так и тепловую, шахта производит на собственном объекте – энергетической котельной (ЭК), работающей как миниТЭЦ. Такого рода организация энергоснабжения требует разработки модели и оптимизации процесса.

Прежде чем разрабатывать структуру модели автономного энергоснабжения шахты, нужно ответить на следующие вопросы:

- 1) Где нужно строить ЭК, или миниТЭЦ?
- 2) Каких потребителей должна обеспечивать ЭК, на каком топливе и оборудовании она будет работать?
- 3) Каковы оптимальные параметры ЭК, или миниТЭЦ?
- 4) Какие технологические процессы будут новыми и как они будут сочетаться с существующими шахтными технологиями?
- 5) Как реструктуризация энергоснабжения шахты повлияет на экономические, экологические, социальные и др. сферы?
- 6) Каково сочетание циклов производства и потребления энергии в различных объединенных технологиях?

Исследуем этот блок вопросов на основе предлагаемой структуры ШАТЭК, схема которой представлена на рис. 1.

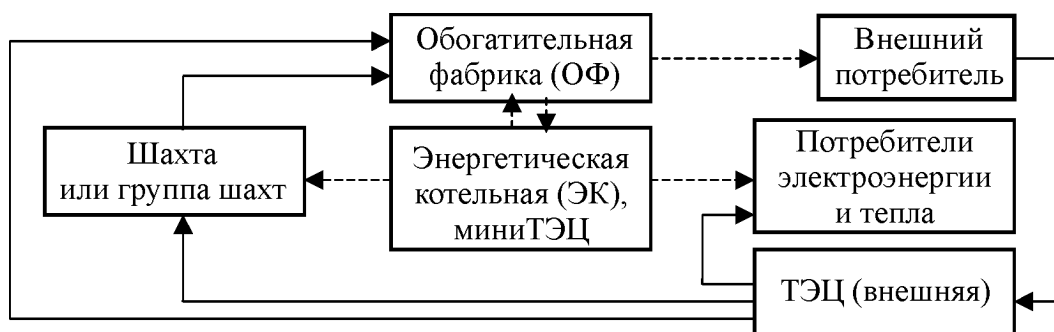


Рис. 1. Схема структуры ШАТЭК

Для формирования целевой функции необходимо минимизировать общие затраты ШАТЭК по экономическому критерию «стоимость», а именно в показателях:

- 1) стоимость угля, добываемого шахтой;
- 2) стоимость переработки угля;
- 3) стоимость транспортных затрат на перемещение первичного энергоносителя, электрической и тепловой энергий;
- 4) стоимость затрат на связь с внешней энергосистемой, т.е. ТЭЦ.

Известно, что механизм образования тарифов железнодорожных перевозок очень сложен, поскольку различные тарифы зависят от объемов перевозок, владельцев вагонов и т.д. Постоянные транспортные издержки учитывают расширение существующей транспортной системы, к примеру, затраты на приобретение новых вагонов, ремонт и строительство железных дорог и т.д. Поэтому расходы на перевозку будем считать постоянными.

Исходя из изложенного, формируем целевую функцию для поиска минимальных затрат ШАТЭК в виде:

$$\begin{aligned} \min f(v, u, w, x, y) = & \sum_i D \left(\sum_i v_{ij} \right) + \sum_j c_j y_j + \sum_j B_j \left(\sum_j v_{ij} \right) + \\ & + \sum_i \sum_j (S_{ij} w_{ij} + T_{ij} v_{ij}) + \sum_j \sum_k (F_{jk} X_{jk} + G_{jk} U_{jk}) + \sum_i R_i, \end{aligned} \quad (1)$$

где v_{ij} – масса отправленного шахтой угля на обогатительную фабрику; u_{jk} – масса отправленного с ОФ угля на ЭК и ТЭЦ; w, x, y – булевы переменные; D – стоимость добычи угля; S – постоянные расходы на перевозку угля; T_{ij} – стоимость перевозки тонны угля; C_{ij} – ежегодные затраты на переработку тонны угля на ОФ; B_j – переменные затраты на подготовку тонны угля на ОФ; F_{jk} – постоянные расходы на перевозку угля с ОФ на ТЭЦ; G_{jk} – стоимость перевозки тонны угля с ОФ на ТЭЦ; R_i – расходы на передачу электроэнергии от ТЭЦ до шахты и ОФ.

Для моделируемой системы ШАТЭК примем следующие ограничения:

1. Масса отправляемого шахтой угля на ОФ не может превысить добычу этой шахты, т.е.

$$\sum_i v_{ij} \leq M_i, \quad (2)$$

где M_i – мощность шахты по добыче угля.

2. Объем поставок угля с ОФ на электростанцию (ТЭЦ) должен быть расчетным:

$$\sum_i U_{jk} \geq N_k. \quad (3)$$

3. Объем поставок угля с ОФ не может превысить ее мощность:

$$\sum_k U_{jk} \leq P_j, \quad (4)$$

$$E \sum_i v_{ij} \geq \sum_k U_{jk}, \quad (5)$$

где E – показатель эффективности обогащения угля.

4. Экологические ограничения должны соответствовать специальным требованиям по содержанию в угле примесей, в частности серы, золы и др.

Если обогатительная фабрика обеспечивает энергетическую котельную и ТЭЦ, то введем ограничение:

$$\sum_i H_i v_{ij} \leq L_k \sum_i v_{ij}, \quad (6)$$

где H_i – содержание серы (в массовых долях); L_k – максимально допустимая для сжигания норма содержания серы в угле.

Тогда экологическое ограничение по компоненту «сера» можно представить в виде:

$$\sum_i H_i v_{ij} - L_k \sum_i v_{ij} \leq M(1 - x_{jk}), \quad (7)$$

где M – некоторое большое положительное число.

Аналогично формируются ограничения по другим компонентам угля.

5. Издержки на транспортировку угля и передачу электрической энергии можно представить в следующем виде:

$$U_{jk} - MX_{jk} \leq 0, \quad (8)$$

$$V_{ij} - MW_{ij} \leq 0. \quad (9)$$

Для минимизации стоимости ШАТЭК сначала опишем содержание задачи, затем формализуем ее и рассмотрим решение с использованием алгоритма обобщения приведенных градиентов. На рис. 1 изображено техническое содержание модели ШАТЭК. Последовательность технологического процесса объединяет такие объекты, как шахта, обогатительная фабрика (ОФ), энергетическая котельная (ЭК), которая имеет установки топливоподачи, парокотельные агрегаты, системы очистки отходящих дымовых газов, удаления золошлаковых отходов, паровые турбины, электрогенераторы и т.д.

В структуру ШАТЭК должны входить и сопутствующие производства: деминерализации шахтных вод, извлечения редких химических компонентов из отвальных пород, кооптации шахтного метана, производства строительных материалов и др.

Однако основное предназначение энергокомплекса состоит в когенерации двух видов энергии – электрической и тепловой. Целесообразно выдвинуть основное требование к их производству – полное удовлетворение своих энергетических потребностей с обеспечением экологической безопасности и охраны труда.

Пусть ШАТЭК в течение года должен произвести необходимые объемы:

- электрической энергии – X , (кВт·ч);
- тепловой энергии – Y , (Дж).

Для этого необходимо выбрать параметры оборудования ШАТЭК с целью минимизации капиталовложений.

Все установки ШАТЭК можно разделить по участию в технологическом процессе на группы:

- 1) установки периодического действия (УПД);
- 2) установки полунепрерывного действия (УПНД);
- 3) установки непрерывного действия (УНД).

Капиталовложения для этих групп будут соответственно равны:

– для УПД:

$$C_{1i} = a_i V_i^{\alpha_i}, \quad (10)$$

где V – производительность установки; a_i, α_i – эмпирические константы, выступающие как стоимостные коэффициенты оборудования.

– для УПНД:

$$C_{2k} = b_k R^{\beta_k}, \quad (11)$$

где R_k – производительность k -й установки; b_k, β_k – эмпирические константы, определяющие стоимостные коэффициенты оборудования.

Для процедуры оптимизации рассмотрим содержание технологических процессов ШАТЭК по группам установок.

Для УПД периодические операции сводятся к загрузке угля (топливоподача, топливоподготовка и т.д.), его переработке и выгрузке. В установках группы УПНД происходит вход-выход материалов, но они работают так же непрерывно, как и УНД. Оборудование группы УПД и УПНД работают наиболее эффективно в режиме совмещения циклов.

Для ШАТЭК, использующего установки трех групп, представим диаграмму времени работы оборудования (рис. 2).

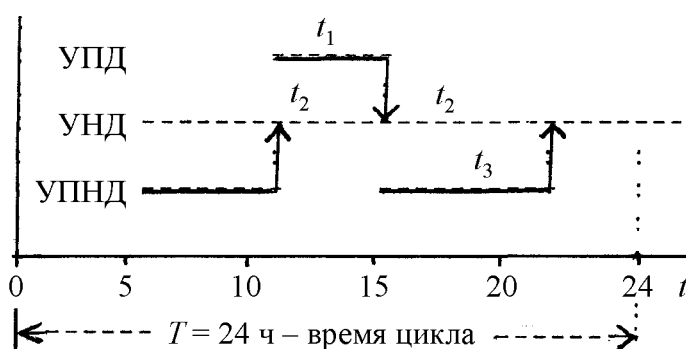


Рис. 2. Диаграмма времени работы оборудования ШАТЭК

В общем для энергетического суточного цикла ШАТЭК имеем:

$$T = \max(t_1 \dots t_n). \quad (12)$$

При выбранном фиксированном времени энергетического цикла, равном 24 часам, все его составляющие должны порционно в него входить.

Очевидно, что определяющим является объем конечной энергопродукции. Тогда для ШАТЭК будем иметь:

$$T \geq \sum_1^n \frac{Q_n T_n}{B_n}, \quad (13)$$

где T – время энергоцикла; B_n – объем произведенной энергии; Q_n – объем потребленной энергии; T_n – время составляющих циклов.

Время в технологических процессах УПНД и УПД определяет составляющие периодов энергоцикла и не может превышать 24 часа. Если работе УПД по технологическому процессу предшествует работа установки УПНД, а за ней в цепочке следует повторение, то полное время для УПД можно считать равным:

$$\bar{\Theta}_{ip} = \Theta_{ip} + t_{ip} + \Theta_{kp}, \quad (14)$$

где Θ_{ip} , t_{ip} , Θ_{kp} – периоды соответствующих производств, в которых работают рассматриваемые установки ШАТЭК.

Продолжительность цикла может быть определена соотношением:

$$T_p = \max \left\{ \max_i (\bar{\Theta}_{ip}), \max (\Theta_{kp}) \right\}. \quad (15)$$

Предполагаем, что объем энергетического сырья или произведенного вида энергии на некоторой стадии процесса получения определенного количества и вида энергии в цикле задан, следовательно, необходимо выбрать такую установку (систему), чтобы она обеспечила необходимый выход по объему сырья или энергии, т.е.

$$V_i = \max_p (S_{ip} B_p). \quad (16)$$

Функция затрат для предприятия представляет собой сумму капитальных вложений на сооружение УПД и УПНД, образующих ШАТЭК.

Таким образом,

$$\bar{C} = \sum_i a_i V_i^{\alpha_i} + \sum_k b_k R_k^{\beta_k}. \quad (17)$$

Результатом изложенного является формулировка задачи оптимального проектирования ШАТЭК: минимизировать функцию (17) при условиях (13–16).

Ограничения можно представить в виде неравенств:

$$T_p \geq \bar{\Theta}_{ip}; \quad (18)$$

$$T_p \geq \bar{\Theta}_{kp}; \quad (19)$$

$$V_i \geq S_{ip} B_p. \quad (20)$$

Тогда задача оптимального проектирования по критерию минимальной стоимости проекта ШАТЭК будет иметь следующий вид:

$$\min \left\{ a_1 V_1^{\alpha_1} + a_2 V_2^{\alpha_2} + a_3 V_3^{\alpha_3} + b_1 R_1^{\beta_1} + b_2 R_2^{\beta_2} + b_3 R_3^{\beta_3} + b_4 R_4^{\beta_4} + b_5 R_5^{\beta_5} \right\}, \quad (21)$$

где a_i , b_i , α_i , β_i – коэффициенты, заданные при следующих ограничениях: для неравенства (13) на общее время технологического энергоцикла:

$$\frac{x}{B_1} T_1 + \frac{y}{B_2} T_2 + \frac{z}{B_3} T_3 \leq 365T; \quad (22)$$

ограничение (20) на объем производства электрической энергии:

$$V_1 \geq \beta_1 B_1; V_1 \geq \beta_2 B_2; V_1 \geq \beta_3 B_3; \quad (23)$$

ограничение (20) на объем производства тепловой энергии:

$$V_2 \geq \gamma_1 B_1; V_2 \geq \gamma_2 B_2; V_2 \geq \gamma_3 B_3; \quad (24)$$

ограничение (13) на продолжительность циклов:

$$T_1 \geq \frac{\beta_1 B_1}{R_1}; T_1 \geq \frac{\beta_2 B_2}{R_2}; T_1 \geq \frac{\beta_3 B_3}{R_3}; \quad (25)$$

$$T_2 \geq \frac{\gamma_1 B_1}{R_1}; T_2 \geq \frac{\gamma_2 B_2}{R_2}; T_2 \geq \frac{\gamma_3 B_3}{R_3}. \quad (26)$$

Ограничения, накладываемые на производство электрической и тепловой энергии в условиях ШАТЭК, могут быть записаны в виде:

$$\left. \begin{array}{l} \text{электрической энергии} - \frac{\beta_2 B_2}{R_2} \geq \frac{\beta_3 B_3}{R_3} \\ \text{тепловой энергии} - \frac{\gamma_2 B_2}{R_2} \geq \frac{\gamma_3 B_3}{R_3} \end{array} \right\}, \quad (27)$$

т.е. имеем, что $R_3 \geq R_2$.

Продолжительность цикла производства электрической энергии:

$$T_1 \geq \frac{\beta_1 B_1}{R_1} + \frac{\beta_2 B_2}{R_2} + \frac{\beta_3 B_3}{R_3}; \quad (28)$$

тепловой:

$$T_2 \geq \frac{\gamma_1 B_1}{R_1} + \frac{\gamma_2 B_2}{R_2} + \frac{\gamma_3 B_3}{R_3}. \quad (29)$$

Следовательно, рассматриваемая задача имеет переменные: T_i , B_i , V_i для каждого вида производимой ШАТЭК энергии и три переменные R , характеризующие производительность.

Поскольку производство электроэнергии ШАТЭК совмещается с получением тепловой энергии, то

$$W = W_{\ominus} + W_T = X + Y, \quad (30)$$

где W – общее энергопроизводство ШАТЭК в год.

Без снижения точности решения задачи можно положить, что:

$$\begin{aligned} Y &= \varepsilon W; \\ W &= X + \varepsilon W; \\ X &= W(1 - \varepsilon), \end{aligned} \quad (31)$$

где ε – доля тепловой энергии.

Поэтому задача приобретает формулировку в виде равенств и неравенств, которые и определяют общее число переменных, т.е. для нее можно применить оптимизационные методы по критериям эффективности с рядом независимых переменных и указанным ограничениям.

Все это в совокупности образует математическую модель ШАТЭК. Однако техническое описание этой модели, отражающее с принятой достоверностью реальное производство, является чрезвычайно важным.

Процесс оптимизации ШАТЭК по предложенной математической модели будем рассматривать как путь отыскания оптимального решения для реальной шахты.

Прямой аналитический путь, ведущий к решению, заменим обходным, включающим оптимизацию модели ШАТЭК, а также трансформацию полученных результатов в практическую форму. При таком подходе надо использовать упрощения, учитывая характеристики ШАТЭК. Опорным критерием для этого является принятая достоверность результатов, прогнозов показателей реального ШАТЭК по известным аналогам, использующим такие же агрегаты и оборудование.

Разумеется, что адекватность модели и реальности в таком случае невозможно строго оценить, поэтому излагаемое далее в некоторой степени креативно, но подчинено техническим принципам, лежащим в основе компонентов модели, что, безусловно, необходимо для оптимального варианта ШАТЭК. Применим к ШАТЭК известный способ разработки модели с «плановым» уровнем неточностей, а именно метод постепенного совершенствования модели. Рассмотрим оптимизацию процесса «производства – потребления» энергии шахтным энергетическим комплексом.

Технологическая схема ШАТЭК объединяет ряд последовательных и параллельных стадий подготовки, переработки энергетического сырья - угля как рабочего тела, а также трансформации и передачи нескольких видов энергии. Можно выделить конечные стадии производства электрической, тепловой энергии и др., но они являются началами других стадий. В связи с этим ШАТЭК – это непрерывное производство-потребление энерго-материальных ресурсов. Для того, чтобы иметь возможность обслуживать и ремонтировать оборудование, следует предусмотреть организацию независимых модулей-блоков, отключение которых в отдельности не вызовет остановку всего производства. Кроме того, при совмещении стадий необходимо обеспечить их управляемость и контроль. Все это в совокупности требует моделирования и оптимизации управления, поскольку фактическое состояние производства существенно отличается от его модели, а эту возможность упускать нельзя, поскольку в ней заключается повышение прибыльности производства.

Предварительную линейную модель ШАТЭК построим по типу «затраты: производство энергии – потребление». Линейная модель позволяет основываться на средних нормах производительности и среднем времени производства, в результате чего проводится окончательный выбор номенклатуры производства по материальным и энергетическим составляющим. Следует ожидать, что при этом будут выявлены очевидные ограничения по максимальным и минимальным показателям работы отдельных систем, установок,

агрегатов, которые в совокупности определяют производственные мощности ШАТЭК. Модифицированная модель имеет широкую область применения и позволяет использовать методы линейного программирования, которые наиболее целесообразны на этапе предварительного исследования.

Для получения оптимальных значений показателей капиталовложений в ШАТЭК принятую модель следует усложнить путем учета расходов, связанных с дополнительным оборудованием и его эксплуатацией. Эти дополнительные расходы несложно учесть в системе линейных ограничений. Однако в результате введения указанных стоимостных членов целевая функция становится нелинейной. Таким образом, предложенная модель ШАТЭК является нелинейно-программируемой с линейными ограничениями и ее можно решать с использованием известных сценариев [3].

Это в первую очередь касается технологий сжигания угля (возможно, шахтного метана), систем очистки дымовых газов, паровых (газовых) турбин и др. Необходимо уточнить имитационную модель (к примеру, время выхода на рабочий режим агрегатов) посредством введения значений случайных переменных (в частности по методу Монте-Карло). В этом случае необходимо располагать статистической информацией о наблюдаемых отклонениях, определить вид влияющих функций распределения и внести их в разработанную модель. Непосредственная оптимизация требует значительных затрат на расчетный процесс [3], поэтому целесообразно выполнять оптимизацию, исследуя конкретную модель ШАТЭК.

Выводы

Таким образом, исходя из общего стратегического подхода к оптимизации структуры ШАТЭК, возможны две инновационные модели: 1) аналитическая; 2) имитационная.

Аналитическая модель включает уравнения материального и энергетического баланса, соотношения между проектными техническими характеристиками и математическими связями, уравнениями, отражающими физические свойства объектов ШАТЭК. Поскольку в такой модели ШАТЭК описывается работа всего комплекса на уровне заложенных технических принципов, следует принять определенную достоверность для расширения условий работы комплекса.

В имитационной модели ШАТЭК основные уравнения, описывающие поведение комплекса, группируются в модули и подпрограммы. Они описывают работу отдельных частей оборудования и агрегатов или реакцию их на изменения условий. Предполагается, что каждый из этих модулей не зависит от других и содержит собственные вычислительные процедуры в виде решений уравнений или операций логического разветвления. Разумеется, что при использовании имитационной модели ШАТЭК нужно иметь расширенное программно-компьютерное обеспечение.

1. Пак В.В. Стратегическое направление эколого-энергетической реструктуризации шахт [Текст] / В.В. Пак, В.Б. Гого // Уголь Украины. - 1997. - № 10.
2. Гого В.Б. Концептуальные положения автономного энергоснабжения угольных шахт и экологической безопасности [Текст] / В.Б. Гого // Известия Донецкого горного института. - 2000. - № 2.
3. Реклейтис Г. Оптимизация в технике [Текст] / Г. Реклейтис. - М.: Мир. -1986. - 346 с.

В.Б. Гого, Ю.Ф. Булгаков, О.М. Данильчук

ІННОВАЦІЙНА МОДЕЛЬ ШАХТНОГО ТЕХНОЛОГО-ЕНЕРГЕТИЧНОГО КОМПЛЕКСУ (ШАТЕК)

Викладено суть інноваційної моделі енергозабезпечення вугільної шахти необхідними видами енергії на основі створення шахтного технолого-енергетичного комплексу (ШАТЕК), який використовує власні енергетичні ресурси.

V.B. Gogo, Yu.F. Bulgakov, O.N. Danilchuk

INNOVATIVE MODEL OF MINE PRODUCTION & POWER COMPLEX (MPPC)

The essence of innovative model of a coal mine power supply with the required types of power based on the construction of mine production & power complex (MPPC) consuming the mine's own power resources is presented.