

**В.И. Большаков, Л.Г. Тубольцев, Н.И. Падун, А.Н. Шевченко**

### **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ РАСЧЕТА ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

Показаны принципы использования системного подхода для расчета технико-экономических параметров альтернативных технологических процессов и новых направлений технического перевооружения горно-металлургического комплекса.

Переход экономики Украины на инновационный путь развития требует внедрения достижений научно-технического прогресса и выбора оптимальных технологических процессов, что влечет за собой потребность в создании новых подходов к определению экономической эффективности преобразования существующих и реализации новых технологий.

Прогнозирование сценариев развития возможных ситуаций предусматривает создание моделей поведения исследуемых объектов. Такой подход может быть реализован с помощью системного анализа, который как прикладная научная дисциплина позволяет с позиций единых принципов и критериев изучать свойства объектов, отношения между ними, свойства и взаимодействия между процессами, а также объектами и процессами. Методология такого анализа базируется на подходах, методах и алгоритмах, позволяющих получить решение в условиях, когда исходная информация об объекте отличается неполнотой, неточностью, нечеткостью и противоречивостью.

Черная металлургия относится к сложным динамическим промышленным системам. Ее развитая технологическая структура, большое количество структурных единиц управления, многообразие исходных материалов и готовой продукции вызывают определенные сложности при исследовании экономических и технологических показателей. При анализе функционирования таких систем необходимым условием является наглядность и возможность рассмотрения результатов этого анализа на каждом из уровней управления. По нашему мнению, для исследования систем управления в черной металлургии должны быть использованы методы системного анализа, которые позволяют объединить условия наглядности результатов и иерархический уровень их представления.

В основе предлагаемого подхода лежит теория гиперкомплексного моделирования, которая использует методы системного анализа и является универсальным методом исследования сложных динамических систем [1]. Наиболее известные методы анализа используют теорию графов, методы структурных матриц, комбинации обычных матриц. Каждый из этих методов разрабатывался и использовался для решения разного рода задач и получал эвристическое развитие [2].

Первый из известных методов - метод графов - был предложен Леонардом Эйлером еще в 1736г. в качестве развлекательной задачи о Кенигсбергских мостах [3]. Практическое применение теория графов получила в конце XIX века, когда в 1765 г. немецкий химик А. Кекуле воспользовался методом графов для изображения структурной формулы бензола, что послужило определенным толчком в развитии теории органической химии [4]. В 1877 г. один из основателей теории автоматического регулирования И.А. Вышнеградский успешно применил элементы теории графов в исследовании структурной устойчивости систем автоматического регулирования. Дальнейшее развитие идея применения символических изображений структуры получила в работах И.И.Гальперина, где каждое уравнение системы записывалось как сумма всех внешних воздействий, приходящихся на каждый элемент системы [5,6]. Этот метод дает четкое представление обо всех внутренних связях, действующих в системе, однако его реализация в то время получалась очень сложной и трудной для восприятия, что не способствовало широкому распространению метода.

М.С. Нейман [7] разработал метод представления физической структуры элементов в виде кольцевых связей, что позволило отображать процессы достаточно сложной природы с учетом нелинейности их характеристик, а также устойчивости или неустойчивости протекания процесса. Например, процесс падения массивного конуса может быть отображен с помощью управляющего кольца зависимостей (рис.1). Малейшее увеличение угла  $\alpha$  вызывает увеличение плеча  $S$  и, как следствие, увеличение момента  $M$ , что в свою очередь приводит к увеличению угла  $\alpha$ . Связь  $M$  с  $\alpha$  является управляющей и прекращается после падения конуса, т.е. управляющее кольцо зависимостей разрывается. Для более сложных систем можно составлять комбинации из колец зависимостей, которые распределяются по уровням иерархии. Однако и в этом случае с увеличением размерности и сложности систем их символическое представление становится слишком громоздким.

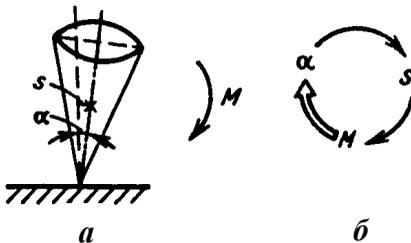


Рис.1. Падение массивного конуса.  $a$  – параметры процесса;  $b$  – управляющие кольца зависимостей.

Развитие теории автоматического регулирования [8,9,10] привело к изображению систем в виде структурных схем с записью передаточных функций внутри прямоугольников, соответствующих тем или иным динамическим звеньям или их группам. Важной для практики является возможность изображения отдельных узлов системы в виде детализированных

структурных схем, на которых показывается прохождение управляющего сигнала или воздействия внутри динамического звена. Однако возможностей этого метода оказывается недостаточно, когда наступает необходимость более детально исследовать процессы прохождения сигнала через каждое звено системы с учетом всех внешних воздействий (рис.2).

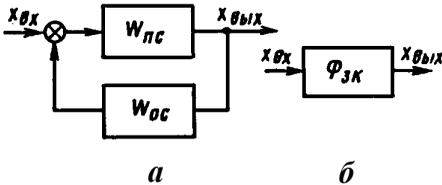


Рис.2. Замкнутый контур системы регулирования: *a* - в развернутом виде; *б* - в свернутом виде.  $W_{пс}$  - контур прямой связи;  $W_{ос}$  - контур обратной связи;  $\Phi_{зк}$  - регулирующий контур.

Лучшие возможности исследования прохождения сигналов через звенья системы с учетом внешних воздействий и взаимной связанности контуров открывают сигнальные графы, разработанные С. Мезоно [11] для исследования системы с обратной связью, главным образом в электро и радиотехнике (рис.3).

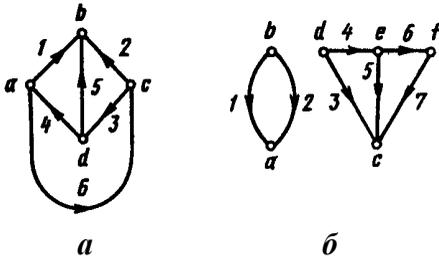


Рис.3. Изображение систем методом графов. Буквенные обозначения в вершинах графов - элементы системы, цифровые обозначения на дугах - взаимосвязи между элементами.

*a* - связный граф (когда все элементы системы участвуют в общих связях); *б* - несвязный граф (когда элементы системы разделены на группы, имеющие самостоятельные связи).

Для математической записи взаимодействий между вершинами и дугами графа Кирхгофом предложены матрицы соответствия дуг и вершин (рис.4). На этих матрицах строки соответствуют вершинам графа, а столбцы - дугам. Однако графы обладают простотой и наглядностью только для устройств малой размерности. При большой размерности системы они становятся сложными для восприятия.

Увеличение размерности и сложности систем привело к необходимости рассмотрения системы по ее составным частям. По этому методу системы сначала представляются в виде электрической сети, которая затем разделяется на отдельные части с учетом свойств ее элементов, а также с учетом физической сущности процессов в реальной системе. Сопоставление зависимостей на графах и матрицах привело к понятию системы структурных матриц, которая дает возможность осуществить принципы системной организации и уменьшить опасность потери связей между отдельными элементами системы [2].

$$\begin{array}{c}
 \begin{array}{c|cccccc}
 i & j & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \\
 a & & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 \\
 b & & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\
 c & & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 1 \\
 d & & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 & 0
 \end{array} \\
 H =
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{c}
 \begin{array}{c|ccccccc}
 i & & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \\
 a & & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 b & & -1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 c & & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\
 d & & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 e & & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 & 0 & 0 \\
 f & & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0
 \end{array} \\
 H =
 \end{array}
 \end{array}$$

***a***
***б***

Рис.4. Матрицы соответствия дуг и вершин графов; *a* – связного графа, *б* – несвязного графа.

Дальнейшее развитие системы структурных матриц привело к созданию теории гиперкомплексных динамических систем (ГДС), которые на данном этапе развития науки являются наиболее общей формой описания сложных систем [1]. Согласно этой теории определение любой системы *S*, представляющей набор разнородных элементов  $a_1, a_2, \dots, a_n$ , состоит в выполнении ряда последовательных операций  $\{P_{ij}\} = P_1 P_2 P_3$ :

$$S = (P_1 S_0) (P_2 S_0) (P_3 S_0) \quad (1)$$

Операция  $(P_1 S_0)$  предполагает составление перечня элементов, входящих в систему, т.е. выполнение процедуры:  $S = (P_1 S_0) = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ . При этом гиперкомплексное разнообразие обеспечивается разнообразием элементов, входящих в систему.

Операция  $(P_2 S_0)$  предполагает определение свойства динамичности системы, т.е. определения взаимосвязей ( $\gamma$ ) между элементами. При этом строится информационная система, выделяя те взаимосвязи, которые являются существенными для поставленной задачи.

Операция  $(P_3 S_0)$  предполагает постановку задачи определения структурности системы, которая отображается в виде графа взаимодействий между элементами системы.

Общую схему описания металлургического производства как ГДС, можно представить следующим образом: «Входные элементы» - «Металлургическое производство» - «Выходные элементы». В развитие теории гиперкомплексного моделирования авторами предложено объединить входные и выходные элементы системы в единую матрицу, что позволяет исследовать внутренние процессы, происходящие в самой системе.

Для примера рассмотрим доменную плавку как систему со свойствами гиперкомплексности и динамичности, состоящую из двух входных элементов - агломерат ( $\varphi_1$ ) и кокс ( $\varphi_2$ ), и четырех выходных элементов - чугуна ( $\varphi_3$ ), шлак ( $\varphi_4$ ), и колошниковый газ ( $\varphi_5$ ), пыль ( $\varphi_6$ ).

Свойство динамичности и операции по его определению выполним, исходя из задач системного исследования. Допустим, нас интересуют взаимосвязи между элементами системы. При этом информационная система

строится с выделением вида взаимодействия, который является существенным для поставленной задачи. В результате получим:

$$S_2 = P_2 S_0 = \{Y_{ij}\}_{i,j=1...6} \quad (2)$$

где  $S_2$  - динамичность, реализуемая за счет взаимосвязи между элементами системы;  $P_2$  - определение каналов взаимосвязи и их характеристика, рассматриваемая с позиций взаимосвязи;  $Y_{ij}$  - показатель взаимосвязи между конкретными элементами.

Взаимосвязь между элементами является важнейшим показателем ГДС и происходит за счет расхода одних элементов и перехода их энергии в другие элементы. Реально в течение определенного времени расходуется не весь элемент  $\varphi$ , а его часть  $d\varphi$ , которая расходуется на системное строительство с определенной скоростью. Показатель взаимосвязи  $y_{ij}$ , определяет, с каким расходом один элемент системы переходит в другой, индексы  $i$  и  $j$  указывают на элементы системы. В матричном виде реализация свойства динамичности системы представлена в табл.1.

Табл.1. Матричное представление упрощенной взаимосвязи элементов доменной плавки

Элементы системы		1	2	3	4	5	6
1	Агломерат ( $\varphi_1$ )	1		$y_{13}$	$y_{14}$	$y_{15}$	
2	Кокс ( $\varphi_2$ )		1	$y_{23}$	$y_{24}$		$y_{26}$
3	Чугун ( $\varphi_3$ )	$y_{31}$	$y_{32}$	1	$y_{34}$		
4	Шлак ( $\varphi_4$ )	$y_{41}$	$y_{42}$	$y_{43}$	1		
5	Пыль ( $\varphi_5$ )	$y_{51}$				1	
6	Колошниковый газ ( $\varphi_6$ )		$y_{62}$				1

По главной диагонали  $\varphi_i / \varphi_i = 1$  (коэффициент расхода элемента на взаимодействие с самим собой);

$y_{ij}$ , при  $i < j$  – коэффициенты взаимосвязи элементов системы между собой (над главной диагональю – для решения прямой задачи расчета выходных параметров по входным элементам);

$y_{ij}$ , при  $i > j$  – коэффициенты взаимосвязи элементов системы между собой (под главной диагональю – для решения обратной задачи расчета входных параметров по выходным элементам).

Незаполненные клеточки в матрице означают отсутствие взаимосвязи между элементами. Постепенно наращивая количество элементов в исходном определении системы, можно переходить к следующему этапу ее развития, что позволяет расширять возможности системы как математической модели до уровня минимального отклонения от реального состояния исследуемого объекта.

Следующим системным свойством исследуемого объекта является свойство структурности:

$$S_3 = P_3 S_0 \quad (3)$$

где  $S_3$  - постановка задачи определения свойства структурности, которая отображается в виде графа информационных контактов;  $P_3$  - оператор опреде-

ления элементов графа взаимосвязи;  $S_0$  - исследуемая группа объектов системы, которая рассматривается с позиций структурообразования информационной модели. В результате выполнения свойства структурности (3) получим графоаналитическую интерпретацию представления доменного процесса как системы (рис.5).

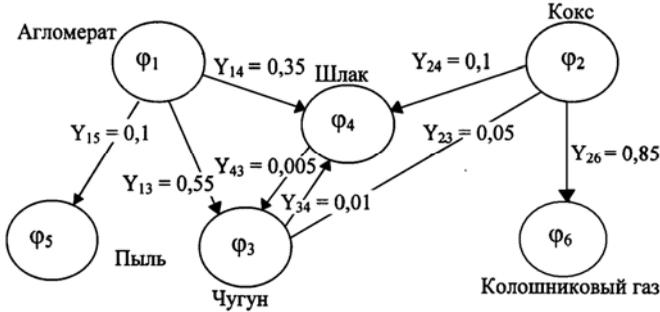


Рис 5. Графоаналитическая интерпретация упрощенного представления доменного процесса для прямого расчета

Металлургическое производство включает комплекс последовательно реализуемых технологий, каждая из которых представляет сложную систему, развивающуюся по своим законам. Реализация и развитие каждой технологии осуществляется с определенной целью на определенном иерархическом уровне металлургического процесса, поэтому необходимо установление функциональных связей между элементами различных иерархических уровней. Такие функциональные связи образуют идеологическую сторону развития металлургического комплекса как системы, характеризуют и определяют управление развитием ГМК как сложной производственной системой.

Данный подход позволяет разработать математическую модель сквозной технологии металлургического производства на системной основе. В этой модели ГМК представлен как система определенного количества факторов (элементов), которые оказывают определяющее влияние на процесс производства металлопродукции. Система представлена в виде матрицы (табл.2), которая характеризует балансовое состояние элементов системы. Взаимосвязь элементов характеризует параметры балансового состояния системы и используется для мониторинга и анализа процесса производства. Математическая модель представлена в виде системной матрицы с несколькими иерархическими уровнями, которая позволяет определять базовые технико-экономические показатели для конкретного технологического процесса и расчетные параметры для измененной или модернизированной технологии, что позволяет производить их сопоставление.

В разработанной модели, реализованной в программе Microsoft Excel, расчет себестоимости продукции осуществляется по алгоритму, представленному на рис.6.

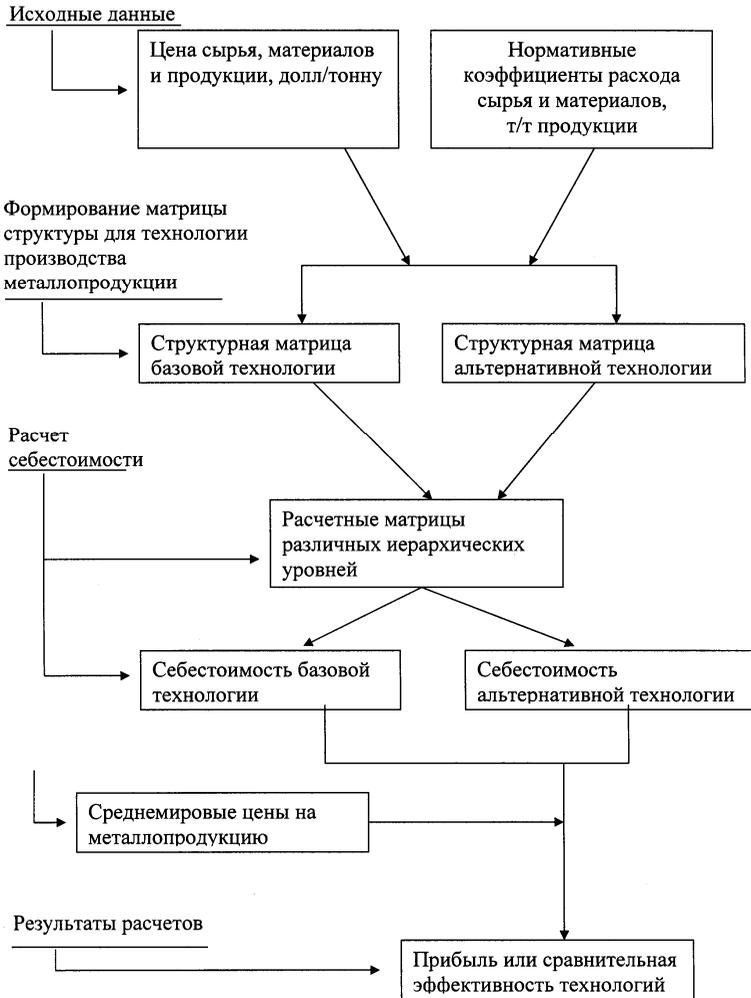


Рис.6. Алгоритм расчета себестоимости металлопродукции

Матрицы составляются для каждого конкретного предприятия и определяют основные технико-экономические показатели, которые являются основными параметрами ГМК. Следующий иерархический уровень матриц составляют матрицы предприятий одной подотрасли, потом об-

ласти и региона. Таким образом определяются показатели развития ГМК на макроэкономическом уровне в целом.

Табл.2. Матрица сквозной технологии производства металлопродукции (прямая задача)

	Элементы сквозной технологии	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	Агломерат	1			▼											
2	Окатыши		1		▼											
3	Кокс			1	▼											
4	Чугун				1	▼	▼									
5	Сталь (мартен)					1		▼	▼	▼						
6	Сталь (ККЦ)						1	▼	▼	▼						
7	Внепечн.обработка							1	▼	▼						
8	Разливка (слитки)								1		▼			▼		
9	МНЛЗ									1			▼	▼		▼
10	Блюминг										1					
11	Крупный сорт											1	▼	▼		
12	Мелкий сорт												1	▼		
13	Слябинг													1	▼	
14	Лист горячекат.														1	▼
15	Холоднокат. лист															1

Для возможности проведения сопоставимых расчетов все виды энергоносителей, используемых в процессе производства металлопродукции, приведены к единому показателю – расход на единицу продукции в тоннах условного топлива (т.у.т.). Приведение к единому показателю осуществлялось по коэффициентам перевода, значения которых приведены в табл.3.

Табл.3. Значения переводных коэффициентов энергетических ресурсов для расчета в тоннах условного топлива (т.у.т.) [12].

Энергетические ресурсы	Гкал	тыс.м <sup>3</sup>	Тыс. кВт.ч	Коэф-ты перевода	т.у.т.
Электроэнергия			1	0,42	0,42
Природный газ		1		1,15	1,15
Пар	1			0,14	0,14
Доменный газ		1		0,13	0,13
Коксовый газ		1		0,52	0,52

С использованием приведенной методики и модели расчета определена обобщенная себестоимость производства чугуна, стали и проката (по среднемировым ценам сырья, энергоносителей и материалов) и проведено сравнение со среднемировыми ценами на готовую продукцию по состоя-

нию на конец 2003г (табл4). В настоящей работе упор сделан на определение себестоимости продукции с учетом всех переделов и производств. Модель для расчета технико-экономических параметров и себестоимости продукции основана на общепризнанной методике, которая использовалась на металлургических предприятиях СССР и используется в настоящее время в Украине. Предлагаемый авторами подход позволяет: на балансовом уровне определять производственный потенциал ГМК; оценивать перспективы его развития; определять слабые места и устанавливать приоритеты развития; оценивать выбор определенных целей как на «микро» уровне для каждого предприятия и отдельной технологии, так и на «макро» уровне для региона или страны в целом; использовать единый подход к оценке эффективности работы предприятий с различной структурой производства.

Таблица 4. Прибыльность базовых технологий производства металлопродукции при реализации по среднемировым ценам, долл/т

	Агломерат	Окатыши	Чугун	Конверт	Марген	Заготовка	Мелкий сорт	Крупный сорт	Слябы	Лист горячекатаный	Лист холоднокатаный
Среднемировая цена	50	50	145	195	195	220	250	250	280	320	420
Себестоимость	34	35	132	163	162	203	234	235	243	284	374
Прибыль	16	15	13	32	33	17	16	15	37	36	46

Определение себестоимости продукции на всех стадиях металлургического передела в сравнении с мировыми ценами (табл.4) показало, что сегодня при реализации продукции металлургические предприятия имеют возможность получать прибыль независимо от глубины переработки продукции. Это является одной из причин, почему сегодня не все металлургические предприятия используют возможности для преодоления отставания в техническом уровне производства, а инвестиции направляются, в основном, для ликвидации аварийного состояния металлургических агрегатов. Судя по немногочисленным инвестиционным проектам в украинской металлургии, можно сделать вывод, что на нынешнем этапе металлургические предприятия решают несколько другие проблемы, связанные с немедленным получением прибыли любой ценой, даже в ущерб ближайшему будущему. Следует отметить, что для каждого конкретного предприятия себестоимость продукции будет отличаться от приведенных в табл.4 данных, однако для сравнения альтернативных технологий полученные данные могут быть использованы. Сравнение между собой аль-

тернативных технологических процессов осуществляется на основе формирования и учета затрат на производство продукции.

В качестве примера полученных с использованием модели результатов приведем анализ расхода энергоресурсов по базовым технологиям ГМК Украины (рис.7). Приведенные на рис.7 результаты выполненного авторами расчета расхода энергоресурсов (т.у.т./т готового проката) в зависимости от схемы производства показал, что уровень энергозатрат существенным образом зависит от схемы производства металлопродукции. Наименьший расход энергоресурсов обеспечивает производство сортового проката по схеме «доменная печь–кислородный конвертер–МНЛЗ–мелкий сорт» (схема 1 на рис.7) – 1,73 т.у.т./т готового проката. По сравнению с производством мелкого сорта производство листовой продукции требует на 20-25% больших энергетических затрат.

Сортамент продукции и уровень реализации технологии оказывает существенное влияние на удельный расход энергоресурсов. В частности, выполненный нами расчет для условий КГГМК «Криворожсталь» подтвердил данные комбината, что при использовании разливки полуспокойных стали в слитки для производства арматуры (Схема 1 на рис.7)) эта технология вполне конкурентоспособна в сравнении с технологией, использующей МНЛЗ.

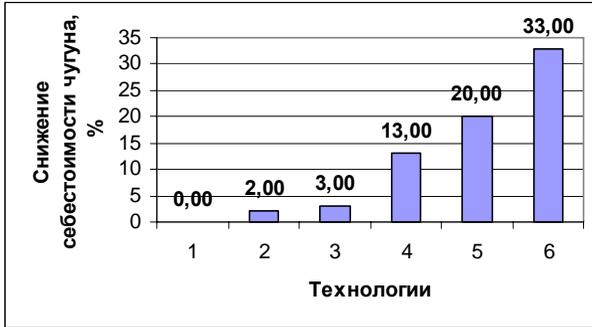


Рис.7. Расход энергоресурсов при различных схемах производства металлопродукции. Технологические схемы производства: 1. ДП – К – МНЛЗ – Сорт; 2. ДП – К – Из – Сорт; 3. ДП – М – Из – Сорт; 4. ДП – К – МНЛЗ – Лист; 5. ДП – К – Из – Лист; 6. ДП – М – Из – Лист. Обозначения:

**ДП** – получение чугуна в доменной печи; **М** – получение стали в мартеновских печах; **К** – получение стали в кислородных конвертерах; **Из** – разливка стали в изложницы; **МНЛЗ** – непрерывная разливка стали; **Сорт** – производство мелко-сортной продукции; **Лист** – производство тонкого горячекатаного листа.

Для определения качественной картины сравнительной эффективности металлургических технологий в расчетах нами использованы нормативные коэффициенты расхода сырья и материалов. Для сравнения эффективности альтернативных технологий авторами выполнен расчет себестоимости чугуна при различных направлениях модернизации доменной плавки (рис.8).

Рис.8. Сравнительная эффективность направлений модернизации процесса



доменной плавки. 1 – базовая технология; 2 – новые конструкции литейного двора; 3 – увеличение содержания железа в агломерате и окатышах на 4%; 4 – замена кокса новыми энергоносителями; 5 – оснащение печей БЗУ, контроль параметров доменной

плавки, управление распределением шихтовых материалов и газов в доменной печи; 6 – модернизация доменных печей с доведением их уровня до мирового.

Эффективность работы черной металлургии в значительной мере определяется доменным производством, которое наряду с подготовкой железорудного сырья является наиболее энергоемким процессом. На его долю приходится до 60% энергетических ресурсов, расходуемых в отрасли. Доля кокса в себестоимости чугуна достигает 40%, поэтому уменьшение расхода кокса является важнейшей проблемой в экономике черной металлургии. Это определяет пристальное внимание металлургов к модернизации доменных печей, что является приоритетным направлением для большинства металлургических предприятий Украины.

Сравнительную эффективность направлений модернизации процесса доменной плавки (рис.8) определяли с использованием факторного расчета расхода кокса [12]. В качестве данных изменения расхода кокса использовали статистические материалы работы доменных печей с использованием перспективных технологий, а также прогнозируемые расходные коэффициенты материалов и энергоресурсов для новых технологий. Доведение технического уровня доменных печей до мирового: с использованием БЗУ, автоматизированных систем контроля параметров доменной плавки и управления распределением шихтовых материалов и газов в доменной печи позволят снизить себестоимость чугуна на 33%. На втором месте по возможности уменьшения общих энергозатрат в доменной плавке стоит технология частичной замены кокса более доступными и дешевыми энергоносителями, в т.ч. ПУТ (около 13%). Общий резерв снижения себестоимости чугуна от реализации всех известных технологических и конструкционных решений может достигать 40%. Поскольку затраты на энергоресурсы в доменной плавке достигают 40% от общих энергозатрат в металлургии, возможности уменьшения энергозатрат в доменном процессе на 13–40% является существенным резервом снижения расхода себестоимости готовой металлопродукции.

Выводы. Основной путь реализации задач развития и реформирования горно–металлургического комплекса Украины – это широкое и ускоренное внедрение новых технологий и технических решений, а также активизация инвестиционной деятельности всех звеньев металлургического производства. Для технико-экономической оценки перспективности использования существующих и новых металлургических технологий разработана методика комплексной оценки эффективности технологий производства чугуна, стали и проката. В основу методики положены принципы балансовой оценки комплекса металлургических технологий с использованием системного подхода. Разработанная математическая модель является инструментом, обеспечивающим выполнение расчетов экономических параметров производства металлопродукции по различным технологическим схемам и вариантам, что позволяет использовать ее для анализа и технико-экономической оценки перспективных металлургических технологий с учетом тенденций развития металлургии, определения наиболее эффективных путей инновационного обновления металлургического производства.

1. *Малюта А.Н.* Закономерности системного развития. – Киев: Наук. Думка, 1990. – 136с.
2. *Шатихин Л.Г.* Структурные матрицы и их применение для исследования систем. – 2-е изд., перер. и доп. – М.: Машиностроение, 1991. – 256 с.
3. Берж К. Теория графов и ее применение / Пер. с франц. – М.:Изд-во иностр.лит., 1962. – 319 стр.
4. *Нечипоренко В.И.* Структурный анализ систем. – М.: Сов. радио, 1977. – 213 с.
5. *Гальперин И.И.* Синтез систем автоматики – М.–Л.: Госэнергоиздат, 1060. – 160с.
6. *Гальперин И.И.* Динамические системы. – М.: Энергия, 1970. – 268 с.
7. *Нейман М.С.* Автоматические процессы и явления. – М.: Сов. Радищ, 158. – 148с.
8. *Мерезовский В.Т.* Многосвязные системы автоматического регулирования. М.: Энергия, 1970. – 288с.
9. *Шаталов А.С.* Структурные схемы в теории управления и электроавтоматике. М.: Госэнергоиздат, 1969. – 378с.
10. *Айзерман М.А.* Теория автоматического регулирования – М.:Наука, 1966. – 452с.
11. *Meason S.J.* Feedback Theory. Some Properties of signal Graphs // Proc.JPE. 1953. vol.41, №9.
12. *Никифоров Г.В., Заславец Б.И.* Энергосбережение на металлургических предприятиях. – Магнитогорск: МГТУ, 2000. – 283 с.
13. *Синицкий В.Д.* Снижение расхода кокса при выплавке чугуна // Экономия материальных ресурсов и организация производства в черной металлургии. – М.:Металлургия, 1987. – 8–13.