

**ФОРМИРОВАНИЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ МЕРОПРИЯТИЙ
ДЛЯ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ САМАРСКОЙ ОБЛАСТИ**

© 2015 А.С. Клентак

Самарский государственный аэрокосмический университет им. академика С.П.Королева
(национальный исследовательский университет)

Поступила в редакцию 06.04.2015

В статье рассматривается формирование последовательности энергосберегающих мероприятий на основании составления и решения математической модели многокритериальной оптимизации методом Парето. В модели составляются целевая функция на основании экспертных оценок, а также затратная функция по рассматриваемому технологическому процессу литейного производства машиностроительного предприятия.

Ключевые слова: энергосберегающие мероприятия, технологический процесс литейного производства, математическая модель многокритериальной оптимизации, оптимальность по Парето.

В последние годы в фокусе государственной политики РФ стоит вопрос повышения энергоэффективности и стимулирования энергосбережения в различных сферах деятельности. Во времена экономического кризиса и финансовой нестабильности предприятия вынуждены сокращать свои расходы. Но, несмотря на такие жёсткие внешние условия, предприятиям необходимо развиваться и проводить модернизации, в том числе и энергетические.

На данном этапе развития нашей страны было выбрано, как приоритетное, направление развития - энергомодернизация, а именно повышение энергоэффективности - эффективного (рационального) использования энергетических ресурсов. Однако в условиях конкуренции необходимо не просто провести модернизацию энергосистемы, но и определить приоритетность целевых мероприятий [1].

Вопрос выбора стратегии модернизации промышленных объектов, особенно при ограничениях по капитальным вложениям и техническим средствам, имеет важное значение при решении задач, связанных с экономией топлива и энергии в промышленности.

Для решения поставленной задачи А.И. Довгялло и др. использовали комплексный эвристико-кибернетический подход. Основные принципы такого подхода заключаются в декомпозиции предприятия (образование исходного множества элементов), составление моделей исходного и возможного состояний элемента, описываемые на основе эвристик, создание функции предпочтения элемента (получение на их основе параметров приоритета) и, как следствие, формирование целевых последовательностей элементов [3]. Однако, этот подход сосредоточен исключительно на предвзятой оценке экспертов, в то время как фактически большое значения для принятия решения о про-

ведении энергосберегающих мероприятий на той или иной группе элементов имеют натуральные и стоимостные затраты данного элемента. Кроме того, данный метод не позволяет определить очередность проведения мероприятий в случае, если рассчитанные параметры приоритета получаются одинаковыми у нескольких элементов.

Ввиду указанного выше исследования, это исследование планирует применить декомпозицию технологического цикла получения кокильной отливки «Крыльчатка» на отдельные элементы – участки; анализ энергоёмких видов оснастки, оборудования и инструментов на основании анкет «Характеристик исходного (возможного) состояния элементов»; расчет математической модели с функциями энергоэффективности и затрат; нахождение последовательности проведения мероприятий методом Парето; выставление рекомендаций.

Метод исследования**Составление набора элементов
технологического цикла**

Исходное множество элементов возможно сформировать различными путями. Первоначальное множество элементов можно получить, исходя из схемы энергоснабжения предприятия (в соответствии с числом ответвлений энергетических потоков от основных магистралей к отдельным потребителям). Это множество затем корректируется с учетом объединения однородных установок в один элемент. Множество элементов может быть образовано на основе составленных синтетических энергобалансов предприятия по видам используемых энергоносителей, по целевому назначению потребления, по объектам. Перечень элементов, подлежащих детальному исследованию с точки зрения эффективности энергоиспользования, может быть составлен с учетом системы показателей, характеризующих

Клентак Анна Сергеевна, аспирант кафедры теплотехники и тепловых двигателей.

E-mail: anna_klentak@mail.ru

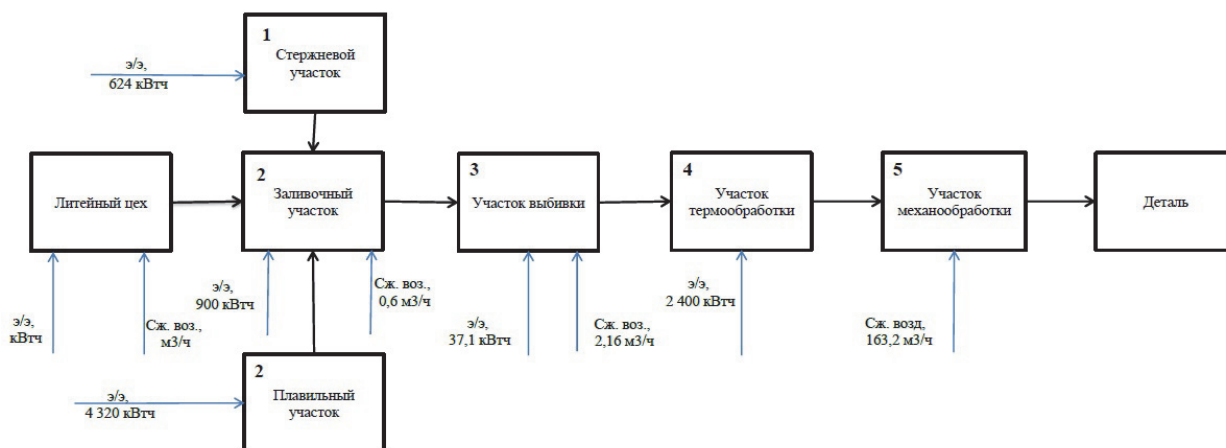


Рис. 1. Схема технологического цикла получения кокильной отливки «Крыльчатка»

состояние учета и нормирования расхода энергоносителей, энергетическую составляющую в себестоимости продукции, расход энергоносителя, затраты на совершенствование элемента и эффект от этого совершенствования и др.

В работе рассматривается литейный цех, имеющий несколько технологических потоков, каждый из которых может выпускать отливки из одной или нескольких марок металла. Образование исходного множества элементов в нашем случае будет состоять в разбиении технологического цикла получения кокильной отливки «Крыльчатка» из алюминиевого сплава ПП-2000М на отдельные элементы – участки, согласно рис. 1. В итоге прохождения одного полного цикла на выходе получается около 8 изделий. В месяц цикл повторяется 3-4 раза.

На стержневом участке (1) в данном технологическом цикле применяются бегуны для изготовления стержневой смеси с мощностью привода 22 кВт. Время приготовления смеси 1,5-2 часа. Сушка стержней для снижения их газотворной способности и повышения прочности и

газопроницаемости осуществляется в камерном сушиле 500/45НА. Температура сушки изделий в камерных сушилках - 40-80°С. Продолжительность – 4 часа. Приготовление расплава (600 кг) происходит на плавильном участке (2) в плавильной печи мощностью 90 кВт в течение 10-12 часов. На заливочном участке (2) происходит выдержка расплавленного сплава (не более 250 кг) в вакуумно-раздаточной печи ВРП-0,25 мощностью 50 кВт в течение 1-1,5 часов. Плавильный и заливочный участки будут рассматриваться в данной работе, как один элемент, вследствие неразрывности этих двух участков технологического процесса. Далее происходит заливка отливки и выдержка ее в кокиле в течение 12 минут. Выбивка (3) одной отливки занимает от 8 до 10 минут. Термообработка (4) партии отливок в камерной печи с толкателем ПНТ8-1 мощностью 100 кВт занимает 6 часов. На механическую обработку (5) одной отливки уходит около 25-30 минут [4,5].

Заданное множество элементов представлено в виде табл. 1.

Таблица 1. Множество элементов

№ эл-та «к»	Наименование (код) к-го элемента	Оборудование
1	Стержневой участок	Смеситель (бегуны) модели 15112, Камерное сушило № 500/45 НА
2	Плавильно - заливочный участок	Плавильная печь сопротивления ПП-2000М, вакуумно-раздаточная печь ВРП-0,25
3	Участок выбивки	Отбойный молоток МОП-2, выбивная решетка мод. 421, станок ленточнопильный СРЗ-200-02
4	Участок термической термообработки	Камерная печь с толкателем ПНТ88-1
5	Участок механической обработки	Высокоскоростная прямая шлифовальная машинка ST 100

Анализ энергоемких видов оборудования на основании анкет «Характеристик исходного (возможного) состояния элементов»

На данном этапе каждый элемент с помощью анкет (табл.2, табл.3) рассматривается экспертом с точки зрения выполнения общей задачи – сни-

Таблица 2. Анкета характеристик исходного состояния элемента
Характеристика исходного состояния элемента
(элементы технологического процесса литейного производства)

№	Характеристика элемента ($Char_{k.и.с.}$)	a_i	α_i	Оценка значимости характеристики на энергоэффективность предприятия
1	Элемент: новый устаревший: модернизируется не модернизируется	0 1,0	0,5 1,0	
2	Изготовление: специальное серийное в количестве: несущественном существенном	0 1,0	0,5 1,0	
...
16	Потери при передаче энергоресурсов: имеют место: несущественные существенные отсутствует	1,0 0	0,5 1,0	

Таблица 3. Анкета характеристик возможного состояния элемента
Характеристика возможного состояния элемента
(элементы технологического процесса литейного производства)

№	Характеристика элемента ($Char_{k.в.с.}$)	b_j	β_j	Оценка значимости характеристики на энергоэффективность предприятия
1	Снижение расхода энергоресурсов: возможно при реконструкции: существенной несущественной невозможно	1,0 0	0,5 1,0	
2	Замена энергоресурса: возможна: одного вида другим более одного вида другими невозможна	1,0 0	0,5 1,0	
...
19	Сокращение потерь при передаче энергоресурсов: возможен: несущественный существенный отсутствует	1,0 0	0,5 1,0	

жение потребления энергоресурсов.

Из представленных характеристик (табл. 2, табл. 3) выбираются восемь оказывающих наиболее сильное влияние на элемент.

Характеристики каждого из вида будут иметь вид:

$$\begin{aligned} Char_{k \text{ И.С.}} &= \sum_{j=1}^8 a_j \cdot \alpha_j, \\ Char_{k \text{ В.С.}} &= \sum_{i=1}^8 b_i \cdot \beta_i. \end{aligned}$$

Тогда для каждого элемента получаем следующее:

Для стержневого участка:

$$\begin{aligned} Char_{1 \text{ И.С.}} &= 7; \\ Char_{1 \text{ В.С.}} &= 6,5. \end{aligned}$$

Для плавно - заливочного участка:

$$\begin{aligned} Char_{2 \text{ И.С.}} &= 5; \\ Char_{2 \text{ В.С.}} &= 5. \end{aligned}$$

Для участка выбивки:

$$\begin{aligned} Char_{3 \text{ И.С.}} &= 7; \\ Char_{3 \text{ В.С.}} &= 6. \end{aligned}$$

Для участка термообработки:

$$\begin{aligned} Char_{4 \text{ И.С.}} &= 7,5; \\ Char_{4 \text{ В.С.}} &= 6. \end{aligned}$$

Для участка механообработки:

$$\begin{aligned} Char_{1 \text{ И.С.}} &= 5; \\ Char_{1 \text{ В.С.}} &= 5,5. \end{aligned}$$

Составление математической модели

Целевой функцией в составляемой математической модели будет являться отношение характеристики возможного состояния к исходному состоянию элемента, показывая тем самым потенциал возможной модернизации рассматриваемого элемента. Таким образом, целевая функция принимает следующий вид:

$$EF = \frac{Char_{k \text{ В.С.}}}{Char_{k \text{ И.С.}}} \rightarrow \max.$$

Для каждого элемента получаем:

$$\begin{aligned} EF_1 &= 0.929; \\ EF_2 &= 1; \\ EF_3 &= 0.857; \\ EF_4 &= 1,25; \\ EF_5 &= 1,1. \end{aligned}$$

Также для принятия решения о проведении энергоэффективных мероприятий очень важным фактором является оценка затрат, которые несет предприятие на данном участке. Поэтому в модель вводится затратная функция, как сумма затрат на энергоресурсы и экологические платежи на рассматриваемом технологическом потоке ма-

шиностроительного предприятия. Целевая и затратная функции устремляются к максимуму, т.к. чем больше затрат несет предприятие на отдельно взятом участке технологического процесса и, чем больше потенциал энергоэффективности от проведения энергоэффективных мероприятий на данном участке, тем более рентабельным становится проведение модернизации именно этого участка технологического потока. Как видно из рисунка 1 на рассматриваемом технологическом процессе машиностроительного предприятия затраты на энергоресурсы складываются из затрат на электрическую энергию и сжатый воздух. Затратная функция принимает вид:

$$Z = Z_3 + Z_{\text{ск.в.}} + Z_{\text{эк.}} \rightarrow \max$$

Расход электроэнергии на каждом участке технологического процесса находится следующим образом:

$$Z_3 = \sum_{l=1}^n P_l \cdot T_l \cdot z_l \cdot \tau_{3/3},$$

где P_l – потребляемая мощность оборудования каждого типа, кВт.,

T_l – время работы оборудования, ч.,

z_l – количество загрузок оборудования, шт.,

$\tau_{3/3}$ – тариф на расход 1 кВтч электрической энергии, руб/кВтч.

Расход сжатого воздуха на каждом участке технологического процесса находится следующим образом:

$$Z_{\text{ск.в.}} = \sum_{l=1}^n z_l \cdot V_l \cdot T_l \cdot \tau_{\text{ск.в.}},$$

где z_l – количество загрузок оборудования, шт.,

V_l – расход сжатого воздуха, потребляемого оборудованием каждого типа, м³/ч,

$\tau_{\text{ск.в.}}$ – тариф на расход 1 м³ сжатого воздуха, руб/м³.

Крупными источниками пыле- и газовойдыления в атмосферу в рассматриваемом технологическом процессе являются плавильные печи, участок приготовления и смешивания смеси, а также участок выбивки и оточки литья. Затраты на экологические платежи находятся в модели следующим образом:

$$Z_{\text{эк.}} = \sum_{l=1}^n q_l \cdot B_l \cdot \left(1 - \frac{\eta_r \cdot A}{100}\right) \cdot \tau_{\text{эк.}}$$

где q_l – удельное выделение веществ на единицу продукции на заданном участке технологического процесса [9], кг/т,

B_l – количество перерабатываемого материала за месяц на заданном участке технологического процесса, т.,

η_m – эффективность очистки улавливающих аппаратов [9], %

A – коэффициент, учитывающий исправную работу очистного оборудования.

$\tau_{\text{эк.}}$ – норматив платы за выбросы в атмосферный воздух загрязняющих веществ [8], руб.

Затраты на каждом участке технологического процесса составляют:

- 1) $Z_1 = 2\,852,94$ руб.;
- 2) $Z_2 = 20\,902,96$ руб.;
- 3) $Z_3 = 423,84$ руб.;
- 4) $Z_4 = 9\,600$ руб.;
- 5) $Z_5 = 22\,964,37$ руб..

В итоге математическая модель принимает следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} EF = \frac{Char_{k\text{в.с.}}}{Char_{k\text{н.с.}}} \rightarrow \max, \\ Char_{k\text{н.с.}} = \sum_{j=1}^8 a_i \cdot \alpha_i, \text{ где} \\ 0 \leq a_i \leq 1, \\ 0 \leq \alpha_i \leq 1 \\ Char_{k\text{в.с.}} = \sum_{i=1}^8 b_j \cdot \beta_j, \text{ где} \\ 0 \leq b_j \leq 1, \\ 0 \leq \beta_j \leq 1 \\ Z = Z_3 + Z_{\text{сж.в.}} + Z_{\text{эк.}} \rightarrow \max, \\ Z_3 = \sum_{l=1}^n P_l \cdot T_l \cdot z_l \cdot \tau_{3/3}, \\ Z_{\text{сж.в.}} = \sum_{l=1}^n z_l \cdot V_l \cdot T_l \cdot \tau_{\text{сж.в.}}, \\ T_l^{\text{норм.}} \leq T_l \leq T_l^{\text{факт.}} \\ Z_{\text{эк.}} = \sum_{l=1}^n q_l \cdot B_l \cdot \left(1 - \frac{\eta_T \cdot A}{100}\right) \cdot \tau_{\text{эк.}}, \\ \tau_{\text{эк.}} \begin{cases} \tau_{\text{эк.}}^{\text{ПДВ}} \\ \tau_{\text{эк.}}^{\text{ПВ}} \end{cases} \end{array} \right.$$

$\alpha_i (b_j)$ и $\alpha_i (\beta_j)$ – соответственно весовой коэффициент показателя исходного (возможного) состояния элемента и сам показатель;

$\tau_{\text{эк.}}^{\text{ПДВ}}$ – норматив платы за выбросы в атмосферный воздух загрязняющих веществ в пределах установленных допустимых нормативов выбросов [8], руб.,

$\tau_{\text{эк.}}^{\text{ПВ}}$ – норматив платы за выбросы в атмосферный воздух загрязняющих веществ в пределах установленных лимитов выбросов [8], руб.

Нахождение рангов мероприятий через решение многокритериальной задачи по оптимальности Парето

Анализ решений при многих критериях в значительной степени сводится к организации в той или иной форме взаимодействия с лицом принимающим решения (далее – ЛПР), которое одно только и может разрешить проблему со-

измерения различных критериев. Тем не менее существует довольно ограниченная область, в которой применение сугубо формального анализа без обращения к ЛПР оказывается весьма полезным. Речь идет о выделении так называемого множества эффективных, или оптимальных по Парето, альтернатив.

Эффективной (оптимальной по Парето) называется такая альтернатива, для которой не существует другой допустимой, не уступающей ей по всем критериям и хотя бы по одному критерию превосходящей ее альтернативы. Важнейший критерий рациональности процесса разработки и принятия решения: выбираемый вариант должен быть эффективным.

Главное в нахождение эффективного решения состоит в том, что после того, как сформулированы критерии, задача нахождения множества эффективных решений на заданном множестве альтернатив является хоть и сложной, но вполне формальной задачей, не требующей для своего решения обращения к ЛПР. Особенно простой задача отыскания эффективных решений является в дискретном случае, т.е. когда имеется заданный набор вариантов решения, из которых надо сделать выбор. Математическая модель, рассмотренная выше, описывает критерии нахождения оптимального участка для начала проведения модернизации предприятия [10]. В случае решения данной задачи каждый из критериев, учитываемых при принятии решения, предпочтительнее большее значение. Тогда альтернатива проведения энергоэффективных мероприятий на участке k (альтернатива i) доминирует альтернативу проведения энергоэффективных мероприятий на участке k+1 (альтернативу j), если оценки у альтернативы i по всем критериям не меньше (больше или равны) оценок альтернативы j. Таким образом, можно построить матрицу сравнения альтернатив, в которой в i-й строке j-м столбце будем ставить 1, если i-я альтернатива доминирует j-ю, и 0 – в противном случае. В решение данной задачи есть пять альтернатив (элементы-участки технологического процесса), каждая из которых оценена по двум критериям (EF, Z). Они представлены в табл. 4.

По результатам попарного сравнения шести альтернатив между собой у нас получится следующая матрица 5x5 (табл. 5).

В табл. 5 получились три столбца, в которых есть единицы: первый, второй и третий. Это значит, что первая, вторая и третья альтернативы доминируются какими-то другими. Поэтому они не являются эффективными. Парето-оптимальные альтернативы в данной задаче – четвертая и пятая.

Выделение множества Парето можно рассматривать лишь как предварительный этап оптимизации, и налицо проблема сокращения этого

Таблица 4. Данные по пяти альтернативам

Кр-й Ал-ва	EF	З, руб.
1	0,929	2 852,96
2	1	20 902,96
3	0,857	423,84
4	1,25	9 600
5	1,1	22 964,37

Таблица 5. Результаты попарного сравнения шести альтернатив

	1	2	3	4	5
1		0	1	0	0
2	1		1	0	0
3	0	0		0	0
4	1	0	1		0
5	1	1	1	0	

множества. Дальнейший поиск во множестве эффективных решений может быть осуществлен только на основе применения принципов принятия решений.

Самый простой способ сужения множества Парето – это исключение какого-то одного вектора из пары парето-оптимальных векторов после их сравнения; иначе говоря, – предпочтение одного парето-оптимального вектора другому. Подобное предпочтение составляет некий «квант» информации об отношении строгого предпочтения ЛПР [11].

В рассматриваемой задаче в качестве выделенного (главного, важнейшего) критерия будет выступать критерий EF, т.е. критерий, который показывает максимальную эффективность проводимых модернизаций. В таком случае оптимальным критерием-элементом для начала проведения является участок термической обработки. Далее последовательность энергосберегающих мероприятий для машиностроительных предприятий Самарской области, сохраняя выше описанный подход, выстраивается следующим образом:

1. Участок термообработки;
2. Участок механообработки;
3. Плавно-заливочный участок;
4. Стержневой участок;
5. Участок выбивки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Рамзаев В.М., Хаймович И.Н., Чумак П.В.* Методика оценки и выбора энергосберегающих мероприятий по критерию очередности при обследовании промышленных предприятий// Актуальные проблемы современного социально-экономического развития: тезисы докл.6 Международной научно-

практ. конференции (Самара, 27-28 мая 2011 г.). Самара, 2011. С.133-134.

2. *Довгялло А.И., Угланов Д.А.* Исследование и оценка энергетической эффективности производственного оборудования: учеб. Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2007. 54 с.
3. Методическое обеспечение энергетического обследования технологического процесса производства двигателей летательных аппаратов: учеб. / *А.И. Довгялло, Д.А. Довгялло, Д.А. Угланов.* Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2007. 54 с.
4. *Вагин, Г.Я., Лоскутов А.Б.* Экономия энергии в промышленности: Учеб. пособие. Н. Новгород: Нижегород. гос. техн. ун-т., НИЦЭ, 1998. 220 с.
5. *Литье по выплавляемым моделям с использованием продуктов переработки алюминиевых шлаков / А.В. Соколов, С.А. Рязанов, Н.Н. Зонненберг // Литейное производство. 2012. № 7. С.31-32.*
6. *Левкина О.Ю.* Исследование и разработка способа организации литейного производства на авиационном предприятии: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. 05.02.22 – Организация производства. Ульяновск, 2014. 26 с.
7. Санитарные правила для литейного производства (заводов, цехов, участков) (утв. Главным государственным санитарным врачом СССР 23.07.1990 № 5183-90)
8. Постановление Правительства РФ от 12.06.2003 № 344 «О нормативах платы за выбросы в атмосферный воздух загрязняющих веществ стационарными и передвижными источниками, сбросы загрязняющих веществ в поверхностные и подземные водные объекты, в том числе через централизованные системы водоотведения, размещение отходов производства и потребления»
9. Расчет выбросов загрязняющих веществ от литейных цехов: Методическое пособие по выполнению практической работы по курсу «Промышленная экология» для студентов специальности 320700 «Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов» / *Л.И. Бондалетова, В.Т. Новиков, Н.А. Алексеев.* Томск: Изд. ТПУ, 2000. 34 с.

10. Филинов П.Б. Разработка и принятие управленческих решений: учеб. пособие. М.: ИНФРА-М, 2010. 308 с.)
11. Ногин В.Д. Проблемы сужения множества Парето: подходы к решению //Искусственный интеллект и принятие решений. 2008. №1. С. 98-112.

**THE FORMATION A SEQUENCE OF ENERGY-SAVING MEASURES
FOR MACHINE-BUILDING ENTERPRISES OF THE SAMARA REGION**

© 2015 A.S. Klentak

Samara State Aerospace University named after Academician S.P. Korolyov
(National Research University)

The article considers the formation a sequence of energy-saving measures on the basis of setting up and solving the mathematical model of multi-criteria optimization method Pareto. The model is the objective function on the basis of expert assessments, as well as costly function of the subject process technology of foundry of machine building enterprise.

Keywords: energy saving measures, process technology of foundry, mathematical model of multi-criteria optimization, method Pareto.