

3. Алферов И. С., Балунов Б. Ф., Рыбин Р. А. К вопросу об ухудшении теплоотдачи в области сверхкритических параметров состояния жидкости // Тепло- и массоперенос. – Мн.: Наука і тэхніка, 1972. – Т. 2. – Ч. 1. – С. 37–42.

4. Орнатский А. П., Глущенко Л. Ф., Калачев С. И. Теплоотдача при подъемном и опускном движении воды в трубах малого диаметра при сверхкритических давлениях // Теплоэнергетика. – 1971. – № 5. – С. 91–93.

5. Петухов Б. С., Генин Л. Г., Ковалев С. А. Теплообмен в ядерных энергетических установках. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – С. 470.

6. Курганов В. А. Теплообмен и сопротивление в трубах при сверхкритических давлениях теплоносителя // Теплоэнергетика. – 1998. – № 3. – С. 2–10; № 4. – С. 35–44.

7. Калбалиев Ф. И., Бабаев Ф. К. Теплоотдача в начальном термическом участке при ламинарном течении и сверхкритических давлениях толуола // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений). – 1984. – № 4. – С. 90–94.

8. Келбалиев Р. Ф. Исследование улучшенного режима теплоотдачи при сверхкритических давлениях жидкости // Проблемы энергетике. – 2001. – № 2. – С. 61–66.

9. Келбалиев Р. Ф. Температурный режим парогенерирующих труб при околокритических давлениях вещества.: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Баку, 1998. – 24 с.

10. Келбалиев Р. Ф. Ухудшение теплообмена при сверхкритических давлениях вещества // ИФЖ. – 2001. – Т. 74. – № 2. – С. 115–118.

Представлена кафедрой
промышленной теплоэнергетики
и технологии воды

Поступила 22.05.2001

УДК 621.31

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПРЕДЕЛОВ ИЗМЕНЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ*

Инж. СТЕПАНОВ С. В.

ЗАО «Сиброн» (Иркутск)

Большинство методов прогнозирования основано на принципах и технике статистического анализа временных рядов различных показателей энергопотребления – суммарных объемов, удельных затрат энергии в целом или каждого энергоносителя в отдельности. Сюда относятся методы экстраполяции, парной и множественной корреляции, международных сравнений. Они характеризуются малой степенью детализации, отличаются простотой и возможностью использования для них стандартных вычислительных программ.

Методы экстраполяции динамических рядов, о которых будет идти речь, основаны на переносе событий и состояний из прошлого в будущее. Считается, что процесс энергопотребления характеризуется значительной

* Публикуется в порядке обсуждения. – *Ред.*

инерционностью взаимосвязей, поэтому правомерно с достаточной степенью вероятности ожидать сохранения уже выявившихся черт и характера этого процесса. Существует ряд разнообразных методов обнаружения и экстраполяции преобладающей тенденции развития анализируемого процесса [1–3]. Базой для исследований обычно служат статистические наблюдения показателя реализованного процесса в течение достаточно продолжительного срока.

Статистические методы прогнозирования предполагают использование ряда гипотез о характере изменения исследуемого показателя, применяемых на основе предварительного качественного анализа исходной информации, которые в значительной мере определяют достоверность прогноза, например:

исследуемый процесс (с точностью до случайной величины) содержит тенденцию роста или уменьшения;

он есть функция времени, которая проявляется через влияние факторов, характеризующих внутреннюю (технологическую) структуру процесса.

Статистическая проверка этих гипотез, а также рассмотрение вопроса о непротиворечивости их физико-химическому содержанию процесса энергопотребления имеют первостепенное значение. Чем точнее система принятых гипотез отражает внутреннюю структуру и характер процесса в прошлом и настоящем, тем больше будет отличаться прогнозирование по такой модели от простой механической экстраполяции.

Рассмотрим использование этих принципов применительно к прогнозированию удельных расходов энергии в промышленности. Одним из путей получения качественной согласованной информации является термодинамический анализ на основе полного энергетического баланса [4]. Он позволяет получить статистику различных показателей, характеризующих в совокупности динамику фактического энергопотребления в исследуемом процессе с учетом всего комплекса условий его реализации. Отсюда же можно получить информацию о структуре потребляемых энергоносителей и ее изменении в течение периода изучения процесса.

Использование для анализа процессов полного энергетического баланса позволяет учитывать все потоки энергии (эксергии), включая химическую энергию (эксергию) технологического сырья и вспомогательных материалов, поступающих в процесс. В официальной статистической отчетности эти виды энергии вообще не учитываются, имеются лишь данные о расходах традиционных видов энергоносителей – топлива, электрической и тепловой энергии. Причем часть энергоносителей, таких как, например, кокс, другие восстановители, графитовые электроды, рассматривается в качестве технологических материалов. Вместе с тем любой процесс может быть осуществлен лишь при подводе вполне определенного количества энергии соответствующего качества, т. е. при определенной структуре используемых энергоносителей (между отдельными энергоносителями, используемыми для осуществления каждого технологического процесса, существует жесткая связь). Эта связь определяется технологической природой процесса и характеризуется соотношением $I_x : I_T : E : I_q$ (соответственно энергии: химическая сырьевая, топлива, электрическая и тепловая).

С момента своего внедрения в практику каждая технология подвергается техническому и технологическому совершенствованию, в результате чего удельные затраты энергии на производство продукции снижаются. И совершенно очевидно, что существует теоретический предел этого снижения.

В [4] разработана методология оценки теоретического потенциала и резервов энергосбережения для энергопотребляющих процессов. В ней в качестве предела, к которому асимптотически приближаются реальные расходы энергии, используются минимально необходимые энергетические затраты. Их величина характеризует протекание процесса в идеализированных условиях, для чего вводится понятие идеализированного аналога реального процесса.

Таким образом, термодинамический анализ конкретных технологий (информация по отдельному предприятию), структуры технологий (информация по отрасли) позволяет получить необходимые данные для прогнозирования энергопотребления на перспективу. Работа с такой информацией в отличие от случая простой механической экстраполяции существенно упрощается, поскольку гипотезы о характере изменения исследуемого показателя здесь принимаются не на основе не всегда качественной статистической выборки, а вытекают непосредственно из термодинамического анализа конкретной технической системы.

В большинстве случаев для описания динамических рядов оказывается удобным выравнивание ряда с помощью каких-либо функций. При этом процесс выравнивания обычно состоит из двух этапов: выбора типа кривой, форма которой в наилучшей мере соответствует характеру изменения динамического ряда, и определения численных значений (оценивания) параметров кривой.

Для описания процессов развития энергопотребления обычно используют набор относительно простых зависимостей: линейную, параболу второй степени, экспоненциальные кривые разного типа. Однако наибольший интерес для нас представляют следующие три функции семейства экспоненциальных кривых – модифицированная экспонента, кривая Гомпертца и кривая Перла–Рида (логиста), поскольку они предназначены для описания процессов, имеющих насыщение (предел). В данной статье автор остановился на одной из этих функций, а именно на модифицированной экспоненте. Что касается задачи оценивания параметров выбранных кривых для описания динамического ряда, то наиболее распространенным (в силу своей простоты и сравнительно широкой области применения) методом решения этой задачи является метод наименьших квадратов (МНК).

Однако не для всех видов кривых он непосредственно применим. В частности, его нельзя использовать для оценки параметров кривых, имеющих асимптоты, в силу того, что поиск минимума квадратов отклонений в этих случаях связан с существенными математическими затруднениями. В подобных ситуациях на практике прибегают к различным упрощениям. В частности, в таких случаях рекомендуется применять «метод трех сумм» или «метод трех точек», позволяющих получить приближенные оценки коэффициентов соответствующих кривых. Для проведения расчетов автор воспользовался первым из этих методов.

Рассмотрим процедуру решения следующей задачи. Имеется статистическая выборка мировых показателей удельного расхода энергии (всех видов энергии, расходуемых на осуществление процесса) на производство 1 т алюминия методом Холла-Эру в электролизерах с самообжигающимся анодом за 55 лет с 1930 по 1985 гг. (точки на рис. 1). Необходимо построить модель прогнозирования этого показателя на перспективу. Для описания процесса развития энергопотребления используем модифицированную экспоненту вида $y_t = k + ab^t$. Для оценивания параметров кривой воспользуемся методом трех сумм. Весь динамический ряд разобьем на три равных отрезка (подпериода). Обозначим суммы значений прогнозируемого показателя как $\sum_1 y_t, \sum_2 y_t, \sum_3 y_t$.

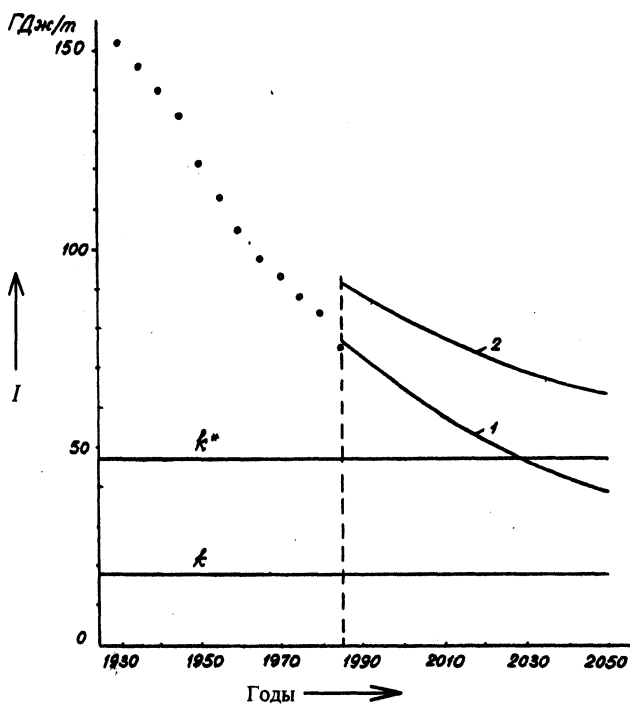


Рис. 1. Иллюстрация методики прогнозирования с использованием термодинамических пределов на примере удельного энергопотребления на производство алюминия

Если уровни ряда точно следуют модифицированной экспоненте, то сумма уровней (значений) для первого подпериода составит

$$\sum_1 y_t = \sum_{t=0}^{n-1} (k + ab^t) = nk + a(b^0 + b^1 + \dots + b^{n-1}), \quad (1)$$

где n – число уровней в подпериоде; $t = 0, 1, \dots, (n - 1)$.

Уравнение (1) можно упростить, приведя сумму в скобках к виду

$$b^0 + b^1 + \dots + b^{n-1} = \frac{b^n - 1}{b - 1}.$$

Тогда, используя уравнение принятой функции, можно записать следующую систему:

$$\begin{cases} \sum_1 y_t = \sum_{t=0}^{n-1} (k + ab^t) = nk + a(b^0 + b^1 + \dots + b^{n-1}) = nk + a \frac{b^n - 1}{b - 1}; \\ \sum_2 y_t = nk + ab^n \frac{b^n - 1}{b - 1}; \\ \sum_3 y_t = nk + ab^{2n} \frac{b^n - 1}{b - 1}. \end{cases} \quad (2)$$

Отсюда несложно найти разности:

$$\begin{cases} \sum_2 y_t - \sum_1 y_t = a \frac{(b^n - 1)^2}{b - 1}; \\ \sum_3 y_t - \sum_2 y_t = ab^n \frac{(b^n - 1)^2}{b - 1}. \end{cases} \quad (3)$$

Решив эту систему относительно b , получим

$$b = \sqrt[n]{\frac{\sum_3 y_t - \sum_2 y_t}{\sum_2 y_t - \sum_1 y_t}}. \quad (4)$$

Теперь, решив 1-е уравнение из системы (3) относительно a , получим

$$a = (\sum_2 y_t - \sum_1 y_t) \frac{b - 1}{(b^n - 1)^2}. \quad (5)$$

Наконец, из 1-го уравнения системы (2) можно найти

$$k = \frac{1}{n} \left(\sum_1 y_t - \frac{b^n - 1}{b - 1} a \right). \quad (6)$$

Если в это уравнение подставить (4) и (5), то можно получить

$$k = \frac{1}{n} \left[\frac{\sum_1 y_t \sum_3 y_t - (\sum_2 y_t)^2}{\sum_1 y_t + \sum_3 y_t - 2 \sum_2 y_t} \right]. \quad (7)$$

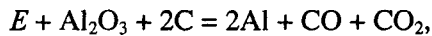
Значение k лучше определять по (7), поскольку в этом случае не будет сказываться округление параметров a и b .

Определив значения параметров a , b и k для приведенного на рис. 1 ряда удельных энергозатрат на производство алюминия по (4), (5) и (7), получим следующий вид искомой функции:

$$y_i = 18,306 + 141,053 \cdot 0,924^i \quad (\text{кривая 1 на рис. 1}). \quad (8)$$

О точности прогноза исследуемого показателя на перспективу по существу сказать ничего нельзя, методы математической статистики позволяют лишь оценить, насколько точно выбранная прогнозная функция описывает исходный динамический ряд. В то же время, как отмечалось ранее, мы имеем возможность установить предел изменения рассматриваемого показателя на основе термодинамического анализа идеализированного аналога исследуемого процесса.

Идеализированный аналог процесса получения алюминия в электролизерах с расходуемыми углеродсодержащими анодами может быть описан следующей реакцией [5]:



где E – подвод электрической энергии в постоянном токе.

Материальный и полный энергетический балансы этого процесса приведены в табл. 1, из которой следует, что минимально необходимые затраты энергии с учетом затрат на преобразование, а также потребления вспомогательного оборудования (-2000 кВт·ч/т Al) на получение 1 т алюминия могут быть не менее 47,8 ГДж. Знание этого предела позволяет уточнить параметры прогнозных кривых, полученных простой механической экстраполяцией данных статистического ряда.

Таблица 1

Материальный и полный энергетический балансы идеализированного аналога процесса электролиза с окисляемыми анодами (на 1 т Al)

Статья баланса	Количество, т	Энергия, ГДж	Эксергия, ГДж	Статья баланса	Количество, т	Энергия, ГДж	Эксергия, ГДж
Приход				Расход			
Al ₂ O ₃	1,889	4,297	1,667	Al	1,0	35,359	31,023
C	0,444	14,566	14,603	CO	0,518	5,243	4,769
E	–	21,739	21,739	CO ₂	0,815	0	0
				Потери эксергии δE	–	–	2,217
Итого	2,333	40,602	38,009		2,333	40,602	38,009

При этом энергетический и эксергетический КПД:

$$\eta_{\text{эн}}^{\text{идл}} = \frac{35,359}{40,602} = 0,871; \quad \eta_{\text{экс}}^{\text{идл}} = \frac{31,023}{38,009} = 0,816.$$

Используя найденное ранее значение коэффициента b и новую величину предела k^* по (6), определим значение коэффициента a^* и уточненное уравнение прогнознй функции

$$y_i = 47,8 + 107,71 \cdot 0,924^i \quad (\text{кривая 2 на рис. 1}). \quad (9)$$

Из рис. 1 видно, что при прогнозировании далее 2030 г. величина удельного потребления, полученная по (8), оказывается меньше предельного его значения (термодинамического предела). Вторая кривая на этом рисунке соответствует прогнозным значениям удельного энергопотребления, полученным по скорректированному уравнению (9). Фактические данные по затратам энергии на производство 1 т алюминия с 1985 по 2000 гг. хорошо ложатся на эту кривую и подтверждают преимущество данного метода.

При этом важно подчеркнуть, что термодинамический анализ процесса позволяет устанавливать пределы изменения практически любых его показателей. Например, материальный и полный энергетический балансы идеализированного аналога технологического процесса получения алюминия, помимо рассмотренной характеристики, дают возможность установить предельные значения расходуемых в процессе энергоносителей и материалов, энергетического и эксергетического КПД. В частности, из табл. 1 видно, что предельная величина расхода анодной массы (углерода) составляет 444 кг, а электроэнергии (в постоянном токе) – 6039 кВт·ч на 1 т алюминия. Отсюда следует, что каждый из этих показателей может быть спрогнозирован на будущее методом, рассмотренным в данной работе, а полученные прогнозы могут быть согласованы на основе прогноза какого-либо обобщенного показателя, каким является КПД или рассмотренный выше суммарный удельный расход энергии (эксергии) на процесс.

Приведенный пример убедительно показывает, что использование данных, полученных в результате термодинамического анализа технологического процесса, технического объекта, в частности предельных значений прогнозируемых величин, может существенным образом повысить достоверность прогнозов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Я н ч Э. Прогнозирование научно-технического прогресса / Пер. с англ. – М.: Прогресс, 1974. – 586 с.
2. Ч е т ы р к и н Е. М. Статистические методы прогнозирования. – М.: Статистика, 1977. – 200 с.
3. К у л е н о в Н. С., Х а с е н о в Ж. Х. Прогнозирование энергопотребления. – Алма-Ата: Наука, 1980. – 136 с.
4. С т е п а н о в В. С., С т е п а н о в а Т. Б. Потенциал и резервы энергосбережения в промышленности. – Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1990. – 248 с.
5. С т е п а н о в В. С., С т е п а н о в С. В. Исследование эффективности использования энергии в производстве алюминия из нефелинов // Электromеталлургия легких металлов. – Иркутск: Изд-во ИркГТУ, 1997. – С. 74–87.

Представлена кафедрой теплогазоснабжения,
вентиляции и охраны воздушного бассейна
Иркутского государственного
технического университета

Поступила 27.06.2002