

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ЭНЕРГОПОТРЕБЛЯЮЩИХ ПРОЦЕССОВ

Докт. техн. наук, проф. СТЕПАНОВ В. С.,
канд. техн. наук, доц. СТЕПАНОВА Т. Б.

Иркутский государственный технический университет

При прогнозировании энергетических потребностей отдельных стран, регионов и мира в целом приходится сталкиваться с большой неопределенностью практически всех необходимых для этих целей показателей. Это в полной мере относится и к показателю эффективности использования энергии, который в любом методе прогнозирования энергопотребления употребляется в явном или косвенном виде. Настоящая статья посвящена описанию методики, позволяющей на основе термодинамического анализа технологических процессов определить эти показатели в различных сферах потребления энергии на перспективу.

Одним из самых удобных методов в прогнозировании энергопотребления, на наш взгляд, является нормативный. Он позволяет учесть направления технического прогресса в потребляющих отраслях, внедрение новых технологий, различных энергосберегающих мероприятий, в результате чего снижаются удельные расходы энергии. В то же время он дает возможность оценить и противоположную тенденцию в изменении этих показателей из-за снижения качества перерабатываемого сырья, увеличения энергозатрат на охрану окружающей среды от вредных выбросов и т. д. Однако нормативным методом, как правило, пользуются для краткосрочного (до пяти лет) и среднесрочного (от пяти до десяти лет) прогнозирования. Для долгосрочных же прогнозов невозможно предсказать величины удельных расходов на производство основных энергоемких видов продукции.

Мы поставили задачу модифицировать нормативный метод, сделать его пригодным для прогнозирования энергопотребления на длительную перспективу, заменив прогноз удельных расходов прогнозом энергетических КПД ведущих технологий в сфере использования энергии. Основой для этого послужили разработанные нами методы термодинамического анализа и понятия, которые мы применяем для исследования эффективности использования энергии и оценки потенциала энергосбережения в различных отраслях экономики [1, 2].

Подготовка исходной информации для прогнозирования должна начинаться с анализа изменений энергетических показателей энергопотребляющих процессов с момента их внедрения в практику до настоящего времени. В качестве основного инструмента для такого анализа используется полный энергетический баланс [1]. Помимо традиционных видов энергии (электрической, тепловой, энергии топлива) этот баланс учитывает и химическую энергию сырья, материалов, продуктов и отходов процесса [3]. Преимуществом является сочетание баланса по энергии и эксергии.

Общеизвестно, что разные формы энергии обладают неодинаковой способностью преобразовываться в работу и другие формы энергии, что является следствием второго закона термодинамики. Очевидно, что такие формы энергии, как кинетическая, электрическая, потенциальная, с технической точки зрения ценнее, «качественнее» других форм энергии (например тепловой), поскольку из энергии первого вида всегда можно получить любую другую энергию, но не наоборот.

Признание качественного различия означает, что непосредственное суммирование и сопоставление разных видов энергии недопустимо, некорректно, хотя и широко распространено. Чтобы сделать их сопоставимыми, нужна единая мера, позволяющая количественно оценить энергию с учетом ее качественных характеристик. Такой мерой служит эксергия, представляющая собой количество работы, которое может быть получено внешним приемником энергии при обратимом взаимодействии термодинамической системы (потока энергии) с окружающей средой до установления полного равновесия при ее параметрах [4–6].

Затраты эксергии легче прогнозировать и анализировать, поскольку она обладает свойством аддитивности. Это дает возможность суммировать ее расходы по отдельным процессам технологической схемы, не прибегая к помощи соответствующих переводных коэффициентов. При расчете затрат тепловой эксергии не требуется указаний о температурном потенциале теплоты.

Величины используемых для расчетов и прогнозов удельных расходов энергоресурсов определяются термодинамической эффективностью реальных технологических процессов. Поэтому они изменяются в очень широких пределах даже для одинаковых технологий в разных странах мира. Однако каждая такая технология (например доменный процесс, сталеплавильные процессы, электролитическое получение алюминия и т. д.) имеет совершенно определенный предел термодинамической эффективности независимо от того, в каком государстве работает предприятие и какова эффективность на данный момент времени.

Общеизвестно, что наиболее удобным и исчерпывающим показателем термодинамической эффективности процесса является его КПД. Однако он может быть определен лишь для процессов, к которым подводится энергия и полезным продуктом которых также является какой-либо вид энергии или этот продукт может быть выражен в энергетических единицах. Для огромного многообразия энергопотребляющих процессов, производящих металлы, изделия из них, промышленные материалы, химические вещества, продукты, услуги, создающие комфорт, и т. д., понятие «полезная энергия» теряет истинное значение. Отсюда следует, что для них не может быть рассчитан КПД в общепринятом смысле.

Для решения этой проблемы нами было предложено заменить полезную энергию/работу в числителе выражения КПД величиной теоретических затрат энергии/работы на осуществление процесса или на производство какого-либо продукта – I_{\min}^* , E_{\min}^* . Эти величины определяются из энергетического баланса идеального аналога реального процесса с предельной степенью идеализации с $\eta_{эн}^{идл} = 1$; $\eta_{экс}^{идл} = 1$ и являются

абсолютным минимумом затрат энергии, а также работы для производства рассматриваемого продукта или услуги с помощью любой технологии. КПД каждого технологического процесса равен отношению теоретических затрат энергии к фактическим:

$$\eta_{\text{эн}}^{\text{реал}} = I_{\text{мин}}^* / I_{\text{эн}}^{\text{реал}} ; \quad \eta_{\text{экс}}^{\text{реал}} = E_{\text{мин}}^* / E_{\text{эн}}^{\text{реал}} . \quad (1)$$

К сожалению, идеальный аналог может быть использован для анализа не всех реальных процессов, поскольку при такой высокой степени идеализации для многих процессов энергозатраты равны нулю. Поэтому более конструктивно сравнивать показатели реального процесса с его идеализированным аналогом, используя меньшую степень идеализации. При разработке такого аналога можно отразить физико-химические основы технологии, вид сырья, из которого производится продукт, и другие особенности.

На основе энергетического баланса идеализированного аналога определяются минимально необходимые затраты энергии/работы для каждого исследуемого процесса – $I_{\text{мин}}$, $E_{\text{мин}}$. Для идеализированного аналога может быть рассчитан энергетический $\eta_{\text{эн}}^{\text{идл}}$ и эксергетический $\eta_{\text{экс}}^{\text{идл}}$ КПД, как и для реального процесса:

$$\eta_{\text{эн}}^{\text{идл}} = I_{\text{мин}}^* / I_{\text{мин}} ; \quad \eta_{\text{экс}}^{\text{идл}} = E_{\text{мин}}^* / E_{\text{мин}} . \quad (2)$$

Сопоставление реальных процессов с идеализированными аналогами по КПД означает оценку степени совершенства исследуемого процесса через относительные КПД, которыми широко пользуются в энергетике:

$$\eta_{\text{эн}}^{\text{отн}} = \eta_{\text{эн}}^{\text{реал}} / \eta_{\text{эн}}^{\text{идл}} ; \quad \eta_{\text{экс}}^{\text{отн}} = \eta_{\text{экс}}^{\text{реал}} / \eta_{\text{экс}}^{\text{идл}} . \quad (3)$$

Чем выше значение $\eta^{\text{отн}}$, тем совершеннее в энергетическом смысле реальный процесс и тем труднее найти пути его совершенствования. Важно также подчеркнуть, что поскольку эксергетические характеристики $\eta_{\text{экс}}$, $E_{\text{мин}}$ определяются с большей достоверностью, использование их для прогнозирования потребностей в энергоресурсах может существенно уменьшить ошибку в прогнозе.

Характер изменения КПД любого реального процесса по мере его освоения и совершенствования представляет собой возрастающую кривую, асимптотически приближающуюся к некоторому пределу – КПД этого процесса, который осуществляется в идеализированных условиях $\eta_{\text{эн}}^{\text{идл}}$, $\eta_{\text{экс}}^{\text{идл}}$. Соответственно энергозатраты на производство единицы продукта процесса, снижаясь, с течением времени стремятся к некоторой практически недостижимой величине – энергозатратам этого идеализированного процесса – минимально необходимым затратам (энергии – $I_{\text{мин}}$, эксергии – $E_{\text{мин}}$).

Если анализ показывает, что совершенствование технологии связано с значительными техническими трудностями и финансовыми затратами и сопровождается незначительным повышением КПД, то это означает, что данная технология «исчерпала себя» и требуется замена ее новой, более эффективной.

Новая технология может принципиально отличаться от предыдущей, поэтому для нее должен быть разработан новый идеализированный аналог, определены энергетический и эксергетический КПД и удельные энергозатраты, величины которых послужат ориентиром для совершенствования внедренного процесса.

Таким образом, чтобы использовать информацию об изменении термодинамической эффективности технологий для прогнозирования энергопотребления, нужно по ретроспективным данным экстраполировать значения КПД на необходимую глубину прогнозирования. Причем можно использовать как прогноз абсолютных, так и относительных КПД. Второй показатель предпочтительней, поскольку, как было отмечено выше, идеальные аналоги не всегда пригодны для этой цели.

Зная минимально необходимые затраты энергии/эксергии на производство рассматриваемого продукта и прогноз КПД технологии на требуемый горизонт прогнозирования, можно с достаточной степенью точности прогнозировать суммарный удельный расход энергии как:

$$I_{\text{реал}}^{\text{пр}} = I_{\text{мин}} \eta_{\text{эн}}^{\text{отн}}; \quad E_{\text{реал}}^{\text{пр}} = E_{\text{мин}} \eta_{\text{экс}}^{\text{отн}}. \quad (4)$$

На основе исследований реальных энергетических балансов и балансов идеализированного аналога процесса можно определить и структуру энергоносителей для данного процесса: долю электрической энергии ($E_{\text{эл}}$), химической энергии топлива ($I_{\text{т}}$), химической энергии сырья ($I_{\text{с}}$), тепловой энергии (I_{q}), т. е. структура энергетических затрат может быть описана следующим соотношением: $E_{\text{эл}} : I_{\text{т}} : I_{\text{с}} : I_{\text{q}}$. Соответственно для эксергетических затрат: $E_{\text{эл}} : E_{\text{т}} : E_{\text{с}} : E_{\text{q}}$. Авторы назвали разработанный метод прогнозирования методом термодинамических пределов.

Многочисленные исследования показывают, что учет основных энергоемких отраслей промышленности, транспорта, коммунально-бытового сектора и сельского хозяйства позволяет описать не менее 70 % энергопотребления любого региона. Все остальные энергозатраты могут быть учтены посредством коэффициента γ . Таким образом, с учетом разработанной методики потребность в энергии/эксергии на горизонт прогнозирования t может быть определена следующим образом:

$$\bar{I}_t = (1 + \gamma_t) \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \bar{\alpha}_{ij} \bar{M}_{ij} \bar{I}_{\text{мин}_{ij}} \text{ext} \left\{ \eta_{\text{эн}_{ij}}^{\text{отн}} \right\} + \bar{P}_t \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \bar{I}_{\text{мин}_{ij}} \text{ext} \left\{ \eta_{\text{эн}_{ij}}^{\text{отн}} \right\} \right]. \quad (5)$$

Здесь i – индекс продукции, услуги, полезного эффекта; j – индекс технологии производства i -й продукции; t – горизонт прогнозирования;

M – объем производства продукции; α_{ij} – доля i -й продукции, производимой по j -й технологии; P – численность населения. Величины с черточкой наверху являются прогнозными. Первая составляющая учитывает затраты на производство продукции, задаваемой суммарными объемами, вторая – энергопотребление, рассчитываемое на душу населения (для системы жизнеобеспечения – отопление, вентиляция, кондиционирование воздуха, горячее водоснабжение, пищеприготовление, освещение и т. п.; для системы всех видов транспорта людей; различного рода услуг).

В связи с неопределенностью исходной информации величины \bar{I}_t и \bar{E}_t получаются в некотором диапазоне, который возрастает с увеличением глубины прогнозирования.

Для примера рассмотрим процесс производства какого-либо вещества с заданным химическим составом. Его идеальным аналогом является обратимая химическая реакция с $\eta_{\text{эн}} = 1$; $\eta_{\text{экс}} = 1$. Данным свойством обладает реакция девальвации этого вещества при определении его химической энергии i_x и эксергии e_x [6, 7]. Таким образом, предельные минимальные затраты I_{\min}^* и E_{\min}^* для производства заданного k -го вещества определяются величиной его химической энергии/эксергии. Эти затраты абсолютно минимальны для производства данного вещества независимо от используемого сырья, извлекаемого из окружающей среды, и технологии его переработки. Следовательно, можно записать:

$$I_{\min k}^* = i_{x_k}; \quad E_{\min k}^* = e_{x_k}, \quad (6)$$

т. е. в качестве предельных энергетических затрат для процессов 2-й категории могут быть приняты соответствующие значения их химической энергии и эксергии [7]. При разработке идеализированных аналогов технологических процессов, связанных с химическими превращениями, нами приняты следующие общие принципы.

В качестве такого аналога принимается процесс, который описывается одной (или несколькими) основной необратимой реакцией, как и в реальном производстве рассматриваемого продукта. В таком идеализированном процессе используется сырье из химически чистых соединений, и получается химически чистый продукт. Потери материалов отсутствуют, реакции протекают при стехиометрических количествах реагирующих веществ и идут до конца. Температура потребляемых и отдаваемых веществ принимается равной температуре окружающей среды. Теплота реакций отводится во внешнюю среду при той же температуре. Естественно, что данный процесс протекает с минимальными затратами энергии.

Соединением идеализированных аналогов отдельных процессов в соответствии с той или иной технологической схемой можно получить аналоги различных реальных производств.

Суть предлагаемого метода оценки энергетических затрат на производство продукции для данной группы процессов покажем на примере

получения алюминия стандартным во всех странах мира методом Холла-Эру. Его неуклонное конструктивное и технологическое совершенствование привело к тому, что алюминий из редкого металла, ценившегося дороже серебра, превратился в самый распространенный и дешевый из цветных металлов, по праву занимающий второе место после стали в ряду конструкционных металлов. При этом удельный расход электроэнергии на электролиз глинозема снизился более чем в 3 раза.

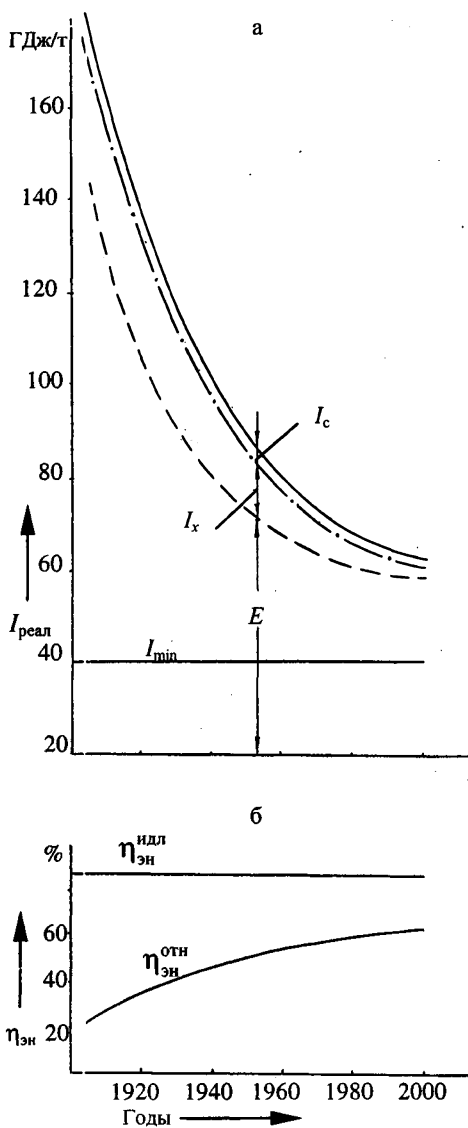


Рис. 1. Изменение энергетических характеристик процесса производства алюминия во времени: а – суммарное потребление энергии и отдельных ее видов; б – относительный энергетический КПД

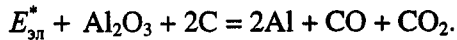
алюминия затрачиваются электро-энергия, химическая энергия топлива в виде углерода (анодная масса или обожженные аноды), химическая энергия сырья (глинозем).

На рис. 1 показаны изменения удельных расходов всех видов энергоносителей на процесс и энергетического КПД за период промышленного освоения процесса. Фактические суммарные затраты энергии постепенно приближаются к величине минимально необходимых затрат. Главные пути снижения энергозатрат для этой технологии практически исчерпаны. Кроме того, в последнее время резко возросли дефицитность углеродистых материалов, используемых для производства анодной массы, и обожженных анодов (нефтяного и пекового кокса, антрацита, пека и т. п.), а также требования, предъявляемые к их качеству. Поэтому все больший интерес специалисты проявляют к разработке процесса электролиза с нерасходуемыми (инертными) анодами. Процесс можно проанализировать на уровне идеализированного аналога и сделать выводы о его эффективности, структуре расходуемых энергоносителей и, следовательно, его перспективности.

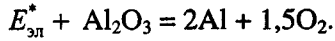
Получение алюминия осуществляется на основе электролитического разложения расплава глинозема в криолите. Схематически процесс электролиза сводится к выделению на катоде металлического алюминия и сгоранию угольного анода за счет выделения на нем кислорода.

Согласно полному энергетическому балансу, на производство

Идеализированный аналог процесса электролиза описывается той же реакцией, что и реальный процесс



Идеализированный аналог процесса производства алюминия в электролизерах с инертными анодами можно представить реакцией



Материальные и полные энергетические балансы этих аналогов представлены в табл. 1, в которой определены теоретические термодинамические характеристики – КПД и минимально необходимые энергетические затраты для каждого из рассмотренных процессов.

Таблица 1

Материальный и полный энергетические балансы идеализированных аналогов процесса электролиза алюминия

Статья баланса	Масса, т	Энергия, ГДж/т	Эксергия, ГДж/т	Статья баланса	Масса, т	Энергия, ГДж/т	Эксергия, ГДж/т
Электролиз с окисляемыми анодами							
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	0,0
				Потери эксергии δE	–	–	2,217
Итого	2,333	40,602	38,009	Итого	2,333	40,602	38,009
Электролиз с инертными анодами							
ПРИХОД				РАСХОД			
Al ₂ O ₃	1,889	4,297	1,667	Al	1,0	35,359	31,023
E	–	31,062	31,062	O ₂	0,889	0,0	0,0
				Потери эксергии δE	–	–	1,706
Итого	1,889	35,359	32,729	Итого	1,889	35,359	32,729

КПД идеализированного аналога процесса Холла–Эру составил: $\eta_{\text{эл}}^{\text{идл}} = 0,871$, $\eta_{\text{экс}}^{\text{идл}} = 0,816$. Минимально необходимые затраты на производство 1 т Al составляют 40,601 ГДж, из них электрическая энергия – 53,6 %, химическая энергия топлива – 10,6, химическая энергия сырья – 35,8 %, т. е. структура энергетических затрат может быть описана следующими соотношениями: по энергии $E_{\text{эл}} : I_{\text{т}} : I_{\text{с}} : I_{\text{q}} = 0,536 : 0,358 : 0,106 : 0,0$; по эксергии $E_{\text{эл}} : E_{\text{т}} : E_{\text{с}} : E_{\text{q}} = 0,572 : 0,384 : 0,044 : 0,0$.

Для процесса с инертными анодами эти показатели составили: $\eta_{\text{эл}}^{\text{идл}} = 1$, $\eta_{\text{экс}}^{\text{идл}} = 0,948$, минимально необходимый расход электроэнергии в 1,43 раза больше, чем с окисляемыми. Однако суммарный расход энергии у

него меньше, а КПД выше, чем у процесса с расходуемыми анодами. Причем при практической реализации этого процесса у него есть неоспоримые преимущества. И если он подвергнется конструктивному технологическому совершенствованию, то это приведет к снижению энергозатрат (рис. 1а).

Для уменьшения объема исходной информации при прогнозировании энергопотребления нами рассматривались не отдельные процессы, а технологические цепочки: от добычи и переработки сырья до получения готового продукта.

В табл. 2 приведены термодинамические пределы для некоторых технологий производства основных металлов.

Таблица 2

Энергетические показатели идеализированных аналогов производства некоторых металлов

Продукт, технология	Минимально необходимые затраты, ГДж/т		$\eta_{эн}^{идл}, \%$	$\eta_{экс}^{идл}, \%$
	энергии	эксергии		
Сталь, выплавленная по технологии:				
• выплавка чугуна–выплавка стали	14,423	12,177	59,2	54,3
• электроплавка металлолома	2,692	2,142	88,1	86,0
• прямое восстановление железа	3,077	2,482	77,1	74,1
Алюминий (из глинозема)	40,488	37,904	87,1	81,6
Медь (пиromеталлургические способы)	28,01	21,66	12,6	12,7
Свинец (шахтная плавка)	6,002	5,455	25,7	27,0
Цинк:				
• пиromеталлургические способы	23,063	20,553	30,3	28,9
• гидрометаллургический способ	20,288	17,760	34,6	33,4
Титан (магний-термический способ)	37,216	37,042	53,2	50,3
Кремний (электроплавка)	52,571	52,622	61,6	58,2

ВЫВОД

Прогнозирование энергопотребления напрямую зависит от прогноза научно-технического прогресса в рассматриваемой отрасли. В процессе разработки научно-технических прогнозов определяется возможность создания принципиально новой техники, изучаются и планируются изменения технического уровня производства и качества продукции, устанавливаются необходимые затраты и технико-экономические показатели для новой техники.

Неотъемлемой частью прогноза научно-технического прогресса является определение оптимальной структуры технологий в различных отраслях. Для решения этой задачи был опробован методический подход, основанный на прогнозировании процесса замещения существующих технологий новыми [8]. Модель разработана для условий капиталистической экономики и свободного рынка, использует понятия этой системы.

В промышленности обычно энергетические затраты определяются на единицу производимой продукции и затем пересчитываются через душевое

потребление этого продукта, удельные затраты на душу населения. Для ряда энергоемких сфер потребления затраты энергии рассчитываются непосредственно на душу населения. Это отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха, строительство жилья, производство одежды и пищевых продуктов, пищеприготовление, охлаждение и замораживание скоропортящихся продуктов и т. п.

Заключительным этапом прогнозирования является определение суммарной потребности в энергии в некотором диапазоне, который зависит от точности прогнозирования численности населения региона, показателей развития его экономики, энергетической эффективности энергопотребляющих процессов.

Объем работы, которую нужно провести для подготовки энергетических характеристик технологий, чрезвычайно велик. Тем не менее без качественного прогноза энергопотребления бессмысленно детально прогнозировать развитие энергетики и выбирать структуру энергетических технологий. Поэтому исследования в области энергетики отраслей экономики должны стать важным разделом при прогнозировании энергопотребления на перспективу.

ЛИТЕРАТУРА

1. Степанов V. S. Analysis of energy efficiencies of industrial processes / Heidelberg: Springer. – Verlag, 1992.
2. Степанов В. С., Степанова Т. Б. Эффективность использования энергии. – Новосибирск: ВО Наука, 1994.
3. Степанов V. S., Степанов S. V. Raw material as an energy source // Energy Sources. – 1997. – 19, № 7. – P. 715 – 722.
4. Rant Z. Exergie, ein neues Wort fur «technische Arbeitsfahigkeit» // Forsch. Ing. Wes. – 1956. – Bd 22, 1. – S. 36–37.
5. Szargut J., Morris D. R., Steward F. R. Exergy analysis of thermal, chemical and metallurgical processes. – N.Y.: Hemisphere, 1988.
6. Шаргут Я., Петела Р. Эксергия. – М.: Энергия, 1968.
7. Степанов В. С. Химическая энергия и эксергия веществ. – Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1990.
8. Peterka V. Macrodynamics of technological change: market penetration by new technologies. – IIASA, Laxenburg, RR-77-22, November 1977.

Представлена кафедрой
теплогазоснабжения, вентиляции
и охраны воздушного бассейна

Поступила 17.01.2002