

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭКСЕРГИИ В ЭКОНОМИКЕ

### 12-1. ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭКСЕРГИИ В ЭКОНОМИКЕ

Возможности использования эксергии в экономике вытекают из двух предпосылок [Л. 126, 144].

1. Эксергия как мера практической энергетической пригодности может служить для приближенной оценки влияния термодинамических параметров на экономические показатели определенного энергоносителя. Ее целесообразно использовать в таких случаях, когда не хватает чисто экономических критериев оценки.

2. Эксергия представляет собой единую меру параметров, поддерживающих ход процесса, и полезных эффектов в качественно различных тепловых процессах. Благодаря этому в качественно разнородных процессах эксергия дает однозначные, удобные и четкие определения.

Первая из упомянутых предпосылок приводит к новым результатам, отличающимся от полученных другими методами. Используя эту предпосылку, можно, например, установить простой эксергетический тариф оплат за пар и горячую воду. Этот тариф относится к рациональным тарифам, не приводящим в крайних случаях к абсурду, в то время как обязательные до настоящего времени тарифы чаще всего опираются на понятие энтальпии и дают в крайних случаях абсурдные результаты.

Применяя эксергетические методы сравнительной оценки разных

энергетических уровней данного энергоносителя, можно многие технико-экономические проблемы решить более точным методом. Эксергия, например, позволяет учесть, что на ТЭЦ стоимость пара из промежуточного отбора или из противодавления зависит от давления этого пара. Повышение давления действует в действительности уменьшению рабочей поверхности теплообменника, питаемого греющим паром, но одновременно приводит к увеличению стоимости пара. Эксергетический метод позволяет также установить экономически целесообразные параметры пара, отбираемого с турбин ТЭЦ для питания подогревателей.

Вторая предпосылка в принципе не приводит к нахождению новых решений технико-экономических проблем, а только облегчает с формальной точки зрения решение этих вопросов, их однозначное понимание и благодаря этому облегчает выявление ошибок, встречающихся в известных до настоящего времени решениях. В качестве первого примера из этой области в настоящем параграфе рассмотрен вопрос определения экономических потерь, вызванных дросселированием. Благодаря применению эксергетических понятий можно дополнить известные решения, вводя простые формулы для учета дополнительного влияния тепла трения, поглощаемого рассматриваемым рабочим телом при дросселировании и компенсационном сжатии. Принятие во внимание этого дополнительного влияния было бы в принципе возможно и без

АБСУРД по факту в России  
с котельными вместо ТЭЦ

использования понятия эксергии, однако последнее облегчает обнаружение этого дополнительного эффекта и приводит к общей формуле, учитывающей возможности как положительного, так и отрицательного воздействий этого явления.

Вторым примером из области экономического применения понятия эксергии является проблема распределения капиталовложений. И в этом случае эксергетические понятия позволяют получить однозначную общую формулу.

В последнее время в литературе встречаются многочисленные предложения по использованию эксергетических показателей в экономике. Авторы этих предложений принимают во внимание, что каждое уменьшение потерь эксергии связано с уменьшением соответствующей переменной стоимости процесса. С другой стороны, уменьшение потерь эксергии можно получить только путем увеличения капиталовложений<sup>1</sup>. Рост капиталовложений идентичен увеличению потерь эксергии, имеющих место при получении основных полезных эффектов производства. Можно также показать, что оптимальное решение для энергетического процесса не должно вытекать из условия минимальной суммы потерь эксергии в общей промышленности страны. Применение такого критерия при решении технических вопросов было бы равнозначно введению «эксергетической экономики».

Нетрудно убедиться, что эксергетическая экономика не соответствовала бы классической экономике. Следует только уяснить себе, что источниками эксергии, поддерживающими ход промышленных процессов, служат природные богатства. Таким образом, эксергетическая экономика реализовала бы промышленные процессы под углом зрения экономики природных богатств. Классическая же экономика ставит

перед собой задачу экономии человеческого труда.

Эксергия не является, таким образом, экономическим показателем. Можно привести много примеров, которые отчетливо показывают, что экономические параметры не всегда пропорциональны эксергии. Например, в атмосферном воздухе в незначительном количестве содержится свободный водород. Эксергия водорода довольно велика (примерно 120 000 кДж/кмоль), но, несмотря на это, его экономическое значение равно нулю<sup>1</sup>. Анализ процессов ТЭЦ, вырабатывающей горячую воду с помощью пара промежуточных отборов, приводит к выводам, что даже для определенного энергоносителя экономическая оценка единицы эксергии не является постоянной, поскольку она зависит от концентрации эксергии.

Из предпосылки, что экономическая оценка единицы эксергии является постоянной без учета рода энергоносителя, вытекает достаточно приемлемое предложение применения эксергетического метода распределения производственных затрат при совмещенных процессах. В этих процессах можно относительно легко выделить суммарную себестоимость, но обычно трудно распределить эту себестоимость между продуктами процесса. Применение эксергетического метода распределения затрат может обеспечить получение более реальных результатов, чем те, которые получены при использовании других методов, не опирающихся на экономические предпосылки. Однако не следует забывать, что результаты, полученные при использовании эксергетического метода, мо-

<sup>1</sup> Этот пример не совсем удачен. Экономическое значение водорода, содержащегося в атмосфере, действительно равно нулю, но не «несмотря на» его высокую эксергию, а вследствие того, что она очень велика. Эксергия водорода, получаемого из воды, намного ниже; соответственно меньше и затраты на его получение. Поэтому в технике водород получают конверсией водяного пара или электролизом воды. Таким образом, сравнение эксергий водорода в обоих случаях дает совершенно правильную ориентировку для выбора метода его получения. (Прим. ред.)

<sup>1</sup> В общем случае это условие не является обязательным. Новые технические решения могут приводить и к уменьшению капитальных затрат одновременно с уменьшением потерь энергии. (Прим. ред.)

ВАЖНАЯ СУТЬ  
ЭНЕРГЕОБЕРЕЖЕНИЯ!  
ТАК ЧЕсть

гут иметь только приближенное значение. Как видно даже из приведенного выше примера с водородом, совершенно нет никаких оснований для различных продуктов процесса принимать одинаковую стоимость единицы эксергии<sup>1</sup>. Поэтому **целесообразность применения эксергетического метода разделения затрат в совмещенном процессе должна быть тщательно обоснована**, поскольку в некоторых случаях этот метод может приводить к экономически нецелесообразным результатам.

Вопрос распределения затрат проанализирован в § 12-2 на примере ТЭЦ. В этом случае эксергетический метод позволяет получить результаты, не отягощенные значительными погрешностями. Однако можно привести примеры процессов, для которых применение эксергетического метода разделения затрат привело бы к большим ошибкам. Например, в доменном процессе **нельзя считать, что экономическая оценка единицы эксергии будет одинаковой как для доменного газа, так и для сырья.**

## 12-2. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ЗАТРАТ НА ТЭЦ

### 12-2-1. ЗАВИСИМОСТЬ МЕЖДУ СТОИМОСТЯМИ ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ И ГРЕЮЩЕГО ПАРА НА ТЭЦ

Процесс преобразования энергии на ТЭЦ является наиболее типовым и распространенным комбинированным процессом. Полезными продуктами этого процесса являются электроэнергия и тепло, идущее на нагрев помещений или используемое для технологических процессов. Вопрос распределения затрат производства на ТЭЦ между электроэнергией и теплом имеет большое практическое значение.

<sup>1</sup> Этот вывод автора нуждается в уточнении. Если речь идет о стоимости, связанной с энергетическими затратами или затратами на топливо, то она будет однозначно связана с эксергией продуктов, если известны к. п. д. отдельных процессов.

Способ распределения затрат сказывается, например, на отпускных тарифах электроэнергии и тепла, которые в свою очередь влияют на стоимость производства на промышленных предприятиях, питаемых от ТЭЦ. В конечном счете применяемый метод распределения затрат оказывает влияние даже на политику капиталовложений. Поэтому вопрос определения стоимости видов энергии, вырабатываемых ТЭЦ, является предметом оживленных дискуссий.

Удельные себестоимости электроэнергии и тепла выражены следующим уравнением:

$$k_E E_{el} + k_C Q_g = K, \quad (12-1)$$

где  $K$  — годовая стоимость эксплуатации ТЭЦ;

$E_{el}$  — годовое производство электроэнергии;

$Q_g$  — годовое производство тепла;

$k_E, k_C$  — удельные себестоимости электроэнергии и тепла.

Уравнение (12-1) можно преобразовать в уравнение прямой в отрезках:

$$\frac{k_E}{K/E_{el}} + \frac{k_C}{K/Q_g} = 1. \quad (12-2)$$

Уравнение (12-2) выражает зависимость между удельными себестоимостями  $k_E$  и  $k_C$ . На рис. 145 изображен отрезок прямой, описываемой этим уравнением. Точки 1 и 2 этого отрезка определены граничными условиями, которые могут

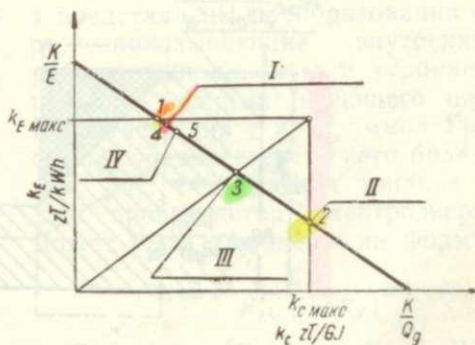


Рис. 145. Прямая распределения стоимости производства для ТЭЦ.

I — эксергетический метод; II — физический метод; III — компромиссный метод; IV — метод Вагнера.

12-2-2. МЕТОДЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАТРАТ:  
ФИЗИЧЕСКИЙ, КОМПРОМИССНЫЙ  
И ЭКСЕРГЕТИЧЕСКИЙ

быть приняты при выборе метода распределения затрат. В последующих выводах целесообразно рассматривать только точки, лежащие между 1 и 2.

Точку 1 находят, исходя из предпосылки, что удельная себестоимость электроэнергии на ТЭЦ такая же, как и электроэнергии, полученной на конденсационной электростанции, имеющей машины той же мощности, которые приводятся паром с такими же параметрами. Из этой предпосылки вытекают очень большая удельная себестоимость электроэнергии  $k_{E \text{ макс}}$  и незначительная удельная себестоимость тепла.

Точку 2 находят, исходя из предпосылки, что удельная себестоимость тепла на ТЭЦ такая же, как и на специализированной котельной. Эта предпосылка приводит к большой удельной себестоимости тепла  $k_{G \text{ макс}}$  и незначительной удельной себестоимости электроэнергии.

В производственной практике в настоящее время чаще всего применяют так называемый *физический метод распределения затрат*. Соотношение затрат по этому методу определяется положением точки 2 на рис. 1. Применение физического метода основано на энергетическом балансе ТЭЦ, исходя из предпосылки, что стоимость топлива, входящая в стоимость электроэнергии и тепла, должна учитываться путем распределения расхода топлива пропорционально полученным количествам электроэнергии и тепла. Этот метод является ошибочным, поскольку он не учитывает различных качеств электроэнергии и тепла.

На рис. 146 показаны диаграмма Сэнвилда энергетического баланса и диаграмма Гроссмана для энергетического баланса ТЭЦ — это же отчасти в —

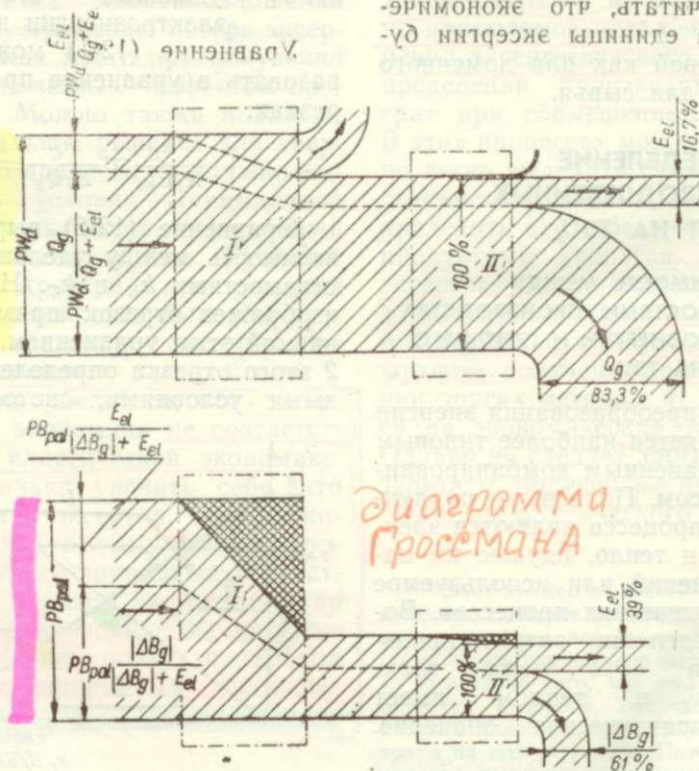


Рис. 146. Энергетический и эксергетический балансы ТЭЦ с турбинами противодавления.  $P$  — расход топлива;  $W_d$ ,  $E_{pal}$  — теплотворная способность и эксергия топлива;  $Q_g$  — греющее тепло;  $E_{el}$  — вырабатываемая электроэнергия;  $|\Delta B_g|$  — перепад эксергии пара, отдающего греющее тепло. Вверху — энергетический баланс, внизу — эксергетический баланс; I — котел; II — турбоагрегат.

у нас ТАК и ЕСТЬ

с турбиной противодавления. (Принято, что на входе пар имеет параметры  $p_1=90$  бар;  $t_1=480^\circ\text{C}$ , а на выходе  $p_2=5$  бар;  $t_2=185^\circ\text{C}$ .) На диаграмме энергетического баланса показан способ распределения расхода угля в соответствии с физическим методом.

При использовании физического метода себестоимость производства тепла определяется таким же образом, как и при раздельном использовании установок. Потребитель тепла (который обычно финансирует ТЭЦ) не видит никакой выгоды от комбинированного использования ТЭЦ. Рассчитанная таким путем незначительная себестоимость производства электроэнергии определяет установление низкого тарифа на электроэнергию для энергосети. В результате возникает система затрат, которая тормозит развитие комбинированного теплоэнергетического хозяйства.

Так называемый компромиссный метод распределения затрат, предложенный Л. Мусила и использованный в измененном виде И. Марецким [Л. 66], преследует цель распределения прибылей при комбинированном ведении хозяйства между производимыми теплом и электроэнергией. Этот метод подразумевает, что отношение удельной себестоимости электроэнергии к удельной себестоимости тепла при их комбинированной выработке должно быть таким же, как и отношение себестоимости электроэнергии, выработанной на промышленной конденсационной электростанции, к удельной себестоимости тепла, выработанного на специализированной котельной:

$$\frac{k_E}{k_C} = \frac{k_{E\text{макс}}}{k_{C\text{макс}}} \quad (12-3)$$

Уравнение (12-3) определяет положение точки 3 на рис. 145.

Эксергетический метод распределения затрат был предложен З. Рантом [Л. 82]. Существует несколько возможных вариантов эксергетического метода. К эксергетической группе методов можно отнести, например, так называемый термодинамический метод, предложенный

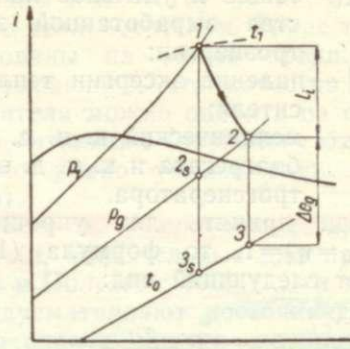


Рис. 147. Внутренняя работа и эксергия греющего пара в ТЭЦ с турбинами противодавления.

В. Селлином [Л. 95]. Предложение Селлина было наиболее приемлемым в этой группе методов.

Использование эксергетического метода основано на эксергетическом балансе ТЭЦ. Принимают, например, что стоимость топлива, приходящаяся на выработку электроэнергии и тепла, необходимо определять, разделяя расход топлива в соответствии с отношением электроэнергии к уменьшению эксергии теплоносителя (рис. 146).

Можно показать, что применение эксергетического метода позволяет получить соотношение затрат, определенное точкой, приближающейся к точке 1 на рис. 145. Для упрощения можно рассмотреть турбинный агрегат с противодавлением, предполагая, что конденсат греющего пара возвращается на ТЭЦ, имея температуру окружающей среды. На рис. 147 в системе координат  $i, s$  представлены преобразования пара, показывающие внутреннюю работу, выполняемую в турбине, и избыток эксергии греющего пара. В соответствии с диаграммой Грасмана для эксергетического баланса (см. рис. 146) расход топлива  $P_E$  для производства электроэнергии может быть определен по формуле

$$P_E = P \frac{E_{st}}{E_{st} + |\Delta E_g|} = P \frac{e_{st}}{(i_1 - i_2) \eta_m \eta_b + (i_2 - i_3)}, \quad (12-4)$$

где  $P$  — общий расход топлива на ТЭЦ;

$E_{el}$ ,  $e_{el}$  — общее и удельное количества выработанной электроэнергии;

$|\Delta E_g|$  — падение эксергии теплоносителя;

$\eta_m$ ,  $\eta_b$  — механический к. п. д. турбоагрегата и к. п. д. электрогенератора.

Если принять для упрощения  $\eta_i = \eta_m = \eta_g = 1$ , то формула (12-4) примет следующий вид:

$$P_E = P \frac{e_{el}}{i_1 - i_{3*}} = P \frac{e_{el}}{(i_1 - i_w) \eta_{CR}} = \frac{G_p e_{el}}{W_d \eta_k \eta_{CR}} = \frac{P E_{el}}{W_d \eta_k \eta_{CR}}, \quad (12-5)$$

где  $\eta_{CR}$  — термический к. п. д. конденсационного цикла Клаузиуса — Ренкина;

$\eta_k$  — термический к. п. д. котла;

$G_p$  — общее количество выработанного пара;

$W_d$  — теплотворная способность топлива.

При таких упрощениях рассчитанное по эксергетическому методу расходование топлива, необходимого для выработки электроэнергии на ТЭЦ, будет таким же, как на конденсационной электростанции, которая питается паром с теми же самыми параметрами. Учет действительных значений коэффициентов  $\eta_b$ ,  $\eta_m$  и  $\eta_g$  вызвал бы определенное перемещение точки на рис. 145 в направлении уменьшения себестоимости электроэнергии (точка 4).

### 12-2-3. ПРОВЕРКА ПРАВИЛЬНОСТИ МЕТОДОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАТРАТ

При рассмотрении ТЭЦ, работающей совместно с электроэнергетической системой, можно легко осуществить проверку правильности метода распределения затрат, поскольку все рациональные методы распределения затрат должны отвечать следующим поверочным критериям: по мере снижения давления пара промежуточного отбора себестоимость производства этого пара

должна все время уменьшаться; при граничных же условиях, когда давление пара промежуточного отбора достигнет значения давления, существующего в конденсаторах конденсационных турбин, рассчитанная себестоимость выработки этого пара должна быть равна нулю или иметь значение, близкое к нулю.

Ни физический, ни компромиссный метод не удовлетворяют этим поверочным критериям. Эти и подобные им методы следует отбросить как методы, приводящие к абсурду. В то же время эксергетические методы не приводят к абсурдным результатам, поскольку они оценивают качество пара не по его энтальпии, а по его работоспособности. (К группе эксергетических методов отнесены также так называемые термодинамические методы, например метод Селлина.)

### 12-2-4. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАТРАТ ПО МЕТОДУ ВАГНЕРА

Чаще всего ТЭЦ работает совместно с электроэнергетической системой. При выборе метода распределения затрат для такой ТЭЦ, кроме термодинамических критериев, следует учитывать влияние ее на капитальные затраты и стоимость передачи энергии в энергосистеме. Это влияние учитывает метод распределения затрат, разработанный Вагнером [Л. 125]. Его можно считать рациональным развитием эксергетического метода.

Решающей причиной строительства ТЭЦ является необходимость поставки тепла для целей обогрева. Размеры котлов и турбин ТЭЦ и параметры пара, питающего турбины, зависят от потребности в тепле и требуемых параметров теплоносителя. Таким образом, если эксергетическая себестоимость производства электроэнергии на ТЭЦ выше, чем на промышленной конденсационной электростанции электроэнергетической системы, то в этом повинны исключительно потребители тепла и эти дополнительные издержки должны ложиться на них. По этой причине в соответствии с методом Вагнера на производство

# ГЛАВНЫЙ метод ВАГНЕРА. запрещенный в СССР!

электроэнергии на ТЭЦ должно расходоваться столько же топлива сколько его расходуется на мощной промышленной конденсационной электростанции, построенной одновременно с данной ТЭЦ. Постоянные издержки, приходящиеся на производство электроэнергии на ТЭЦ, при расчете должны быть такими же, как постоянные издержки в электроэнергетической системе в случае, когда в результате отказа от строительства ТЭЦ электроэнергия вырабатывается конденсационной электростанцией. Следует лишь определить, в какой мере строительство ТЭЦ обязательно снизит капитальные затраты в электроэнергетической системе. Вполне понятно, что это зависит от электрической мощности, которую отдает ТЭЦ в период годовой пиковой нагрузки электроэнергетической системы.

Удельная себестоимость выработки электроэнергии, найденная по методу Вагнера, в целом меньше, чем найденная в соответствии с энергетическим методом (точка 5 на рис. 145).

## 12-3. ТАРИФЫ НА ПАР И ГОРЯЧУЮ ВОДУ

### 12-3-1. КРИТИКА УСТАНОВЛЕНИЯ ЦЕН ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ НА ОСНОВЕ ЭНТАЛЬПИИ

При расчетах за пар и горячую воду, отбираемые с ТЭЦ, применяют преимущественно «физические» тарифы, ставки которых пропорцио-

нальны количеству тепла, отдаваемого теплоносителем. Такие тарифы основаны на общей предпосылке, указывающей, что качество теплоносителя можно оценить на основании энтальпии (поскольку отданное тепло равно уменьшению энтальпии).

В табл. 42 приведены тарифные ставки, обязательные для применения в Польше с 1960 г. Эти тарифы предусматривают постоянную годовую оплату, исходя из максимального затребованного потребителем количества тепла, и переменную оплату, устанавливаемую по действительному количеству израсходованного тепла.

Рационально установленные тарифы оплат за теплоноситель должны отвечать поверочным критериям, подобным сформулированным в подпараграфе 12-2-3: стоимость тепла, отдаваемого теплоносителем, должна быть тем меньше, чем больше температура этого теплоносителя приближается к температуре окружающей среды; при граничных условиях, когда температура теплоносителя приближается к температуре окружающей среды, стоимость тепла должна уменьшаться до нуля.

«Физический» тариф, ставки которого пропорциональны количеству тепла, за редким исключением, не отвечает условиям поверочного критерия. Водяной пар, имеющий температуру окружающей среды, может, конденсируясь, отдать значительное количество тепла, однако это тепло практически непригодно

Да, да на этом строится политика энергосбережения топлива, сбережения  
ЦЕНА Тепла "0"

Таблица 42

Обязательные тарифные ставки на пар и горячую воду

Условное обозначение тарифа	Вид поставляемой энергии	Вид взиманий и измерений	Постоянная годовая оплата злотых в год за 1 Ккал/ч	Переменная оплата, злотых/ккал
I А	Горячая вода	Франко-электростанция	108 000	50
I В	"	Франко-потребитель	126 000	55
II А	Пар с давлением до 12 ат	Франко-электростанция	126 000	50
II В	То же	Франко-потребитель	162 000	55
III А	Пар с давлением более 12 ат	Франко-электростанция	144 000	50
III В	То же	Франко-потребитель	180 000	55

2-х ставочные. Тарифы

$Q = T \cdot q_{\text{пер}} = 108000 + 50 \cdot 3000 = 108000 + 150000 = 258000$

$108000 + 50 \cdot 2500 = 93,2 + 50 = 93 \frac{3000}{1000} = 85 \frac{3000}{1000}$

Самое главное это скрывать от нас с 1951 по 1952

для использования и его экономическая эффективность равна нулю. Вторым примером может служить охлаждающая вода конденсаторов паровых конденсационных турбин. Эта вода отдает в градирне огромное количество тепла в окружающую среду. Если бы это тепло оценивалось на основании «физического» тарифа, то были бы получены абсурдные результаты, говорящие о том, что работа градирни связана с очень большими экономическими потерями.

«Физический» тариф не создает стимулирующих условий для рационального ведения теплового хозяйства. Он не стимулирует, например, стремления к исключению процессов мятая пара, так как не отражает падения стоимости пара, подвергнутого мятю. Не побуждает он также потребителя заказывать пар с возможно более низкими параметрами, поскольку ставки «физического» тарифа для очень широкого диапазона параметров пара не зависят от этих параметров.

Приведенные выше положения относятся только к оплате за тепло, отдаваемое через теплоноситель. Следует обратить внимание на то, что теплоноситель, имеющий температуру окружающей среды, обладает определенной экономической эффективностью, обусловленной его химической чистотой (например, конденсат обладает экономической ценностью даже при температуре окружающей среды; имеется в виду его пригодность для питания котлов). Поэтому все большее распространение получает положение, по которому потребитель тепла обязан возвратить конденсат, причем за невозвращенный конденсат с него берут дополнительную плату. Это положение является правильным и должно быть, очевидно, предусмотрено в рациональном тарифе на пар.

### 12-3-2. ПРИНЦИПЫ УСТАНОВЛЕНИЯ РАЦИОНАЛЬНОГО ТАРИФА ОПЛАТЫ ЗА ТЕПЛОНОСИТЕЛЬ

Ставки рационального тарифа оплаты за пар промежуточных отборов должны вытекать из рацио-

нально определенной себестоимости выработки этого пара. Стало быть, в принципе необходимо вести расчеты себестоимости выработки пара с установленными параметрами на нескольких ТЭЦ. Эти расчеты должны выполняться по методу Вагнера, а их результаты должны служить основой для установления цен на пар тех же параметров, которые принимались во внимание при расчетах.

Полученный таким образом результат может являться только исходным пунктом для установления ставок рационального тарифа на пар, так как эти ставки должны быть поставлены в зависимость от расхода пара и его параметров, а не от местных технико-экономических условий на отдельных ТЭЦ. Если же на основе обоснованно выбранной себестоимости выработки пара с определенными конкретными параметрами установлен тариф на этот пар, то установление тарифа для пара с другими параметрами должно выполняться с помощью простейшего коэффициента, учитывающего упомянутые выше поверочные критерии.

Соответствие поверочным критериям, упомянутым в подпараграфе 12-3-1, проще всего может быть достигнуто путем установления цен на пар в соответствии с его эксергией. Значение же эксергии зависит от температуры окружающей среды, что значительно затрудняет практическое использование эксергетического тарифа. Чтобы избежать этой трудности, следовало бы для соответствующих времен года установить условные постоянные температуры окружающей среды. Например, для летнего периода (июнь, июль, август) можно принять среднюю температуру окружающей среды  $t_0 = 17^\circ \text{C}$ . Кроме того, в расчетах необходимо использовать физическую эксергию, которую с незначительной погрешностью можно отсчитывать от состояния насыщенного пара при температуре окружающей среды. В летний период физическую эксергию можно также отсчитывать от состояния насыщенного пара под давлением 0,02 бар



Я. ШАРГУТ, Р. ПЕТЕЛА

# ЭКСЕРГИЯ

Перевод с польского Ю. И. Батурина  
и Д. Ф. Стржижовского под редакцией  
доктора техн. наук В. М. БРОДЯНСКОГО

ИЗДАНИЕ ПЕРЕРАБОТАННОЕ И ДОПОЛНЕННОЕ

*Эта „запрещенная“  
для Теплоэнергетиков  
России КНИГА!  
Вот вы узнаете основы  
энергоэкономической  
политики в России и  
и Перекрестного субсидиро-  
вания в энергетике  
Богданов А.Б.*



«ЭНЕРГИЯ»  
МОСКВА 1968

Чтобы полностью использовать сжатый воздух с температурой окружающей среды, следовало бы произвести изотермическое расширение его с отбором тепла из окружающей среды.

Максимальная способность к совершению работы, рассчитанная с учетом взаимодействия с окружающей средой, была названа эксергией. Отсюда следует определение этой величины:

Эксергия материи является максимальной работой, которую эта материя может совершить в обратимом процессе, с окружающей средой в качестве источника даровых тепла и веществ, если в конце этого процесса все участвующие в нем виды материи приходят в состояние термодинамического равновесия со всеми компонентами окружающей среды.

Приведенное выше определение может быть в равной степени применено к материи, выступающей в виде вещества или поля. В соответствии с этим определением эксергия материи окружающей среды равна нулю, если составляющие рассматриваемой материи находятся в состоянии термодинамического равновесия. Полное термодинамическое равновесие в природе вообще не встречается (например, в атмосферном воздухе нет полного термодинамического равновесия между свободным водородом, кислородом и водяными парами). В связи с этим в окружающей среде материя не выступает в состоянии, эксергия которого абсолютно равна нулю. Указанное отклонение от термодинамического равновесия не имеет большого практического значения, однако его следует соответствующим образом учитывать при выборе метода определения эксергии.

### 2-1-3. ЭНЕРГИЯ, ЭКСЕРГИЯ И АНЕРГИЯ

Была предпринята попытка вместе с приведенным выше определением эксергии составить определение максимальной работы. Рант определяет эксергию как часть энергии, которая может быть превращена в любой другой вид энер-

гии [Л. 141—143]. Для непревратимой части энергии Рант предложил название анергия. Следовательно, в соответствии с определением Ранта каждый вид энергии можно разделить на эксергию и анергию.

Энергия подчиняется закону сохранения, но закона сохранения эксергии не существует. Напротив, каждое необратимое явление — причина безвозвратной потери эксергии. Следовательно, по Ранту в необратимых явлениях эксергия превращается в анергию, но трансформация анергии в эксергию невозможна!

При расчете эксергии существует точка начала отсчета — нулевая точка, определяемая параметрами всех составляющих окружающей среды. При расчете энергии нулевая точка выбирается условно. Следовательно, и нулевая точка анергии является условной и определяется по условно установленной точке нулевой энергии.

Определение эксергии, предложенное Рантом, очень просто и может способствовать распространению этого понятия. Однако более глубокий анализ показывает, что это определение не является достаточно точным.

Во-первых, как правильно заметил Грассман [Л. 139], эксергия определяется возможностью взаимодействия рассматриваемой материи с окружающей средой. Следовательно, максимальная работа — эксергия — определяется не только рассматриваемой энергией и поэтому не должна рассматриваться как часть ее.

Во-вторых, указанное определение приводит к противоречию при рассмотрении тел с более низкой температурой, чем температура окружающей среды. Снижение температуры такого тела (а, следовательно, отведение от него части его энергии) приводит к увеличению эксергии его. Если бы эксергия была частью энергии, то отнятие от тела некоторой порции энергии должно было бы привести к уменьшению эксергии. Неправильно также утверждение, что эксергию можно целиком преобразовать в любой вид

энергии. Например, эксергия элементарного углерода выше его теплотворной способности. Следовательно, если бы некоторое количество эксергии было израсходовано на выделение чистого углерода из углекислого газа, содержащегося в атмосфере, то полученное в результате этого процесса увеличение химической энергии должно было бы быть меньше израсходованной эксергии.

В данной книге определение Ранта не принято и вытекающее из него понятие эксергии не используется.

Определение эксергии, используемое в книге, может показаться совпадающим с определением энергии, употреблявшимся когда-то в физике. Часто энергию определяют как способность совершать работу. Однако следует подчеркнуть, что эксергия выражает определенную, конкретную способность к совершению работы, обусловленную взаимодействием с окружающей природой.

Грассман [Л. 43] обратил внимание на определенную двусмысленность слова «энергия». В разговорном языке часто под этим словом понимается не «общая способность к совершению работы» (как в физике), а «практическая способность к совершению работы» (следовательно, величина в значении эксергии). Если, например, рассматривается сжатый воздух при температуре окружающей среды, то часто все-таки говорят об «энергии» этого воздуха, несмотря на то, что с точки зрения термодинамики разница между этой энергией и энергией атмосферного воздуха равна нулю.

Приведенный пример показывает, что в технической практике давно существует необходимость введения величины, характеризующей практическую энергетическую пригодность. Этот пробел и восполняет эксергия.

Предметом дальнейшего рассмотрения в этой книге является эксергия материи в форме вещества. Эксергия теплового излучения рассматривается отдельно в гл. 11.

#### 2-1-4. КОНЦЕНТРАЦИЯ ЭКСЕРГИИ КАК ПОКАЗАТЕЛЬ ВОЗМОЖНОСТИ ЕЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

Эксергия определяет практическую энергетическую пригодность материи. Следует, однако, обратить внимание на то, что для оценки пригодности недостаточно знать общее количество эксергии рассматриваемого термодинамического агента. Очень важным параметром, оказывающим влияние на возможность практического использования эксергии, является отношение величины эксергии к объему термодинамического агента. Эту величину можно назвать концентрацией эксергии [Л. 116].

Вообще говоря, чем больше концентрация эксергии, характеризующая данный термодинамический агент, тем благоприятнее складываются возможности использования этого агента. Поэтому в принципе большая концентрация эксергии приводит к уменьшению капиталовложений установки, служащей для использования этой эксергии; чем больше плотность эксергии, тем меньшими могут быть размеры трубопроводов, теплообменников, машин и т. п. Вместе с капиталовложениями могут также уменьшиться транспортные расходы или потери (например, уменьшение диаметра трубопровода приводит, как правило, к уменьшению потерь тепла).

В практике энергетики часто умышленно идут на потери эксергии, только для того чтобы получить повышенную концентрацию эксергии. В качестве типичного примера можно привести производство горячей воды в теплообменниках ТЭЦ. Работа этих теплообменников сопровождается большими потерями эксергии, но, несмотря на это, реализация этого процесса технически и экономически оправдана, поскольку горячая вода, выходящая из теплообменников, имеет по сравнению с питающим их паром в десятки раз большую концентрацию эксергии.

Следует также иметь в виду, что слишком высокая концентрация эксергии может быть и нежелатель-

ной, поскольку из-за нее могут возникнуть затруднения в управлении процессом (очень большую концентрацию эксергии имеют, например, продукты термоядерного процесса).

#### 2-1-5. РАЗЛИЧИЕ ВИДОВ ЭКСЕРГИИ

При анализе тепловых промышленных процессов исследуемую систему следует выделить при помощи контрольной балансовой поверхности. Такая поверхность может быть как неподвижной, так и перемещаемой относительно окружающей среды, но форма ее не должна подвергаться изменениям. При неизменной контрольной поверхности легче составить в общем виде уравнения энергетического и эксергетического балансов.

Любой агент, поступающий через контрольную поверхность в данную систему, привносит эксергию, зависящую от его химического состава и параметров состояния<sup>1</sup>. Подведение к системе агента связано с совершением над системой работы проталкивания. Эту работу можно рассчитать, учитывая внешнюю силу, действующую в поперечном сечении потока агента через контрольную поверхность.

Для упрощения расчетов работу проталкивания можно учитывать вместе с эксергией, зависящей от химического состава и параметров состояния агента. Подобный метод применяется и в энергетическом балансе и позволяет рассчитать энергию потока агента при помощи энтальпии. При составлении эксергетического баланса этот метод еще более оправдан, поскольку эксергия представляет собой способность к совершению работы.

В теплотехнике обычно используются установки, работающие в стационарном режиме. Следовательно, наиболее удобно принять в качестве исходной величины эксергию потока вещества, который пересекает неподвижную контрольную поверхность. В данной книге эта величина будет называться просто

<sup>1</sup> К параметрам состояния относятся температура, давление, скорость, высота центра масс над уровнем отсчета и др.

эксергией и обозначаться символом  $E$  — для всего количества вещества или  $e$  — удельная эксергия<sup>2</sup>.

Для расчета эксергии закрытой системы в пределах контрольной поверхности существует иной тип эксергии. Эксергия однородной части системы в дальнейшем будет обозначаться как  $E_z, e_z$ .

Третий тип эксергии следует ввести для потока вещества, который пересекает подвижную контрольную поверхность. Эта величина в практических расчетах встречается довольно редко. Ее обозначают символом  $E_r, e_r$ .

В связи с тем, что за исходную величину принята эксергия  $E$  потока, пересекающего неподвижную контрольную поверхность, в этой книге эксергия  $E_z$  однородной части системы и эксергия  $E_r$  потока вещества, пересекающего подвижную контрольную поверхность, выражены через эксергию  $E$ . Соответствующие формулы для пересчета приведены ниже.

Из приведенных соображений следует, что при одних и тех же химическом составе и параметрах состояния агента существуют различные виды эксергии, зависящие от того, находится ли рассматриваемый агент в пределах контрольной поверхности или же он пересекает неподвижную или подвижную контрольную поверхность. В последнем случае ценность эксергии зависит не только от химического состава и параметров состояния рассматриваемого агента и окружающей среды, но также и от скорости перемещения контрольной поверхности.

#### 2-1-6. СОСТАВЛЯЮЩИЕ ЭКСЕРГИИ ПОТОКА ВЕЩЕСТВА, КОТОРЫЙ ПЕРЕСЕКАЕТ НЕПОДВИЖНУЮ КОНТРОЛЬНУЮ ПОВЕРХНОСТЬ

Эксергию потока вещества, который пересекает неподвижную контрольную поверхность, можно раз-

<sup>2</sup> Такая символика в последнее время используется в большинстве отечественных и зарубежных работ. В польском издании применена устаревшая система обозначений ( $B$  и  $b$ ), введенная Кинаном в 1932 г. (Прим. ред.)