

СОВМЕСТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ И ЭКОЛОГИЧНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Описана методика совместной оценки термодинамической эффективности и экологичности технических объектов и технологий на основе их полного энергобаланса. Предложен показатель суммарного термодинамического воздействия на окружающую среду таких объектов. Описана процедура его определения для всех видов загрязнения (химическое, тепловое, концентрационное) во всех сферах окружающей среды.

Ключевые слова: термодинамическая эффективность, энергобаланс, энергия эксергия, окружающая среда.

В настоящее время одними из наиболее актуальных проблем являются повышение эффективности использования энергии во всех сферах ее потребления и защита окружающей среды от техногенного загрязнения. В действительности, эти проблемы нельзя разделять, т. к. они в очень сильной степени взаимосвязаны: чем выше энергетическая эффективность производства, тем меньше оно загрязняет окружающую среду. В настоящее время эти проблемы, как правило, решаются раздельно.

Нами разработан метод совместного исследования энергетической эффективности и негативного влияния на окружающую среду технических объектов. Введение в практику понятий эксергии, химической энергии и эксергии веществ позволило нам разработать методику универсального энергетического баланса, построенного на базе 1-го и 2-го начал термодинамики, пригодную для анализа любых процессов и установок. Данный баланс получил название *полного энергетического баланса*, поскольку позволяет учитывать все виды энергии, включая химическую энергию топлива, сырья и материалов в приходной части, а также продуктов и отходов процесса – в расходной [1, 2]. Для учета различий в качестве разных форм энергии используется предложение З. Ранга об их представлении в виде суммы двух составляющих – работоспособной (эксергии) и неспособ-

ной совершать работу (анергии). Это позволяет записать уравнение полного энергетического баланса в виде:

$$\begin{aligned} & \left(\sum E_{эл} \right)' + \left(\sum E_{м} \right)' + \left[\sum_i (E_{x_i} + B_{x_i}) \right]' + \\ & \quad + \left[\sum_i (E_{q_i} + B_{q_i}) \right]' = \quad (1) \\ & = \left(\sum E_{эл} \right)'' + \left(\sum E_{м} \right)'' + \left[\sum_i (E_{x_i} + B_{x_i}) \right]'' + \\ & \quad + \left[\sum_i (E_{q_i} + B_{q_i}) \right]'' \end{aligned}$$

Здесь $\sum E_{эл}$, $\sum E_{м}$ – соответственно, электрическая и механическая энергия (тождественно эксергии);

$\sum_i I_{x_i} = \sum_i (E_{x_i} + B_{x_i})$ – сумма величин

химической энергии всех материальных потоков, поступающих в процесс и выходящих из него (сырья, материалов, топлива, продуктов и отходов);

$\sum_i I_{q_i} = \sum_i (E_{q_i} + B_{q_i})$ – тепловая энталь-

пия (теплота), вносимая в систему и отводимая из нее с потоком полезных продуктов и отходов, излучением или теплопередачей. Одним штрихом обозначены статьи приходной части баланса, двумя – расходной.

Расчету полного энергобаланса обязательно предшествует работа по установлению границ исследуемой термодина-

мической системы и составлению ее материального баланса.

К числу важнейших задач, решаемых на основе изучения энергетических балансов любых технических систем, относится оценка эффективности использования подведенной к ним энергии. После введения в практику понятия эксергии, позволяющего учесть качество различных видов энергии, в настоящее время в исследованиях, как правило, рассчитываются два КПД – энергетический ($\eta_{\text{эн}}$) и эксергетический ($\eta_{\text{экс}}$).

Несмотря на то, что проблемы охраны окружающей среды и рационального использования природных ресурсов уже несколько десятилетий считаются наиболее актуальными, научно-методическая база этой области исследований еще находится на стадии формирования. В частности, не разработана теоретическая база для моделирования взаимодействия производственного объекта с окружающей средой (ОС), не установлена общая мера воздействия технологического объекта на ОС, отсутствует методология анализа рациональности потребления и эффективности использования природных ресурсов.

Сложившаяся практика оценки экологического аспекта производственной деятельности предприятий использует в настоящее время в качестве главного и единственного критерия экологического совершенства производства соблюдение норм предельно допустимых выбросов в атмосферу (ПДВ) и сбросов загрязняющих веществ в водоемы (ПДС).

Нормирование сбросов (выбросов) загрязняющих веществ конкретного производства осуществляется на основе оценки соответствия их фактических концентраций в контролируемых зонах компонентов ОС (зона водопользования для водоемов и санитарно-защитная зона для воздушного бассейна) значениям предельно допустимой концентрации (ПДК) для каждого ингредиента.

В соответствии с принятой статистической отчетностью предприятий, глав-

ными показателями, характеризующими экологическое совершенство производства, выступают количество (масса) вредных веществ, выбрасываемых в атмосферу, и объем сброса загрязненных сточных вод. Для оценки допустимости загрязняющих выбросов (сбросов) их соотносят с ПДВ и ПДС.

При таком подходе производственная и компенсационная (средозащитная) деятельность предприятия рассматриваются изолированно друг от друга, устанавливаемые ограничения (нормативы) загрязняющего воздействия производства на ОС оказываются не согласованными с таким важнейшим производственным показателем, как эффективность использования материальных и энергетических ресурсов. Вследствие этого основные усилия направлены на пассивные виды природоохранных мероприятий (установка очистного оборудования) и не увязываются с затратами на экологическое совершенствование технологии основного производства.

Но самое главное, предельно допустимые концентрации являются показателями качества окружающей среды, пригодной для существования человека, а не природы в целом (хотя небольшая оговорка по поводу окружающей среды в целом в формулировке этого понятия имеется).

Существующие в настоящее время методики для оценки вредного воздействия деятельности человека на окружающую среду имеют ряд общих черт, которые можно рассматривать как недостатки: 1) отдельно исследуется воздействие на атмосферу, гидросферу, верхние слои литосферы (почву); 2) при исследовании воздействия на каждую из перечисленных сред определяются выбросы всех химических ингредиентов по отдельности; 3) тепловое загрязнение, как правило, учитывается только применительно к гидросфере.

В то же время, очень важно иметь некоторый показатель кумулятивного негативного воздействия на окружающую

среду технологий, предприятий, отраслей, промышленности в целом. Уже давно некоторыми учеными высказывается идея о том, что таким показателем суммарного воздействия на окружающую среду может быть эксергия выбрасываемых в нее потоков энергии и вещества [3 – 6]. Применение эксергетического подхода к решению экологических задач базируется на том, что эксергия – единственное среди физических понятий, в определении которого входят окружающая среда и ее параметры.

Эксергия обладает свойством аддитивности, поэтому можно суммировать эксергии всех материальных веществ E_x и тепловых потоков E_q , выбрасываемых во все компоненты окружающей среды – атмосферу, гидросферу, литосферу. Такой показатель достаточно просто определить. Для большого числа неорганических и органических веществ, используемых и производимых в промышленности, рассчитаны величины химической эксергии [7].

Рассчитать тепловую эксергию не составляет большого труда, если известны параметры сбрасываемого теплового потока. Величина эксергии тепла, отбираемого от горячего источника при постоянной температуре, определяется по выражению

$$e_q = q \left(1 - \frac{T_0}{T_1} \right), \quad (2)$$

где q – тепловая энергия (энтальпия) потока; T_0 – температура окружающей среды, К; T_1 – температура горячего источника, К;

а в случае переменной температуры –

$$e_q = q - T_0 \int_{T_1}^{T_1'} \frac{dQ}{T} = q - T_0 \Delta S. \quad (3)$$

Здесь ΔS – изменение энтропии горячего источника при переходе из состояния T_1' в состояние T_1'' .

Тем не менее, попытки использовать эксергетический метод и его понятия для оценки негативного воздействия технических объектов на ОС, которые предпринимались неоднократно целым рядом специалистов [3 – 6], оказались в целом неудачными. Причиной этого является то обстоятельство, что в научном сообществе до сих пор нет единой трактовки понятия химической эксергии вещества [7]. Например, у Я. Шаргута величина химической эксергии включает так называемую нулевую составляющую e_0 [8]. В методиках Степанова-Озолинга, Ямаучи-Фуэки и других авторов величина химической эксергии ее не учитывает, поскольку природа этой составляющей по сути не является химической.

Другой причиной неудачи использования эксергетического метода для решения экологических задач, на наш взгляд, является и то, что не удалось с использованием понятия эксергии оценить негативное воздействие на ОС химически нейтральных (обесцененных) веществ, в частности парниковых газов.

Нами предлагается в качестве показателя негативного влияния выбросов такого рода использовать минимальную работу (эксергию), необходимую для снижения концентрации рассматриваемого ингредиента в выбросах технического объекта до значения допустимой концентрации, принятой в том или ином компоненте окружающей среды. Как известно, эта величина при соответствующих допущениях может быть определена по выражению

$$E_k = nRT_0 \ln(z_{iB} / z_i^*), \quad (4)$$

где R – газовая постоянная, Дж/моль·гр.; T_0 – температура окружающей среды, К; z_{iB} – мольная концентрация компонента в выбросах; z_i^* – допустимая (нормативная) мольная концентрация ингредиента в компонентах окружающей среды (атмо-

сфере, гидросфере); n – число молей компонента в выбросах.

Таким образом, мы предлагаем выбросы эксергии в окружающую среду определять как сумму трех составляющих

$$E_{\text{сум}} = \sum E_g + \sum E_x + \sum E_k. \quad (5)$$

Такой подход позволяет учитывать негативное воздействие любого технического объекта, их совокупности в конкретном регионе (населенном пункте) как на основе модели локальной окружающей среды, так и на модели глобальной ОС. Значения суммарной эксергии, установленные на базе первой модели, могут использоваться при принятии решений на региональном уровне. Значения эксергии, установленные на основе глобальной модели ОС, могут служить информацией для получения показателя экологического состояния нашей планеты в целом.

Ниже показана процедура расчета предлагаемых показателей энергоэффективности и экологичности технического объекта и использование их для сравнительного анализа на примере паровых

котлов одинаковой производительности, работающих на угле и природном газе.

Результаты этих расчетов приведены в табл. 1-2. Полные энергобалансы рассчитаны на производительность котлов 230 т пара ($t_{\text{мп}} = 510^\circ\text{C}$, $p_{\text{п}} = 10,8$ МПа) в час. Приход энергии (эксергии) с топливом определялся на основе удельных значений химической энергии и эксергии топлива, приведенных в [2]. Каждый энергетический поток характеризуется эксергией (величины в скобках). Величины материальных потоков на входе в объект и на выходе из него также приведены в табл. 1-2. Звездочкой отмечены полезные продукты процесса.

Для оценки негативного воздействия котельной установки на окружающую среду необходимо знать объем и компонентный состав выбросов продуктов сгорания топлива в атмосферу. Эти данные для рассматриваемых объектов приведены в табл. 3.

Таблица 1

Полный энергетический баланс парового котла (топливо – уголь)

Статья баланса	Масса, т	Энергия (эксергия), ГДж/ч	%
Приход			
Топливо (уголь)	35,70	720 (710)	100
Воздух организованный	281,90	0,0	0,0
Присосы воздуха	64,14	0,0	0,0
Итого:	381,74	720 (710)	100
Расход			
Перегретый пар*	(230)	572 (290)	79,44
Потери с отходящими газами (физическое тепло)	376,564	119,5 (36,24)	16,60
Потери от химического недожога	(1,713)	18,7 (13,51)	2,60
Потери с золой	5,176	6,1 (3,56)	0,85
Потери тепла в окружающую среду	–	2,7 (0,44)	0,51
Потери эксергии от необратимости			
– горения	–	– (203,45)	–
– теплообмена	–	– (162,8)	–
Итого:	381,74	720	100

Полный энергетический баланс парового котла
(топливо – природный газ)

Статья баланса	Масса, т	Энергия (эксергия), ГДж/ч	%
Приход			
Топливо (природный газ)	13,780	696 (641)	100
Воздух организованный	257,32	0,0	0,0
Присосы воздуха	65,87	0,0	0,0
Итого:	336,97	696 (641)	100
Расход			
Перегретый пар*	(230)	572 (290)	82,2
Потери с отходящими газами (физическое тепло)	336,97	109,86 (32,48)	15,8
Потери от химического недожога	(0,878)	11,1 (10,1)	1,6
Потери тепла в окружающую среду	–	3,04 (0,31)	0,4
Потери эксергии от необратимости			
– горения	–	– (152,1)	–
– теплообмена	–	– (153,7)	–
Итого:	336,97	696	100

Таблица 3

Выбросы газов в атмосферу

Компонент	При сжигании угля			При сжигании природного газа		
	на 1 кг, м ³	в час, тыс. м ³	% объ- ем.	на 1 м ³ , м ³	в час, тыс. м ³	% объ- ем.
O ₂	0,419	14,958	6,06	0,77	13,514	5,0
N ₂	5,974	213,272	73,90	11,418	200,386	74,1
CO ₂	0,917	32,736	11,34	1,06	18,603	6,88
CO	0,030	1,070	0,37	0,05	0,878	0,32
H ₂ O	0,669	23,883	8,28	2,11	37,03	13,70
SO ₂	0,004	0,143	0,05	–	–	–
Итого:	8,084	286,062	100	15,408	270,41	100

На основе данных, полученных при расчете полных энергетических балансов можно оценить термодинамическую эффективность рассмотренных котлов по величине их энергетического и эксергетического КПД. Они соответственно составили:

для котла на угле:

$$\eta_{\text{эн}} = \frac{I_{\text{мп}}}{I_{\text{хт}}} = \frac{572}{720} = 0,794;$$

$$\eta_{\text{экс}} = \frac{E_{\text{мп}}}{E_{\text{хт}}} = \frac{290}{710} = 0,408;$$

для котла на природном газе:

$$\eta_{\text{эн}} = \frac{I_{\text{мп}}}{I_{\text{хт}}} = \frac{572}{696} = 0,822;$$

$$\eta_{\text{экс}} = \frac{E_{\text{мп}}}{E_{\text{хт}}} = \frac{290}{641} = 0,452.$$

Эти величины показывают, как и следовало ожидать, что термодинамическая эффективность котла на угле ниже, чем на природном газе.

Данные, приведенные в табл. 1-3, позволяют также оценить экологичность этих объектов по предлагаемому в данной статье показателю – суммарному выбросу эксергии в окружающую среду в

целом и отдельных ее компонентов. Результаты расчета этих показателей, полученных непосредственно из полных энергобалансов рассмотренных объектов, приведены в табл. 4. Значения работы (эксергии), необходимой для снижения концентрации ингредиента, рассчитывались по выражению (4) с использованием данных табл. 3. Расчет проводился при условии доведения мольной концентрации CO₂ в отходящих газах до концентрации в атмосфере, равной $z_i^* = 0,0003$, а при определении E_k для компонента SO₂ принималось равной $z_i^* = 0,5$ мг/м³ в соответствии с ПДК. Из табл. 4 видно, что суммарный сброс эксергии в окружающую среду у котла, работающего на угле, существенно (примерно на 1/3) выше, чем у котла на природном газе.

Использование же полных энергетических балансов для анализа энергетического совершенства процессов и выявления резервов энергосбережения было многократно апробировано на большом числе крупных предприятий и показало удобство и эффективность метода.

Выводы.

1. В настоящее время в отечественной и мировой практике нет общепринятого показателя для оценки кумулятивного негативного воздействия технических объектов на окружающую среду в целом, включая атмосферу, гидросферу и верхние слои литосферы.

2. Такие показатели, как эксергия и анергия, химическая энергия и эксергия веществ, предложенные еще в середине прошлого века, позволяют осуществить строгий термодинамический анализ энергоэффективности любых технических объектов на основе их полного энергетического баланса и численно оценить негативное воздействие технического объекта на окружающую среду. В качестве обобщенного показателя такого воздействия нами предложена величина сброса эксергии (химической, тепловой, концентрационной) как в отдельные компоненты окружающей среды, так и ОС в целом.

3. Для широкого практического использования предложенного показателя и метода его определения необходимо лишь узаконить широко используемые в научных исследованиях понятия: эксергия и анергия, химическая энергия и эксергия вещества.

Таблица 4

Сброс энергии/эксергии в окружающую среду, ГДж/ч

Компоненты окружающей среды	Химическая энергия/эксергия		Тепловая энергия/эксергия		Концентрационная эксергия E_k	Суммарный сброс эксергии $E_{сум}$
	I_x	E_x	I_q	E_q		
При сжигании угля						
Атмосфера	18,7	13,51	113,5	36,24	22,456	72,206
Литосфера	5,2	3,22	0,9	0,34	–	3,56
Сброс эксергии, всего:		16,73		36,58	22,456	75,766
При сжигании природного газа						
Атмосфера	11,1	10,1	109,86	32,43	11,82	54,4
Литосфера	–	–	–	–	–	–
Сброс эксергии, всего:		10,1		32,43	11,82	54,4

Литература

1. Степанов В. С. Анализ энергетического совершенства технологических процессов. Новосибирск : Наука, 1984. 273 с.

2. Степанов В. С., Степанова Т. Б. Эффективность использования энергии. Новосибирск : Наука, 1994. 257 с.

3. Шаргут Я., Петела Р. Эксергия. М. : Энергия, 1968. 279 с.

4. Бродянский В., Фратшер В., Михалик К. Эксергетический метод и его приложение. М. : Энергоатомиздат, 1988. 288 с.

5. Эксергетические расчеты технических систем : справ. пособие / В. М. Бро-

дьянский [и др.] ; под ред. А. А. Долинского, В. М. Бродянского. Киев : Наукова думка, 1991. 360 с.

6. Бояджиев Д. Дълбочинноста на преработване на природните ресурси и степента на отпадъчност на технологиите, разгледани в светлината на ексергийно-екологичния анализ // Изв. Вн. ин-т нар. стоп.: Варна, 1983. С.63-72.

7. Степанов В. С. Химическая энергия и эксергия веществ. Новосибирск : Наука, 1990. 163 с.

8. Szargut J., Morris D. R., Steward F. R. Exergy analysis of thermal, chemical and metallurgical processes. N.Y.: Hemisphere, 1988.