

АННОТАЦИЯ

В работе предложено использовать в качестве индикативной оценки термодинамической эффективности энергосистемы эксергетический КПД. Представлена методика его расчёта. Получена количественная оценка термодинамической эффективности энергосистемы Беларуси в существующем состоянии, приведена динамика её изменения за последние пятнадцать лет. Полученные результаты хорошо коррелируют с динамикой снижения удельных расходов топлива на производство электрической и тепловой энергии. Преимуществом предложенного индикатора является его универсальность и возможность использования для анализа энергетических систем с многовариантностью по типам установок и видам используемых энергоресурсов.

ANNOTATION

The paper considered to use exergy efficiency coefficient as an indicative assessment of the thermodynamic efficiency of the power system. The method of its calculation is presented. Quantitative assessment of thermodynamic efficiency of the Belarus power system in the current state is obtained, the dynamics of its changes over the past fifteen years is shown. These results are correlated well with the dynamics of specific fuel consumption reduction for the production of electricity and heat. The advantage of the proposed indicator is its versatility and ability to use for the analysis of energy systems with a lot of variance by units' types and kinds of energy sources.

К вопросу оценки термодинамической эффективности Белорусской энергосистемы

Е. О. Воронов, генеральный директор ГПО «Белэнерго»,
В. Н. Романюк, д. т. н., профессор, В. А. Седнин, д. т. н.,
профессор, заведующий кафедрой «Промышленная тепло-
энергетика и теплотехника», А. А. Бобич, м. т. н., ассистент
Белорусский национальный технический университет

Введение

В настоящее время эффективность теплоэнергетических систем принято оценивать по удельным расходам условного топлива на производство электрической и тепловой энергии. Эти показатели достаточно удобны для энергетических систем с однородным оборудованием и когда в качестве первичного энергоресурса используется только органическое топливо. В случаях, когда в системе используются как источники раздельной генерации электрической и тепловой энергии, так и источники, вырабатывающие эти преобразованные энергопотоки комбинированным способом, а также имеет место многовариантность исходных энергоресурсов (органическое и ядерное топливо, альтернативные источники энергии, побочные энергоресурсы, органические отходы промышленного и сельскохозяйственного производств), желательно иметь более универсальный индикатор энергетической эффективности. В этом качестве

можно использовать термодинамические потенциалы, обладающие чрезвычайно важным свойством идентификации вида работы (механической, электрической и других видов в тех или иных условиях) [1]. О целесообразности использования такого индикатора в технических приложениях указывал еще в 1928 г. академик В. И. Вернадский в своей работе «О задачах и организации прикладной научной работы АН СССР» [2].

В настоящее время для анализа и оценки технических систем применяют термодинамические функции, которые однозначно характеризуют работоспособность, энергетическую ценность потоков вещества и энергии при известных внешних условиях. В качестве соответствующих термодинамических характеристик в энергетике используют эксергетические абсолютные и относительные показатели. Наличие подобной индикативной оценки термодинамической эффективности, являющейся долговременной, стабильной характеристикой, позволит более обоснованно выбирать варианты развития источников энергосистемы из ряда альтернативных решений, имеющих близкие экономические показатели.

Напомним, что под эксергией (работоспособностью) понимают максимальную работу (или энергию первой группы), которую совершает

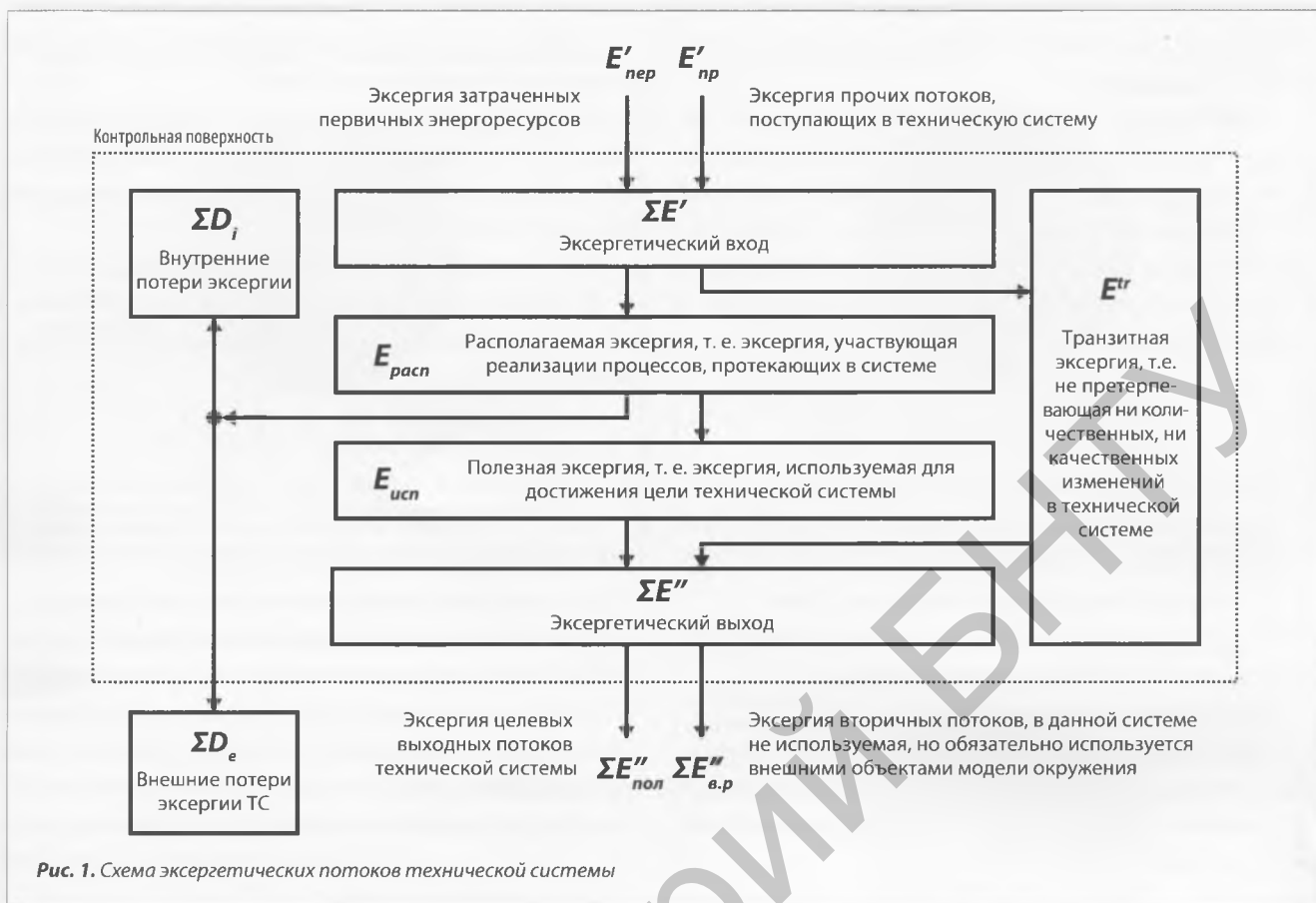


Рис. 1. Схема эксергетических потоков технической системы

термодинамическая система при обратимом переходе в состояние равновесия с окружающей средой. Следовательно, эксергия определяет работоспособность вещества (энергии), пригодность энергии для использования в заданных условиях окружающей среды. Важно отметить, что использование эксергетического анализа технических систем позволяет решать задачи технико-экономической оптимизации. Недостаточное использование эксергетических методов анализа в практике энергообеспечения и энергоиспользования авторы [2] объясняют отсутствием удобного инженерного аппарата, позволяющего без сложных вычислений и поисков в литературных источниках получать конкретные рекомендации по повышению энергоэффективности технических систем. Однако этот недостаток в современных условиях можно устранить разработкой соответствующего программного продукта.

Следует отметить, что для отдельных технических систем методика эксергетического анализа достаточно хорошо отработана [1–5]. В [2] представлены методики анализа и термодинамической оптимизации технических систем преобразования энергии. Там же рассмотрены вопросы сравнения

эффективности комбинированной (теплофикационной) и отдельной выработки энергии. Вместе с тем информации о применении соответствующих показателей на базе эксергетического метода оценки для больших энергетических систем с многоуровневой структурой в общедоступной литературе нами не найдено.

В статье рассмотрена возможность оценки термодинамического метода эффективности для региональной энергетической системы уровня энергосистемы Республики Беларусь.

Методика оценки термодинамической эффективности энергосистемы

На рис. 1 представлена графическая интерпретация взаимосвязи эксергетических потоков для технической системы.

Определение энергетической эффективности энергосистемы может быть проведено с помощью термодинамического анализа на базе эксергетического метода. В результате можно найти несколько показателей [6]: термодинамический коэффициент полезного действия (КПД), степень термодинамического совершенства, степень технологического

совершенства, степень полного совершенства технической системы.

Термодинамический КПД используется для детального анализа технической системы и обычно в тех случаях, когда имеются потоки транзитной эксергии, значительно превышающие потоки эксергии, характеризующие процессы, протекающие в исследуемой технической системе, и определяется по соотношению:

$$\eta = \frac{\Sigma E'' - E^{tr}}{\Sigma E' - E^{tr}} = 1 - \frac{\Sigma D}{\Sigma E' - E^{tr}} = \frac{E_{исп}}{E_{расп}}, \quad (1)$$

где $\Sigma E'$, $\Sigma E''$ — потоки эксергии соответственно на входе и выходе системы, ГВт·ч;

E^{tr} — транзитные потоки эксергии, ГВт·ч;

$E_{исп}$, $E_{расп}$ — используемый и располагаемый потоки эксергии соответственно, ГВт·ч;

D — потери эксергии, ГВт·ч.

Для теплотехнологических процессов более информативной является оценка термодинамической эффективности системы по степени технологического совершенства:

$$\beta = \frac{\Sigma E_{расп}}{\Sigma E'} = 1 - \frac{\Sigma E^{tr}}{\Sigma E'} \quad (2)$$

Степень полного совершенства технической системы определяют из выражения:

$$\mu = \frac{\Sigma E_{исп}}{\Sigma E'} = 1 - \frac{(\Sigma E^{tr} + \Sigma D)}{\Sigma E'} \quad (3)$$

Степень термодинамического совершенства определяют как:

$$\nu = \frac{\Sigma E''}{\Sigma E'} \quad (4)$$

В общем случае при анализе тепловых процессов рекомендуется располагать всем перечисленным набором показателей, но на практике чаще используют эксергетический КПД_е в виде степени термодинамического совершенства (4). Для решения поставленной задачи — определения количественной оценки термодинамического совершенства энергосистемы — он является наиболее приемлемым, на наш взгляд, вариантом. Применительно к энергосистеме представим его в виде:

$$\eta_e = \frac{\Sigma W_s + \Sigma E''_{qp} + \Sigma E''_{qcv}}{\Sigma E'} \quad (5)$$

где ΣW_s — потоки электроэнергии, отпущенные внешним потребителям, ГВт·ч;

$\Sigma E''_{qp}$, $\Sigma E''_{qcv}$ — эксергии потоков теплоты от котельных и ТЭЦ энергосистемы, отпущенной внешним потребителям соответственно с паровым и водяным теплоносителями, ГВт·ч;

$\Sigma E'$ — эксергии потоков топлив, ГВт·ч.

Эксергия потоков теплоты с паровым (E''_{qp}) и водяным (E''_{qcv}) теплоносителями определяется из выражения:

$$E''_q = Q \cdot \tau_e = Q \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T}\right), \text{ ГВт}\cdot\text{ч}, \quad (6)$$

где Q — теплота, отпущенная с паровым или водяным теплоносителем, ГВт·ч;

τ_e — эксергетическая температурная функция;

T_0 — температура окружающей среды, К;

T — температура отпускаемых теплоносителей, К.

Для определения эксергии топлива в [1–4] представлен ряд соотношений, которые учитывают вид топлива. Так:

♦ для природного газа:

$$E'_{пг} = e_0 \cdot B = 1,04 \cdot Q_p^b \cdot B, \text{ ГВт}\cdot\text{ч} \quad (7)$$

♦ для жидких топлив:

$$E'_{жт} = 0,975 \cdot Q_p^b \cdot B, \text{ ГВт}\cdot\text{ч} \quad (8)$$

♦ для твёрдых топлив:

$$E'_{тт} = Q_p^b \cdot (1 - W_{ва}) \cdot B, \text{ ГВт}\cdot\text{ч}, \quad (9)$$

где e_0 — удельная эксергия топлива, ГДж/кг;

Q_p^b — высшая теплота сгорания топлива, ГДж/кг;

$W_{ва}$ — влажность твёрдого топлива, доли;

B — расход топлива, кг.

В отношении ядерного топлива расчёт его эксергии в разных источниках несколько различен. В. М. Бродянский относит ядерную энергию к первой (организованной, безэнтропийной) энергии, эксергия которой равна энергии [2]. В более ранней работе Я. Шаргута [3] для расчёта эксергии ядерного топлива предлагается соотношение:

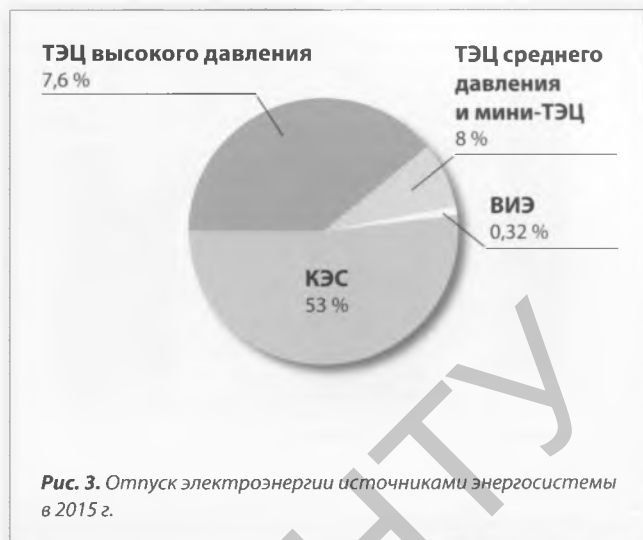
$$E'_{ят} = 5,354 \cdot 10^9 \cdot (B_{ят} / \mu), \text{ кДж/с}, \quad (10)$$

где $B_{ят}$ — расход расщепляющегося изотопа, содержащегося в ядерном топливе, загружаемом в реактор, кг/ч;

μ — молярный вес расщепляющегося изотопа, кг/кмоль.

Имеются и иные подходы к решению данной задачи [7–10].

В нашем случае, когда речь идёт о совокупной оценке термодинамической эффективности энергосистемы, в которой АЭС является её составной



частью, предпочтительным к определению эксергии потока ядерной энергии является подход В. М. Бродянского [5].

Термодинамический анализ эффективности функционирования энергосистемы Республики Беларусь

Определение эксергии входных потоков энергосистемы

Входными потоками баланса эксергии энергосистемы в контексте рассматриваемой задачи являются потоки эксергии первичных энергоресурсов, прежде всего топлив. При анализе существующего положения в энергосистеме (рис. 2) расчёт эксергии топлив может быть сведён к расчёту эксергии природного газа, поскольку его доля в приходной части энергобаланса системы страны в настоящий момент превышает 97 % [11]. Обобщённый учёт прочих первичных энергоресурсов, включая возобновляемые источники энергии (ВИЭ), через эксергию основного топлива, которым в нашем случае является природный газ, даёт ошибку, не превышающую погрешность исходных данных и расчётов на их основе.

Очевидно, что погрешность обобщённого расчёта входного потока эксергии оказывается на порядок меньше и ею в данном случае можно пренебречь.

Определение эксергии выходных потоков энергосистемы и расчёт КПД

Для оценки термодинамической эффективности энергосистемы в настоящее время используем абсолютные значения отпуска электрической и тепловой энергии, их структуру, а также расход топлива (табл. 1, рис. 3, 4).

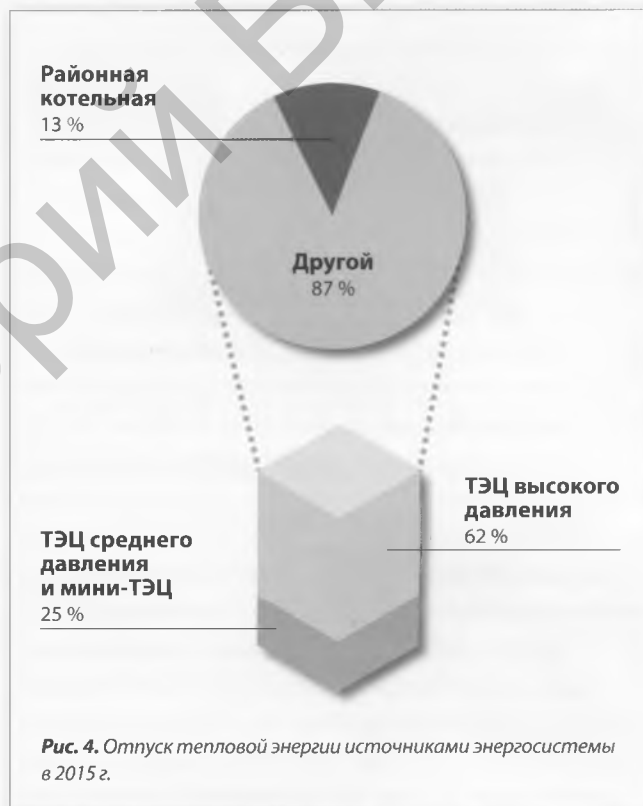
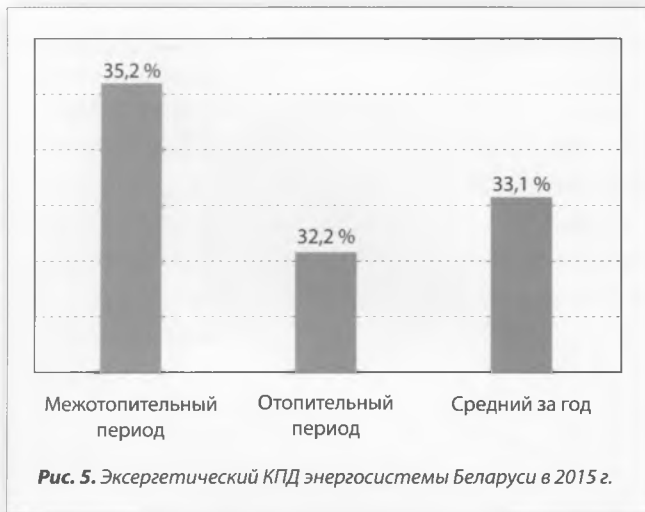


Табл. 1. Отпуск тепловой и электрической энергии, расход топлива энергосистемой Беларуси за 2015 г.

Показатель	Межотопительный период	Отопительный период	За год
Отпуск электроэнергии, млрд кВт·ч	10,6	18,0	28,6
Отпуск тепловой энергии, млн Гкал	6,25	26,6	32,9
в том числе:			
- с паровым теплоносителем	2,41	4,67	7,08
- с водяным теплоносителем	3,84	21,9	25,8
Расход природного газа в условном топливе, млн т	3,85	8,36	12,2



Результаты расчётов количественной оценки термодинамической эффективности энергосистемы Беларуси для межотопительного, отопительного периодов и в целом за год, полученные с помощью рассмотренной выше методики, представлены на рис. 5.

Отопительный период характеризуется большим количеством генерации тепловой энергии, в том числе за счёт прямого сжигания топлива в котельных, для которых эксергетический КПД объективно невелик, что и приводит к снижению термодинамической оценки энергосистемы в этот период в сравнении с прочими.

Доля выработки в стране электроэнергии блок-станциями составляет до 9 % от общей потребности в ней, поэтому особый интерес представляет оценка термодинамической эффективности энергосистемы с учётом работы этих распределённых когенерационных источников. Исходные данные

для расчёта эксергетического КПД энергосистемы с учётом работы блок-станций за год по отпуску тепловой и электрической энергии, расходу топлива для источников энергосистемы принимаем из табл. 1. Для блок-станций эти данные приведены в табл. 2.

Табл. 2. Данные для расчёта среднегодового эксергетического КПД энергосистемы Беларуси с учётом работы блок-станций в 2015 г.

Показатель	Значение
Отпуск электроэнергии, млрд кВт·ч	3,25
Отпуск тепловой энергии, млн Гкал	3,91
Расход природного газа в условном топливе, млн т	1,17

Сравнение результатов расчёта эксергетического КПД энергосистемы с учётом и без учёта работы блок-станций приведено на рис. 6. Распределённые когенерационные источники приводят к увеличению термодинамической эффективности энергосистемы, которому соответствует рост эксергетического КПД с 33,1 до 33,6 %. Увеличение КПДе можно объяснить более высоким коэффициентом использования топлива на блок-станциях, работающих в когенерационном режиме.

Особый интерес представляет оценка динамики роста термодинамической эффективности энергосистемы Беларуси за последние годы. На рис. 7 отражено изменение эксергетического КПД энергосистемы за 2000–2015 гг. на фоне изменения традиционных характеристик (удельных расходов топлива), используемых для оценки работы энергетического оборудования.

Увеличение эксергетического КПД с 29,4 до 33,1 % Белорусской энергосистемы объективно отражает её техническое перевооружение за последние годы. Также можно констатировать, что динамика предложенного индикатора хорошо коррелирует с динамикой изменения традиционных характеристик. При этом следует отметить, что его (индикатора) использование даёт более широкие возможности для оценки вариантов развития энергосистемы при привлечении широкого ассортимента видов топлива, включая ВИЭ и органические отходы производства.

Кроме того, использование методов термодинамического анализа позволяет оценивать эффективность преобразования энергии внутри технической системы, что важно для комплексного исследования энергетических систем.



Рис. 7. Изменение различных оценочных характеристик энергосистемы Беларуси в период 2000–2015 гг.

Выводы

1. Показано, что термодинамическая эффективность энергосистемы может быть определена по эксергетическому КПД, который является объективным и, что важно, стабильным показателем.

2. Предложена методика расчёта индикативной оценки термодинамической эффективности энергосистемы. Представлены результаты тестовых расчётов на примере энергосистемы Республики Беларусь, которые хорошо коррелируют с традиционными базовыми показателями энергетической эффективности.

3. Можно считать целесообразным совершенствование предложенной методики с целью её адаптации для решения задач технико-экономической оптимизации энергосистемы при её развитии и внедрении энергосберегающих мероприятий, а также в условиях применения широкого ассортимента видов топлива, включая ВИЭ и органические отходы промышленных производств. ЭИМ

Литература

1. Бродянский В. М. Эксергетический метод термодинамического анализа / В. М. Бродянский. — М.: Энергия, 1973. — 296 с.

2. Бродянский В. М. Эксергетический метод и его приложения / В. М. Бродянский, В. Фратшер, К. Михалек. — М.: Энергоатомиздат, 1988. — 288 с.

3. Шаргут Я. Эскергия / Я. Шаргут, Р. Петела. — М.: Энергия, 1968. — 273 с.

4. Сажин Б. С. Эксергетический метод в химической технологии / Б. С. Сажин, А. П. Булеков. — М.: Химия, 1992. — 208 с.

5. Сорин М. В. Методика однозначного определения эксергетического КПД технических систем преобразования энергии и вещества / М. В. Сорин, В. М. Бродянский // Изв. вузов. Энергетика. — 1985. — № 3. — С. 78–88.

6. Андрущенко А. И. Показатели эффективности сложных систем энергоснабжения и взаимосвязь между ними / А. И. Андрущенко // Материалы четвёртой Российской научно-технической конференции «Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике, промышленности», Ульяновск, 24–25 апреля 2003 г. / Ульяновский государственный технический университет. — Ульяновск, 2003. — С. 12–14.

7. Kriese S. Exergie in der Kraftwerkstechnik. Leistungskraftwerke-Dampfkraftwerke-Gasturbinen-Warme-Kraft-Kopplung / S. Kriese / Essen: Vulkan. — 1971. — 148 с.

8. Mujanovic R. Bila s parnog bloka po drugom zakonu termodinamike // R. Mujanovic / Termotechnika. — 1977. — № 3. — С. 56–67.

9. Pruschek R. Exergetische Analyse eines Kernkraftwerkes // R. Pruschek / BWK. — 1970. — № 1. — С. 64–70.

10. Siegel K. Exergieanalyse heterogenen Leistungsreaktoren // K. Siegel / BWK. — 1970. — № 9. — С. 434–440.

11. В 2020 году Белоруссия рассчитывает снизить долю природного газа в энергобалансе до 37,3 % [электронный ресурс]: — 2016. — Режим доступа: <http://www.rosteplo.ru/news.php?zag=1334042953>. — Дата доступа: 02.06.2016.