



Оценка энерго-экологической эффективности



Владимир ПОПОВ
Vladimir G. POPOV

Юрий БОРОВКОВ
Yuri N. BOROVKOV



Филипп СУХОВ
Philip I. SUHOV

Попов Владимир Георгиевич – доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Химия и инженерная экология» Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ).

Боровков Юрий Николаевич – ведущий инженер кафедры «Химия и инженерная экология» МИИТ. Сухов Филипп Игоревич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Химия и инженерная экология» МИИТ.

Проблемы использования энергии напрямую связаны с задачами энерго- и ресурсосбережения, а также экологической безопасности, охраны окружающей среды. Для оценки энерго-экологической эффективности железнодорожного транспорта авторами предлагается использование методологии системного анализа и эксергетического метода, который опирается на законы сохранения массы и энергии, второй закон термодинамики.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, энергетическая эффективность, загрязнение среды, экологическая безопасность, ресурсосбережение, эксергетический метод.

В начале XXI века человечество оказалось перед лицом энергетического и экологического кризисов, принимающих все более глобальный и острый характер, которые, резонируя, породили новое явление – глобальный энерго-экологический кризис [1].

I.

Железнодорожный транспорт в мире признан одним из наиболее энергетически эффективных и экологически чистых видов транспорта – по удельным показателям потребления энергии и выбросов загрязняющих веществ на единицу перевозочной работы. Несмотря на это, он является и колоссальной природно-социо-технической системой, потребляющей большое количество топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) и оказывающей заметное негативное воздействие на окружающую среду.

Железные дороги России потребляют ежегодно до 6% производимой в стране электроэнергии и столько же – дизельного топлива. На тягу поездов во всех видах движения расходуется свыше 80% электроэнергии и дизельного топлива от этого количества [2]. Остальное идет на содер-

жание инфраструктуры, ремонтное производство и социальные нужды работников отрасли.

Нормальное функционирование железнодорожного транспорта обеспечивается его энергетическим комплексом – совокупностью топливопотребляющих и энергоиспользующих установок, а также вспомогательных систем, требующих значительного количества ТЭР и как следствие этого – приводящих к загрязнению окружающей среды.

Обеспечение энергетической эффективности и экологической безопасности в сложившихся условиях стало одним из важнейших стратегических направлений развития отрасли, ориентированным на уменьшение объемов потребления энергоресурсов и сокращение расходов на их приобретение, снижение нагрузки на окружающую среду со стороны объектов железнодорожного транспорта.

При этом нельзя не отметить, что вопросы, связанные с исследованием и корректной оценкой энерго-экологической эффективности различных технических систем и комплексов, являются сегодня актуальными, если не сказать приоритетными, и требуют дополнительного теоретического обоснования.

Так, используемые показатели энергетической эффективности различных технических систем, технологий, оборудования разнородны, не всегда имеют ясный физический смысл и зачастую трудно сопоставимы. Особенно большие методологические проблемы наблюдаются, когда исследуются объекты (комплексы, оборудование), одновременно потребляющие качественно различные виды энергии и по-разному их преобразующие (например, органическая работа, тепловая энергия воды или пара).

Еще более неоднозначна ситуация с комбинированными оценками эффективности, учитывающими не только энергетическую эффективность, но и экологическую безопасность – то есть с «энерго-экологической» или «эколога-энергетической» эффективностью.

Допустим, в методике «Интерфакс-ЭРА» [3] используются следующие основные показатели – критерии эффективности развития:

$\mathcal{E}1$ – энергетическая эффективность = $P/\mathcal{E} \Rightarrow$ максимум,

$\mathcal{E}2$ – технологическая эффективность = $\mathcal{E}/B \Rightarrow$ максимум,

$\mathcal{E}3$ – экологическая эффективность = $P/B \Rightarrow$ максимум,

где \mathcal{E} – полные затраты вещества-энергии на производство; P – полезно использованные на произведенную продукцию; B – выброшенные в окружающую среду в виде загрязнителей (воздействий).

Комбинированная «эко-энергетическая» эффективность в [3] определяется из соотношения: $P/(B \cdot \mathcal{E})$.

Трудности с непосредственным использованием таких показателей для сравнения и трактовкой их физического смысла состоят в разной физической природе входящих в них величин.

Кроме того, вопросы энергосбережения и охраны окружающей среды рассматриваются зачастую в отрыве друг от друга, хотя являются во многом разными сторонами одной проблемы. Это приводит к тому, что в организации природоохранной деятельности преобладают пассивные меры защиты (наращивание мощности и эффективности очистных сооружений, сопровождающееся нередко их существенным удорожанием), в то время как необходимость активных мероприятий, направленных на инновационное развитие, модернизацию технологий и оборудования, остается недооцененной.

II.

Энергетический комплекс железнодорожного транспорта правомерно воспринимается открытой термодинамической системой и характеризуется значительной разнородностью видов топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) и функционального назначения входящих в его состав элементов. Для исследования энерго-экологической эффективности энергетического комплекса железнодорожного транспорта нами выбраны прежде всего эксергетический метод термодинамического анализа – метод, рассматривающий термодинамические системы во взаимодействии с окружающей их средой и опирающийся на второй закон термодинамики.

Разработка основ эксергетического метода началась еще во второй поло-





Рис. 1. «Междисциплинарный треугольник эксергии».

вине XIX века трудами таких ученых, как Дж. Гиббс, Ж. Гюи и А. Стодола. Базовым в нем стало понятие эксергии – термодинамической функции, определяемой выражением:

$$E = S(T - T_0) + V(p - p_0) + \sum_{i=1}^N n_i(\mu_i - \mu_0), \quad (1)$$

где E – величина эксергии термодинамической системы, Дж;

S – энтропия системы, Дж/К;

T и T_0 – температура системы и окружающей среды соответственно, К;

V – объем системы, м³;

p и p_0 – давление в системе и в окружающей среде соответственно, Па;

n_i – количество молей i -го вещества;

μ_i и μ_0 – химические потенциалы i -го вещества – компонента системы и окружающей среды (среды отсчета) соответственно, Дж/моль.

Термин «эксергия» был введен в употребление югославским ученым-теплотехником З. Рантом в 1956 году. Он состоит из двух частей – греческого слова «ergon» (работа, сила) и первой половины латинского слова «externus» (внешний).

Эксергетический метод использует законы сохранения массы и энергии вместе со вторым законом термодинамики для анализа, проектирования и совершенствования энергетических и других систем. Большой вклад в его развитие и значительное расширение сферы применения внесли российские и зарубежные ученые Г. Вам, П. Грассман, Я. Шаргут, А. И. Андрющенко, В. М. Бродянский, Д. П. Гохштейн, Е. И. Янтовский и др.

Эксергетический метод получил признание благодаря своей универсальности. Он принципиальным образом позволяет

сравнивать между собой любые виды энергии с учетом их качественной неравноценности и на этой основе оценивать эффективность различных процессов и механизмов преобразования.

Полнота использования эксергии определяется величиной потерь (внешних и внутренних). Потери эксергии (ее неполнота в системе) – это потери подводимой извне эксергии (в большинстве случаев – топлива), а потому и дополнительный расход топливных ресурсов и, как следствие, увеличение объемов продуктов сгорания топлива, в том числе парниковых газов.

Глубокий смысл понятия «эксергия» вытекает из эквивалентности убывания эксергии и возрастания энтропии в изолированной системе. Рост энтропии и убывание эксергии неизбежны в силу второго закона термодинамики. В отличие от энергии эксергия означает способность действительно производить работу в реальных условиях окружающей среды. Поэтому можно сказать, что используемые в обычной повседневной практике слова «энергосбережение, экономия энергии» на самом деле подразумевают экономию именно эксергии, а не энергии.

Как видно из формулы (1), эксергия выступает мерой отклонения параметров состояния термодинамической системы от условий окружающей среды, являясь, таким образом, способом измерения эффектов, которые могут влиять на эту среду.

Отсюда возникает понятие «эксергетического загрязнения» (сброса эксергии в окружающую среду) – потоков материальных и энергетических, пересекающих контрольную поверхность выделяемой термодинамической системы и обладающих ненулевой эксергией. Для самых распространенных в технике систем рассматривают три вида возможных взаимодействий с окружающей средой:

- 1) термические (температурный потенциал);
- 2) деформационные (потенциал – разность давлений);
- 3) химические (химический потенциал) [4].

Области наиболее частого и оправданного использования понятия эксергии на современном этапе развития научных методов могут быть представлены в виде

своеобразного «междисциплинарного треугольника» (рис. 1) [5].

Другими словами, понятие эксергии самым непосредственным образом связано с так называемым правилом трех «Э»: эффективность, экономичность, экологическая целесообразность.

III.

В инженерной практике понятие эксергии тоже применяется для оценки уровня вмешательства в окружающую среду и определения возможностей его минимизации. Любое использование ресурсов и выброс отработанных продуктов оказывают значительное влияние на природу. Это влияние соотносится с содержащимся в них количеством эксергии.

Для анализа функционирования различных энергоиспользующих и энергопреобразующих систем составляется их эксергетический баланс. Он составляется на основе балансов массы и энергии путем расчета потоков эксергии и ее потерь.

Общая запись эксергетического баланса системы может быть представлена как:

$$E_{\text{вых}} = E_{\text{вх}} - (D_{\text{внешн.}} + T_0 \Delta S), \quad (2)$$

где $E_{\text{вых}}$ — эксергия целевого выхода системы;

$E_{\text{вх}}$ — эксергия входа системы;

$D_{\text{внешн.}}$ — внешние потери эксергии в системе;

ΔS — изменение энтропии потока в конечном и начальном состояниях;

T_0 — абсолютная температура окружающей среды (среды отсчета), К.

Аналитическую запись (2) иллюстрирует схема на рис. 2.

Все потери эксергии в технических системах условно делят на две группы: а) внутренние; б) внешние.

Внутренние потери эксергии связаны с необратимостью процессов, происходящих внутри системы. Любое снижение внутренних потерь эксергии дает возможность при сохранении заданного целевого выхода сократить объем эксергии, поступающей на вход системы, как правило, в виде невозобновляемых природных ресурсов (топливно-энергетических и сырьевых). И в данном случае уменьшение внутренних потерь эксергии направлено на сокращение «внутренней природоёмкости» системы и сокращение материальных затрат на приобретение ресурсов [6].

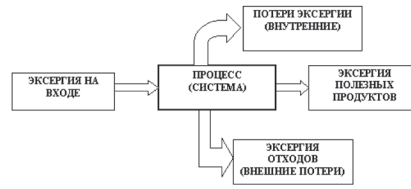


Рис. 2. Графическая схема эксергетического баланса процесса (системы).

К *внешним* потерям относят те, которые связаны с теплообменом при конечной разности температур между телами. В эту же группу входят потери на трение в подшипниках, потери с уходящими газами, с охлаждающей водой, утечками рабочего тела и т. д. [4] Внешняя природоёмкость — это количество воды, воздуха, почвы, необходимое для размещения, рассеивания, разбавления, нейтрализации газообразных, жидких и твердых отходов, выводимых из технологических процессов [6].

Как отмечено в [7,8], железнодорожный транспорт можно рассматривать как крупную термодинамическую систему, потребляющую энергетические ресурсы, преобразуемые в механическую перевозочную работу.

На вход энергетического комплекса железнодорожного транспорта поступают потоки эксергии, представленные различными видами ТЭР: электроэнергии, дизельного топлива, котельно-печного топлива (уголь, газ, мазут, торф, горючие сланцы), бензина, тепловой энергии.

Помимо учета потоков эксергии непосредственно на структурной границе энергетического комплекса железнодорожного транспорта возникает и необходимость в оценке его более отдаленной функциональной границы в той части, которая связана преимущественно с использованием привлекаемых извне нетопливных энергоресурсов, прежде всего — электроэнергии.

Под первичной эксергией следует понимать эксергию первичных энергоносителей (сырьевые материалы в их естественной форме до проведения какой-либо технологической обработки, например каменный уголь, нефть, природный газ, урановая руда).

Как уже было сказано, степень термодинамического совершенства системы непосредственным образом зависима от интенсивности ее взаимодействия с окружающей средой, выражающейся, с одной стороны,



в количестве изымаемых из нее материальных и энергетических ресурсов (главным образом, невозобновляемых), а с другой стороны – мере интенсивности потоков вещества и энергии (с точки зрения анализа внешних потерь эксергии).

IV.

В последнее время усилилась роль эксергетического метода в вопросах, связанных с оценкой негативного воздействия на окружающую среду.

Многие экологические проблемы связаны с производством, преобразованием и использованием энергии (например, кислотные дожди, истощение стратосферного озона, глобальные изменения климата).

Целесообразность применения эксергии для решения экологических задач объясняется тем, что эксергия – единственное понятие в физике, в определение которого входят категории «окружающая среда» и «окружение технической системы».

В целом ряде публикаций рассматриваются возможности эксергетического метода для оценки энерго-экологической эффективности транспортных систем различного масштаба [9–12].

Оценивая при помощи эксергии потенциальное негативное воздействие на окружающую среду внешних потерь (выбросов, сбросов, отходов, физических факторов), нужно отметить, что они обладают как физической (термомеханической), так и химической эксергией. При этом химическая эксергия зачастую является значительной и не локализована в пространстве, а механическая и термическая (потенциалы давления и температуры) быстро стремятся к нулю по мере удаления от источника их поступления в окружающую среду. Поэтому в большинстве случаев предлагается оценивать потенциал негативного воздействия на окружающую среду по химической эксергии выбросов, сбросов и отходов.

В основе этой идеи лежит тот факт, что все поступающие в окружающую среду вещества так или иначе трансформируются в компоненты, присутствующие на пространстве техносферы в естественном состоянии – происходит выравнивание термодинамических потенциалов. Для химических

соединений основной процесс преобразований связан с химическими реакциями («реакциями девальвации»), приводящими к их преобразованию в компоненты окружающей среды.

Согласно [13] суммарный сброс эксергии от технической системы в окружающую среду $E_{\text{сум}}$ представляет собой сумму трех составляющих – тепловой (термической) E_q , химической E_x и концентрационной эксергии E_k соответственно:

$$E_{\text{сум}} = E_q + E_x + E_k. \quad (3)$$

При этом различными авторами предлагается использовать в качестве показателя потенциального негативного воздействия выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух либо сумму всех составляющих эксергии, либо только концентрационную эксергию, либо только химическую.

Тепловая эксергия выбросов определяется по формуле:

$$E_q = M_2 \cdot c_{p\mu(T)} \cdot T \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T}\right), \quad (4)$$

где M_2 – общее количество продуктов сгорания, моль;

$c_{p\mu(473)}$ – средняя мольная теплоемкость выбрасываемой газовой смеси, кДж/кмоль·К;

T_0 и T – температура окружающей среды и отходящих газов соответственно, К.

Или в том случае, если расчет вести по отдельным компонентам:

$$E_q = \sum_{i=1}^N m_i \cdot c_{p_i} \cdot T \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T}\right), \quad (5)$$

где m_i – масса i -го компонента выбросов, кг/т ДТ;

c_{p_i} – удельная массовая изобарная теплоемкость i -го компонента выбросов, кДж/кг·К.

Химическая эксергия выбросов E_x определяется как сумма значений химической эксергии соответствующих веществ – компонентов выбросов:

$$E_x = \sum_{i=1}^N m_i \cdot e_{x,i}, \quad (6)$$

где m_i – масса i -го компонента выбросов, кг/т ДТ;

$e_{x,i}$ – удельная химическая эксергия i -го компонента выбросов, кДж/г.

Расчет концентрационной эксергии E_k проводится в соответствии с [12] по формуле:

$$E_k = \sum_{i=1}^N n_i \cdot R \cdot T_0 \cdot \ln(z_{i0} / z_i^*), \quad (7)$$

где n – количество молей i -го компонента в выбросах;

R – молярная газовая постоянная, Дж/моль·град; $R=8,314$ Дж/моль К;

z_{i0} – молярная концентрация i -го компонента в выбросах, %; при расчете может быть сделано допущение о совпадении значений молярных концентраций и объемных долей газообразных веществ в смеси;

z_i^* – допустимая (естественная или нормативная) молярная концентрация компонента в окружающей среде; для естественных компонентов атмосферного воздуха – их естественное среднесуточное содержание в атмосферном воздухе; для остальных компонентов в качестве такого показателя использовались значения $ПДК_{м.р.г}$, пересчитываемые в соответствующие молярные концентрации.

ВЫВОДЫ

Установлено, что эффективность использования ТЭР (эксергетический КПД) в энергетическом комплексе железных дорог составляет сегодня 33,4%.

Подтверждена приоритетность повышения эффективности использования эксергии в перевозочном процессе.

Сравнение показателей эксергии выбросов на железных дорогах России с аналогами в КНР, представленными в [14], позволяет говорить о том, что и валовая эксергия выбросов, и приведенная к единице перевозочной работы в нашей стране ниже примерно в 1,5 раза.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузык Б. Н., Яковец Ю. В. Энергоэкологическая революция XXI века. – М., 2007.
2. Энергетическая стратегия ОАО «РЖД» на период до 2010 года и на перспективу до 2020 года. – М., 2004.
3. Методика оценки экологической и энергетической эффективности экономики России/Артюхов В. В., Мартынов А. С. – М., 2010.
4. Бродянский В. М. Эксергетический метод термодинамического анализа. – М.: Энергия, 1973.
5. Ibrahim Dincer, Marc A. Rosen. Exergy: Energy, Environment and Sustainable development. Elsevier, 2007.
6. Воробьев О. Г., Шамшин А. В. Анализ техногенных потоков загрязняющих веществ судостроительного завода [Электронный ресурс] –<http://inftech.webserv.ru/it/conference/scm/1999/session12/vorobev.html>
7. Попов В. Г., Боровков Ю. Н. Методология эксергетического подхода к термодинамической оценке эффективности процесса перевозок//Труды IX науч.-практ. конф. – М.: МИИТ, 2008.
8. Боровков Ю. Н. Энергетический комплекс железнодорожного транспорта России как открытая термодинамическая система//Материалы VII междунар. науч.-практ. Конф. «Научный прогресс на рубеже тысячелетий». Praha, Publishing House “Education and science”, 2011.
9. M. Federici, S. Ulgiati, R. Basosi. A thermodynamic, environmental and material flow analysis of the Italian highway and railway transport systems/Energy Volume 33, Issue 5, May 2008. P. 760–775.
10. Xi Ji and G. Q. Chen. Exergy analysis of energy utilization in the transportation sector in China/Energy Policy Volume 34, Issue 14, September 2006. P. 1709–1719.
11. Ларюшкин-Железный Б. В., Блохин И. А. Энергетическая эффективность транспортировки грузов автотранспортом//Материалы междунар. науч.-практ. конф. «Роль природообустройства сельских территорий в обеспечении устойчивого развития АПК». – М., 2007.
12. Степанов В. С., Степанова Т. Б. Определение эффективности использования энергии в транспортных системах на основе энергетического и эксергетического КПД (на примере трубопроводного транспорта)// Системы. Методы. Технологии. – 2010. – № 8.
13. Степанов В. С., Степанова Т. Б. Совместное исследование термодинамической эффективности и экологичности технических объектов//Экология и рациональное природопользование. – 2010. – № 7.
14. Xi Ji et al. Exergy-based assessment for waste gas emissions from Chinese transportation/Energy Policy 37 (2009), 2231–2240. ●

ASSESSMENT OF ENERGY AND ENVIRONMENTAL EFFICIENCY

Popov, Vladimir G. – D.Sc. (Tech), professor, head of the department of chemistry and engineering ecology of Moscow State University of Railway Engineering (MIIT).

Borovkov, Yuri N. – principal engineer of the department of chemistry and engineering ecology of Moscow State University of Railway Engineering (MIIT).

Suhov, Philip I. – Ph.D. (Tech), associate professor of the department of chemistry and engineering ecology of Moscow State University of Railway Engineering (MIIT).

The problems of energy utilization are directly related to the tasks of energy and resource saving and environmental safety. The authors propose the approach to the assessment of energy and environmental performances of railways on the basis of system analysis and exergic methodology. The exergic method is based on mass conservation law, law of conservation of energy, second law of thermodynamics.

Key words: railways, energy efficiency, environmental pollution, ecological safety, resource saving, energy method.

Coordinates of authors (contact information): Попов В. Г. – vpopov@mail.ru, Боровков Ю. Н. – yunikborovkov@gmail.com, Сухов Ф. И. – Philipp@suhov.org

