

ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭКСЕРГЕТИЧЕСКОГО МЕТОДА В ЭКОЛОГИЧЕСКОМ МЕНЕДЖМЕНТЕ

Боровков Ю.Н.¹, Воронцова В.М.²

¹Боровков Юрий Николаевич – кандидат технических наук, доцент;

²Воронцова Виктория Михайловна – магистрант,
кафедра химии и инженерной экологии,
Российский университет транспорта (МИИТ),
г. Москва

Аннотация: в статье рассматриваются проблемы комплексной оценки и решения задач снижения «природоемкости» технических систем, включающих в себя эффективность использования энергетических ресурсов и создаваемое ими загрязнение окружающей среды. В качестве перспективного метода решения этих задач предлагается эксергетический метод анализа. Поскольку в терминологии стандартов по экологическому менеджменту потребление природных ресурсов и выбросы загрязняющих веществ относятся к числу основных экологических аспектов, данные, получаемые с его помощью, могут служить в качестве научно-методологической основы эффективности функционирования систем экологического менеджмента. Повышение эксергетического КПД системы, ее термодинамической эффективности будет способствовать сокращению использования топливно-энергетических ресурсов и уменьшению создаваемого при этом загрязнения окружающей среды.

Ключевые слова: эксергия, эксергетический анализ, загрязнение окружающей среды, парниковые газы, экологические аспекты, энергетические ресурсы, техническая система, окружающая среда, изменение климата, система экологического менеджмента.

Повышение внимания к вопросам снижения негативного воздействия на окружающую среду и обеспечения рационального использования природных ресурсов является одной из основных тенденций развития современной экономики. В качестве эффективного и широко применяемого инструмента решения этих задач выступает внедрение систем экологического менеджмента в различных организациях, что позволяет при грамотном отношении в более широком контексте определять возможности для повышения экологической эффективности производственной и иной деятельности и использовать их.

В системе экологического менеджмента (СЭМ) в качестве одного из основных экологических аспектов и показателей эффективности осуществляемой деятельности выступает использование природных ресурсов, в том числе энергетических, а также образующиеся в результате их использования «отходы» системы в виде газообразных, жидких, твердых веществ и потоков энергии.

Следовательно, оценка и повышение эффективности использования в организации энергетических ресурсов является одним из основных направлений реализации в рамках СЭМ мероприятий, направленных на предотвращение загрязнения, согласно п. 3.2.7 ГОСТ Р ИСО 14001 - 2016.

Для повышения энергетической эффективности при осуществлении хозяйственной или иной деятельности, согласно справочнику по наилучшим доступным технологиям НТС 48 – 2017, реализуется использование эксергетического метода. Его преимуществом является возможность выявления неочевидных при плановом подходе термодинамических ресурсов повышения эффективности, в том числе благодаря использованию потенциала вторичных энергоресурсов.

Также среди важных экологических аспектов деятельности организации, напрямую связанных с эффективностью использования энергии, выделяются выбросы парниковых газов (ПГ). Оценка и управление выбросами ПГ приобретает все большую актуальность в контексте международных климатических соглашений и принимаемых в РФ нормативных актов по формированию системы мониторинга и отчетности предприятий по выбросам ПГ (приказы Минприроды РФ № 300 и № 330) и реализации плана мероприятий по обеспечению к 2020 году сокращения выбросов ПГ до уровня не более 75% объема выбросов в 1990 году.

Уже в настоящий момент для постановки на учет объекта, оказывающего негативное воздействие на окружающую среду, необходимо в форме заявки, утвержденной приказом Минприроды России от 27.09.2016 № 499, указывать фактическую массу выбросов парникового газа в пересчете на углекислый газ (CO₂- эквивалент) от этого объекта.

Различные транспортные системы, в частности, железнодорожный транспорт, можно рассматривать как крупные энергетические комплексы, потребляющие значительное количество энергии (как в виде электроэнергии, так и различных видов органического топлива), преобразуемой главным образом в механическую перевозочную работу, и оказывающие при этом существенное воздействие на окружающую среду.

Перспективным методом совместного исследования термодинамической эффективности и экологической безопасности различных технических систем и комплексов является эксергетический метод, базирующийся на понятии эксергии [1-3].

Эксергия – свойство термодинамической системы или потока энергии, определяемое (характеризуемое) количеством работы, которая может быть получена внешним приемником энергии при обратимом взаимодействии с окружающей средой до установления полного равновесия [4, 5].

Понятие эксергии оказывается самым непосредственным образом, связанным с так называемым «правилом трех «Э»: эффективность, экономичность, экологическая целесообразность. Эксергетический баланс и проводимый на его основе анализ позволяет получить в целом характеристику внутреннего качества самого производственного или энергетического объекта, степень его безотходности не только по материальному, но и по термодинамическому балансу, эффективность по веществу и энергии [2, 3].

В рамках эксергетического анализа производственных систем ставится вопрос не о минимизации расхода энергетических ресурсов, а о максимизации полезной работы, которую может произвести производственная система. При этом эксергетический анализ не противопоставляется энергетическим исследованиям, а дополняет их. В качестве объекта эксергетического анализа можно рассматривать не только технологические процессы, но и отдельные технико-экономические системы, а также целые отрасли промышленности.

Эксергетические показатели позволяют не просто оценить потери энергии / эксергии (в том числе - в окружающую среду), а установить минимально возможные затраты системы (их теоретический минимум), соотнести их с фактической энергоемкостью технологического процесса и, таким образом, рассчитать технический потенциал повышения эффективности. Анализ эксергетических потерь в производственной системе позволяет определить «узкие места», в которых теряется качество энергии и, как следствие, существуют возможности для повышения энергоэффективности [6].

Эксергетический метод уже получил применение для исследования транспортных систем, например транспортных систем Китая, Японии и многих стран Европы и др. Интерес к его использованию для анализа эффективности использования энергоресурсов на транспорте и уровня создаваемого транспортными системами негативного воздействия на окружающую среду, рассматриваемых при таком подходе во взаимосвязи с общих методических позиций и в одинаковых единицах измерения, в последнее время устойчиво растёт, о чем говорит большое количество научных исследований, выполненных в разных странах мира.

Эксергия термодинамической системы в данном состоянии определяется количеством энергии, не характеризующей энтропией, которое может быть получено внешним приемником энергии от системы при ее обратимом переходе из данного состояния в состояние полного термодинамического равновесия с окружающей средой.

Наиболее общим выражением эксергии, пожалуй, следует признать следующую запись, представляющую эксергию в виде суммы составляющих:

$$E = E_{\text{пот}} + E_{\text{кин}} + E_{\text{физ}} + E_{\text{хим}}, \quad (1)$$

где E – полная эксергия термодинамической системы;

$E_{\text{пот}}$, $E_{\text{кин}}$, $E_{\text{физ}}$ и $E_{\text{хим}}$ – составляющие компоненты эксергии – потенциальная, кинетическая, физическая и химическая эксергия соответственно.

Поскольку для большинства реальных технических систем потенциальная и кинетическая эксергия не имеет практического интереса (примерами исключений могут служить гидроэлектростанции и ветровые электрогенераторы, использующие потенциальную эксергию воды и кинетическую эксергию ветра соответственно), для исследования происходящих в них процессах энергетических преобразований выражение (1) может быть упрощено.

Таким образом, величина эксергии термодинамической системы, включающая в себя физическую и химическую эксергию, определяется следующим выражением:

$$E = S(T - T_0) + V(p - p_0) + \sum_{i=1}^N n_i (\mu_i - \mu_0), \quad (2)$$

где E – величина эксергии [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].

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. В обычной повседневной практике слова «энергосбережение, экономия энергии» на самом деле означают экономию эксергии. Эксергию удобно использовать как характеристику качества энергии в тех экономических расчётах, где нужна независимая от экономических факторов оценка потребляемых ресурсов с учётом их качества [4,5].

Эксергия является мерой отклонения параметров состояния термодинамической системы от условий окружающей среды, отражая, таким образом, с одной стороны возможность использования данной термодинамической системы, её ресурсный потенциал, а, с другой стороны – также изменений, которые могут произойти в окружающей среде, её потенциальную экологическую опасность, хотя и без учёта токсикологических и санитарно-гигиенических аспектов возможного воздействия.

Использование эксергетического метода при анализе загрязнения окружающей среды позволяет иначе взглянуть на данную проблему. Все формы негативного воздействия на окружающую среду (химическое, физическое загрязнение) представляют собой сброс эксергии в окружающую среду – потоки (вещественные и энергетические), направленные из системы в окружающую среду (пересекающие контрольную поверхность, границу системы) и обладающие отличной от нуля эксергией.

Для наиболее распространённых в технике систем рассматривают 3 вида возможных взаимодействий с окружающей средой и соответствующие им формы негативного воздействия на неё:

1. термическое (температурный потенциал) – источник вторичного тепла, (вторичный энергоресурс) или теплового загрязнения;
2. деформационное (потенциал – разность давлений) – способность производить работу (контролируемое использование – работа расширения газов в ДВС, пневмосистемы; неконтролируемое – взрыв);
3. химическое (химический потенциал) – ресурс (топливно-энергетический, сырьевой) или источник химического загрязнения.

Принципиальная неоднородность потерь эксергии в системе позволяет записать эксергетический баланс системы следующим образом:

$$E_{\text{вых}} = E_{\text{вх}} - (E_{\text{отх}} + T_0 \Delta S), \quad (3)$$

где $E_{\text{отх}}$ – эксергия отходов (в широком смысле слова), удаляемых в окружающую среду (нецелевой выход системы); эту составляющую потерь иначе можно назвать внешними потерями эксергии;

T_0 – температура окружающей среды [K];

ΔS – приращение энтропии системы между начальным и конечным состоянием;

слагаемое $T_0 \Delta S$ представляет собой внутренние потери эксергии, обусловленные необратимостью реальных процессов, протекающих с ростом энтропии.

Таким образом, степень термодинамического совершенства системы непосредственным образом связана с интенсивностью ее взаимодействия с окружающей средой, выражающейся, с одной стороны, в количестве изымаемых из окружающей среды материальных и энергетических ресурсов (главным образом, невозобновляемых), а, с другой стороны, с интенсивностью поступающих из системы в окружающую среду потоков вещества и энергии (или, с позиции эксергетического анализа, потоков эксергии, представляющих собой внешние потери эксергии) [4, 5].

В связи с особым вниманием, которое уделяется вопросам энергоэффективности и охраны окружающей среды в экономике РФ в целом, в транспортном секторе и на железнодорожном транспорте в частности, эксергетический анализ в своём современном, «расширенном» понимании может быть весьма полезен для эффективного и совместного их исследования, использоваться при принятии управленческих решений, касающихся как существующих, так и планируемых транспортным систем и их элементов, может использоваться не только для ретроспективного анализа, но и для прогнозирования [7].

Эксергия как особый термодинамический потенциал может быть использована для оценки угрозы окружающей природной среде, поскольку определяет работу, которая будет совершена в локальной окружающей среде. Очевидно, чем меньше внешние потери эксергии, тем меньше степень негативного воздействия на окружающую среду.

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 ОС. Введение в практику понятий эксергии, химической энергии и эксергии веществ позволяет учитывать

все виды энергии, включая химическую энергию топлива, сырья и материалов в приходной части, а также продуктов и отходов процесса – расходной, с помощью полного энергетического баланса, построенного на базе 1-го и 2-го начал термодинамики.

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 и эксергетический.

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).

Нормирование выбросов загрязняющих веществ конкретного производства осуществляется на основе оценки соответствия их фактических концентрации в контролируемых зонах компонентов ОС (СЗЗ для воздушного бассейна) значениям предельно допустимой концентрации (ПДК) для каждого ингредиента. Но самое главное, ПДК являются показателями качества ОС, пригодной для существования исключительно человека, а не природы, экосистемы в целом.

Очень важно иметь некоторый показатель кумулятивного воздействия на ОС технологий, предприятий, отраслей, промышленности в целом. Уже давно некоторыми учеными высказывается идея о том, что таким показателем суммарного воздействия на ОС может быть эксергия выбрасываемых в нее потоков энергии и вещества.[3-5] Применение эксергического подхода к решению экологических задач базируется на том, что эксергия – единственное среди физических понятий, в определение которого входят ОС ее параметры.

Эксергия обладает свойством аддитивности, поэтому можно суммировать эксергии всех материальных веществ E_x и тепловых потоков E_q , выбрасываемых во все компоненты ОС – атмосферу, гидросферу, литосферу.

Величина эксергии тепла, отбираемого от горячего источника при постоянной температуре, определяется по выражению

$$e_q = q \left(1 - \frac{T_0}{T_1} \right) \quad (4)$$

где q – тепловая энергия (энтальпия) потока;

T_0 – температура ОС, К;

T_1 – температура горячего источника, К.

В случае переменной температуры:

$$e_q = q - T_0 \int_{T_1}^{T_1'} \frac{dQ}{T} = q - T_0 \Delta S \quad (5)$$

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

Но в научном обществе до сих пор нет единой трактовки понятия химической эксергии вещества, что осложняет его использование. Также с использованием этого понятия не удастся оценить негативное воздействие на ОС химически нейтральных (обесцененных) веществ, например, парниковых газов.

В [2] для преодоления вышеназванных проблем, в качестве показателя негативного влияния выбросов такого рода (парниковые газы) предлагается использовать минимальную работу (эксергию), необходимую для снижения концентрации рассматриваемого ингредиента в выбросах технического объекта до значения допустимой концентрации, принятой в том или ином компоненте ОС. Эта величина может быть определена по выражению:

$$E_k = nRT_0 \ln(z_{iB}/z_i^*) \quad (6)$$

где R – газовая постоянная, Дж/моль·гр;

T_0 – температура ОС, К;

z_{iB} – молярная концентрация компонента в выбросах;

z_i^* – допустимая (нормативная) молярная концентрация ингредиента в компонентах ОС;

n – число молей компонента в выбросах.

Таким образом, выбросы эксергии в ОС следует определять, как сумму трех составляющих:

$$E_{\text{сум}} = \sum E_q + \sum E_x + \sum E_k \quad (7)$$

Такой подход позволяет учитывать негативное воздействие любого технического объекта, их совокупности в конкретном регионе как на основе модели локальной ОС, так и на модели глобальной ОС.

Эксергия является термодинамическим потенциалом особого вида, связанным с параметрами окружающей среды. Получив значения эксергий для различных видов энергии, можно перейти к составлению эксергетических балансов для системы и отдельных ее элементов, расчету эксергетических

КПД, определению относительных и абсолютных потерь эксергии в них, что позволяет наметить основные пути совершенствования как отдельных элементов, так и в целом системы.

Также возможности эксергетического анализа для повышения эффективности использования топливно-энергетических ресурсов создают предпосылки для управления еще одним важным экологическим аспектом – выбросами парниковых газов. Изменение климата стало одной из самых важных проблем, стоящих перед народами, правительствами, бизнесом и гражданами в последние годы. Изменение климата влияет как на людей, так на природные системы и может привести к значительным изменениям в использовании ресурсов, производстве и экономической деятельности. Разрабатываются и реализуются международные, региональные, национальные и местные способы ограничения содержания парниковых газов (далее — ПГ) в атмосфере Земли, в основе которых лежит их количественное определение, мониторинг, отчетность и верификация выбросов и/или удаления ПГ.

Изменение климата было идентифицировано как одна из самых значительных проблем, стоящих перед странами, правительствами, деловыми кругами и населением на предстоящие десятилетия. Изменение климата чревато серьезными последствиями как для человеческих, так и для природных систем и может привести к значительным изменениям в использовании ресурсов, производстве и экономической деятельности. В ответ на это разрабатываются и внедряются международные, региональные, национальные и локальные инициативы по ограничению концентраций парниковых газов (ПГ) в атмосфере земли. Такие инициативы по ограничению концентрации ПГ основываются на количественном определении, мониторинге, отчетности и верификации выбросов ПГ и/или их устранении.

Согласно ГОСТ Р ИСО 14064-1, организация может состоять из одного или большего числа производственных объектов. Выбросы или удаление ПГ на уровне производственного объекта могут происходить из одного или большего числа источников или поглотителей. Связь между источниками, поглотителями ПГ и производственными объектами представлена на рисунке 1.

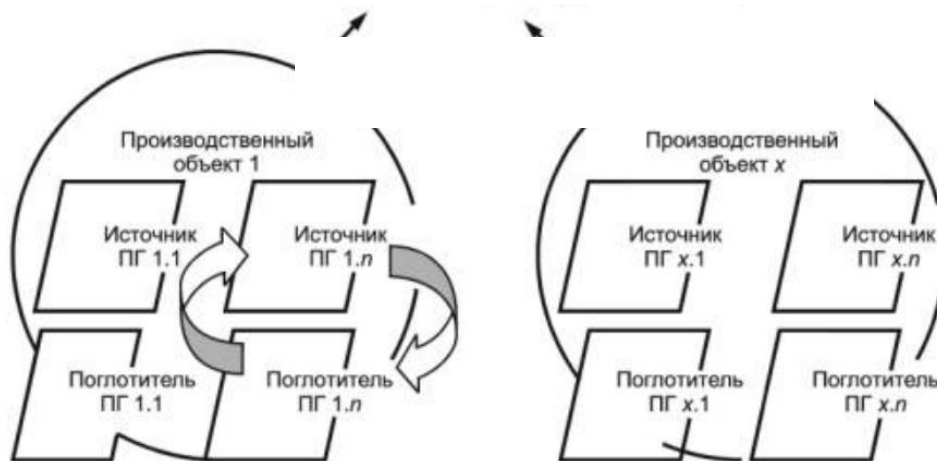


Рис. 1. Взаимосвязь между источниками, поглотителями ПГ и производственными объектами

Организация должна консолидировать выбросы и удаление ПГ на производственных объектах с помощью одного из следующих подходов:

- а) управление: организация отвечает за все количественно определенные выбросы и/или удаление ПГ с производственного объекта, который выбрасывает или поглощает ПГ на данном объектом, любым образом,
- б) распределенная доля (в акциях): организация отвечает за свою долю выбросов и/или удаления ПГ с производственных объектов.

Значение образующейся при сжигании органического топлива эмиссии парниковых газов (их массы) может быть представлено следующим образом:

$$G_{ПГ,i} = \frac{E_{вых,цел.}}{e_T \cdot \eta_e} \cdot KЭ_{i,j} \cdot ПП_i, \quad (8)$$

где $E_{вых,цел.}$ – значение целевого выхода системы, выраженное в единицах эксергии;

e_T – удельная химическая эксергия топлива, приведенная к единице его массы;

η_e – эксергетический КПД системы, отражающий с позиций термодинамики эффективность преобразования входа системы в целевой выход.

Как видно из (8), значение эмиссии парниковых газов обратно пропорционально эксергетическому КПД системы η_e , что свидетельствует о необходимости повышения значения η_e для сокращения объемов используемого топлива и выбрасываемых в атмосферу парниковых газов.

Если анализируемая система может быть представлена в виде последовательности элементов, характеризующих собственными значениями эксергетических КПД, можно записать значение эмиссии парниковых газов, относящейся к «цепочке» элементов от q -го до k -го:

$$g_{ПГ,k} = \frac{E_{вых,цел}}{e_{топл.}} \cdot \frac{1}{\prod_{n=q}^k \eta_{e,n}} = \frac{E_{вых,цел}}{e_{топл.}} \cdot \delta, \quad (9)$$

где $\eta_{e,n}$ – эксергетический КПД текущего n -го элемента из последовательности элементов от q -го до k -го;

δ – коэффициент преобразования эксергии.

Аналогично тому, как изменяется удельный вклад потерь эксергии в отдельных элементах в общую величину потерь в системе, по мере удаления от начала «цепочки» увеличивается значение удельной дополнительной эмиссии парниковых газов, приходящейся на единицу потерь эксергии в отдельном элементе.

Применение наилучших доступных технологий приведет для внедряющих их конкретных производств к повышению качества продукции, снижению ее себестоимости, увеличению удельного объема выпуска продукции за счет мер по энерго- и ресурсосбережению.

На рисунке 2 представлена предлагаемая последовательность осуществления организацией мероприятий экологического менеджмента по снижению выбросов и повышению удалений парниковых газов.



Рис. 2. Последовательность этапов экологического менеджмента в области снижения выбросов парниковых газов

В целом для принятия обоснованных решений по управлению экологическими аспектами и снижению экологических рисков с учетом не только экологической, но также технологической и экономической составляющей, в рамках научно-методического обеспечения СЭМ может быть рекомендовано использование эксерго-экономического анализа, позволяющего количественно оценить и сопоставить качественно различные виды энергии (имеющие различную эксергию), определить минимально необходимые и фактические энергетические затраты технологических процессов, выявить нерациональные затраты, оценить экономические последствия и экологическое влияние разрабатываемых энергосберегающих мероприятий [6].

Список литературы

1. *Yoshihiko Soeno, Hiromitsu Ino, Kiiti Siratori and Kohmei Halada. Exergy Analysis to Evaluate Integrated Environmental Impacts/ The Japan Institute of Metals, 2003.*
2. *Степанов В.С., Степанова Т.Б. Совместное исследование термодинамической эффективности и экологичности технических объектов. Экология и рациональное природопользование, № 7, 2010. С. 124-130.*
3. *Степанов В.С., Степанова Т.Б. Определение эффективности использования энергии в транспортных системах на основе энергетического и эксергетического КПД (на примере трубопроводного транспорта). Изд-во «Наука. Сибирская издательская фирма РАН», 1994. С. 126-132.*
4. *Шаргут Я., Петела Р. Эксергия М.: Энергия, 1968. С. 279.*
5. *Бродянский В., Фратшер В., Михалик К. Эксергетический метод и его приложение. М.: Энергоатомиздат, 1988. С. 288.*
6. *Оценка экономической эффективности природоохранных мероприятий методом реальных опционов на примере ПАО «Газпром» /Электронный архив Национального исследовательского Томского политехнического университета. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/33721/1/TPU249465.pdf>/ (дата обращения: 19.04.2018).*
7. *Оценка энерго-экологической эффективности. Попов В.Г., Сухов Ф.И., Боровков Ю.Н. / Мир транспорта. № 3, 2012.*