

ЭКСЕРГИЯ КАК ЕДИНАЯ МЕРА

В статье рассматривается понятие эксергии и ее применимость к различным областям человеческой деятельности.

Ключевые слова: термодинамический анализ, приложения эксергетического метода.

Основы учения об эксергии были заложены еще в первой половине XIX века в работах, которые впоследствии стали основой классической термодинамики. Однако первым, кто четко определил термодинамическую функцию «доступной энергии», стал У. Гиббс [1]. Независимо от него в 1889 г. француз Ж. Гюи [2], а в 1898 г. словак А. Стодола [3] ввели понятие «пригодной для использования энергии» и дали ему математическое описание в виде разности энтальпии и произведения изменения энтропии на температуру окружающей среды. Идеи Ж. Гюи нашли отражение в работах многих ученых, в том числе Максвелла и Лоренца.

В XX в. учение об эксергии получило развитие благодаря целой плеяде ученых. Здесь следует отметить хорватского исследователя Ф. Бошняковича, заложившего основы немецкой школы прикладной и теоретической термодинамики. В своих статьях он подчеркивал важность изучения «доступной энергии» У. Гиббса, которую называл «рабочим потенциалом». Ф. Бошнякович впервые составил баланс работоспособности и дал графическую интерпретацию максимальной работоспособности и потерь, связанных с необратимостью изменений. В 1953 г. Зоран Рант предложил использовать термин «эксергия» (от греч. *ex* – внешний, *ergos* – работа) для обозначения технической работоспособности [4].

На сегодняшний день под эксергией термодинамической системы понимают максимальную полезную работу, которую теоретически может эта система совершить в обратимом процессе, в течение которого она взаимодействует с окружающей средой, если в конце данного процесса она приходит с ней в состояние термодинамического равновесия.

В математической форме эксергия может быть представлена следующим образом [6-8]

$$E = U + p_0V - T_0S - \sum_i \mu_{i0}n_i, \quad (1)$$

где U, V, S, n_i - внутренняя энергия, объем, энтропия и количество вещества в молях – это «экстенсивные» параметры системы (т.е. их значения изме-

няются вместе с ее размерами); а p_0 , T_0 , μ_{i0} - давление, температура и химический потенциал i -того элемента в состоянии равновесия его с окружающей средой – это «интенсивные» параметры системы.

Таким образом, эксергия показывает, насколько состояние системы отличается от равновесного с окружающей средой. Это определяет использование данной функции в самых различных областях научных исследований.

В теплофизических процессах часто используют физическую или термомеханическую эксергию, которая является результатом несовпадения температуры и давления рассматриваемого вещества с температурой T_0 и давлением p_0 окружающей среды, которая определяется выражением [5]

$$E = I_1 - I_2 T_0 (S_1 - S_2), \quad (2)$$

где I_1, S_1, I_2, S_2 - энтальпия и энтропия вещества в начальном и конечном состояниях.

Если же вещество имеет химический состав, отличающийся от состава распространенных компонентов окружающей среды и проявляющийся в виде химических веществ или их концентрации, то в таком случае необходимо определять химическую эксергию по формуле [7-8]

$$E = n \left[\mu^0 \mu_0^0 + RT_0 \ln \frac{c}{c_0} \right], \quad (3)$$

где n – количество вещества, μ^0 - химический потенциал вещества при нормальных условиях, μ_0^0 - химический потенциал вещества в окружающей среде, R – универсальная газовая постоянная, c, c_0 - концентрации вещества при нормальных условиях и в окружающей среде. При этом предполагают, что температура и давление вещества и окружающей среды равны.

Потери за счет необратимости протекания процессов проявляются вследствие конечных разностей температур и концентраций при массо- и теплообмене, смешения неравновесных потоков, гидравлического сопротивления и т.д. Снижение внутренних потерь путем уменьшения термодинамической необратимости процессов связано с уменьшением их движущей силы, а следовательно, с ухудшением их технологических показателей (снижение выхода полезного продукта при химической реакции, степени извлечения компонента при его выделении из смеси и т.п.). Это противоречие является основой для термодинамической оптимизации, цель которой сводится к минимизации энергозатрат. Основу такой оптимизации составляет эксергетический метод, поскольку он позволяет выразить в одинако-

вых единицах (через эксергию) энергетическую ценность потоков энергии и вещества и учесть не только их количество, но и «качество» [9].

Понятие эксергии тесно взаимосвязано с определением энергии. Следовательно, первая может послужить оценкой последней. Формы существования энергии различны, причем одни виды энергии могут быть преобразованы в другие. Однако существуют некоторые ограничения, так как способность преобразования различных видов энергии неодинакова. Эта способность определяет так называемое качество энергии (т.е. теоретическую возможность ее превращения в механическую работу), которое описывается посредством понятия энтропии. Чем больше энтропия, тем, соответственно, ниже «качество» энергии. Поэтому эксергия позволяет охарактеризовать энергию и энтропию одновременно.

Аналогично энергии оценивается и «качество» различных материалов. Самая чистая форма вещества содержит составляющие, энтропия которых практически равна нулю. Смеси имеют большую энтропию, а, значит, меньшее «качество», которое уменьшается по мере увеличения количества примесей. Следовательно, с помощью эксергии можно дать характеристику различным видам ресурсов. Например, эксергия так называемых источников энергии сравнима с их энергетической ценностью. Полезные ископаемые (к примеру, руды) имеют меньшую эксергию, однако ее увеличивают путем обогащения и удаления ненужных примесей за счет подвода термомеханической и химической эксергии. Еще меньшей эксергией обладают минералы. Таким образом, все виды природных ресурсов независимо от их происхождения, количества и месторасположения можно оценить посредством единой величины – эксергии.

В современных расчетах понятие эксергии используется для интенсификации лесного и сельского хозяйства. Здесь под эксергией понимают долю поглощенной солнечной энергии, идущую на продуктивность и транспирацию (испарение воды растением). Эксергия (E_x), оценивается по формуле [10]:

$$E_x = E^{out} \left[K + 1n \left(\frac{E^{out}}{E^{in}} \right) \right] + R, \quad (4)$$

где E^{in} – суммарный приход энергии, E^{out} – суммарная отраженная энергия, R – суммарная поглощенная энергия, K – энтропия Кульбака (степень отклонения реального спектра поглощения от равновесного).

Для оценки непосредственных затрат энергии на продукцию можно

использовать соотношение отраженной энергии в красном и ближнем инфракрасном диапазонах, лежащее в основе расчета распространенного индекса NDVI, который тесно связан с чистой первичной продукцией [11; 12].

Еще одним из перспективных направлений является применение учения об эксергии по отношению к информационно-измерительным системам. Если их рассматривать с элементарной точки зрения они, как и термодинамические, состоят из большого количества элементов - битов информации. Поэтому для их описания прибегают к статистическим методам. Чем больше система отклоняется от равновесия, тем больше информации необходимо для ее описания [13]. Следовательно, многие отношения, используемые в термодинамике, справедливы и для статистической механики, и для теории информации. Информационные системы, как физические и химические, описывают с помощью вероятности, энтропии, эксергии и других величин. Объем информации в системе ограничивается значением ее эксергии. В этом случае справедливо отношение [6-8]

$$E = k'T_0I, \quad (5)$$

где $k'T_0 \approx 2,9 \cdot 10^{-21}$ Дж – это величина эксергии, отнесенная к 1 бит информации при температуре окружающей среды T_0 , $k' = k \ln 2$. k – постоянная Больцмана, I – информационная емкость. Важно отметить, что информация выступает в качестве меры порядка или структуры и является фундаментальной понятием наряду с энергией и веществом.

При рассмотрении сложных технологических комплексов одним из важных параметров является показатель надежности системы. Понятие надежность включает в себя (в зависимости от назначения объекта и условий его эксплуатации) такие свойства, как безотказность, работоспособность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость работоспособности или сочетание этих свойств объекта. Для конкретных объектов и условий их эксплуатации эти свойства могут иметь различную относительную значимость.

Работоспособность системы может быть полной или частичной. Полностью работоспособный объект обеспечивает в определенных условиях максимальную эффективность его применения. Эффективность применения в тех же условиях частично работоспособного объекта меньше максимально возможной, но значения ее показателей при этом еще находятся в пределах, установленных для такого функционирования, которое считается нормальным. Частично неработоспособный объект

может функционировать, но уровень эффективности при этом ниже допускаемого. Полностью неработоспособный объект применять по назначению невозможно. Понятия частичной работоспособности и частичной неработоспособности применяют главным образом к «сложным» системам, для которых характерна возможность нахождения в нескольких состояниях. Эти состояния различаются уровнями эффективности функционирования системы [14].

Введение в систему эксергетических показателей такого параметра как надежность системы позволит на наш взгляд, более полно определять работоспособность системы. В качестве примера можно взять две трубы при прочих равных условиях, но у одной надежность будет 0,6 (в условных единицах), а у другой 0,99. В таком случае интуитивно мы можем сказать, что среда, транспортируемая первой трубой (0,6), будет иметь эксергию (работоспособность) меньше, чем во второй трубе (0,99). Будет ли эта разность эксергий пропорциональна разности показателей надежности сказать однозначно нельзя.

В инженерии эксергия служит для оценки уровня вмешательства в окружающую среду, т.е. затрагивается социально-политический аспект эксергетического анализа. Человеческая деятельность должна осуществляться с позиции наименьшего вмешательства в окружающую среду. Любое использование ресурсов и выброс отработанных продуктов оказывает значительное влияние на природу. Это влияние соотносится с содержащимся в них количеством эксергии. Представив потоки эксергии в виде диаграмм, можно оценить уровень вмешательства в окружающую среду и определить наиболее приоритетные направления развития.

Именно эксергетические потоки являются своеобразным природным «двигателем», который управляет перемещением потоков вещества и энергии между различными системами, присутствующими на нашей планете. Иными словами, эксергия выступает в качестве ведущей силы, обеспечивающей их существование и постоянное развитие. При этом источник эксергии можно считать неисчерпаемым, поскольку весь ее объем, получают посредством излучения, идущего от Солнца. Лишь небольшой ее объем используется непосредственно на нагревание, выработку электричества с помощью солнечных электростанций, а также на обеспечение циркуляции вещества в атмосфере и гидросфере (приливы и отливы, ветровые потоки), на которой также основывается выработка электроэнергии на ветровых и гидравлических электростанциях.

Что касается биосферы, то именно здесь эксергия используется наи-

более рационально. Зеленые растения усваивают эксергию солнечного излучения и посредством нее осуществляют процессы фотосинтеза, имеющие химическую природу. Таким образом осуществляется преобразование одного вида эксергии в другой. Перенос веществ, образующихся в результате фотосинтеза, в трофических цепях сопровождается потреблением эксергии. Последнее звено любой пищевой цепочки представлено организмами - редуцентами, которые являются своеобразными «разрушителями». Те же вещества, которые ими не могут быть переработаны, формируют залежи полезных ископаемых, к примеру, угля или нефти. Таким образом, живое вещество и остатки органического происхождения на нашей планете представляют собой различные формы запасаания эксергии. Все потребности в биологических продуктах человечество удовлетворяет именно благодаря этому источнику.

В статье [15] приводится высказывание В.И. Вернадского: «Мы не имеем еще общей единицы для количественного сравнения всех естественных производительных сил, или, вернее, мы не умеем свести их к этой единице, не можем одной единицей, например, выразить добычу металла и горючего. А между тем необходимо и возможно свести к единой единице все; только при этом условии можно подойти к полному количественному анализу той потенциальной энергии страны, которая может дать удобное для жизни представление о пределах заключающегося в данной стране природного богатства. Только при этом условии можно подойти к энергетической картине окружающей человека природы с точки зрения его жизни». В этой фразе, сказанной еще в 1928 г., заключается основная идея: невозможно комплексно подходить к решению насущных проблем, будь то экономические или экологические, не имея обобщенной «единицы измерения».

Попытки введения такой единицы, применимой к оценке ресурсов различной природы происхождения, чаще всего основывались на использовании таких фундаментальных понятий, как энергия и вещество, которые составляют понятийное ядро любой науки. Однако здесь вступают в силу некоторые ограничения, обусловленные действием основных законов природы. Понятие природного ресурса уже само собой подразумевает что-то, что может быть израсходовано или уничтожено, поэтому использование вещества в качестве меры чего-либо становится неприемлемым, поскольку, согласно одному из законов, вещество не исчезает и не появляется, его общее количество неизменно. В природе происходит его постоянный круговорот, когда из одного состояния оно переходит в другое. Все эти процессы характеризуются не только потоками вещества, но

энергии. Часто при их описании используют выражения «потери энергии», «тепловые потери», «расход энергии», что с точки зрения термодинамики является некорректным: ведь это противоречит ее первому закону сохранения. Следовательно, и энергия не может выступать в качестве «единой единицы».

Возникает тупиковая ситуация, выход из которой был найден посредством введения новой величины – эксергии. На первый взгляд эксергетический метод оценки основывается на рассмотрении энергетических потоков. Однако важно учесть, что они исследуются в плане «пригодности» или применимости, т.е. в расчет берется та их часть, которая может быть использована для совершения работы.

Очевидной становится тесная взаимосвязь учения об эксергии с классической термодинамикой, которая выступает в качестве своеобразной базы для «единой единицы». Здесь наряду с понятиями энергии и вещества фундаментальным является и понятие энтропии. Именно оно является ключевым в трактовке второго закона термодинамики и именно энтропия определяет не только направление всех естественных процессов (в сторону ее увеличения), но предопределяет саму возможность их осуществления. Важными представляются и другие энергетические характеристики, в частности, введенные У. Гиббсом термодинамические потенциалы, изменения которых в заданных условиях определяют для данного вещества величину максимальной работы (если она производилась) или минимальной (если ее нужно было затратить). Один из этих потенциалов показывал работу в условиях взаимодействия с окружающей средой. Это как раз то, что необходимо для оценки любого природного ресурса и создания некоей модели «абсолютного ресурса».

Таким образом, эксергия предстает своеобразным мерилom «качества» любого вещества или потока энергии и, следовательно, представляет возможность их практического использования, что определяет решение «задачи Вернадского». Дав оценку разнообразным природным ресурсам можно количественно проанализировать потенциал любой страны, что позволит наметить приоритетные направления развития и эффективно решать насущные проблемы.

Источники

1. Gibbs J.W., A method of geometrical representation of thermodynamic properties of substances by means of surface, Trans. Conn. Acad. II (1873) 382-404; The Collected Works, Yale University Press 1 (1928).
2. Gouy G., About available energy, J. Physique II 8 (1889) 501-518 (in French).
3. Stodola A., The cyclic processes of the gas engine, Z. VDI 32 (1898) 1086-1091 (in German).

4. Rant Z., Exergie, ein neues Wort für 'technische Arbeitsfähigkeit' (Exergy, a New Word for Technical Available Work), Forschungen im Ingenieurwesen 22 (1956) 36-37.
5. Я.Шаргут, Р.Петела. «Эксергия», Москва, издательство «Энергия», 1968 г.
6. Wall G., Exergy—a useful concept within resource accounting, Institute of Theoretical Physics, Göteborg, Report No. 77-42, 1977, 58 p., ISBN 99-1767571-X and 99-0342612-7.
7. Wall G., Gong M., On exergy and sustainable development—Part 1: Conditions and concepts, exergy, Internat. J. 1 (3) (2001), 18 p.
8. G. Wall 2009, Exergetics, Bucaramanga 2009 151 p.
9. Плотников В.В., Карпеев С.В. Использование химической эксергии при анализе химикотехнологических схем // Материалы докладов Международной научно-технической конференции «Энергетика-2008: инновации, решения, перспективы»// В 5 кн. Кн.1 «Теплоэнергетика». Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2008.
10. Jorgensen S.V., Svirezhev Y. M. 2004. Towards a Thermodynamic Theory for Ecological Systems. Elsevier Ltd. The Boulevard, Oxford UK, 369 p.
11. Пузаченко Ю.Г., Санковский А.Г., 2005. Климатическая обусловленность чистой продукции биосферы Известия РАН сер. Географ. 5., С. 14-28
12. Сандлерский Р. Б. Оценка потенциальной биологической продуктивности южно-таежных ландшафтов по данным дистанционного зондирования // Труды Международной школы-конференции «Ландшафтное планирование. Общие основания. Методология. Технология» С. 1-6
13. L. Brillouin, Science and Information Theory, 2nd ed., Academic Press, New York, 1962.
14. Надежность технических систем: Справочник /Ю.К. Беляев, В.А. Богатырев, В.В. Болотин и др.; Под ред. И. А. Ушакова. М.: Радио и связь, 1985. 608 с.
15. Бродянский В., Бандура А. 1996. Ресурсы ноосферы и экономика//Энергия № 10, С. 12-24.

Зарегистрирована 08.09.2010 г.