

## ЭКСЕРГЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Веретельник Т.И., к.т.н., доцент

Черкасский государственный технологический университет

*Проведено аналіз сучасних ексергетичних методів дослідження технічних систем і процесів. Запропоновані основні задачі ексергетичного аналізу роботи кавітаційного реактора при очищенні стічних вод.*

*The analysis of modern exergical methods of research of technical systems and processes is made. Primary goals of exergical analysis of cavitation reactor work at sewage purification are offered.*

### Введение

Эксергетический метод термодинамического анализа является новым разделом термодинамики и основан на применении понятия *эксергия* для исследования технических процессов. Этот метод находит широкое применение при анализе теплосиловых и холодильных установок, агрегатов химических и металлургических производств, различных криогенных систем. Развивается также и технико-экономические приложения эксергетического метода [1]. Понятие *эксергия* существенно отличается от понятия энергия. В то время как энергия связана с фундаментальными свойствами материи, эксергия является частным понятием, которое характеризует превратность, пригодность энергии в данных условиях окружающей среды, параметры которой независимы от воздействия рассматриваемой системы [2]. Использование эксергии позволяет решать широкий круг технических и технико-экономических задач на основе единой, логически последовательно построенной термодинамической методики [3].

Важное социальное и экономическое значение имеет техническая задача энергосбережения. Производство и потребление энергии растет с каждым годом в мире, что обусловлено ростом масштабов производства всех хозяйственных отраслей, развитием новых технологий. В этих условиях важную роль играет экономия энергоресурсов. Для создания энергосберегающих технологий и совершенствования энергетического и технологического оборудования нужны критерии качества энергии и эффективности ее использования. Поэтому целью наших исследований является анализ эксергетических методов исследования химико-технологических систем.

### Анализ последних исследований по использованию эксергии

*Эксергия* – свойство термодинамической системы или потока энергии, определяемое (характеризуемое) количеством работы, которое может быть получено внешним приемником энергии при обратном их взаимодействии с окружающей средой до установления полного равновесия [4]. При определении эксергии объект

рассмотрения включает саму систему (или поток энергии), окружающую среду, меру эксергии (работу), отдаваемую внешнему приемнику энергии, и те объекты внешней среды которые могут служить приемником энергии. Термин «эксергия» был введен в 1956 г. югославским ученым З. Рантом [5] по предложению Р. Планка. Он состоит из двух частей: греческого слова *ergon* – работа, сила и приставки *ex*, означающей «из», «вне». Термин соответствует по смыслу обозначаемому понятию и близок к другим родственным терминам – энергия, энтропия, энтальпия.

Следует отметить, что разработка основ эксергетического метода была начата еще во второй половине XIX века профессором университета в Лионе Ж.Гюи, первая работа которого вышла в 1889 г. [1], несколько раньше в 1867 г. Дж. В. Гиббс впервые ввел определение функции, позволяющей найти максимальную работу системы и окружающей среды. Однако уровень техники того времени еще не требовал подробной разработки термодинамического аппарата, основанного на эксергетических функциях.

Дальнейшие шаги в этом направлении сделаны в 1898 А. Стодолой [1], а затем рядом исследователей, среди которых особо следует отметить Д. Кинана, В. Кизома и Ф. Бошняковича [1], работы которых относятся к 1930-м годам. А. Стодола развил идеи своих предшественников применительно к наиболее важным с технической точки зрения, процессам – тем, которые протекают в потоке.

Поэтому введенное им понятие «свободной технической энергии» основано на функции, характеризующей энергию потока рабочего тела – энтальпии  $i$ . Д. Кинан исследовал свойства эксергетической функции  $i-T_0S$ , предложил и построил первую диаграмму для водяного пара с эксергией в качестве ординаты, основываясь на эксергетическом методе, он провел анализ цикла конденсационной электростанции. В. Кизот в 1933 г. впервые применил эксергетические функции для термодинамического анализа низкотемпературных процессов в примере каскадного процесса сжижения азота.

Ф. Бошнякович в своем известном курсе термодинамики [6] подробно исследовал ряд

свойств энергетической функции  $i-T_0S$ , названной им «технической работоспособностью» с широким использованием  $i, S$  – диаграммы состояния. Именно работы Ф. Бошняковича и его школы дали существенный толчок развитию этого направления термодинамики.

Классическое определение эксергии как «максимальной работы, которую может совершить система в обратном процессе с окружающей средой в качестве источника даровых тепла и веществ, если в конце этого процесса все участвующие в нем виды материи приходят в состояние термодинамического равновесия со всеми компонентами окружающей среды», было дано Я. Шаргутом и Р. Петелой [4]. Ими введены понятия эксергии потока вещества, физической эксергии (результат несовпадения температуры и давления системы и окружающей среды), химической эксергии (результат несовпадения химических потенциалов системы и окружающей среды), ядерной эксергии – максимальной работы, которая может быть получена за счет ядерных реакций вещества системы.

Наибольший вклад в последующее развитие методов, использующих понятие эксергии, сделан профессором Московского энергетического института В.М. Бродяским [1-3; 7; 8]. Им, в частности, были предложены понятия эксергии тепла

$$E_Q = Q \left( 1 - \frac{T_0}{T} \right) = \tau_e Q, \quad (1)$$

где  $Q$  – поток тепла и «эксергетической температуры»;

$T_0$  – температура окружающей среды;

$T$  – температура теплового потока;

$$\tau_e = 1 - \frac{T_0}{T} \quad (2)$$

и разработаны методы эксергетического анализа для целого ряда процессов и установок.

К настоящему времени эксергетический анализ, хоть и не стал общепринятым для большинства практических работников, широко применяется в теоретических исследованиях эффективности работы оборудования и установок в самых различных отраслях народного хозяйства: процессов химической технологии [9-13], паросиловых и холодильных установок, процессов сжатия и расширения рабочего тела [14-16], разделения смесей [17-19], излучения, металлургических процессов, сжигания топлива, теплооб-

мена [10; 20-23], обратных и регенеративных циклов, циклов совместного получения тепла и холода, термотрансформаторов, термоэлектрических батарей, выхревых труб [24-26], биотехнологии [27], дисперсных систем [28,29]. Многие авторы отмечают, что эксергетические методы анализа должны стать частью технико-экономических расчетов [1-3, 30-33].

Существенные успехи в развитии эксергетического метода обусловили появление многочисленных работ по применению и развитию для процессов химической технологии с целью создания высокоэффективных энерготехнологических систем. Например, оригинальный и достаточно общий подход был использован при расчете химической энергии нефтяных функций в процессе разделения нефти [34]. Здесь в качестве «окружающей среды» принимался идеальный газ, т.е. гипотетическое вещество состава фракции, лишенное молекулярных связей. Такой подход позволяет определить химическую эксергию как при неизвестном точном химическом составе технологического потока, основываясь только на его физико-химических свойствах, так и для рабочего тела с известным составом.

Понятие эксергии лежит в основе современного эксергетического анализа [1-3], представляющего собой достаточно разработанный аппарат. Эксергетические методы позволяют учесть не только количественные, но и качественные характеристики энергоресурсов, используемых в различных элементах энергетических и технологических установок, а также оценить диссипативные потери в этих элементах и установках в целом и определить эффективность использования энергии.

Эксергетический анализ основан на управлении эксергетического баланса, которое для произвольного числа потоков на входе и выходе рассматриваемого элемента установки (рис. 1) имеет вид

$$\sum E' - (\sum E'' + \Delta E) = \Delta E^*, \quad (3)$$

где  $\sum E'_M, \sum E''_M, \sum E'_Q, \sum E''_Q$  – суммы эксергии потоков вещества и тепла на входе и выходе установки;

$\sum L', \sum L''$  – суммарная работа, совершаемая окружающими телами над системой и системой над окружающими телами;

$\Delta E^*$  – эксергетические потери.

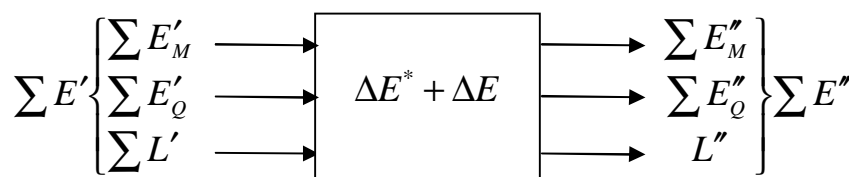


Рис. 1. Потоки эксергии тепла и вещества

Уравнение эксергетического баланса (3) замыкается эксергетическими потерями  $\Delta E^*$ , характеризующими диссипацию энергии, а эффективность установки оценивается величиной эксергетического КПД

$$\eta_e = \frac{\sum E''}{\sum E'}, \quad (4)$$

где  $\sum E''$  – потоки эксергии, определяющие полезный эффект;  $\sum E'$  – потоки эксергии, определяющие затраты.

Эксергетические (энтропические) потери могут быть найдены независимо по формуле Гюи-Стодолы

$$\Delta E^* = T_0 \cdot \Delta_i S, \quad (5)$$

где  $T_0$  – температура окружающей среды;

$\Delta_i S$  – производство энтропии, вызванное необходимостью процессов (диссипативными эффектами), другими словами, это сумма приращений энтропии всех тел, участвующих в процессах реальной химической системы. Величина  $\Delta_i S$  определяется из уравнения баланса энтропии [34], играющего основную роль в термодинамике необратимых процессов.

Недостатком такого подхода является то обстоятельство, что процессы, проходящие внутри системы, не конкретизируются, и поэтому детальные механизмы процессов диссипации не учитываются – метод определяет только интегральный эффект, хотя может быть применен и к отдельному процессу, если его удастся выделить из всей совокупности процессов, происходящих в системе.

Для развития проблем энергосбережения требуется существенная интенсификация различных технологических процессов. Один из путей решения этой задачи связан с использованием гетерогенных сред. Развитие поверхности межфазного взаимодействия, высокие значения коэффициентов переноса энергии и вещества в таких системах позволяют существенно интенсифицировать многие технологические процессы.

Огромный опыт накоплен в области техники псевдоожидания [35]: термическая и химико-термическая обработка материалов, катализ, сушка, сжигание различных видов топлива и т.д. В энергетике актуальна проблема повышения эффективности энергоустановок, снижения расхода топлива, энергии и тепла. При решении этих задач также используются дисперсные рабочие тела.

В настоящее время предложено большое количество физических и математических моделей процессов в гетерогенных средах, обобщающих огромный экспериментальный материал, и разработаны инженерные методики, позволяющие осуществлять инженерное оформление технологий.

Построение гидромеханики гетерогенных систем связано с серьезными трудностями, что обусловлено многообразием и сложностью эффектов, которые могут сопровождать движения фаз: силовые и тепловое взаимодействие, пульсационные движение частиц и сплошной среды, массообмен, химические реакции, фазовые переходы и т.д.

В дальнейших исследованиях предполагается решить такие *основные задачи эксергетического анализа работы кавитационного реактора*:

- составить эксергетическое уравнение баланса химико-технической системы (кавитационного реактора);
- рассмотреть термодинамическую диаграмму состояния эксергия-энтальпия и изучить ее свойства;
- впервые рассмотреть КПД химико-технической системы (кавитационного реактора) на основе термодинамики необратимых процессов;
- развить эксергетический метод для процессов кавитационной технологии с целью создания высокоэнерготехнологических систем.

### Выводы

Из анализа научно-технической литературы следует, что методы эксергетического анализа на основе неравновесной термодинамики являются эффективны и перспективны и могут быть использованы при исследовании кавитационной технологии в гетерогенных системах.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Бродянский В.М. Эксергетический метод термодинамического анализа. – М.: Энергия, 1973. – 296 с.
2. Бродянский В., Фратшер В., Михалек К. Эксергетический метод и его приложения. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 286 с.
3. Эксергетические расчеты технических систем: Справочное пособие / Под ред. акад. А.А. Дольникого; авторы Бродянский В.М. и др. – К.: Наукова думка, 1991. – 360 с.
4. Шаргут Я., Петела Р. Эксергия. – М.: Энергия, 1968. – 280 с.
5. Rantz. Bewertung und Praktische Verrechnung von Energien // Allg. Warmetechnik. – 1957. – Vol. 8, №2. – P. 25-32.
6. Бродянский В.М. Вечный двигатель – прежде и теперь. – М.: Физмалит, 2001. – 260 с.
7. Бошнякович Ф. Техническая термодинамика. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1956. – Т. 2. – 372 с.
8. Бродянский В.М. Об эксергетической температурной шкале // Изв. вузов. Энергетика. – 1964. – №5. – С. 65-72.
9. Сажин Б.С., Булеков А.П. Эксергетический метод в химической технологии. – М.: Химия, 1992. – 208 с.

10. Сорин М.В., Бродянский В.М., Лейтес И.Л. Выбор оптимальной структуры теплообменных систем химических производств // Химическая промышленность. – 1987. – №8. – С. 466-471.
11. Rantz Z. Thermodynamic evaluation of chemical processes // Chem. – Ind. – Tech. – 1969. – 41, №16. – P. 891 – 898.
12. Степанов В.С. Химическая энергия и эксергия веществ. – Новосибирск: Изд-во “Наука”. Сибирское отделение, 1985. – 104 с.
13. Степанов В.С., Степанова Т.Б. Оценка энергетического потенциала топлив по их химической энергии и эксергии // Изв. вузов. Энергетика. – 1994. – №1-2. – С. 95-98.
14. Андриющенко А.И. Основы технической термодинамики реальных процессов. – М.: Высшая школа, 1975. – 264с.
15. Гохштейн Д.П., Верхивкор Г.П. Анализ тепловых схем атомных электростанций. Киев.: Высшая школа. – 1977. – 240с.
16. Ильин Р.А. Термодинамический анализ эффективности комбинированных теплоэнергетических технологий (в промышленной теплоэнергетике): автореф. дис. ... канд. техн. наук / Астрах. ГТУ. – Астрахань, 2004. – 21с.
17. Британ И.М., Голубев И.Ф. Эксергетический анализ процесса мембранного разделения газовых смесей // Химическая промышленность. – 1987. – №8. – С. 462-466.
18. Калинина Е.И., Бродянский В.М. Технико-экономический анализ систем разделения газовых смесей. – М.: Изд-во МЭИ, 1979. – 69 с.
19. Бродянский В.М. Энергетика и экономика комплексного разделения воздуха. – М.: Metallurgia, 1966. – 174 с.
20. Шаргут Я. Теплоэнергетика в металлургии. – М.: Metallurgia, 1976. – 151 с.
21. Вукович Л.К., Никульшин В.Р. Эксерготопологическое моделирование сложных систем теплообменников // Промышленная теплотехника. – 1980. – №2. – С. 52-60.
22. Bejan A. General criterion for rating heat-exchanger performance // Int. J. Heat and Mass Transfer. – 1978. – Vol. 21. – P. 655-672.
23. Андреев Л.П., Костенко Г.М. Эксергетические характеристики эффективности теплообменных аппаратов // Изв. вузов. Энергетика. – 1982. – №3. – С. 77-82.
24. Бродянский В.М. Комбинированные процессы в холодильной технике и второе начало термодинамики // Холодил. техника. – 1971. – №8. – С. 36-40.
25. Соколов В.Я., Бродянский В.М. Энергетические основы трансформации тепла и процессов охлаждения. – М.: Энергоиздат, 1981. – 320 с.
26. Нестеров Б.П., Коровин Н.В., Бродянский В.М. Термодинамический анализ процессов сжижения газов // Инж.-физ. журн. – 1963. – Т. 5, №7. – С. 36-42.
27. Биотехнология. Принципы и применения / Под ред. И. Хиггинса, Д. Беста, Д. Джонса. – М.: Мир, 1988. – 480 с.
28. Левшаков А.М. Эксергетический баланс для полидисперсных потоков газозвеси // Изв. вузов. Энергетика. – 1979. – №1. – С. 123-126.
29. Ясников Г.П. Процессы переноса в гетерогенных системах с фазовыми и химическими превращениями: Автореф. дис. ... докт. ф-м. наук / УПИ. – Свердловск, 1982. – 42 с.
30. Evans R.B., El-Sayed Y.V. Thermoeconomics and the design of heat systems // Trans. ASME., J. Eng. Power, 1970. – Vol. 92. – P. 27-35.
31. Калинина Е.И., Бродянский В.М. Основные положения методики термодинамического анализа комплексных процессов // Изв. вузов. Энергетика. – 1977. – №12. – С. 57-64.
32. London A.L. Economics and the second law: an engineering view and methodology // Int. J. Heat Mass Transfer. – 1982. – Vol. 25, №6. – P. 743-751.
33. Ноздренко Г.В. Алгоритм расчета стандартной стоимости единицы продукции электростанции на основе эксергетического анализа // Журнал прикладной физики. – 1989. – Т. 3, №1. – С. 166-172.
34. Гохштейн Д.П. Энтропийный метод расчета энергетических потерь. – М.-Л.: ГЭИ, 1963. – 112 с.
35. Псевдооживление / Под ред. В.Г. Айштейна и А.П. Баскакова. – М.: Химия, 1991. – 400 с.

*Рецензент д.т.н., проф. Ващенко В.А.*

**Веретільник Т.І.**, к.т.н, доцент, завідувач кафедри механіки і поліграфічних машин, декан факультету перепідготовки фахівців Черкаського державного технологічного університету.