

ЭКСЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К АНАЛИЗУ ТЕХНОЛОГИЙ ПЕРЕРАБОТКИ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В 1889 г. Луи Жорж Гюи ввел понятие технической работоспособности — максимальной технической работы, которую может совершить система при переходе из данного состояния в состояние равновесия с окружающей средой, а Аурель Стодола (1898) вывел методику анализа процессов в потоке за пределы чистой теории и применил введенное им понятие свободной технической энтальпии для теплотехнических расчетов. Теорема Гюи — Стодолы утверждает, что потеря энергии в системе за счет неравновесности протекающих в ней процессов равна произведению температуры окружающей среды и изменения энтропии системы. Термин «эксергия» предложен в 1955 г. Зораном Рантом.

Эксергия — предельное (наибольшее или наименьшее) значение энергии, которое может быть полезным образом использовано (получено или затрачено) в термодинамическом процессе с учетом ограничений, накладываемых законами термодинамики; это максимальная работа, которую может совершить система при квазистатическом (бесконечно медленном) переходе из заданного состояния в состояние равновесия с окружающей средой (эксергия процесса положительна), или же минимальная работа, которую необходимо затратить на квазистатический переход системы из состояния равновесия с окружающей средой в заданное состояние (эксергия процесса отрицательна).

Сравнивая эксергию — характеристику идеального квазистатического процесса — с полученной/затраченной в реальном неравновесном процессе энергией, делают вывод о степени термодинамического совершенства процесса.

Для промышленных установок в качестве окружающей среды обычно принимают атмосферный воздух. Для установок, работающих на открытом воздухе, температура которого зависит от времени суток и времени года, необходимо либо выполнять расчеты для различных периодов, либо брать какую-то усредненную температуру окружающей среды.

Основопологающая идея эксергетического анализа заключается в использовании при анализе технических систем помимо энергии дополнительного показателя — эксергии: сравнение фактически совершенной работы с эксергией процесса позволяет судить об эффективности использования энергии. Чем ближе энергетические показатели реального неравновесного процесса к эксергии процесса, тем совершеннее процесс и тем сложнее увеличить его эффективность.

Принято считать, что при выборе основных принципов процесса можно выявить источники 40 % потерь энергии, при проектировании — еще 40 %. Таким образом, примерно на 80 % потерь на этапе производства воздействовать уже невозможно. Именно поэтому эксергетический анализ имеет особенно большое значение на стадиях эскизной проработки и проектирования системы.

Используемые в эксергетическом анализе термины «потеря энергии» и «потеря эксергии» имеют принципиально разное содержание: первый означает невозможность использования энергии для достижения конкретной цели, второй — полное исчезновение эксергии, связанное с рассеянием энергии.

Эксергетический КПД — отношение фактически совершенной работы к ее максимально возможному значению, т. е. к эксергии рассматриваемого процесса. Если обычный энергетический КПД показывает степень полезного использования энергии и позволяет сравнивать по этому показателю, например, тепловые машины, то эксергетический КПД характеризует эффективность использования энергии (термодинамическое совершенство процесса) и отвечает на вопросы о теоретической возможности и практической целесообразности повышения эффективности тепловой машины: сравнительно небольшому значению энергетического КПД может соответствовать близкое к 100 % значение эксергетического КПД, когда дальнейшее повышение энергетического КПД невозможно из-за ограничений, накладываемых законами термодинамики. Значимое отклонение эксергетического КПД от единицы показывает наличие принципиально устранимых потерь эксергии, уменьшение которых возможно при более рациональном проведении процессов и использовании более совершенного оборудования.

Эксергетический КПД применим для анализа совершенства любых термодинамических процессов. Эксергетический КПД равновесных процессов равен 1.

Для описания процесса (как незамкнутого, так и циклического) в открытой или закрытой системе используют эксергию потока энергии (термическую эксергию).

В качестве примера вычисления эксергии рассмотрим процесс извлечения РЗЭ из руды. Здесь стоит отметить, что огромный вклад вносят выбранные граничные условия, описывающие границы рассматриваемой системы. Действительно, содержание РЗЭ в рудах обычно не превышает 6 % (суммарно по всем РЗЭ); учитывая, что энергия, затраченная на переработку руды обычно пропорциональна ее массе, получаем изначально маловыгодную по эксергии систему. Также следует учесть тот факт, что как при выделении РЗЭ (получение концентрата), так и при разделении на отдельные элементы требуется тройной избыток реагентов по сравнению со стехиометрически рассчитанным количеством, плюс на каждом шаге неминуемо присутствуют определенные потери целевого продукта.

Для рассматриваемого случая в качестве основного граничного условия мы принимаем за условные 100 % не общее количество руды, а содержащееся в ней количество РЗЭ. Схематически материальный баланс процесса представлен на рисунке 112.

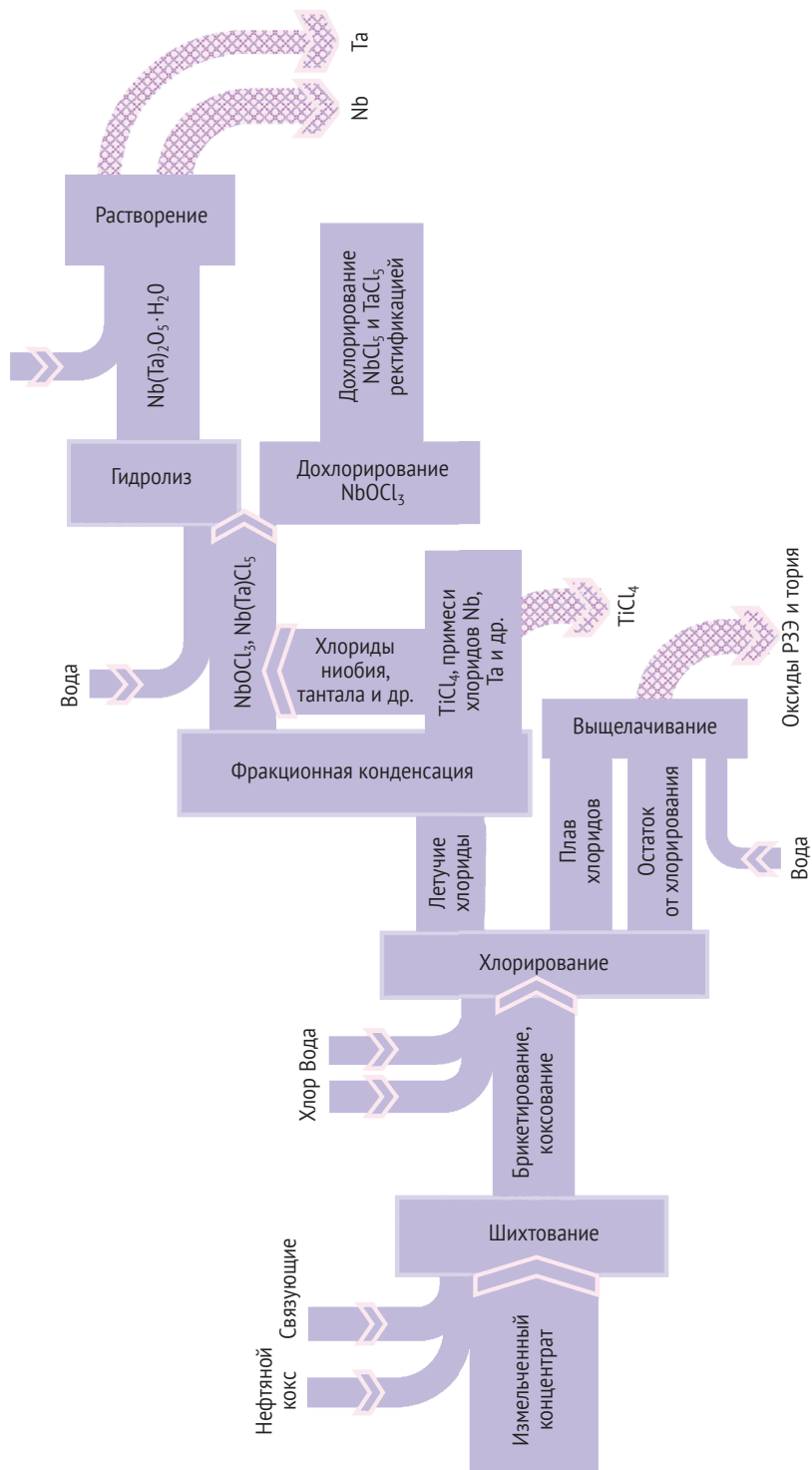


Рис. 112. Диаграмма потоков ресурсов для технологической схемы переработки лопаритового концентрата способом хлорирования производства РЗЭ

Эксергетический анализ показывает неочевидные при балансовом подходе термодинамические резервы повышения эффективности, но при этом требует расчета эксергии всех участвующих потоков и элементов системы.

Классическая термодинамика под эксергией понимает способность рабочего тела производить работу. Оценка эффективности с помощью эксергетического КПД ($\eta_{\text{экс}}$) показывает, какая доля затраченной энергии преобразуется в полезную работу. Однако такая оценка не позволяет судить о том, насколько полно использована эксергия, т. е. о степени термодинамического совершенства преобразования энергии в установке.

При этом эксергетический анализ позволяет судить о термодинамическом совершенстве всей установки и ее частей. В общем случае эксергетический КПД представляет собой отношение полезно усвоенной эксергии к затраченной, т. е. характеризует степень необратимости реальных процессов и циклов, и определяется по формуле:

$$\eta_{\text{экс}} = \frac{E_{\text{пол}}}{E_{\text{затр}}} \cdot 100 = \frac{E_{\text{затр}} - E_{\text{пот}}}{E_{\text{затр}}} \cdot 100.$$

где $\eta_{\text{экс}}$ — эксергетический КПД, %; $E_{\text{пол}}$ — полезно усвоенная эксергия; $E_{\text{затр}}$ — затраченная эксергия; $E_{\text{пот}}$ — потери эксергии.

Условие повышения энергетической эффективности технологического процесса также может быть сформулировано в виде:

$$d\eta_{\text{экс}} / dt < 0,$$

т. е. повышение энергоэффективности происходит при увеличении эксергетического КПД системы.

Несмотря на то что условие повышения энергетической эффективности при эксергетическом анализе формулируется аналогично тепловому КПД, результаты эксергетического анализа дают положительные результаты.

Эксергия природного ресурса характеризует максимальную термодинамическую работу, которая может быть получена посредством технической системы при использовании данного ресурса в условиях взаимодействия с окружающей средой. Таким образом, эксергия характеризует природный ресурс с точки зрения его энергетической ценности. Это, однако, вовсе не означает, что любой природный ресурс должен рассматриваться только как исходный материал или источник производства энергии. Так, эксергетическая оценка ресурсов, используемых в качестве сырья для получения различных веществ и материалов (например, в химической и металлургической промышленности), необходима в первую очередь для термодинамического исследования химических процессов переработки этих ресурсов.

Для оценки разрабатываемых ресурсов применяют различные виды эксергии. Если они представляют собой источники тепла (геотермальные ресурсы,

термоградиенты в океане и т. д.), их можно оценить с помощью термомеханической эксергии или непосредственно с помощью эксергии теплового потока. Для органического топлива или минерального сырья такой расчет ведется с помощью химической эксергии (реакционной или концентрационной).

Как следует из определения эксергии природного ресурса, для расчета этой величины необходимо знать параметры окружающей среды (температуру, давление, химический состав). Поскольку параметры окружающей среды могут варьировать в зависимости от места и времени, эксергия природного ресурса должна рассчитываться локально, применительно к условиям прохождения технологического процесса, в ходе которого этот ресурс используется или перерабатывается. В большинстве случаев изменение параметров окружающей среды мало влияет на эксергию природного ресурса. Поэтому значения эксергии природного ресурса могут быть табулированы с определенной точностью, независимо от параметров окружающей среды.

Однако эксергия природных ресурсов зависит от параметров локальной окружающей среды. В таких случаях уровень отсчета эксергии выбирается согласно следующему правилу: из всех возможных вариантов (в условиях реального окружения технических систем) конечных состояний, достигаемых в результате перевода источника эксергии (в данном случае природного ресурса) в состояние равновесия с локальной окружающей средой, за уровень отсчета принимается то состояние, которое обеспечивает получение максимальной эксергии.

Непосредственное применение уравнений баланса эксергии для оценки термодинамической эффективности отдельных элементов (блоков) действующих технологических систем затруднительно в связи со сложностью расчета слагаемого полной работы \dot{W}^* . В большинстве случаев трудности с расчетом \dot{W}^* можно обойти путем расширения объекта анализа таким образом, чтобы межсистемные тепловые потоки были исключены из баланса эксергии.

Конечно, при указанном расширении объекта анализа из баланса не могут быть исключены потоки теплоты, обусловленные тепловым рассеянием от внешних поверхностей аппарата в окружающую среду. Более того, теплообмен с окружающей средой может являться необходимым элементом технологического процесса (например, при воздушном или водяном охлаждении аппаратов). Но как в том, так и в другом случае теплота или холод, отданные окружающей среде, не создают дополнительной работы. Обусловленные теплообменом с внешней средой потери эксергии автоматически будут учитываться в балансе эксергии диссипативным слагаемым σ_E .

На основании сказанного интегральные уравнения баланса эксергии практически без снижения общности могут быть записаны в более простом виде: для систем, которые производят или потребляют работу (электрическую или механическую):

$$\dot{W} = \sum_j \dot{m}_j e_j + \sigma_E;$$

для многочисленной категории химико-технологических процессов, не сопровождаемых производством или потреблением работы:

$$\sum_j \dot{m}_j e_j = -\sigma_E.$$

К этому необходимо добавить, что тот факт, что мы избавляемся в итоге от явного «присутствия» слагаемого полной работы \dot{W}^* в интегральных уравнениях баланса эксергии, не умаляет значения понятия полной работы в обосновании физического смысла функции эксергии.

Традиционно эксергетический метод анализа технологических процессов строится на использовании условных абсолютных значений эксергии, определенных относительно так называемого «мертвого» состояния вещества, которое характеризуется механическим, тепловым и химическим равновесием с окружающей средой. Но существует и другая возможность, основанная на выражении всех балансовых уравнений через изменения эксергии материальных потоков. Уход от использования абсолютных эксергий избавляет от значительной неопределенности и условности в выборе базового набора химических веществ, символически представляющего окружающую среду, по отношению к которому исчисляется химическая эксергия материальных потоков. Отметим также, что введение коэффициентов преобразования эксергии, основанных на расчете изменений эксергии потоков, освобождает от недоразумений, возникающих при сравнении разных систем по показателям эффективности, основанным на абсолютных значениях эксергии, из-за искажающего влияния вклада так называемой «транзитной» эксергии. Приведем в общем виде коэффициент преобразования эксергии:

$$\eta_e = [\dot{W} + \dot{m}_5(e_4 - e_5)] / [\dot{m}_1 e_1 + \dot{m}_2 e_2 - (\dot{m}_1 + \dot{m}_2) e_5].$$

Здесь \dot{m}_x обозначены питающие массовые потоки (1–3 — вход, 4, 5 — выход), e_x — удельные эксергии соответствующих материальных потоков.

Для процессов, связанных с получением РЗЭ, значения η_e лежат в интервале 35–50%; таким образом, потери эксергии ($-\sigma_E$) составляют для этого вида технологических систем более половины потенциальной работоспособности. Эти потери связаны главным образом с неравновесными условиями протекания химических процессов. Широкий интервал значений η_e обусловлен тем, что установки разных типов, помимо схемных и конструктивных особенностей, различаются соотношением потоков.

Незаменимость термодинамического подхода заключается в выявлении на фундаментальном уровне потенциальных резервов в повышении эффективности использования энергоресурсов. Последовательное углубление эксергетического анализа конкретного производства путем расчета потерь эксергии для каждого индивидуального элемента технологической схемы позволяет определить наиболее «узкие», с позиций энергосбережения, места

схемы и сконцентрировать усилия именно на их устранении. Еще большее значение процедура эксергетического анализа имеет при синтезе новых технологических схем.

Однако в плане практической оптимизации потребления в промышленном производстве эксергетический метод не должен абсолютизироваться и противопоставляться экономическому подходу к тому же вопросу. Хотя эксергетический критерий, в отличие от стоимостных показателей, полностью свободен от влияния рыночной и политической конъюнктуры в ценообразовании, необходимо иметь в виду, что единый энергетический эквивалент основан на применении гипотетических идеальных устройств и процессов, и реальная стоимость эксергии разного происхождения различна.