

В.М. Бродянский

Московский энергетический институт (Технический университет), ул. Красноказарменная, 14, г. Москва, РФ, 111250

ДОСТУПНАЯ ЭНЕРГИЯ ЗЕМЛИ И УСТОЙЧИВОЕ РАЗВИТИЕ СИСТЕМ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ. 1. ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСКУССТВЕННЫХ СИСТЕМ

Статья посвящена анализу развития систем жизнеобеспечения, а также их применению в условиях XXI в. Основная проблема касается использования природных ресурсов, в особенности невозобновляемых, и негативного влияния человеческой цивилизации на окружающую среду. В первой части статьи анализируется понятие универсальной термодинамической единицы — полезной, пригодной для преобразования энергии (эксергии). Показано, что данное понятие позволяет решить две фундаментальные проблемы. Первая — «задача Вернадского» — заключается в объективной оценке всех природных материальных и энергетических ресурсов Земли при помощи универсальных единиц. Вторая — затрагивает подсчёт термодинамической эффективности имеющихся систем жизнеобеспечения и, следовательно, основных возможностей и ограничений развития в этом направлении. Кроме того, представлен качественный и количественный анализ энергетического, энтропийного и эксергетического балансов Земли в отношении возможностей и ограничений использования энергетических и материальных потенциалов планеты в различных системах жизнеобеспечения.

Ключевые слова: Доступная энергия Земли. Системы жизнеобеспечения. Вещество. Энергия. Эксергия. Ресурсы. Экология.

V.M. Brodjansky

AVAILABLE ENERGY OF THE EARTH AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF THE LIFE SUPPORT SYSTEMS. 1. EFFICIENCY OF SYNTHETIC SYSTEMS

This article describes the analysis of developing life support systems and their application in the XXI century. The main problem concerns the use of natural resources, especially non-renewable, and the negative impact of human civilization on the environment. The first part discusses the concept of an universal thermodynamic unit — useful, suitable for transformation of energy (exergy). It is shown that this concept allows us to solve two fundamental problems. The first problem — «the problem of Vernadsky's» — is an objective assessment of all natural material and energy resources of the Earth by means of universal units. The second problem affects the calculation of the thermodynamic efficiency of existing life support systems and, consequently, the main possibilities and limitations of development in this direction. In addition, the presented qualitative and quantitative analysis of the energy, entropy and exergic balances of the Earth with respect to the possibilities and limitations of using energy and material potentials of the planet in various life support systems.

Keyword: Available Earth energy. Life support systems. Substance. Energy. Exergy. Resources. Ecology.

Д.т.н., профессором Московского энергетического института (Технического университета) Виктором Михайловичем Бродянским (1921-2009 гг.) эта статья была написана для «Энциклопедии систем жизнеобеспечения», которая готовилась к публикации ЮНЕСКО. Энциклопедия, состоящая из трёх томов, была издана издательством «EOLSS» на английском языке в 2002 г. Все тома этой энциклопедии в 2005 г. были выпущены Издательским домом «Магистр-Пресс» (г. Москва) на русском. Перевод с русского на английский и обратно искажил в некоторых местах статью В.М. Бродянского. Поэтому русский текст нуждался в основательном редактировании, которое тщательно было выполнено к.т.н., доцентом Национального технического университета Украины (КПИ) П.П. Куделей. Из-за большого объёма статья публикуется в двух выпусках журнала. Она, несомненно, вызовет интерес у читателей.

© В.М. Бродянский

1. ВВЕДЕНИЕ

Развитие мировой экономики в начале XXI в. подвело человечество к необходимости радикально изменить отношение к природным ресурсам. Миновало время, когда окружающую среду можно было рассматривать как неиссякаемый источник сырья и одновременно использовать в качестве мусорной ямы.

Непонимание данного факта ведёт к экологической деградации и снижению пригодности окружающей среды для жизни людей. На протяжении всей истории человечество сталкивалось с этой проблемой в той или иной степени, но сейчас сложилась гораздо более угрожающая ситуация.

«Буферная способность» природы в мировом масштабе достигла предела. Если мы не хотим вернуться «назад в пещеры», необходимо решить одну, но очень сложную проблему. Другими словами, мы должны сделать так, чтобы Земля не потеряла способность поддерживать растущую численность населения при сохранении современного уровня жизни. В противном случае человечество ожидает серьёзные проблемы в самом ближайшем будущем. Нам придется выяснить, что хуже: погибнуть от истощения природных ресурсов или от переполнения мусорных свалок. Естественно, такую перспективу нельзя допустить даже на местном уровне.

Этот «категорический императив» в понимании Иммануила Канта не зависит от идеологических и политических факторов. Все, от учёных и политических лидеров до обывателей, начинают понимать сложившуюся ситуацию (хотя осознание приходит гораздо медленнее, чем ожидалось).

Не стоит забывать, что, согласно данным ООН, население Земли увеличится с 6 млрд. в 2000 г. до 9 млрд. к 2050 г. Важно также учитывать неодинаковый уровень потребления ресурсов в разных частях планеты. В настоящее время большая доля населения Земли, т.е. около 80 %, имеет уровень потребления энергии менее 10 % на человека, что резко контрастирует с положением в развитых странах. Дополнительные сложности могут возникнуть из-за повышения уровня моря, изменения климата, почвенной эрозии, увеличения концентрации вредных газов в атмосфере (таких как CO₂), утончения озонового слоя и т.д.

Эти проблемы нужно решать немедленно. Пользуясь термином, который предложил *П. Тейяр де Шарден* и развил *В. Вернадский* (1928 г.), можно сказать, что сейчас перед нами встала необходимость сохранять и развивать «ноосферу» Земли. Данный термин обозначает совокупность сфер Земли, которые преобразуются в результате деятельности человека. Ноосфера включает неорганический — литосфера, гидросфера, атмосфера и органический компонент — биосфера. Все системы жизнеобеспечения человечества являются неотъемлемыми составляющими обоих компонентов ноосферы. Данный термин понадобится позже при анализе. Термин «системы жизнеобеспечения» означает все природные и созданные человеком системы, которые поддерживают

жизнь и развитие человека.

Функционирование систем жизнеобеспечения затрагивает две формы взаимодействия компонентов ноосферы. Первая относится к потреблению природных ресурсов и рациональным пределам их использования. Вторая определяется способностью окружающей среды поглощать и усваивать выбросы множества систем жизнеобеспечения.

Результаты такого взаимодействия обычно негативно сказываются и на органической, и на неорганической частях ноосферы. Но степень вредного воздействия различается в зависимости от неорганической и органической частей ноосферы.

Судя по анализу потребления неорганических природных ресурсов, сложности могут возникнуть лишь из-за истощения некоторых из них. Но в обозримом будущем, если принять во внимание возможности науки и техники, серьёзных негативных последствий данной ситуации появиться не должно. Органические природные ресурсы вызывают большие опасения, так как истребляются гораздо быстрее, чем возобновляются. Отрицательное воздействие на экологию требует тщательного научного и практического исследования.

Выбросы неорганических отходов загрязняют окружающую среду, что оказывает чрезвычайно опасное влияние на экологию. В ближайшем будущем отрицательное воздействие будет только возрастать. У сопротивляемости ноосферы есть свои пределы.

Основная проблема состоит в следующем: необходимо обеспечить гармоничное развитие ноосферы, учитывая способности Земли его поддерживать. Шаги в данном направлении уже осуществляются. Развитие и применение на практике естественных, технических, экономических наук и экологии даёт положительные результаты. Однако в каждой из этих областей, как правило, применяются различные подходы и методы для решения собственных специфических проблем.

В новой ситуации наряду с этими усилиями требуется комплексный, так называемый «ноосферный подход» ко всем наукам, связанным со взаимодействием систем жизнеобеспечения с окружающей средой. Особенное внимание следует уделить экономике и экологии. В противном случае возникают неразрешимые проблемы. Сложные проблемы нуждаются в комплексном изучении. Например, в отдельно взятом регионе необходимо решить вопрос с энергоснабжением, но из этой частной, казалось бы, ситуации можно извлечь множество потенциальных идей для широкого диапазона различных проблем.

Во-первых, существует несколько видов электростанций (тепловые электростанции, работающие на угле, нефти или атомном топливе, гидроэлектростанции, ветровые электростанции). Во-вторых, при выборе следует учитывать не только уровень спроса на электричество и тепло, но и весь спектр экологических проблем данного региона: загрязнение воздуха, почвы и водоёмов.

Перечисленные выше проблемы являются только

«вершиной айсберга». Извлечение, переработка и транспортировка любого топлива (как и других материалов, необходимых для строительства и функционирования электростанции) неизбежно наносит вред окружающей среде. С точки зрения современной экологии нельзя принимать решение без учёта данных связей. Здесь неуместны чисто денежные, экономические методы.

В данной ситуации возникает необходимость обобщённых количественных характеристик, которые можно использовать при оценке различных природных ресурсов и продуктов их переработки. Такая оценка зависит от всех экономических и политических колебаний. Первым на это обстоятельство обратил внимание в 1928 г. русский учёный В. Вернадский. Он писал: «Мы не имеем ещё общей единицы для количественного сравнения всех естественных производительных сил. Необходимо свести к единой единице всё, только при этом условии можно подойти к энергетической картине окружающей человека природы с точки зрения обеспечения жизни».

Очевидно, что общая единица, «абсолютный ресурс», может основываться только на фундаментальных понятиях вещества и энергии. Только они позволяют провести инвентаризацию всех полезных ископаемых Земли. Но это, бесспорно, далеко не самое практичное решение проблемы. Данный подход лишь определяет область и направление поиска, который может занять несколько десятилетий.

Главная сложность состоит в том, что фундаментальные понятия вещества и энергии нельзя напрямую использовать для введения общей единицы. Вещество подходит на роль абсолютного ресурса, потому что включает понятие субстанции, подверженной истощению. (Слово «субстанция» происходит от латинского «*substantia*», что означает сущность, основу всех внешних проявлений и изменений). Но вещество, в соответствии с законом сохранения, нельзя уничтожить в принципе. Таким образом, количество любого вида вещества на Земле должно оставаться неизменным. «Потеря вещества» — это относительный термин, любое «потерянное вещество» можно возвращать в исходную форму снова и снова при должном расходе энергии. Воду и воздух можно регенерировать, оксиды сократить, отходы преобразовать в полезные продукты. Кроме того, «абсолютная единица», согласно теории Вернадского, должна отражать не только количественные характеристики каждого ресурса, но и его качество в контексте практического использования. Это невозможно при использовании единиц массы.

Второе понятие (энергия) менее фундаментально, чем вещество, но более перспективно в смысле решения проблемы. Говорят: «Природа энергии является ключом к загадке нашего существования». *С.П. Кануца* высказывался более подробно: «Энергия — главный фактор, определяющий производство пищи, работу промышленности и транспорта, общее благополучие человечества и безопасность общества». В сущности, это верно, так как все проблемы систем

жизнеобеспечения и их взаимодействия с окружающей средой связаны с энергией и её преобразованием. Тем не менее, энергию нельзя использовать в качестве «абсолютного ресурса».

Как это ни странно, камнем преткновения здесь также стал закон сохранения энергии (как в случае с законом сохранения вещества). Строго говоря, привычные выражения «потеря энергии» или «расход энергии» не имеют право на существование, потому что энергию, как и вещество, нельзя уничтожить. Однако решение было найдено.

Потребовался новый подход, основанный на количественных и качественных характеристиках в отношении не только энергии, но и вещества. В самом деле, что значит потерять (уничтожить) в результате человеческой деятельности, если количество вещества и энергии неизменно? Все используемые ресурсы, в конце концов, трансформируются в отходы. Топливо превращается в золу, шлаки и дым, биологические продукты — в органические отходы, атмосферный кислород — в углекислый газ. Высококачественная электроэнергия, полученная в процессе преобразования химического или атомного топлива, рассеивается в окружающей среде в виде низкотемпературного тепла. Существование и деятельность систем жизнеобеспечения неизбежно приводит к необратимому рассеянию вещества и энергии. Но все преобразования дают в результате потерю в качестве!

С научным анализом процессов, связанных с преобразованием энергии и вещества, имеет дело термодинамика. Надёжность результатов её правильного использования (что очень важно в данном случае) продемонстрировал *Альберт Эйнштейн*. Он писал: «Теория впечатляет тем больше, чем проще её предпосылки, разнообразнее предметы исследования и обширнее область применения. Поэтому классическая термодинамика произвела на меня глубокое впечатление. Это единственная физическая теория общего содержания, относительно которой я убеждён, что в рамках применимости её основных понятий она никогда не будет опровергнута».

Однако средства классической термодинамики не привели к немедленному решению практических проблем, связанных с общей единицей, «абсолютным ресурсом», хотя и имелась общая качественная мера, энтропия, которая отражает необратимое рассеяние энергии. Дело в том, что в классической термодинамике нет понятия окружающей среды в широком смысле слова. Присутствует только понятие температуры окружающей среды без учёта остальных параметров (давления, химического состава). Очевидно, что без введения в термодинамику этих сложных понятий невозможно решить все проблемы различных систем жизнеобеспечения, тесно взаимодействующих с окружающей средой. В результате долгих исследований, основанных на введении понятия окружающей среды в термодинамику, было установлено общее понятие. Вначале оно называлось «пригодной», «свободной» энергией, или «пригодностью» (*Дж. Кинан*, 1932). Сейчас данная термодинамическая функция

известна как «эксергия». Термин (введённый *З. Рантом*, 1956) происходит от латинского «*externus*» (внешний) и греческого «*ergon*» (энергия).

На основе «эксергетического» подхода можно осуществить «количественное сравнение всех естественных производственных сил» на практическом уровне, как предлагал в своих работах В. Вернадский. Иными словами, универсальная мера подходит не только для потребляемой первичной энергии, но и для всех ресурсов, необходимых для поддержания жизни человека. Более того, такая мера сделала возможным количественно анализировать производственные процессы, оценивать альтернативные технологии и абсолютно все системы жизнеобеспечения, которые преобразуют природные ресурсы в полезную продукцию.

Сегодня объективный анализ данного типа производится через обоснованную оценку вещества и энергии. Введение понятия эксергии позволило связать термодинамику с экономикой и экологией. Перед «скрещёнными» науками открылись новые возможности.

Что касается экономики, то она не изучает в должной мере внешние факторы, такие как вклад окружающей среды, ценность ресурсов, минимизация и утилизация отходов. Традиционная классическая экономика не в состоянии справиться с такими насущными не требующими отлагательства вопросами, как истощение ресурсов или изменения в условиях деятельности систем обеспечения жизни на планете. Более того, экономическая теория не позволяет однозначно предсказать макроэкономическую динамику и поворотные пункты экономического цикла. В отношении экологии экономические теории совершенно не предусматривают биофизическую основу, которая обеспечивает функционирование любой экономики.

Естественно предположить, что для решения этих сложных проблем в современной экономике также необходимо использовать эксергетический подход. Таким образом, в экономической науке возникнет особая ветвь, основанная на эксергетическом подходе. Безусловно, данная ветвь, именуемая термоэкономикой или эксергоэкономикой, ни в коем случае не заменяет современную экономику. Термодинамический подход дополняет экономическую теорию и позволяет решить как глобальные, так и частные проблемы, связанные с усовершенствованием систем жизнеобеспечения и будущими тенденциями развития.

Во второй части данной статьи анализируется понятие доступной энергии (эксергии) как универсальной термодинамической единицы в отношении двух фундаментальных проблем:

- объективная оценка всех видов природных ресурсов;
- расчёт термодинамической эффективности любой из систем жизнеобеспечения и, следовательно, главных возможностей и ограничений её усовершенствования.

В третьей части приводится количественный анализ энергетического, энтропийного и эксергетического баланса Земли. Разбор балансов производится в

контексте возможностей и ограничений применения в различных системах жизнеобеспечения энергетического и вещественного потенциала планеты в ближайшем будущем.

В заключительной части статьи рассматриваются экономические проблемы, тесно связанные с оптимизацией систем обеспечения, а также прогнозируется их дальнейшее развитие. Приводятся две основные целевые функции оптимизации таких систем. Обсуждаются области и условия применения этих функций.

В заключении кратко описываются пути достижения «экологичной экономики» и развития систем жизнеобеспечения без вреда для природы.

2. ПРОБЛЕМА «УНИВЕРСАЛЬНОЙ МЕРЫ» ДЛЯ МАТЕРИАЛЬНЫХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ

«Всё, что необходимо человеку, в конечном счёте, удовлетворяется пригодной энергией».
Ф. Содди, 1931.

2.1. Термодинамическая основа понятия пригодной энергии

2.1.1. Фундаментальная роль двух термодинамических законов

Функционирование различных систем жизнеобеспечения, как и их природное окружение, неизбежно связано с понятием энергии. Изучать и даже создавать новые системы жизнеобеспечения возможно только на основе термодинамических законов, которые регулируют их деятельность.

В реальной жизни эти законы не всегда очевидны, но существование их бесспорно. Все попытки нарушить или просто обойти их (даже в наши дни) ни к чему не приводят. В этом отношении законы физики сильно отличаются от юридических, что не всегда учитывается.

«Неопровержимость» термодинамических законов (неотъемлемой части законов физики) крайне важна, так как служит доказательством несостоятельности всех попыток их обойти. Классический пример из истории — изобретение «вечного двигателя». Однако термодинамические законы не только определяют вероятность осуществления процесса, но и показывают, является ли преобразование вещества или энергии благоприятным или нет.

Вот почему целенаправленный анализ этих законов так важен для развития и совершенствования систем жизнеобеспечения. Во избежание путаницы из-за различия подходов и используемой терминологии, следует кратко рассмотреть несколько понятий и определить необходимые термодинамические понятия, применимые к данной проблеме.

Первый закон термодинамики, или закон сохранения энергии, гласит, что энергию нельзя ни создать, ни уничтожить. В отношении проблем преобразования энергии в различных природных и искусственных системах условия действия первого закона можно изобразить в виде схемы (рис. 1).

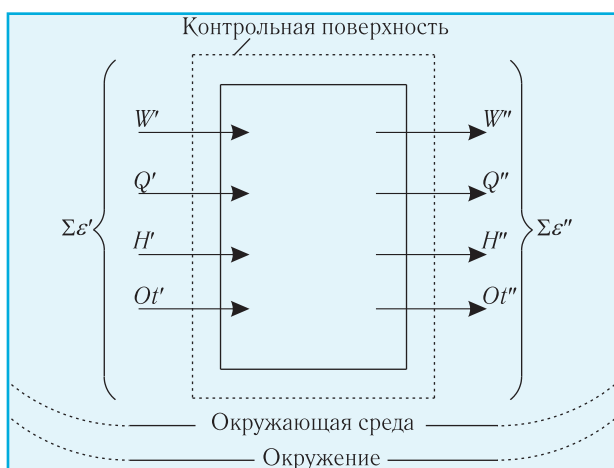


Рис. 1. Энергетические потоки, поступающие в систему и покидающие её (общий случай): W', W'' — потоки работы; Q', Q'' — потоки тепла; H', H'' — энтальпия потоков массы; Ot', Ot'' — другие виды энергетических потоков

В целом системы взаимодействуют с окружающей средой посредством различных потоков энергии и вещества. Потоки свободно проникают в систему и покидают её. Чтобы рассчитать энергообмен в системе, необходимо обозначить её пределы (контрольная поверхность). Как правило, потоки входящей и выходящей энергии различаются: работа W , тепло Q , внутренняя энергия потока вещества, энтальпия H и, наконец, другие Ot . Последняя категория включает электрический ток и все виды излучений.

Первый закон термодинамики для такой модели гласит: «Полная сумма всех потоков энергии, поступающих в систему ($\Sigma\epsilon'$), всегда равна сумме всех потоков энергии, покидающих систему ($\Sigma\epsilon''$) в данный промежуток времени». Естественно, количество всех энергетических потоков должно выражаться в одинаковых единицах. Это условие выполняется при стационарном состоянии системы, когда ни один из её параметров не меняется за данный промежуток времени.

Нельзя забывать один очень важный момент, связанный с практическим использованием первого закона. Его выполнение обеспечивает лишь возможность существования заданной системы. Любая существующая система должна соответствовать требованиям первого закона, но не все системы, отвечающие его требованиям, могут существовать на самом деле. Это необходимо, но недостаточно. Дополнительное условие устанавливается вторым законом термодинамики.

Второй закон термодинамики устанавливает дополнительные ограничения на возможность существования системы, которая полностью отвечает требованиям первого закона. Первый закон касается только количественных характеристик энергии, второй устанавливает дополнительные ограничения для преобразования энергии и отражает качественные характеристики. Возникает вопрос: какие критерии эффективности могут служить основой для оценки качества энергии?

Для определения качества различных объектов существует один общий критерий: степень соответ-

ствия свойств данного объекта запросам потребителя. Что касается энергии, её использование во всех случаях неизбежно предполагает преобразование из одной формы в другую. Примером служит принцип действия электростанции. Вначале химическая энергия топлива преобразуется в тепловой поток, который трансформируется во внутреннюю энергию водяного пара. Та, в свою очередь, превращается в механическую энергию и, наконец, в электричество. Затем электрическая энергия в нужной форме поступает к потребителям. Энергия преобразуется не только в искусственных объектах, таких как системы жизнеобеспечения, но также и в биологических существах, не исключая человека.

Следовательно, главной качественной характеристикой энергии является её способность преобразовываться в другие формы. С этой точки зрения различные формы энергии можно легко разделить на две группы, согласно способности преобразовываться в другие формы. Первую группу составляют формы энергии, которые можно трансформировать в любую другую форму без ограничений. (Естественно, здесь также выполняются условия первого закона термодинамики. Ограничения относятся только к видам энергии). Во вторую группу входят остальные формы.

Данная классификация применима и к видам энергии, которые передаются различными носителями, и к тем, которые передаются от одного носителя к другому. Примером первого вида энергии является внутренняя энергия вещества. Примером второго — тепловой поток или работа любого рода. Передача энергии в форме тепла (при помощи конвекции или излучения) или работы (механической, электрической, магнитной и т.д.) не предполагает существенный массообмен. Причина в соотношении массы m и энергии ϵ , согласно формуле Эйнштейна $\epsilon=mc^2$, где c — скорость света (так как значение c очень велико, $\epsilon \gg m$). Возможные переходы энергии в разные формы представлены в табл. 1.

Таблица 1. Возможности взаимного преобразования различных форм энергии

Форма энергии	№	1	2	3	4	6	7
Механическая	1	о	о	о	о	о	о
Электрическая	2	о	о	о	о	о	о
Внутренняя энергия носителя	Молекулярная термомеханическая	3	•	•	о	•	о
	Химическая	4	•	•	о	•	о
	Атомная	5	о	о	о	о	о
Передаваемая энергия	Тепло	6	•	•	•	•	•
	Работа	7	о	о	о	о	о
	Монохроматическое излучение	8	о	о	о	о	о
	Полихроматическое излучение	9	•	•	•	•	•

Механическая и электрическая энергия вместе с работой включены в первую группу, потому что их можно полностью преобразовать в любую другую

форму. Однако данной особенностью обладают не только эти формы энергии. Атомную энергию, которую получают в результате ядерного синтеза, тоже можно отнести к этой категории. В принципе атомную энергию, тождественную потере массы, равной Δmc^2 , можно полностью трансформировать.

Чем обусловлена разница в способности форм энергии трансформироваться? Дело в том, что все формы энергии связаны с различными свойствами движения составляющих частиц вещества (атомов, молекул или фотонов). Белыми точками обозначены формы энергии первой группы, характеризующиеся упорядоченным движением частиц, формы второй группы (чёрные точки) ассоциируются с беспорядочным движением частиц.

При упорядоченном характере движения энтропия $S=0$. В остальных случаях энтропия $S>0$. Например, механическая энергия шестерни коробки передач связана с упорядоченным вращательным движением колёсных частиц (рис. 2). Здесь энтропия равна нулю и не пригодна к использованию. Второй пример — внутреннее беспорядочное тепловое движение частиц вещества: атомов и молекул. В данном случае энтропия $S>0$.

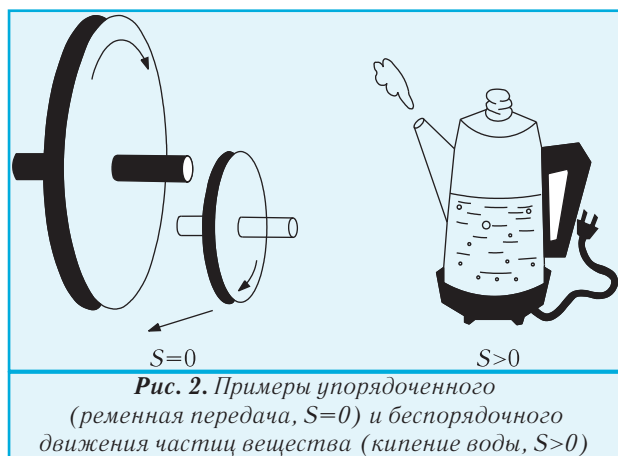


Рис. 2. Примеры упорядоченного (ременная передача, $S=0$) и беспорядочного движения частиц вещества (кипение воды, $S>0$)

При любой трансформации энергии уровень беспорядочного движения частиц только увеличивается, а вместе с ним и энтропия S . Обратный процесс невозможен в принципе. Уровень беспорядочного движения частиц остаётся неизменным (т.е. не происходит изменения энтропии, $\Delta S=0$) только в идеальном, теоретическом процессе. Однако на самом деле таких совершенных процессов не существует.

Данный закон отражает известное правило: порядок превращается в беспорядок легко и самопроизвольно, но сделать порядок из беспорядка — задача сложная. В науке это неприятное правило выражается во втором законе термодинамики. Он естественным образом связан с вышеупомянутым понятием энтропии.

Энтропия также определяет возможности взаимного преобразования различных форм энергии, перечисленных в табл. 1. Данная возможность связана с главным свойством энтропии увеличиваться при всех

реальных процессах, где имеет место трансформация энергии. Чем больше уровень беспорядочности, тем выше значение энтропии (ΔS). Таким образом, процессы, характеризующиеся исчезновением энтропии, неосуществимы.

Отсюда можно сформулировать второй закон термодинамики: в реальных процессах преобразования энергии общая энтропия всех вовлечённых тел может только увеличиваться или, в идеальном случае, оставаться неизменной: $S'' \geq S'$ или $\Delta S \geq 0$. В противном случае процесс неосуществим даже при выполнении первого закона. На основе этого, все формы энергии, обозначенные чёрными точками в табл. 1, характеризуются энтропией $S>0$. Формы энергии, обозначенные белыми точками, характеризуются энтропией $S=0$. Любую из последних высокоорганизованных форм энергии можно полностью преобразовать в другую форму. Низкоорганизованные формы (чёрные точки) нельзя полностью преобразовать в высокоорганизованные формы: возможна лишь частичная трансформация, остальные можно преобразовать только в энергию второй группы.

Таким образом, согласно второму закону, допускается существование лишь некоторых процессов, удовлетворяющих требованиям первого закона. Практическая значимость второго закона подчёркивается в афоризме: «В гигантской мастерской природы первый закон играет лишь роль бухгалтера; роль директора отведена второму закону». И действительно, второй закон определяет «направление» всех естественных процессов, а первый следит за тем, чтобы при этом баланс энергии был соблюлён.

2.1.2. Роль окружающей среды в определении пригодной энергии

Энтропия — очень важное физическое понятие, почти такое же важное, как энергия. Увеличение энтропии позволяет судить о характеристиках неизбежно отрицательных процессов в заданной системе. Чем выше значение ΔS , тем хуже процессы в данной системе с точки зрения энергетики.

С помощью термодинамики можно вычислить увеличение (генерацию) энтропии ΔS во всех технических системах либо путём дополнительных теоретических расчётов, либо путём измерения параметров реальных объектов. Это очень полезная информация, но она не подходит как полезный инструмент для решения практических проблем техников и экологов. Она не отражает реальные энергетические характеристики системы и уровень её совершенства (в особенности, эффективность).

Дело в том, что все термодинамические процессы в системе (естественные или созданные человеком) всегда протекают в определённом окружении и неизбежно взаимодействуют с её составляющими. В термодинамическом анализе системы, с позиции первого закона (рис. 1), все процессы, протекавшие вне границ системы, в окружении, не принимались во внимание.

Между тем данное фундаментальное понятие имеет большое значение для анализа и усовершен-

ствования технических и природных систем. Окружение системы включает всё, с чем взаимодействует данная система. Для практического анализа окружение полезно разделить на две основные части: природные ресурсы и окружающая среда.

Первая часть — природные ресурсы служит основой для производства сырья и энергии (топливо, руды, биологические объекты, солнечное излучение и т.д.), необходимых для систем жизнеобеспечения. Параметры первой части принципиально отличаются от параметров второй — окружающей среды. Окружающая среда находится в более-менее равновесном состоянии. Таким образом, в окружающей среде не наблюдается существенных отклонений в таких параметрах, как давление, температура или химический потенциал. Следовательно, производство работы путём взаимодействия между её частями невозможно. На самом деле окружающая среда Земли состоит из атмосферы, морей, океанов и земной коры (за исключением полезных минеральных ресурсов). Все параметры окружающей среды не зависят от влияния изучаемой системы. Данное условие отражает реальное состояние каждой системы, размеры которой малы по сравнению с окружающей средой. (Анализ понятия «окружение» в связи с химической эксергией более подробно приводится в пункте 2.1.3).

Роль параметров окружающей среды в практической оценке различных форм энергии можно показать на нескольких простых примерах. Представим себе цилиндр с газом — сжатым воздухом. Газ выполняет полезную работу только в том случае, если существует разность давлений между ним и окружающей средой. Если давление в цилиндре p_1 выше, чем снаружи p_2 , то газ может совершать работу на выходе из цилиндра (например, для вращения турбины). Если давление снаружи выше, чем в цилиндре ($p_2 > p_1$), газ совершает работу, входя в него. Но если давление внутри и снаружи (например, в окружающей среде) одинаковое ($p_1 = p_2 = p_e$), пригодная (работоспособная) энергия газа будет равна нулю, хотя внутренняя энергия газа, как любого вещества, отлична от нуля. Энергия газа в таком случае неэффективна, т.е. непригодна.

То же самое можно сказать о тепловой, химической и других формах энергии из второй группы. Горячий песок Сахары и холодный воздух Антарктики не имеют энергетической ценности каждый в своей родной окружающей среде. Их пригодная энергия равна нулю. Но если горячий воздух поступит в Антарктику, он с успехом заменит печь, и наоборот, холодный воздух послужит холодильником в Сахаре. Другими словами, энергия станет пригодной.

Химическое топливо, например, природный газ, характеризуется на Земле высокой энергетической ценностью, но если его перенести на другую планету с бескислородной метановой атмосферой, его пригодная энергия будет равна нулю. И наоборот, земной воздух станет там отличным топливом, так как будет сгорать, обеспечивая высокие температуры, как и метан в воздухе.

Все эти примеры доказывают, что количество полезной, пригодной энергии, которую можно получить из энергии второй группы, определяется только в соответствии с параметрами окружающей среды. Во всех приведённых случаях максимальное количество потенциальной работы (в общем смысле, энергии первой группы в табл. 1) можно определить особым термодинамическим методом. Данный метод позволяет установить соответствующее количество работы при помощи обратимого (идеального) взаимодействия с окружающей средой.

Первым этой проблемы коснулся известный американский учёный *Уиллард Гиббс* (1877 г.), но он не стал продолжать исследования в данной области. В дальнейшем изучением проблемы занимались *Ж. Гюи* во Франции и *А. Стодола* в Германии. Позднее идею использовали *Ф. Бошнякович* (Германия) и *Дж. Кинан* (США), первый изучал *Arbeitsfähigkeit* (работоспособность), второй разрабатывал научный метод анализа реальных энергетических систем через аналогичную термодинамическую функцию под названием «пригодность» (1932 г.). Словенский учёный *З. Рант* ввёл в 1956 г. термин «эксергия» (некоторые авторы использовали похожие термины, например, «эссергия», но, скорее, для своеобразия и добавления новых свойств). В настоящее время данный термин вошёл во всеобщее употребление и вытеснил другие, используемые ранее термины из-за точности, краткости и близости к родственному слову «энергия».

Количество эксергии полностью совпадает со всеми полностью превратимыми формами энергии первой группы (№№ 1, 2, 7, 8) в табл. 1 в реальных условиях взаимодействия с окружающей средой. Что касается остальных форм энергии, отмеченных чёрными точками, они все могут обладать подобным свойством преобразования (при заданных условиях окружающей среды), если их состояние характеризуется эксергией. Эксергия определяет возможность преобразования в любую из полностью преобразуемых форм энергии, а остальные преобразуются только в неэффективную энергию.

Следовательно, эксергия является общей мерой качества различных видов энергии. Эта мера применима ко всем формам энергии, которые нельзя полностью преобразовать в работу, и к энергии, которую переносит вещество или потоки тепла и излучения. В первом случае эксергия выражает максимальное количество работы, которое производит единица массы исследуемого вещества с заданными параметрами в двустороннем (идеальном) процессе достижения равновесия с окружающей средой. Во втором случае эксергия также обозначает максимальное количество работы (пригодной энергии), которую производят потоки тепла или излучения, взаимодействующие с окружающей средой. Однако если имеет место обратный процесс, эксергия всегда обозначает минимальное количество работы (пригодной энергии), которую нужно затратить для выработки единицы энергии или массы вещества с заданными параметрами.

Таким образом, количество эксергии характери-

зует с энергетической точки зрения идеальные процессы преобразования энергии и вещества в условиях заданной окружающей среды.

2.2. Определение эксергии для различных форм энергии

Нет необходимости приводить все термодинамические уравнения, связанные с физической или химической эксергией потоков энергии и материи. Нижеизложенная информация понадобится далее в практическом анализе различных объектов, имеющих отношение к системам жизнеобеспечения и их естественной среде (Бандура и Бродянский, 1996).

Что касается вычисления и анализа эксергии объектов, рассматриваемых в данный момент, наибольшее значение для практического использования имеют четыре формы эксергии. Существует эксергия теплового потока, физическая эксергия вещества, химическая эксергия вещества и эксергия излучения. Рассмотрим главные свойства данных форм эксергии и их особенности относительно анализа и усовершенствования систем жизнеобеспечения.

2.2.1. Эксергия теплового потока

Эксергия теплового потока E_q характеризуется энтропией $S \neq 0$, так как подразумевает беспорядочное движение частиц материи. Из теории термодинамики следует, что максимальную работу (т.е. эксергию E_q) теплового потока Q можно рассчитать по классической формуле С. Карно:

$$E_q = Q \frac{T - T_e}{T}, \quad (1)$$

где T — температура теплового потока, T_e — температура окружающей среды. Или, если

$$\frac{T - T_e}{T}$$

(коэффициент Карно) принять за τ_e ,

$$E_q = Q \tau_e. \quad (1')$$

Данное уравнение позволяет определить эксергию теплового потока при заданной температуре окружающей среды.

Соотношение между τ_e и T показано на рис. 3 для заданного значения T_e . Эксергия теплового потока E_q при $T = T_e$ равна нулю, так как $\tau_e = 0$, и тепловой поток не имеет ценности при данных условиях. При увеличении T по отношению к T_e , значение τ_e и соответственно E_q возрастают. В пределах $T \rightarrow \infty$ и $\tau_e \rightarrow 1$ качество теплового потока достигает качества упорядоченной энергии. Таким образом, в данном гипотетическом случае тепло полностью преобразуется в работу. На практике, как правило, используемые температуры T гораздо ниже (табл. 2). Если температура теплового потока $T < T_e$, то τ_e отрицательно, и его зна-

чение стремится к $-\infty$. Соответственно, тепловой поток при данных условиях не только не может выполнять работу, а наоборот требует потребления работы, которая в идеальном случае равна значению эксергии. Другими словами, получается поток холода. Чтобы добиться такого результата, необходимо затратить соответствующее количество эксергии E_q . Количество эксергии может быть больше Q (если $\tau_e < -1$). Подвод тепла Q в любую систему при таких условиях ($\tau_e < 0$) сопровождается отводом эксергии тепла.

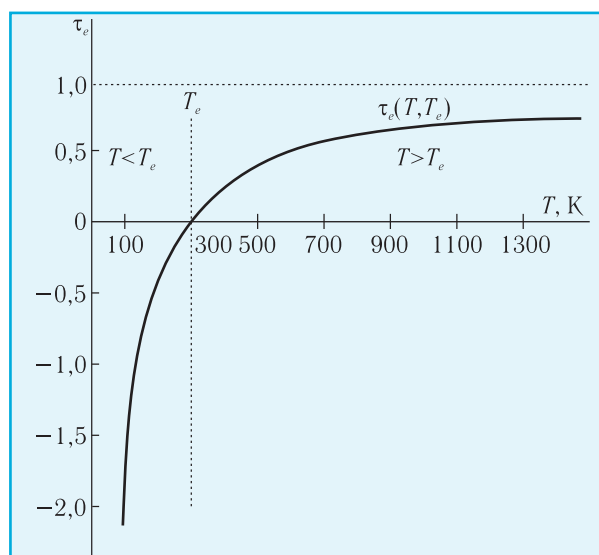


Рис. 3. Связь между тепловым потоком и его эксергией в координатах τ_e - T при высоких ($T > T_e$) и низких ($T < T_e$) температурах

Таблица 2. Значения τ_e для нескольких опорных значений T

Опорная точка	Температура, К	Коэффициент Карно τ_e
Точка затвердевания:		
Золота	1336	0,78
Серебра	1234	0,76
Точка кипения:		
Серы	718	0,59
Воды (при 101,3 кПа)	373	0,22
Тройная точка воды	273	-0,07
Точка кипения (при 101,3 кПа):		
Аммиака	239,8	-0,22
Кислорода	90,2	-2,25
Азота	77,4	-2,79
Водорода	20,3	-13,4
Гелия-4	4,2	-68,8
Гелия-3	3,19	-90,8

Другими словами, отвод тепла из системы, где температура T меньше температуры окружающей среды, требует затрат работы (например, в холодильнике). В данном случае эксергия тепла имеет отрицательное значение. При очень низких температурах затраты работы (даже в идеальном случае) больше, чем количество отводимого тепла. Такая ситуация

имеет место в криогенных системах, например, при производстве жидкого кислорода или водорода, также как и в других низкотемпературных технологиях. При очень низких температурах коэффициент Карно τ_e имеет очень большое значение и стремится к минус бесконечности при $T \rightarrow 0$.

Следовательно, эксергию теплового потока можно определить как минимальное количество тепла, требующееся для производства заданного количества работы, или, другими словами, минимальное количество работы, необходимой для отвода тепла на низкотемпературном уровне, т.е. для производства заданного количества холода. В табл. 2 указано значение τ_e для нескольких значений T (при $T_e = 293 \text{ K}$).

Различие между энергией теплового потока и его эксергией можно продемонстрировать на простом примере (рис. 4). Предположим, дано 100 кДж тепла при температуре $T = 350 \text{ K}$ ($77 \text{ }^\circ\text{C}$) и при температуре окружающей среды $T_e = 300 \text{ K}$. По первому закону термодинамики этого количества энергии достаточно для получения большого количества работы, например, чтобы поднять человека весом 75 кг на высоту

$$10200 \text{ кгм} / 75 \text{ кг} = 1360 \text{ м} = 1,36 \text{ км}.$$

Но в действительности дело обстоит совершенно по иному (рис. 4). Коэффициент Карно при $T = 350 \text{ K}$ и $T_e = 300 \text{ K}$

$$\tau_e = (350 - 300) / 350 = 0,143. \quad (2)$$

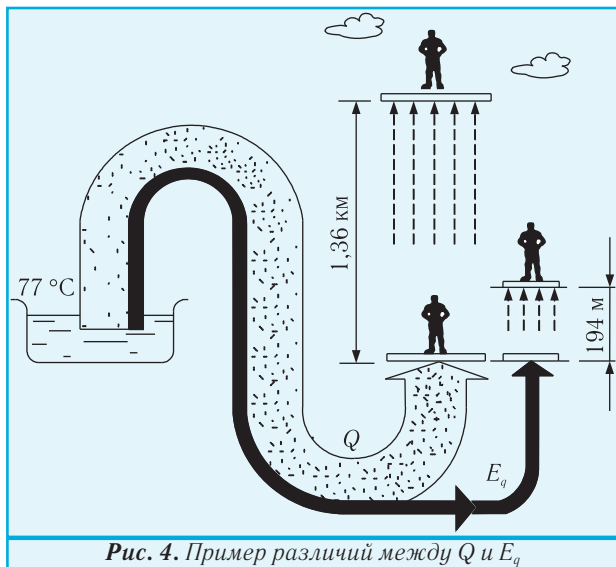


Рис. 4. Пример различий между Q и E_q

Следовательно, максимальная высота, которую можно достичь, затратив данное количество тепла при этих условиях, будет равна лишь $1360 \cdot 0,143 = 194,5 \text{ м}$. Теперь можно обобщить главные признаки нескольких форм эксергии.

2.2.2. Физическая эксергия вещества

Физическая эксергия вещества определяется способностью производить работу во взаимодействии с окружающей средой. В процессе производства максимального количества работы вещество изменяет

свои параметры при данных условиях (давление p и температуру T) на параметры равновесия с окружающей средой (p_e, T_e). При $p > p_e$ эксергия $e > 0$ для всех температур. Только если $p = p_e$ и $T = T_e$, эксергия $e = 0$ («мёртвое состояние», равновесие с окружающей средой). Чем больше отклоняется T от T_e и p от p_e , тем выше значение e .

Эта зависимость ясно видна на диаграмме $e-T$ (эксергия-температура) для воздуха (рис. 5). Точка 0 соответствует параметрам воздуха окружающей среды (p_e, T_e). Во всех остальных случаях эксергия воздуха отлична от нуля и определяется разностью давлений $\Delta p = p - p_e$ и температур $\Delta T = T - T_e$ в сравнении с окружающей средой. Таким образом, можно выделить следующие компоненты: e_p , связанную с Δp , и e_T , связанную с ΔT .

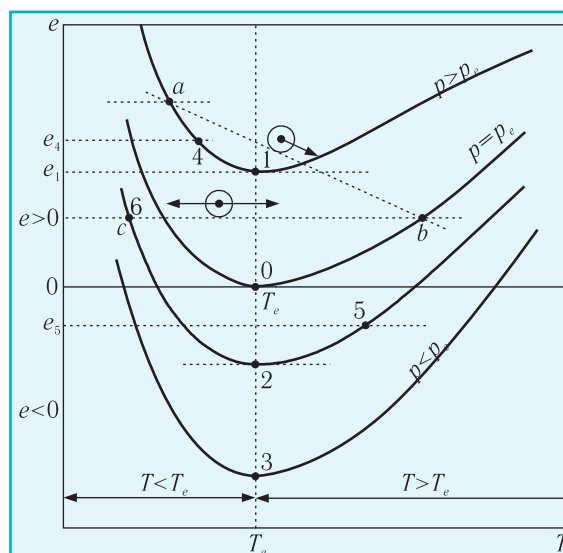


Рис. 5. Изменение физической эксергии e потока газа при давлении p и температуре T и возможность получения работы

Например, e_T для точки 4 равна разности между ординатами точки 4 и 1, значение e_p равно разности между ординатами точек 1 и 0. Сумма данных величин равна

$$e_4 = \Delta e_{4-1} + \Delta e_{1-0} = e_{T,4} + e_{p,4}.$$

Это верно и для областей, где $e < 0$. Например, $e_5 = \Delta e_{2-0} - \Delta e_{2-5}$. В данной области $e < 0$, т.е. такого состояния вещества можно достигнуть при затрате работы (чтобы произвести вакуум или охлаждение). (Физическое значение отрицательной эксергии объясняется просто. В данном случае окружающая среда влияет на систему ($p < p_e$ или $T < T_e$), а не наоборот. Полезную работу можно получить в обоих случаях). Необходимо заметить, что влияние на окружающую среду увеличивается во много раз при низких температурах. Переход в различные термодинамические состояния можно проиллюстрировать на диаграмме $e-T$ на рис. 5 при помощи простой аналогии с механикой. Проведём прямую линию, соединяющую две точки,

как след от плоскости, перпендикулярной поверхности диаграммы. Представим себе шарик на этой плоскости, который катится в вероятном направлении выполняемых процессов. Работа Δe , которую можно получить из единицы массы, равна разности эксергий в начальной и конечной точках процесса. Судя по расположению точек a и b , шарик может катиться только от a к b . То есть вероятно стихийное движение вдоль такой линии, а максимальная работа равна Δe_{a-b} . Движение в обратном направлении возможно лишь при затрате работы, равной Δe_{b-a} . При движении из точки c в точку b (или в обратном процессе) затрат работы не требуется.

Процесс переноса энергии из одного потока в другой, как и между компонентами e_p , e_T и другими компонентами в потоке рабочих веществ, часто встречается в природе и используется на различных производственных объектах. Идеальные в отношении эксергии модели подобных процессов применяются при их анализе и развитии. Эксергия потока вещества определяется разностью между энтальпией (энергией потока материи) h с заданными параметрами p и T и энтальпией с параметрами равновесия с окружающей средой p_e и T_e , т.е. h_e .

Но данная разность $\Delta h = h - h_e$ отражает только количественные характеристики энергии, без учёта потери в качестве. Потеря качества энергии d отражается в увеличении энтропии Δs , о чём и шла речь выше. Для расчёта потерь в качестве данную величину необходимо умножить на температуру окружающей среды T_e . Таким образом, при учёте потери эксергии, эксергия потока вещества $e = e_p + e_T$ равна Δh минус $T_e \Delta s$, т.е.

$$e = \Delta h - T_e \Delta s.$$

2.2.3. Химическая эксергия вещества

Определить и рассчитать химическую эксергию различных химических соединений сложнее, чем физическую эксергию вещества. Однако основные вычисления остаются те же. Для расчёта физической эксергии необходимо знать только температуру и давление вещества и окружающей среды, а эти параметры всегда известны.

При расчёте химической эксергии необходимо выбрать из множества веществ вне системы, в окружении, некоторые вещества для сравнения, потому что в природе химического равновесия не встречается, слишком много компонентов участвует в процессе. (В отличие от более узкого понятия окружающей среды, где можно пренебречь различием параметров p и T . Таким образом, при расчёте эксергии среду можно принять за равновесную часть окружения).

В данной ситуации необходимо более детально разобрать понятие «окружение» в отношении анализа и расчёта эксергии. Все составляющие окружения можно разделить на две группы. В первую группу входят наиболее распространенные твёрдые компоненты внешнего слоя земной коры (продукты эрозии: силикаты, окиси, карбонаты и т.д.). Также сюда относятся

вода (в зависимости от местных условий морская или речная, пресная) и воздух. Они общедоступны и в принципе не могут быть использованы для получения работы. Первую группу можно принять за равновесную часть земной среды, где химическая эксергия равна нулю.

Все остальные природные химические соединения относятся ко второй группе. Они существенно отличаются от равновесной части земной среды. Сюда входят топливо, руда и т.д. Их химическая эксергия отлична от нуля и определяется максимальным количеством работы, которую можно получить при химическом преобразовании в соединения первой группы (другими словами, при достижении уровня равновесия с первой частью земной среды — природы). Данная работа равна их химической эксергии.

Химическая эксергия продуктов гидросферы (например, водорода, извлечённого из воды) или атмосферы (кислорода, азота, инертных газов) равна минимальному значению работы при их извлечении. Такой же метод используется для расчёта химической эксергии соединений и элементов, которые получают из природных веществ среды. Их химическая эксергия равна сумме эксергий исходного природного материала и минимальной работы, затраченной на его извлечение. Так как все расчёты эксергии основаны на термодинамической модели обратимых процессов, то химическая эксергия, как и другие виды эксергии, обладает свойством обратимости. То есть минимальная работа (эксергия) единицы извлечённого вещества равна максимальной работе, которую можно получить при достижении равновесия с компонентами окружения.

Обобщённая схема природного окружения и его компонентов представлена на рис. 6. Там же указаны все части ноосферы (геосфера, атмосфера, гидросфера и биосфера).



Рис. 6. Обобщённая схема природной окружающей среды и её компонентов: ZE — нулевая эксергия (природная среда); CE — химическая эксергия; RE — эксергия солнечного излучения; PE — эксергия горячих подземных областей

Первая из вышеперечисленных частей окружения, равновесная, обозначена как ZE (нулевая эксергия). Объекты второй части также характеризуются температурой T_e и давлением p_e , однако облада-

ют отличной от нуля эксергией. Они обозначены как SE (химическая эксергия). Далее на рис. 6 изображены источники горячей воды и горячие подземные области с температурой $T > T_e$. Их физическая эксергия $E > 0$. Они обозначены как PE (физическая эксергия).

Дополнительные пояснения к обобщенной схеме на рис. 6:

1. Для расчёта физической и химической эксергии вводится условие равновесия при p_e и T_e в атмосфере и гидросфере. Эксергия определяется безотносительно к реальным различиям давления и температур, которые могут использоваться при получении работы (например, ветер, различие в температуре моря на заданной глубине и на поверхности и т.д.).

2. Все биологические объекты, существующие в биосфере (в воздухе, воде, почве), также обладают отличной от нуля эксергией, так как их физические и химические параметры отличаются от параметров среды. Количественная оценка данных характеристик представляет совершенно другую, сложную проблему, которая пока не затрагивалась. Более подробный её анализ представлен в разделе 4.3.3.

Рассчитать химическую эксергию очень сложно, так как внешний слой земной коры представляет собой смесь множества твёрдых растворов. Необходимо выбрать среду с подходящим химическим составом (образцами), из которой можно извлечь заданное вещество при минимальных затратах работы. Я. Шаргут решил данную проблему при помощи оценки концентрации эксергии в твёрдых растворах методом для идеальных растворов, который пригоден для всех частей техносферы (геосферы, гидросферы и атмосферы). Он также ввёл понятие стандартной химической эксергии (1961). Данные подходы можно использовать при расчёте химической эксергии E_{ch} любого реального соединения. Полученные данные были занесены в таблицу.

Таким образом, эксергию теплового потока и физическую эксергию вещества, как и химическую эксергию, можно использовать при объективном анализе и оценке химических соединений, следовательно, эксергия является компонентом любого природного ресурса.

Химическая эксергия E_{ch} , как правило, имеет довольно большие значения. Например, укажем эксергии металлов: Cu — 134400 кДж/кмоль; Al — 887810 кДж/кмоль; Fe — 377740 кДж/кмоль. Для газов: H_2 — 238410 кДж/кмоль; O_2 — 3970 кДж/кмоль; N_2 — 720 кДж/кмоль (эксергия O_2 и N_2 сравнительно меньше, так как их можно извлечь из воздуха биофизическими методами без применения химических реакций). Эксергия углерода равна 410820 кДж/кмоль.

2.2.4. Эксергия излучения

Поток излучения, как работа и тепло, является важным способом передачи энергии. При помощи излучения энергия передается от одного объекта другому без непосредственного контакта или участия

теплового носителя. Действие многих искусственных обогревающих и осветительных приборов основывается на использовании излучения, в особенности солнечного.

При вычислении эксергии излучения необходимо учитывать не только температуру излучения и окружающей среды, но также распределение частот в потоке излучения. Существуют два варианта:

1. Излучение характеризуется конкретным распределением частот (например, солнечное излучение, обладающее сложным спектром). В данном случае поток излучения равнозначен тепловому, так как обладает ненулевой энтропией. Рассчитать эксергию потока излучения можно при помощи специальной формулы.

2. Монохроматическое когерентное излучение характеризуется единственной частотой (например, квантовый генератор). В данном случае поток излучения не обладает энтропией ($S=0$) и равнозначен потоку упорядоченной энергии (как работа).

Фактически, в рамках обсуждаемой проблемы, достаточно использовать эксергию солнечного излучения. Она равна 0,933 энергии при температуре окружающей среды $T_e=300$ К.

2.2.5. Сопоставление эксергии и энергии

Все проблемы, связанные с изучением систем жизнеобеспечения и их взаимоотношений со средой, легко решаются путём термодинамического анализа. Подобный анализ основан на совместном применении двух законов термодинамики: первого в форме энергии ε , второго в формах эксергии E . Их свойства позволяют решить многие проблемы, связанные с развитием систем жизнеобеспечения, а также с экологическим и экономическим аспектом исследования. Разнообразие возможностей термодинамики обусловлено различием двух её основных законов и фундаментальными свойствами двух термодинамических функций, ими представленных: энергии ε и эксергии E . Все вышеописанные формы эксергии обладают общими свойствами, которые отличают их от энергии.

В табл. 3 представлены основные свойства энергии и эксергии, определяющие возможности их применения.

Использование данных термодинамических функций в анализе и усовершенствовании искусственных систем жизнеобеспечения рассматривается далее.

3. ЭКСЕРГЕТИЧЕСКИЕ БАЛАНСЫ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСКУССТВЕННЫХ СИСТЕМ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ

3.1. Эксергетические балансы систем и их эксергетические характеристики

Эксергетический баланс систем преобразования энергии и вещества служит основой комплексного анализа этих систем. Он аналогичен энергетическому

Таблица 3. Сопоставление свойств энергии и эксергии

Энергия ϵ	Эксергия E
Зависит только от параметров потока материи и энергии, параметры окружающей среды значения не имеют	Зависит и от параметров потоков энергии, вещества, и от параметров среды (окружения)
Имеет значение, отличное от нуля (равное mc^2 , согласно уравнению Эйнштейна)	В мёртвом состоянии равновесия с природой (окружением) равняется нулю
Подчиняется закону сохранения энергии и не может быть уничтожена	Подчиняется закону сохранения только в обратимых процессах, в реальных необратимых процессах частично или полностью уничтожается
Способность преобразования в различные формы ограничена вторым законом термодинамики во всех процессах, включая обратимые	Способность преобразования в различные формы не ограничена для обратимых и ограничена вторым законом термодинамики для необратимых процессов

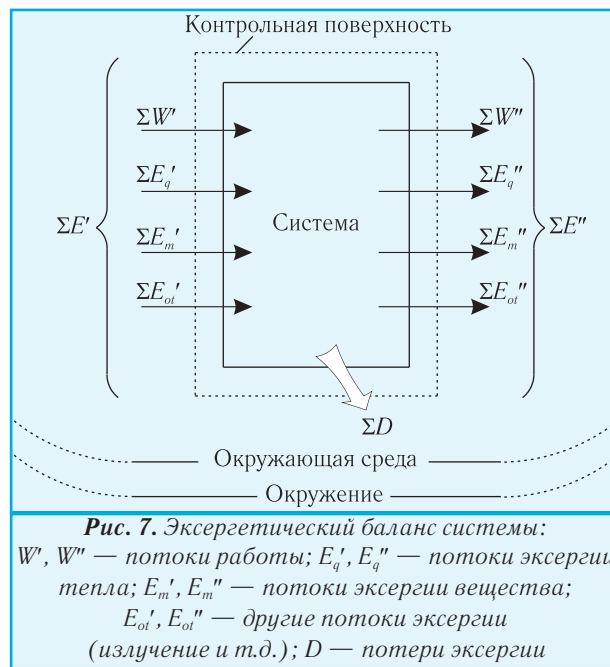
балансу, который изображён на рис. 1. Его составляющие отражают те же потоки энергии и вещества. Однако эксергетический баланс радикально отличается от энергетического. Это связано со свойством потоков эксергии уменьшаться и исчезать в реальных процессах. Уменьшение ассоциируется с увеличением энтропии S и преобразованием пригодной энергии в бесполезную энергию хаотично движущихся частиц, которую нельзя превратить в работу. Уничтоженная часть эксергии D представляется уравнением Гюи-Стодоль:

$$D = T_e \Delta S, \tag{3}$$

где ΔS — увеличение (генерация) энтропии в данном процессе или системе; T_e — температура окружающей среды. Уравнение (3) является выражением фундаментального закона: потеря эксергии связана с температурой окружающей среды.

Эксергетический баланс любой системы, искусственной или природной, отражает требования не только первого, но и второго законов термодинамики и, следовательно, потерю эксергии D . В общем случае потоки вещества и энергии, как поступающие в систему, так и выходящие из неё, те же, что и при энергетическом балансе. Однако количественные характеристики выражены в единицах эксергии E (рис. 7). Это работа $\Sigma W'$ и $\Sigma W''$, эксергии тепловых потоков $\Sigma E'_q$ и $\Sigma E''_q$, эксергии потоков вещества $\Sigma E'_m$ и $\Sigma E''_m$ (физические и химические E_{ch}) и другие потоки (например, эксергия излучения). В каждом отдельном случае могут отсутствовать один или несколько потоков. Отсюда следует, что только потоки работы $\Sigma W'$ и $\Sigma W''$ (ряд 5 в табл. 2) являются одними и теми же величинами в уравнениях эксергетического и энергетического балансов, поскольку работу (механическую или электрическую) можно полностью преобразовать в любую другую форму эксергии (и обратно). В данном случае при расчёте баланса сложностей не возникает. Для остальных потоков эксергии необходимо учитывать окружение (в частном случае, окружающую среду), которое влияет на вычисление эксергии в соответствии с уравнением (3). Таким образом, эксергетический баланс любой системы преобразования вещества и энергии для стационарных процессов имеет следующее выражение:

$$\Sigma E' = \Sigma E'' + \Sigma D. \tag{4}$$



Естественно, чем ниже значение ΣD при постоянном $\Sigma E'$, тем больше значение $\Sigma E''$, соответствующее результату процесса в системе. Соответственно, эксергетическая эффективность процесса в данной системе, отражающая его термодинамическое совершенство,

$$\eta_e = \frac{\Sigma E''}{\Sigma E'} = \frac{\Sigma E' - \Sigma D}{\Sigma E'}. \tag{5}$$

Значение η_e , как правило, изменяется от 1 (идеальный процесс при $\Sigma D=0$) до 0 (процесс без полезного результата из-за $\Sigma E''=0$).

Верхний предел встречается только в идеальной системе, в которой нет потерь, и поэтому значение потоков на входе равно значению на выходе. Нижний предел относится к крайним случаям, когда все входящие потоки уничтожаются в системе, и полезный эффект не производится. Последнюю систему можно назвать «никчёмной». Реальный процесс производства должен характеризоваться эксергетической эффективностью («рациональной эффективностью»

или «эффективностью Карно») в данных пределах — чем он лучше, тем выше эффективность. То есть разность между значениями на выходе и входе, равную потере внутри системы ΣD , можно уменьшить. В идеальном случае потери равны нулю.

Чтобы лучше понять результаты эксергетического анализа, представим их в виде схемы. Потоки и потери эксергии наглядно изображены на диаграмме Грассмана-Шаргута. Диаграмма для простейшей системы с одноступенчатым преобразованием потока вещества и энергии показана на рис. 8. Ширина полос равна значениям потока эксергии на входе и выходе из системы (или заданной части сложной системы). Каждая часть (подобласть) представлена прямоугольником, а сужение полосы означает потерю эксергии (ΣD) в заданной части анализируемой системы. В сложных системах на подобных диаграммах можно отражать не только потоки и потери, но также разделение и слияние эксергии. Потери в каждой части системы можно подразделить на несколько видов в соответствии с причиной их появления. При помощи графического подхода можно создать «рентгенограмму» анализируемой системы с указанием не только детального описания процессов, но также взаимодействия системы с окружающей средой и другими системами.

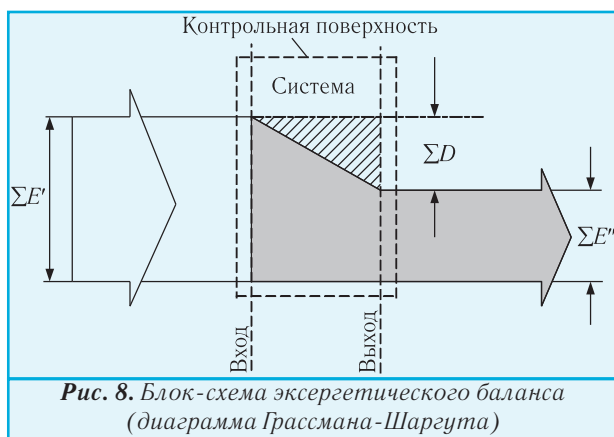


Рис. 8. Блок-схема эксергетического баланса (диаграмма Грассмана-Шаргута)

Диаграммы используются также для энергетических потоков (диаграммы Сэнки) и потоков энтропии. Обе изображены на рис. 9. Диаграммы Сэнки отражают первый закон термодинамики и показывают только распределение и слияние энергетических потоков; количественные изменения не показаны.

График потоков энтропии отражает только увеличение энтропии ΔS , связанное с потерей эксергии в соответствии с уравнением (3). Такая информация полезна, но только в отношении общих потоков эксергии. Диаграмма потока эксергии даёт полную информацию.

Строго говоря, уравнение (4) эксергетического баланса является неравенством, так как поток потерь (ΣD) не существует на самом деле. Однако в литературе потери эксергии D учитываются для удобства при вычислении баланса. Так же дело обстоит с энтропией, в данном случае неравенство возникает

из-за увеличения энтропии. Подобная интерпретация термина «баланс» допустима в широком смысле.

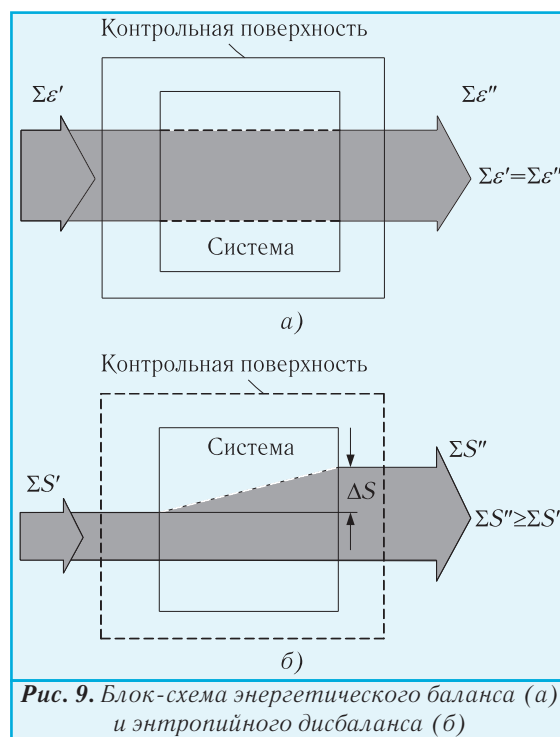


Рис. 9. Блок-схема энергетического баланса (а) и энтропийного дисбаланса (б)

Таким образом, все преобразования энергии (связанные или не связанные с передачей массы) можно графически представить в трёх формах: диаграмма потока энергии отражает первый закон термодинамики; вторая и третья формы объединяют оба основных закона. Вторая диаграмма отражает потери эксергии (через увеличение энтропии), а третья даёт полную информацию о потоках и потерях эксергии вследствие необратимости. Далее представлена иллюстрация к данному типу анализа, начиная с простого чайника и заканчивая воздухоподогревательной установкой.

3.2. Эксергетический анализ технических систем и их производительности

Практическое использование анализа эксергии можно условно представить на примере очень простой системы преобразования энергии: электрического чайника. Прибор подходит для первичной демонстрации реального энергетического и эксергетического балансов. На рис. 10 схематически изображено само устройство и его энергетические и эксергетические балансы.

Энергетический баланс процесса в чайнике можно описать следующим образом:

$$H'_w + W'_e = H''_w + H_L \quad (6)$$

или

$$W'_e = H''_w - H'_w + H_L, \quad (6')$$

где H'_w и H''_w — энтальпии холодной и кипящей воды; W'_e — потребление электрической энергии; H_L — по-

теря тепла в окружающую среду. Чтобы нагреть 1 кг воды с исходной температурой 20 °С (293 К) до 100 °С (373 К) потребуется тепло $Q=H''_w-H'_w=4,19 \cdot 80=335,2$ кДж. Потеря тепла $H_L=3$ кДж. Отсюда энергетическая эффективность процесса

$$\eta = \frac{H''_w - H'_w}{W'_e} = \frac{335,2}{335,2 + 3} = 0,99 \text{ или } 99\% \quad (7)$$

Энергетический баланс даёт отличный результат — эффективность системы — 99 %. Эксергетический баланс системы можно записать следующим образом:

$$\Sigma E' = E'_w + W'_e = E''_w + D_1 + D_2, \quad (8)$$

где $W'_e=W$ — потребление электрической энергии, строго равной эксергии; E'_w — эксергия холодной воды (E'_w при 293 К равно нулю); E''_w — эксергия воды при 100 °С (373 К), составляющая 42,1 кДж/кг; D_1 — потери эксергии при передаче тепла от электрического нагревателя воде; $D_2=H_L$ — потери эксергии при передаче тепла в окружающую среду, принятые равными 3 кДж, так как в данное количество тепла преобразуется электрическая энергия. После подстановки данных в уравнение (8) получим:

$$338,2 = 42,1 + D_1 + 3; \\ D_1 = 338,2 - 42,1 - 3 = 293,1 \text{ кДж.}$$

Отсюда, потери эксергии $\Sigma D = D_1 + D_2 = 293,1 + 3 = 296,1$ кДж.

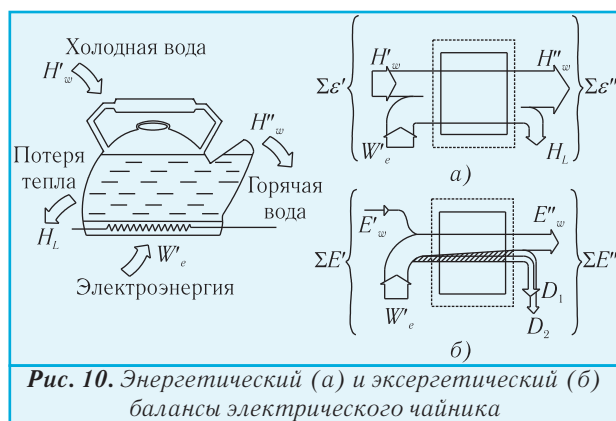


Рис. 10. Энергетический (а) и эксергетический (б) балансы электрического чайника

Таким образом, эксергетический баланс электрического чайника отличается от энергетического. Эксергетическая эффективность нагревания воды

$$\eta_e = 42,1 / 338,2 = 12,4\%$$

Эксергия теряется при передаче тепла от электрического нагревателя воде и из-за отвода тепла в окружающую среду. Различие в результатах эксергетического и энергетического анализа объясняется необходимостью учитывать не только количественные, но и качественные характеристики потоков энергии и вещества. Здесь высококачественная электрическая

энергия используется для нагрева воды только до 100 °С. Теряется весь потенциал высоких температур, более 80 %, который можно реализовать, например, для получения той же электрической энергии или в других технологиях, в химических и иных процессах.

Вышеописанный прибор не относится к высокотехнологичным системам. Однако следует признать, что многие другие широко используемые нагревательные системы тоже не обладают высокой эффективностью (особенно домашние отопительные системы, действие которых основано на применении химического топлива: угля, газа или нефти). В данной связи полезно будет проанализировать современную ситуацию на более сложном примере, чем электрический чайник или кондиционер. Нижеописанная система предназначена для кондиционирования воздуха, обогрева и вентиляции школьных зданий (рис. 11).

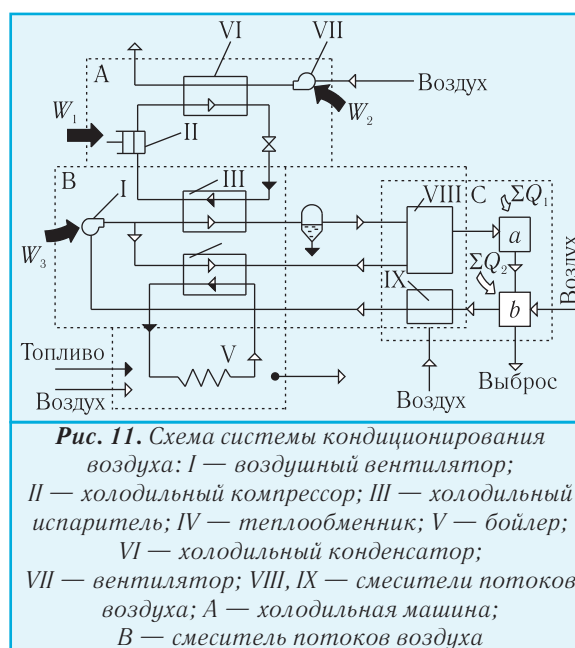


Рис. 11. Схема системы кондиционирования воздуха: I — воздушный вентилятор; II — холодильный компрессор; III — холодильный испаритель; IV — теплообменник; V — бойлер; VI — холодильный конденсатор; VII — вентилятор; VIII, IX — смесители потоков воздуха; A — холодильная машина; B — смеситель потоков воздуха

Тепло ΣQ_1 выделяется в здании, включая тепло ламп ΣQ_2 . Суммарная входная мощность $\Sigma W = W_1 + W_2 + W_3$ равна 100 кВт. Общее тепловыделение равно $\Sigma Q_1 + \Sigma Q_2 = 3,3 + 0,7 = 4$ кВт. Таким образом, энергетическая эффективность всей системы равна 0,04 или 4 %. Эксергетический анализ сложных технических систем предполагает вычисление балансов не только заданной системы как целого, но и её отдельных частей. Очевидно, что основные энергетические потери имеют место в холодильной машине (50,5 кВт) и при тепловой передаче в зоне В (32,9 кВт). Эксергетические потери отмечены на схеме (рис. 12). Данный подход даёт полную информацию о потерях эксергии и эффективности каждого компонента системы. Её можно использовать для оптимального усовершенствования системы.

Метод анализа детально рассматривается во многих работах. В большинстве случаев он демонстрирует большее термодинамическое совершенство, чем в примерах из таблиц 1-3. Но, на самом деле, показатели не такие высокие. Это ясно из табл. 4.

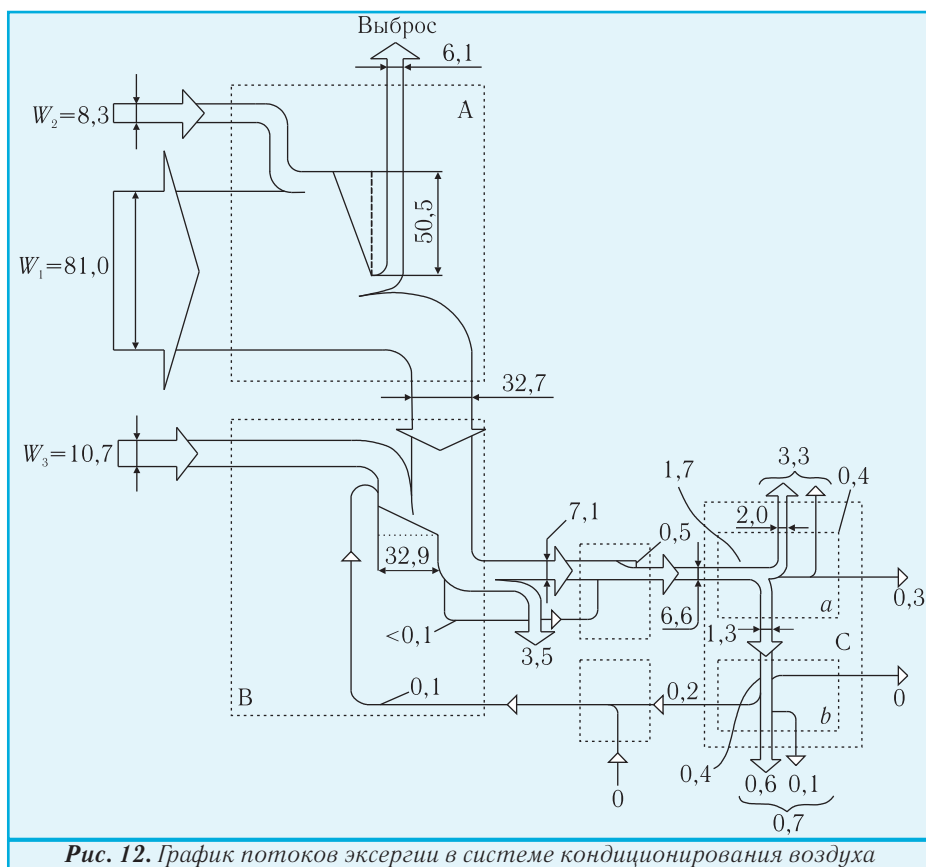


Рис. 12. График потоков эксергии в системе кондиционирования воздуха

Таблица 4. Эксергетическая эффективность различных технических систем преобразования энергии и вещества

Система	Эксергетическая эффективность, %
Электростанции	
Установки цикла Ренкина	30-38
Установки с комбинированным циклом	40-55
Электрохимические генераторы	70-75
Холодильное оборудование	
Компрессорные системы:	
– для низких температур (240-260 К)	30-55
– азотный ожижитель	20-25
– водородный ожижитель	15-20
– гелиевый ожижитель	10-15
– воздухоразделительные установки	20-28
Тепловые насосы:	
– компрессорные системы	35-40
– абсорбционные системы	35-55
Системы кондиционирования	
Летний период	4-12
Зимний период	8-15
Химическая промышленность	
Сернокислотная установка	45-50
Установка для синтеза аммиака	35-40
Металлургия	
Процессы доменной печи	30-40
Печь для электрической плавки стали	30-40

Поясним качественные показатели таблицы.

1. Термин «эффективность» имеет много значений. В большинстве случаев он обозначает отношение потока полезной энергии на выходе из системы ϵ'' к потоку энергии ϵ' на входе. Тогда качество энергии не учитывается, а результаты не отражают реальный уровень совершенства объекта. Иногда такая «эффективность» превышает 100 % (например, в тепловом насосе). Вот почему в научной литературе этот коэффициент называется КПЭ (коэффициент преобразования энергии) в отличие от эксергетической эффективности (или эффективности Карно). Разница между ними имеет большое значение, её нельзя не учитывать».

2. Эффективность отдельных систем преобразования энергии и вещества не может предоставить полную информацию об уровне совершенства и возможностях развития. Необходимо учитывать два природных явления, связанных с их совместным использованием и качественным развитием (эволюцией) с течением времени.

В любом типе государственной и региональной экономики используются неразделимые объекты, как правило, длинные цепи из объектов преобразования энергии и вещества. Начиная, к примеру, с добычи минеральных ресурсов (топлива и полезного минерального сырья) или биологического сырья и заканчивая конечным продуктом, необходимым для поддержания жизни. Эффективности отдельных частей цепи обычно не зависят друг от друга. Следовательно, минимизация потерь эксергии проводится в большинстве случаев на каждой установке отдельно. Естественно, упор делается на самые большие объекты (электростанции, химические и металлургические заводы и т.д.).

Данный подход полностью оправдан, так как работа по экономии в масштабах тысяч киловатт более выгодна, чем экономия в масштабах сотен киловатт или даже нескольких ватт в сравнительно маленьких системах ближе к концу энергетической цепи.

Но в контексте современной экономики данный подход, применимый в основном для больших объектов, не является оптимальным для всех цепей преобразования вещества и энергии, рассматриваемых как единое целое. Иногда при потреблении того же количества энергии в другой части цепи можно получить гораздо больший эффект. В таких случаях проявляет-

ся неравнозначность эксергий по всей цепи преобразований.

Предположим, что в системе с последовательной связью между элементами изменение эффективности η_e одного из элементов не влияет на эффективность других элементов (т.е. эффективность элементов не зависит друг от друга).

Такая система схематически представлена на рис. 13. В данном случае существуют простые отношения между η_e системы и $\eta_{e,i}$ её элементов. Так как эксергия на выходе из i -го элемента E_i всегда равна эксергии на входе в $(i+1)$ -ый, то:

$$E'' = E'_n = E' \eta_{e,1} \dots \eta_{e,i} \dots \eta_{e,n} = E' \eta_e \quad (9)$$

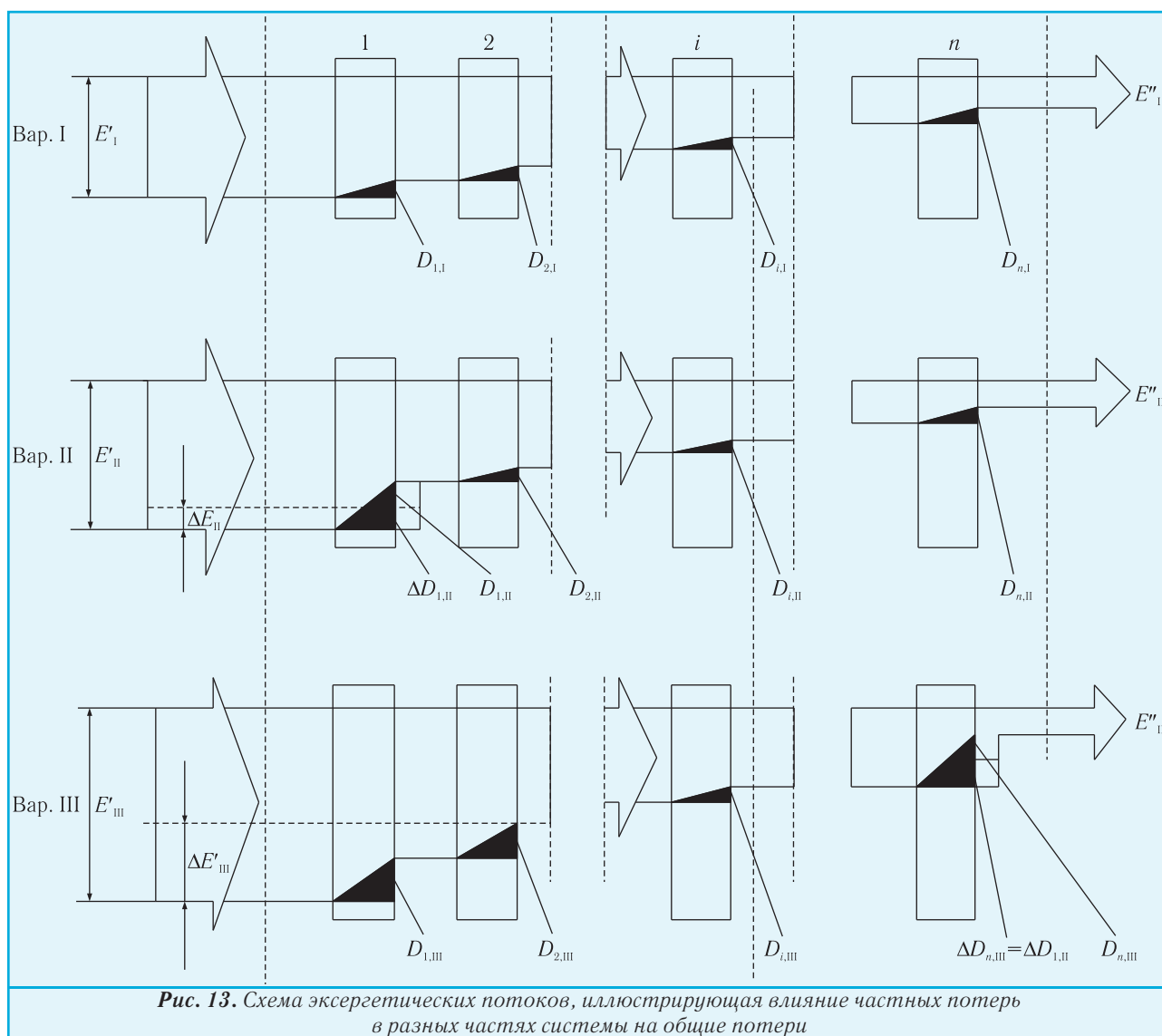
и

$$\eta_e = \prod_{i=1}^n \eta_{e,i} \quad (10)$$

Таким образом, вычисление эффективности «уравнивает в правах» все элементы системы: как только увеличивается эффективность одного из них,

настолько же увеличивается общая эффективность системы η_e . Иногда это правило «равенства прав» не ограничивает потери эксергии. В данном случае не совсем верно формальное представление об универсальности эксергии. Необходимо учитывать неэквивалентность её в различных частях системы. Для ясности представим поток эксергии в системе из n последовательно соединённых элементов, как показано на рис. 13. Пусть потери в одном из элементов системы увеличились на определённое число ΔD_i .

Проанализируем два случая. В первом (вариант II) потеря происходит в элементе 1, то есть ближайшем к входу. Во втором (вариант III) — в элементе n , в конце цепи преобразования эксергии. Предположим, что количество эксергии E'' на выходе из системы не меняется, как и эффективность всех элементов, кроме того, где встречается изменение в потерях D_i . При сравнении схем на рис. 13 видно, что такое же увеличение потерь в различных элементах приводит к увеличению потребления необходимой эксергии E' на входе в систему. В первом случае, где потери происходят в элементе 1, увеличение $\Delta E'_{II}$ равно $\Delta D_{1,II}$. Во втором случае, где потери в элементе n уве-



личились ровно на $\Delta D_{n,III} = \Delta D_{I,II}$, потребление эксергии на входе гораздо больше ($\Delta E'_{III} > \Delta E'_{II}$). Это также следует из уравнения (10). И действительно, в случае II изменилось $\eta_{e,1}$, в случае III — $\eta_{e,n}$. Но в первом случае изменения незначительны, так как добавление ΔD к знаменателю выражения $\eta_{e,1}$ больше влияет на $\eta_{e,n}$, где абсолютное значение E'_n гораздо меньше E'_1 .

Этот простой пример демонстрирует, что влияние потерь D_i в различных элементах системы неодинаково. Чем дальше элемент находится от начала цепи, тем выше влияние. Добавочная эксергия $\Delta E'_s$ на входе в систему

$$\Delta E'_s = D_n \frac{1}{\prod_{i=1}^{n-1} \eta_{e,i}}, \quad (11)$$

где знаменатель — произведение эксергетических эффективностей $(n-1)$ элементов системы. Если, например, в системе пять элементов, причём $\eta_{e,1} = 0,8$, $\eta_{e,2} = 0,6$, $\eta_{e,3} = 0,2$, $\eta_{e,4} = 0,3$, потеря 1 кВт в пятом элементе «обойдётся» в $1/(0,8 \cdot 0,6 \cdot 0,2 \cdot 0,3) = 34,72$ кВт. Таким образом, потеря 1 кВт в пятом элементе «стоит» на входе примерно в 35 раз больше, чем в первом элементе.

Данная зависимость иллюстрирует первостепенную важность усовершенствования многих систем жизнеобеспечения, располагающихся в конце технологической или энергетической цепи, особенно в системах с низкой общей эксергетической эффективностью.

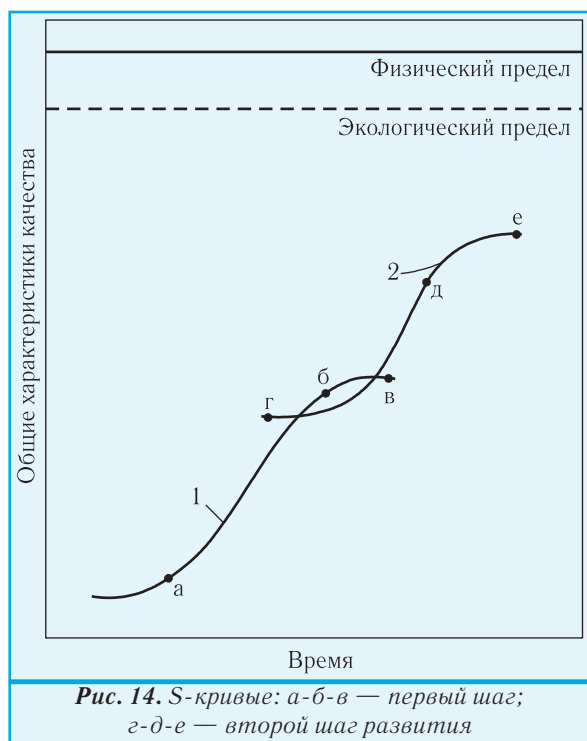


Рис. 14. S-кривые: а-б-в — первый шаг; г-д-е — второй шаг развития

Естественно, с течением времени все характеристики (η_e и др.) уровня качества постепенно увеличиваются. При анализе данной тенденции к увеличению, выяснилось, что она, как правило, имеет форму

S-кривой. Схема зависимости изображена на рис. 14.

Время отмечено по оси абсцисс, а общие качественные характеристики, или эксергетическая эффективность — на оси ординат. Данный подход применялся и раньше, но одну из главных сложностей представлял выбор коэффициента. Решение проблемы — в понятии «эксергетической производительности». В большинстве случаев кривая для данного объекта имеет S-форму, отражающую три стадии его существования.

Первая ступень развития (перед точкой а на S-кривой 1) характеризуется нулевым или очень низким уровнем роста эффективности. Данной временной период связан с поиском наилучших вариантов нового продукта. Оптимальный вариант не находится сразу, у проблемы может быть несколько решений.

К концу данного периода (точка а) устанавливается оптимальный вариант продукта, завершаются все приготовления, и начинается производство. Период между точками а и б характеризуется постепенным увеличением качества продукции в результате усовершенствования. Когда исчерпываются основные потенциальные возможности улучшения системы, начинается период насыщения (точка б). В данный период (б-в) возможны лишь незначительные улучшения. Новых существенных изменений можно добиться только через новую техническую мысль, но это требует времени из-за поиска оптимального решения. Затем процесс проходит по тому же пути, но по следующей S-кривой. Посредине S-кривой 2, есть точка д. Она имеет огромное значение. Здесь во второй раз производная меняет знак. То есть скорость увеличения качества продукта начинает угасать. Значит, приходит время для нового, улучшенного варианта продукта или системы, иначе его предложит другой производитель.

Естественно, процесс развития имеет свои ограничения, связанные с экономическими, экологическими и, конечно, физическими факторами. Анализ основан на правиле S-кривой. Правило можно применить, если качественные характеристики поддаются расчёту при помощи характеристик эксергетической эффективности.

3.3. Заключение

Анализ эксергетической эффективности и последующий выбор энергетически оптимальных свойств искусственных систем жизнеобеспечения — ключевая задача при усовершенствовании и развитии в ближайшем будущем. Но решение этих проблем — лишь часть цели более высокого порядка: обеспечить устойчивое развитие земной ноосферы для потребностей человечества не только сейчас, но и в будущем. Для анализа более широкой проблемы необходимо учитывать все доступные ресурсы Земли. Первый шаг в данном направлении включает анализ внешнего (т.е. энергетического, состоящего из энтропийного и эксергетического) и внутреннего балансов Земли. До недавнего времени считалось, что человечество ока-

зывает негативное влияние лишь на внутренний энергетический и вещественный баланс Земли. Сейчас становится ясно, что затрагивается также и внешний энергетический баланс. Данная тенденция представляет не меньшую опасность. Первый подход к этим проблемам описан в следующей части статьи.

БИБЛИОГРАФИЯ

Bandura, A.V.; Brodianski, V.M. 1996. Nature of Macroeconomic Equilibrium and Driving Force of Economic Cycles. Proceedings of ECOS-96, Stockholm, Sweden. 533-40. [В этой работе устанавливается связь между экономическими и эксергетическими свойствами производства.]

Brodianski, V.M.; Sorin, M.V.; Le-Goff, P. 1994. The Efficiency of Industrial Processes: Exergy Analysis and Optimization. Amsterdam, the Netherlands, Elsevier. 487 pp. [Всесторонний анализ преобразований массы и энергии в технических системах на основе понятия эксергии.]

Jorgensen, S.E. 1998. Exergy as an orientor for the development of ecosystems. Advances in Energy Studies (Proceedings of International Workshop, Porto Venere, Italy), pp. 371-402. Rome, Italy, Musis. [В этой работе предлагается метод вычисления эксергии биологических тканей.]

Kapitza, P. 1998. Global Problems and Energy. In: P. Kapitza, The Science and Modern Society, Moscow, Nauka.

Odum, H.T. 1996. Environmental Accounting. Energy and Environmental Decision Making, New York, John Wiley, 370 pp. [В этой работе представлено сочетание термодинамического и монетарного подходов к проблемам окружаю-

щей среды.]

Petty W. 1998. The Economic Writing of Sir William Petty.

Kelly, A.M. Publisher. [Впервые опубликовано около 1670 года.]

Ricardo, D. 1886. On the Principles of Political Economy. Cambridge, UK, Cambridge University Press. [Впервые опубликовано в 1817 г.]

Schrodinger, E. 1992. What is Life? Cambridge, UK Cambridge University Press [Впервые опубликовано в 1944 году]. 182 pp. [Это первая фундаментальная научная работа по этому вопросу.]

Smith, A. 1886. The Wealth of Nations. University of Chicago Press [Впервые опубликовано в 1776 году.]

Soddy, F. 1931. Money versus Man. London.

Szargut, J. 1998. Exergy analysis of thermal processes: ecological cost. Advances in Energy Studies (Proceedings of International Workshop, Porto Venere, Italy), pp. 77-97. Rome, Italy, Musis. [Описывается применение понятия эксергии для оценки истощения невозобновляемых природных ресурсов.]

Szargut, J; Morris, D.; Stevard, F. 1987. Exergy Analysis of Thermal Chemical and Metallurgical Processes. Hemisphere Publ. Corp. [В этой работе даются фундаментальные положения и способы применения эксергетического метода.]

Vernadsky, V.I. 1928. About the Problems and Organization of Applied Sciences in the USSR Academia of Sciences. Leningrad. Publishing house of the Academy of Science.



ВТОРОЕ ВЫСШЕЕ ОБРАЗОВАНИЕ — ЗА 2 ГОДА!



- необходимо наличие законченного высшего инженерно-технического образования;
- обучение в Одесской государственной академии холода по направлению Украинской ассоциации производителей технических газов "УА-СИГМА";
- специальность 8.090507 "Криогенная техника и технология";
- форма обучения — заочная контрактная;
- завершение учёбы — сдачей государственного экзамена;
- возможность продолжения обучения для получения диплома магистра;
- диплом Министерства образования и науки Украины признается в странах СНГ.

Условия приёма по контактному тел./факсу: +38 (048) 777-00-87