

Н.Е. Сердитова

АНАЛИЗ СЛОЖНЫХ ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМ: ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ ПОДХОД

N.E. Serditova

**ANALYSIS OF COMPLEX ECO-ECONOMIC SYSTEMS:
A THERMODYNAMICAL APPROACH**

В экономической литературе можно найти два различных подхода. Первый, представляемый традиционной экономической наукой, полагает, что технологические инновации могут решить проблему снижения качества энергии и сырьевых материалов и поэтому экономический рост может продолжаться бесконечно. Второй подход, реализуемый экологической (или биофизической) экономикой опирается на законы термодинамики и упрекает традиционный подход в пренебрежении долгосрочной устойчивостью.

There are two different approaches in the literature. The first one, represented by traditional economics, assumes that technological innovations can solve the problem of lowering quality of minerals and energy resources, so that the economic growth will never end. The second approach, adopted by ecological (or biophysical) economics, is based on principles of thermodynamics and criticizes the traditional approach for ignoring long-term sustainability.

Человечество получало немало тревожных предупреждений по поводу экономического роста и связанных с ним негативных последствий для окружающей среды. Одним из первых был Томас Роберт Мальтус, который в 1798 опубликовал «Эссе о принципах народонаселения» [1]. В этом эссе он предсказывал, что рост населения будет опережать экономический рост, который ограничен площадью пахотных земель. Почти через два столетия экономист Николас Георгеску-Рёген отметил, что экономические процессы, в отличие от общепринятого мнения, не являются циклическими и, в конце концов, приведут к истощению мировых запасов природных ресурсов. Затем, в 1972 г. Римский клуб опубликовал шокирующий отчет «Пределы роста», за которым последовала еще одна известная книга Джереми Ривкина «Энтропия в парниковом мире». В этой работе рассмотрено, как второе начало термодинамики влияет на экономический процесс, который в свою очередь, определяет качество окружающей среды.

Общие тенденции в состоянии окружающей среды

В последние 50 лет мы все больше узнаем о воздействии человека на окружающую среду. В течение, по крайней мере, 200 лет человечество создавало различные крупные формы экономической деятельности для удовлетворения растущих рыночных потребностей. Преобладающей стала экономическая мо-

дель непрерывного роста, основанная на идее о том, что рост происходит автоматически в результате научно-технического прогресса. Есть много причин для восхваления экономического роста. Например, многие считают, что экономический рост необходим для избавления от бедности и обеспечения полной занятости. В то же время, экономическая деятельность оказывает воздействие на состояние окружающей среды и энтропия является одним из методов описания этого воздействия. Но вначале давайте приведем несколько фактов о нашей экономической системе.

Бесспорно, одним из главных факторов, определяющих мировую экономическую активность, является численность населения. На рис. 1 показан рост численности населения за последние 70 лет и прогностические оценки на будущее. С увеличением экономического роста в развивающихся странах можно ожидать, что столь же существенно возрастет и мировая экономическая активность, как показано на рис. 2. С 1970 по 2002 гг. население земного шара выросло на 50 процентов, а объем экономического производства утроился [3].

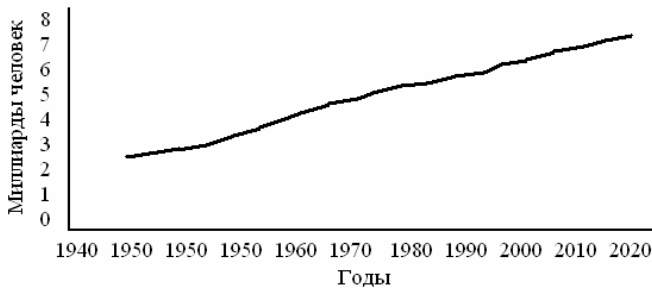


Рис. 1. Рост численности мирового населения

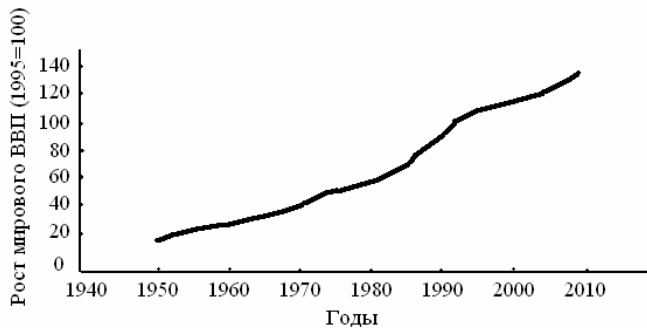


Рис. 2. Рост мирового ВВП (по данным ВТО)

Такой экономический рост требует использования природных ресурсов и, в первую очередь, энергии (главным образом, от ископаемого топлива), а также материалов (главным образом, древесина, железо, медь). Природные ресурсы, как известно, бывают возобновляемыми и невозобновляемыми. Возобновляемые ресурсы, такие как солнечная, ветровая и гидроэнергия, считаются таковы-

ми в том смысле, что будущие поколения теоретически будут по-прежнему иметь к ним доступ, хотя их мощность в любой заданный момент времени ограничена. Невозобновляемые ресурсы включают все виды ископаемого топлива и природных материалов, таких как минеральное сырье и металлы. Использование невозобновляемых ресурсов невосполнимо, то, что мы потребляем сегодня, просто отнимается у будущих поколений.

Кроме потребления природных ресурсов, экономический процесс производит отходы. Наиболее широко обсуждаемыми темами в этой области является загрязнение воздуха, влияние парниковых газов на глобальное изменение климата, разрушение озонового слоя, кислотные осадки и др. Парниковые газы относительно прозрачны для коротковолновой солнечной радиации, но поглощают длинноволновую тепловую радиацию, излучаемую земной поверхностью. Эти газы включают углекислый газ, хлорфторуглероды (ХФУ), метан, двуокись азота.

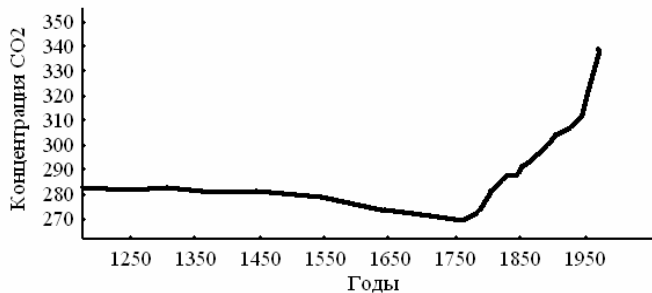


Рис. 3. Изменение концентрация CO₂ с 1250 г.
(по данным исследования антарктических ледников)

На рис. 3 видно, насколько возросла атмосферная концентрация углекислого газа с началом промышленной революции в XIX в., когда дрова и уголь стали использоваться в качестве топлива и источника энергии. Рост концентрации CO₂ и ХФУ с все большей степенью научной определенности называют главными причинами парникового эффекта и глобального изменения климата, что подтверждается недавним Четвертым отчетом МГЭИК ООН. ХФУ разрушают озоновый слой в стратосфере на высотах между 12 и 70 км. Стратосферный озон, природный защитник жизни на Земле от экстремальных уровней ультрафиолетовой (УФ) солнечной радиации, образуется, когда молекулы кислорода в верхней атмосфере поглощают солнечную радиацию и расщепляются на атомы, которые рекомбинируют с молекулами кислорода, образуя озон O₃. ХФУ используются в бытовых и промышленных холодильных установках. Эти химические вещества распадаются, освобождая хлор, который и разрушает молекулы озона. Хотя и были предприняты международные меры (Монреальский протокол) по запрещению использования ХФУ и замене их на менее опасные вещества, следует отметить, что уже выпущенные ХФУ будут находиться в атмосфере

еще около 400 лет. Поэтому даже строгое запрещение ХФУ не может немедленно избавить озоновый слой от нанесенного ущерба.

Одной из групп исследователей, вынесшей вопросы окружающей среды на международную политическую арену, являлся так называемый Римский клуб, созданный в 1968 г. учеными, озабоченными разрушением окружающей среды в результате промышленной деятельности. В 1972 г. эта группа опубликовала отчет «Пределы роста», в котором описывалась связь между экономическим ростом и ущербом для окружающей среды. Этот отчет имел большой общественный и политический резонанс. Группа разработала динамическую глобальную модель, в которую было включено пять основных глобальных тенденций: рост промышленной активности, рост численности населения, истощение природных ресурсов, недостаточное питание во многих регионах и, наконец, увядающая окружающая среда. Модель приводила к шокирующим заключениям о том, что если ничего не делать, истощение природных ресурсов приведет к глобальному краху до 2100 г. В отчет были также включены различные экономические сценарии и их последствия. Удручающая картина состояла в том, что если бы мы даже могли добавлять ресурсы и применять новые технологии, крах все равно был бы неизбежным. Это происходит из-за экспоненциального роста в конечной сложной системе. Группа предложила выход из этой ситуации в виде перехода к устойчивому состоянию, в котором объем промышленного производства замораживается на уровне 1975 г., а так же ограничивается рост численности населения. Римский клуб продолжает существовать по сей день, объединяет членов из 52 стран и продолжает публиковать отчеты по вопросам окружающей среды [3].

Несколько иной подход включения экологической компоненты состоит во введении понятия несущей способности. Несущая способность – это максимально допустимая постоянная нагрузка, которую может выдержать данная окружающая среда для определенной цели (например, для продолжения человеческой цивилизации). Человеческая цивилизация нуждается в энергии, минеральном сырье, древесине, пище и т.д. Несущая способность может быть рассчитана как, например, площадь суши, необходимая для поддержания нашей цивилизации. Расчеты Reese и его сотрудников показывают, что, например, в 1995 г. было 1,5 гектара пахотной земли на душу населения [9]. Однако, например, жителям Ванкувера было необходимо 4,2 гектара на душу населения для поддержания их уровня потребления. Еще более яркий пример найден в Нидерландах. Из-за высокой плотности населения эта страна нуждается в ресурсах с площади в 15 раз большей площади страны. Если посмотреть на глобальную ситуацию, то для того, чтобы остальному населению Земли жить на том же уровне, что и население Северной Америки, человечеству понадобится еще одна обитаемая планета того же размера, что и наша.

Рассмотренные выше несколько примеров просто еще раз напоминают о достаточно очевидном факте: экономическая активность серьезно влияет на

окружающую среду. В дальнейшем мы рассмотрим, как концепция энтропии может помочь нам в понимании взаимодействия между экономическим процессом и истощением природных ресурсов и нарастающим загрязнением.

Понятие энтропии

В нашем материальном мире мы имеем дело с потоками вещества и энергии, которые под действием человека превратились в экономическое явление. Экономическое явление возникает всегда, когда мы имеем место с ограниченными ресурсами. Строго говоря, на нашей планете нет неограниченных запасов, они все конечны, хотя некоторые кажутся изобильными. Часть запасов, которая может быть преобразована, формирует ресурсы. Часть из них преобразуется в товары для потребления, которые имеют стоимостное выражение.

Все реальные энергетические процессы генерируют энтропию. Энтропия (S), понятие из термодинамики, может быть рассчитана как количество тепла (Q) переданного при теплообмене, деленное на температуру (T), при которой имел место теплообмен

$$\Delta S = \frac{\Delta Q}{T} .$$

Это определение было введено в оборот Р. Клаузиусом в 1865 г. [2]. Он хотел компенсировать недостаток Первого закона термодинамики (закона сохранения энергии), который не мог объяснить, почему тепло всегда передается от более теплого тела к более холодному и обратный процесс никогда не наблюдается. Изучая свойства этого нового понятия, он пришел к заключению о том, что в изолированной системе (в которой нет обмена энергией или массой с окружающей средой) энтропия всегда возрастает в процессах, которые меняют распределение энергии внутри системы.

Во всех процессах, связанных с потреблением энергии, по сути, происходит лишь ее превращение или перераспределение. Примером превращения энергии является сжигание ископаемого топлива. Мы превращаем химическую энергию, хранящуюся в химических связях между атомами в тепловую. Эта тепловая энергия может использоваться с какой-то целью, например, двигать автомобиль, при этом часть ее используется для совершения работы. Конечным результатом этого процесса является полное исчезновение топлива (кроме остатков в виде пепла и сажи) и его превращение в газообразную форму (главным образом, CO_2 и водяной пар), выполненная работа, например, перемещение машины на определенное расстояние, и остаточное тепло, которое не удалось конвертировать в работу и которое рассеивается в окружающую среду. Возникает вопрос, можно ли вернуть энергию в первоначальное состояние, чтобы ее использовать еще раз для движения автомобиля. Если бы мы имели дело только с первым началом термодинамики, такое в принципе бы было возможно, поскольку энергия не исчезла, а только превратилась в другие формы (совершен-

ная работа и тепло) и распределилась в больший объем. Однако, из опыта известно, что такую идею не удастся материализовать. Фактически такое было бы возможно, если бы мы могли изобрести вечный двигатель. Почему же это невозможно?

Именно здесь вступает в силу второе начало термодинамики, поскольку при этом бы произошло запрещенное уменьшение энтропии. Каждый раз, когда мы превращаем («потребляем») энергию, автоматически возрастает энтропия. Конечно, энтропия малой системы может уменьшаться, как, например, при охлаждении чайника с горячей водой. Тем не менее, общий уровень энтропии в большой системе будет возрастать по мере того, как тепло от чайника уходит в окружающую среду. Конечно, теоретически, можно поймать каждую молекулу, образовавшуюся после сжигания топлива при поездке на автомобиле и вернуть их на исходные места. Однако, для этого потребуется еще больше энергии (и соответственно, будет произведено еще больше энтропии).

Второе начало термодинамики, по сути, запрещает «рециклирование» энергии. Энергия полезна для нас только в форме, позволяющей совершать работу. Такая функция располагаемой работы в термодинамике называют эксэргией. Можно сказать, что качество энергии, ее эксэргия, ухудшается по мере выполнения работы. Энтропия также может использоваться как показатель качества энергии. Вышесказанное может быть обобщено следующим образом:

- Высококачественная энергия (обладающая высокой способностью выполнения работы) имеет низкий уровень энтропии;
- Низкокачественная энергия (обладающая низкой или нулевой способностью выполнения работы) имеет высокий уровень энтропии.

Второе начало термодинамики утверждает, что в изолированной системе преобразование энергии всегда происходит от высококачественного состояния к низкокачественному, иначе говоря, количество эксэргии уменьшается. Во время превращения энергии всегда происходит необратимое производство энтропии. Имеется фундаментальная причина того, почему энтропия может только возрастать. На это впервые указал Людвиг Больцман, который в 1880 г. установил связь между энтропией и механическими свойствами молекул и атомов [10].

На рубеже XIX и XX вв. шли горячие дебаты о существовании атомов. Больцман считал, что они существуют, и многие физические явления могли быть объяснены с помощью распределений их энергии и скоростей. Основываясь на результатах Больцмана, Макс Планк [11] сформулировал то, что теперь называется уравнением Больцмана:

$$S = k \ln W ,$$

где S – энтропия системы; k – постоянная Больцмана; W – термодинамическая вероятность, или количество возможных микросостояний, которые могут приводить к данному макросостоянию, иначе говоря, количество способов реализации данной системы.

Значение W указывает, по сути, насколько вероятно существование системы при заданных характеристиках. Рассмотрим пример. Допустим, у нас имеется колода карт с 4 одинаковыми картами. Колода в целом может быть описана такими параметрами, как количество карт, толщина колоды, ее вес и т.д. С 4 картами мы имеем $4! = 1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4 = 24$ возможных конфигураций, которые приведут к одинаковым значениям параметров колоды. В этом случае $W = 24$. Постоянная Больцмана $k = 1,380\ 6504(24) \cdot 10^{-23}$ Дж/К, поэтому энтропия в этом случае будет равна $k \cdot \ln 24 = 4,4 \cdot 10^{-23}$. Чем больше возможностей имеет данная система для установления какого-то состояния, тем более вероятным становится наступление данного состояния, тем выше будет энтропия. С этой точки зрения становится понятным наблюдение Клаузиуса о том, что энтропия со временем возрастает. Это происходит потому, что заданная (изолированная) система будет стремиться к все менее упорядоченному состоянию и такое состояние является более вероятным. К сожалению, с точки зрения человека, чем менее упорядочена система, тем менее она полезна. Энергия куда более полезна, когда она «собрана» в литре бензина, чем когда она рассредоточена в окружающей среде после сжигания этого литра. Ясно, что энтропия при этом возрастет, поскольку степень упорядоченности после сжигания снизится.

Энтропия и экономический процесс, переопределение понятий эффективности и устойчивости

Что такое «экономический процесс»? Можно найти множество определений, но здесь мы будем придерживаться подхода Н. Георгеску-Рёгена [4]. Главной задачей экономического процесса является обеспечение долгосрочного существования человеческих особей. Другими словами, продукция экономического процесса предназначена для поддержания и повышения удовлетворения от жизни. Можно определить три важных частных экономических процесса: сельское хозяйство, добыча полезных ископаемых и промышленное производство.

Сади Карно, молодой французский военный инженер, захотел оценить производительность парового двигателя (необходимое для производства заданной работы количество угля) и закончил эту задачу детальным анализом его циклической природы (цикл Карно) [12]. После этого стало ясно, что производительность зависела только от разницы температур пара в котле и холодильнике. Это покончило с бытовавшим заблуждением о неограниченной производительности паровой машины. Стало ясно, что из всей доступной тепловой энергии при высокой температуре, только ее часть может быть использована для совершения работы, а остаток являлся тепловыми потерями при низкой температуре холодильника и никак не мог использоваться для выполнения работы.

Таким образом, используя тепло для совершения работы, мы фактически не потребляем энергию. Суммарное количество энергии остается неизменным. Меняется качественная характеристика энергии: она превращается из доступной формы (способной совершать работу) в недоступную форму (неспособной

совершать работу). Количество эксэргии уменьшается на величину полезной работы. Вот мы, наконец, и добрались до сути проблемы. В типичной экономической модели экономический процесс считается цикличным. Это представление, среди прочего, вызвано тем, что деньги, отнюдь не второстепенная вещь в экономике, переходят из одних рук в другие, никогда не исчезая. Можно найти некоторые параллели между деньгами и энергией. Как отмечалось, энергия остается неизменной в ходе экономического процесса, казалось бы, о чем беспокоиться? Мы знаем, в чем состоит загвоздка. Мы также знаем, что энтропия изолированной системы возрастает и это возрастание необратимо. Все это сводится ко второму началу термодинамики, которое утверждает, что есть только одно направление, в котором движется наша планета и обратной дороги нет: все наши процессы ухудшают качество доступной для нас энергии. Поэтому представление о цикличности экономического процесса является заблуждением.

Пример экономического процесса и закона энтропии

Рассмотрим связь между экономическим процессом и вторым началом термодинамики более подробно. Шуточная связь между энергией и экономикой может быть найдена в простых определениях. Энергия – это способность совершать работу. Деньги – способность заставить других людей выполнять работу. Однако, в действительности, эта связь куда более фундаментальна и серьезна. Рассмотрим экономический процесс на примере жизненного цикла стекла. Стекло играет большую роль в повседневной жизни, и хотя оно само по себе не загрязняет окружающую среду, процесс его производства, как мы увидим, определенно ее загрязняет. Кроме того, стекло является одним из лучших примеров рециклируемого материала, однако, это тоже приводит к заблуждениям. Большая часть стекла производится в двух формах – оконное и бутылочное. Мы рассмотрим только бутылки.

Жизнь стеклянной бутылки начинается со сбора сырья, кремнезема (химическое вещество диоксид кремния), которое может быть найдено в кварцевом песке, или в случае рециклирования, в измельченном стекле из перерабатываемых бутылок. Фактически, кварцевый песок уже является стеклом, но в форме очень мелких частиц. Кварц подается в печь для плавления, иногда добавляются специальные присадки для изменения свойств стекла (например, окись свинца для производства хрусталя, железо для придания коричневого или зеленого цвета и соли кобальта для голубых или зеленых оттенков).

Рассмотрим как этапы, схематически показанные на рис. 4 существенно влияют на энтропию в качественном смысле (т.е. в терминах возрастания / убывания). Мы будем это делать по окончании каждого этапа за исключением начального, сбора сырья. Также учтем влияние на окружающую среду на каждой фазе цикла. Назовем внешнюю среду «окружающим миром», приняв за его границы область, за пределами которой процесс производства не оказывает какого-либо обнаруживаемого воздействия на окружающую среду. Уровень энтропии

сырья и окружающего мира зададим произвольно и будем следить лишь за его увеличением/уменьшением в дальнейшем.

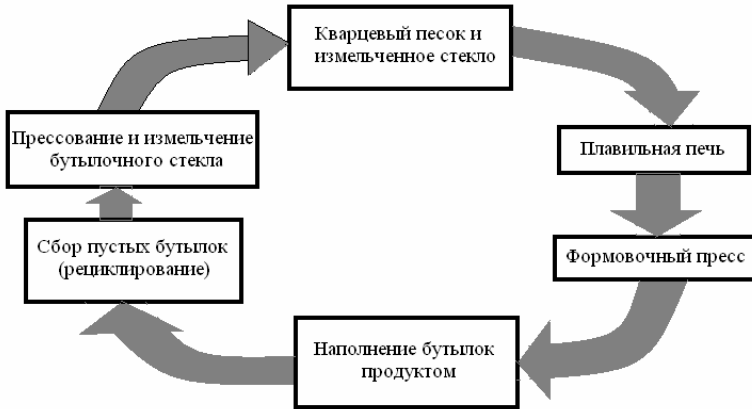


Рис. 4. Жизненный цикл стеклянной бутылки

Итак, следующий шаг – плавильная печь, температура в которой может достигать 1700 °С. Молекулы силиката переходят в жидкое состояние, из формулы Больцмана следует, что энтропия должна возрасти, поскольку для молекул имеется больше возможных микросостояний. Что же происходит с энтропией окружающего мира? Для нагрева и поддержания высокой температуры печи требуется много энергии. Для этого сжигается ископаемое топливо, что приводит к увеличению энтропии и выбросу углекислого газа. Для выплавки одной тонны стекла требуется 4 гигаджоуля энергии. Поэтому можно ожидать, что энтропия будет расти как для стекла, так и окружающего мира. На рис. 5 это показано в виде подъема соответствующих столбцов энтропии.

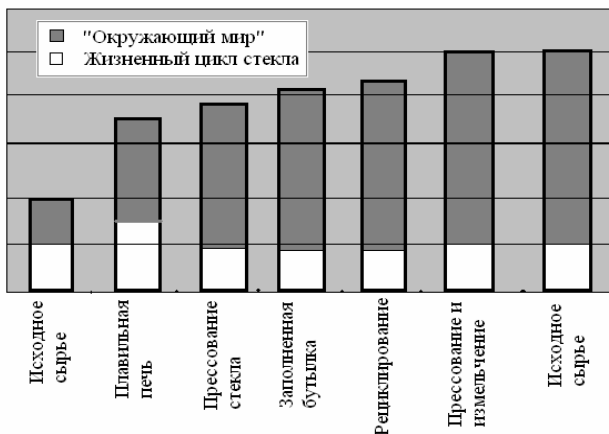


Рис. 5. Изменение энтропии в жизненном цикле стекла

После плавления стекла следующий этап заливки стекломассы в формы, где под давлением им будет придана форма бутылок. Затем производится контролируемое охлаждение, чтобы избежать создания напряжения в стекле и образования трещин. По мере превращения стекла из жидкой фазы в твердую, с обретением формы стекла, энтропия уменьшается, поскольку материал переходит в более упорядоченное состояние. Однако «мировая» энтропия при этом возрастает, поскольку нужна энергия для формовки. Кроме того, охлаждение стекла сопровождается отводом тепла в окружающую среду, что опять-таки приводит к росту энтропии. Уменьшение энтропии стекла меньше увеличения энтропии окружающего мира, поэтому в целом в изолированной системе энтропия возрастает.

Следующим этапом является наполнение бутылок жидкостью, т.е. водой, пивом, лимонадом, лекарствами и т.д. Допустим, что все пустые бутылки затем будут рециклированы. Производство бутылки из отходов стекла без ухудшения качества стекла снижает расходы на энергию почти на 30 процентов, достаточно, чтобы от каждой бутылки в течение часа горела 100-ваттная лампочка. Рециклирование приносит около 20 процентного сокращения загрязнения воздуха. А что можно сказать по поводу баланса энтропии? Для переработки отходов необходимо транспортировать пустые бутылки в центры сбора, а затем на стекольную фабрику. Энтропия стекла сильно не изменится, однако истраченное топливо для транспортировки увеличит энтропию окружающего мира. Экономия энергии и загрязнения воздуха действуют в противоположном направлении.

На стекольной фабрике бутылки должны быть разбиты, а стекло измельчено. Можно ожидать, что энтропия стекла при этом несколько возрастет, поскольку битое стекло представляет более беспорядочное состояние, чем целая бутылка. Энтропия окружающего мира опять возрастет, поскольку для работы дробильных машин необходима электроэнергия. Для получения электроэнергии необходимо сжигать топливо, что и приводит к росту энтропии, что отмечено более высоким столбцом на рис. 5.

На этом этапе мы возвращаемся к фазе сырья. Битое измельченное стекло будет перемешано с силикатным песком и отправлено в плавильную печь и процесс начнется заново. Если говорить о процессе производства стекла, он выглядит как замкнутый цикл, показанный на рис. 4. Однако, с точки зрения энтропии (рис. 5) ничего похожего на замкнутый цикл не наблюдается: энтропия растет с начала процесса. Мы приходим к выводу, что рециклирование стеклянных бутылок вовсе не является циклическим процессом.

Эффективность и устойчивость

Традиционная экономика, как правило, не уделяет большого внимания побочным эффектам экономического процесса. По умолчанию предполагается, что новые и лучшие технологии, в конце концов, решат основные проблемы окружающей среды. Однако пример со стеклом показывает ошибочность такого

представления. Теоретически, с точки зрения потребляемых материалов, мы можем продолжать рециклирование стекла бесконечно, однако, с энтропийной точки зрения, энтропия нашего мира будет все время расти, частично по естественным причинам, но промышленная деятельность будет значительно ускорять этот процесс.

Мы установили, что экономический процесс переводит доступную энергию и ресурсы в высокоэнтропийное состояние, причем со скоростью большей, чем это бы происходило естественным образом. Следует отметить, что рост энтропии частично компенсируется уменьшением энтропии, вызванным солнечной радиацией. Это высокоэнтропийное состояние может быть описано как непрерывное производство отходов экономическим процессом. Этот фундаментальный и в значительной степени невидимый механизм не учитывается традиционной экономикой. Этот недостаток связан с традиционным определением эффективности. Эффективность часто определяется как объем произведенной продукции по отношению к затратам на производство в терминах численности персонала, объема сырья или капитальных вложений. Все усилия после этого концентрируются или на увеличении объема производства, или на сокращении затрат. Это называется повышением эффективности или иногда называется экономическим развитием. Однако, если мы хотим принять во внимание природные ресурсы, одновременно необходимо искать пути сокращения количества производимой энтропии. Например, в процессе производства стеклянных бутылок, внимание нужно уделить не только тому, что в процессе производства стекла энтропия меняется не так значительно, а также важно учесть рост энтропии в окружающем мире. При таком подходе имеет смысл определить что-то вроде энтропийной эффективности, или общее количество произведенной энтропии на каждую выпущенную бутылку. Если мы включим такое понятие эффективности в общий процесс ее повышения, мы действительно получим устойчивую экономику.

Рассмотрим более подробно вопрос производства энтропии. Мы знаем, что энтропия изолированной системы возрастает. В пределе, в конце концов, энтропия достигнет своего максимального значения и тогда все придет в мертвую точку. Конечно, мы надеемся, что такое случится нескоро. Момент, когда остановится экономика, наступит значительно раньше, чем мировая энтропия достигнет своего максимума. На рис. 6 сделана попытка отразить ситуацию в упрощенной версии. На нем показано как энтропия мировой системы меняется со временем.

Линия А является опорной. Она представляет скорость производства энтропии в отсутствие человека (или другой «цивилизованной» формы жизни). Энтропия будет устойчиво расти в соответствии со вторым началом термодинамики, пока не наступит момент t_A , когда вся доступная энергия трансформируется в недоступную. Это может произойти через миллиарды лет. В случае В на планете учтена человеческая цивилизация с энтропически неэффективными

экономическими процессами. Скорость производства энтропии возрастает по сравнению со случаем А и продолжает расти до тех пор, пока не использованы все ископаемые формы источников энергии и природных ресурсов. К этому времени t_B промышленная активность становится невозможной. Ясно, что t_B наступит раньше t_A . Этот очень упрощенный пример показывает, что мы оставляем меньше времени будущим поколениям независимо от рециклирования. Энтропия не может быть рециклирована. После t_B производство энтропии будет происходить примерно с той же скоростью, что и в случае А. Единственное отличие состоит в том, что момент достижения максимума энтропии t_C наступит значительно раньше, чем в случае А.

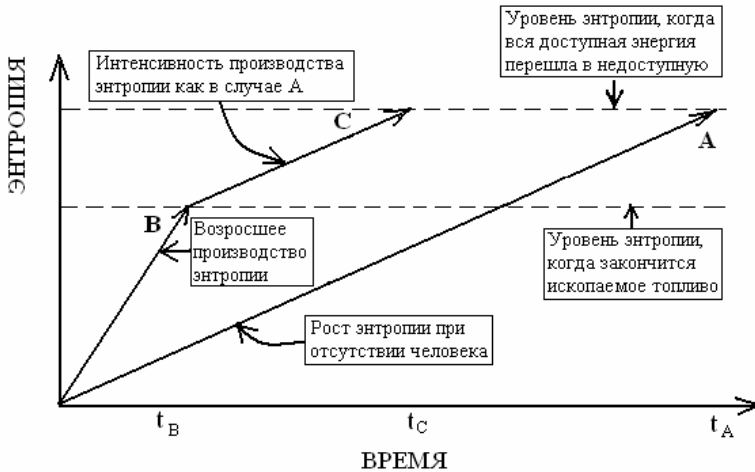


Рис. 6. Упрощенная схема мирового производства энтропии

Широко распространено убеждение в том, что технический прогресс найдет решение проблем нехватки источников энергии и материалов. Будущее в области технологии довольно трудно предсказывать. Например, официальное заключение по поводу недавно изобретенного телефона в 1876 г. звучало следующим образом: «Телефон имеет слишком много недостатков, чтобы всерьез рассматриваться как средство связи. Прибор практически бесполезен» [13]. Однако можно осмелиться сделать прогноз, что будущее за возобновляемыми источниками энергии с низким производством энтропии.

Преобразование доступных ресурсов в недоступные

Взрослый человек должен преобразовать в среднем около 8000 килоджоулей в день для поддержания своих физических потребностей. Если включить сюда все источники энергии для производства автомобилей, электричества, продовольствия и других продуктов повседневной жизни, то каждый из нас в среднем преобразует 800 000 килоджоулей в день! [6]. Поскольку все в природе, даже материя, по сути, является энергией, не стоит удивляться, что второе

начало термодинамики применимо к экономическим процессам. Каждый раз, когда мы преобразуем энергию, неизбежно уменьшается эксэргия.

Суммарное количество энергии всегда сохраняется постоянным, а что можно сказать о материалах? Например, рассмотрим железо. Железо является стабильным элементом, что означает, что суммарное количество атомов железа на планете не меняется. Железо добывается из руды, затем в процессе переработки освобождается от соединений с другими элементами, главным образом, кислородом. Затем железо используется в самых различных изделиях, от винтов до кузовов автомобилей и железнодорожных вагонов. После того, как изделия отслужат свой срок, считается, что почти весь металл может быть рециклирован. Это не совсем так. Например, в случае железнодорожных рельсов, каждый раз, когда поезд тормозит или разгоняется, происходит их износ и молекулы и атомы выбрасываются в воздух. Это сравнимо с диффузией газа, когда его молекулы всегда стараются занять максимальное доступное пространство (другой пример роста энтропии). Таким образом, определенная часть железа не может быть рециклирована, и она потеряна для экономического процесса. Эти потери сравнимы с преобразованием доступной энергии в недоступную.

Открытые неравновесные системы

Второе начало термодинамики сформулировано для изолированных систем. В таких изолированных системах со временем порядок и организация должны исчезнуть. В то же время мы знаем, что существуют развивающиеся системы, в которых нарастает сложность и упорядоченность. Более сложной моделью для таких развивающихся систем являются системы, далекие от теплового и химического равновесия. Они нелинейные и проходят через стадии неопределенности. Они не стремятся к минимуму свободной энергии и максимуму удельной энтропии, но усиливают определенные флуктуации и дрейфуют в сторону нового динамического режима, радикально отличающегося от установившегося или равновесного состояния.

На первый взгляд развитие систем, далеких от состояния равновесия противоречит второму началу термодинамики. Как же могут системы повышать свой уровень сложности и организованности, и при этом становится более энергонасыщенными? В изолированных системах, в конце концов, должно воцариться однообразие и случайность. Дело в том, что развивающиеся системы не являются изолированными, поэтому второе начало термодинамики не полностью описывает то, что происходит с ними, точнее, между ними и окружающей средой. Такие системы всегда являются открытыми, так что изменение энтропии в них определяется не только необратимыми внутренними процессами. Внутренние процессы удовлетворяют второму началу: доступная энергия, однажды использованная, не способна к совершению дальнейшей работы. Однако, энергия, необходимая для совершения работы может быть «импортирована» открытыми системами из окружающей среды. Таким образом, через границы

системы может происходить перенос доступной энергии или негативной энтропии. Изменение энтропии внутри системы описывается известным уравнением Пригожина

$$dS = d_j S + d_e S,$$

где dS – изменение энтропии в системе, $d_j S$ – изменение энтропии в результате необратимых процессов внутри системы, $d_e S$ – изменение энтропии, перенесенное через границы системы. В изолированной системе dS всегда положительно, имеется только первый член уравнения, который всегда растет по мере совершения работы. В открытой системе второе слагаемое может компенсировать или даже превышать первое, тогда изменение энтропии dS может быть нулевым или отрицательным. Открытая система может находиться в стационарном состоянии $dS = 0$, или расти и усложняться ($dS < 0$). В такой системе энтропия, произведенная необратимыми процессами внутри системы, передается в окружающую среду [14].

Когда две величины, доступная энергия внутри системы и доступная энергия, импортируемая через границу из окружающей среды, уравниваются друг друга, система находится в устойчивом состоянии. В динамичной окружающей среде эти две величины редко надолго уравниваются друг друга, поэтому в реальном мире, в лучшем случае, системы являются метастабильными.

Открытые системы, (такие, как человеческое тело или экономика) подвержены действию тех же самых сил энтропийного распада, как и изолированные. Это означает, что для поддержания внутреннего порядка и целостности они постоянно должны импортировать высококачественную энергию и материалы извне и экспортировать низкокачественную энергию и отходы.

Современная формулировка второго начала термодинамики утверждает, что все высокоупорядоченные неравновесные сложные системы с необходимостью развиваются и растут (повышают внутреннюю упорядоченность) за счет возрастающего беспорядка в системах более высокого порядка иерархии, т.е. в окружающей среде.

Экономика является примером высокоупорядоченной сложной динамической системы. Она также является открытой подсистемой материально закрытой нерастаущей экосферы, т.е. экономика находится внутри экосферы. Таким образом, экономика зависит для своего поддержания, роста и развития от производимой экосферой низкоэнтропийной энергии и материалов, а также от ассимиляционного потенциала экосферы для производимых отходов. Это означает, что за определенной точкой непрерывный рост экономики (т.е. рост народонаселения и накопление производственного капитала) может происходить только за счет возрастающего беспорядка (энтропии) в экосфере. Это происходит, когда потребление экономикой превышает природное производство, что проявляется через ускоряющееся разрушение природного капитала, сокращения биоразнообразия, загрязнение воздуха, вод, суши, изменение климата и т.д.

Технический прогресс избавил человечество и его экономику от полной зависимости от единственного источника низкоэнтропийной энергии с невысоким расходом, а именно солнца, что, по сути, и провело границу между доиндустриальным и индустриальным обществом. Однако технический прогресс не может отменить закон энтропии.

Заключение

В экономической литературе можно найти два различных подхода: один, представляемый традиционной экономической наукой, полагает, что технологические инновации могут решить проблему снижения качества энергии и сырьевых материалов и поэтому экономический рост может продолжаться бесконечно. Экологическая (или биофизическая) экономика опирается на законы термодинамики и упрекает традиционный подход в пренебрежении долгосрочной устойчивостью. Например, затраты на восстановление потери озонового слоя или последствий загрязнения, изменения климата не учитываются в стандартных экономических оценках. Мы видели как промышленность и сельское хозяйство ускоряет производство энтропии в нашем мире. Производство энтропии может продолжаться, пока мы не достигнем точки, в которой вся доступная энергия преобразуется в недоступную. Чем быстрее мы приближаемся к этой точке, тем меньше свободы мы оставляем будущим поколениям. Если бы производство энтропии было включено во все экономические модели, эффективность стандартного промышленного производства предстала бы в совершенно ином свете.

Даже если бы на нашей планете не было человека, производство энтропии продолжалось бы. С этой точки зрения экосистемы несовершенны, даже солнце имеет конечное время жизни. Главная проблема состоит в том, что в нашем неустанном стремлении ускорить развитие мы в огромной степени ускоряем производство энтропии. Можно увидеть некоторую аналогию между экономической системой и организмом: и тот и другой потребляют низкоэнтропийные ресурсы и производят высокоэнтропийные отходы. Все это оставляет будущие поколения с меньшим запасом ресурсов.

Хотя рециклирование в большой степени замедляет сокращение запасов природных ресурсов, оно лишь частично сокращает объем производимой энтропии. Поэтому при проектировании или развитии экономического или промышленного процесса необходимо также взглянуть на связанную с ним скорость производства энтропии по сравнению с естественной «фоновой» скоростью. Мы видели, что для обратимых процессов прирост энтропии был меньшим, чем для необратимых. Практически это означает, что высокоскоростные процессы всегда производят больше энтропии. Пойти в магазин пешком является лучшим энтропийным выбором по сравнению с поездкой на машине. Можно сказать, что энтропийные часы тикают и могут идти только вперед.

Второе начало термодинамики сформулировано для замкнутых систем. Его обобщение на случай открытых, неравновесных нелинейных динамических систем, к которым относится экономическая система, показывает тот же самый результат: ее поддержание, рост и развитие может происходить только за счет деградации и разрушения (повышения энтропии) экосистемы, составной частью которой является экономическая система. Технический прогресс не может отменить второе начало термодинамики.

Литература

1. *Роберт Мальтус*. Опыт о законе народонаселения. – Петрозаводск: Петроком, 1993 (Шедевры мировой экономической мысли. Т. 4).
2. *Клаузиус Р.* В кн.: Второе начало термодинамики. – М.-Л., 1934.
3. *Harris, Jonathan M., Timothy A. Wise, Kevin P. Gallagher, and Neva R. Goodwin, eds.* A Survey of Sustainable Development: Social and Economic Dimensions. Washington, D.C.: Island Press, 2001.
4. *Krishnan, Rajaram et al., eds.* A Survey of Ecological Economics. Washington, D.C.: Island Press, 1995.
5. National Research Council. Assigning Economic Value to Natural Resources. Washington, D.C.; National Academy Press, 1994.
6. *Pearce, David W., and Jeremy J. Warford.* World Without End: Economics, Environment, and Sustainable Development. New York and Oxford, England: Oxford University Press, 1993.
7. *Peskin, Henry M.* Sustainable Resource Accounting, Chapter 4 in Assigning Economic Value to Natural Resources. National Research Council. Washington, D.C.: National Academy Press, 1994.
8. *Repetto, Robert, et al.* Wasting Assets: Natural Resources in the National Income Accounts. Washington, D.C.: World Resources Institute, 1989.
9. United Nations Department for Economic and Social Information and Policy Analysis. Integrated Environmental and Economic Accounting. New York: United Nations, 1993.
10. *David Lindley.* Boltzmann's Atom: The Great Debate That Launched a Revolution in Physics. // Free Press, 2001.
11. *Планк М.* Введение в теоретическую физику (Einführung in die theoretische Physik, Bd. 1–5, 1916–1930).
12. *La Mer V. C.,* Some current misinterpretations of N. L. Sadi Carnot's memoir and cycle // American Journal of Physics, 1954, vol. 22, № 1.
13. *Соучек Л.* Туда, где не слышно голоса. – Прага, 1968.
14. *Пригожин И.* Конец определенности. 1999.

Ключевые слова: эколого-экономическая система, энтропия, экономический процесс, производство энтропии, ресурсы, окружающая среда.