

Глава 11

Что такое стоимость с точки зрения физики

Как специфическое понятие экономики, стоимость не нуждается в том, чтобы быть сведенной к каким-либо естественно-научным понятиям, но, поскольку процесс производства можно рассматривать как процесс преобразования 'диких' форм природы в полезные для людей формы (жилье, пища, одежда, машины и так далее), можно искать аналогии в термодинамике. С общей точки зрения вся окружающая нас среда является *термодинамической системой*, находящейся в далеком-от-равновесия состоянии. Работа и потоки информации, в конечном счете, определяет новую организацию вещества, которое приобретает формы различных предметов потребления (сложность), так что процесс производства можно рассматривать как процесс материализации информации. Оценкой стоимости материализации информации является работа производственной системы. Чтобы поддерживать сложность в термодинамической системе, потоки вещества и энергии должны протекать через систему.

11.1 Энергетический принцип эволюции

11.1.1 Термодинамика Земли

Всю Землю и верхние слои Земли отдельно можно рассматривать как *термодинамические системы*, существующие в неравновесных состояниях. Термодинамические законы являются весьма общими и применимы к любой системе (Nicolis и Prigogine, 1977; Prigogine, 1980),

как бы большой и сложной она ни была, в то же время не требуя, чтобы мы знали структуру системы во всех деталях. Благодаря работам Пригожина (Nicolis and Prigogine, 1977; Prigogine, 1980), мы знаем, что устойчивые диссипативные структуры могут существовать в далеких-от-равновесия состояниях. Все биологические организмы и все искусственные вещи на Земле можно считать диссипативными структурами, которые существуют благодаря потокам энергии (Morowitz, 1968; Nicolis and Prigogine, 1977). Существуют диссипативные структуры большего масштаба: конвекционные течения в атмосфере и океанах, экологические системы, социально-экономические системы, системы знаний и прочие. Сама человеческая популяция является примером крупномасштабной диссипативной структуры. Однако мы только начинаем распознавать и описывать крупномасштабные структуры в верхних слоях Земли.

В самом грубом приближении Земля, как термодинамическая система, может быть характеризована внутренней энергией U , температурой T и энтропией S . В условиях, когда при предположении, что работой внешних гравитационных сил, приводящих к деформации формы Земли, можно пренебречь по сравнению с другими слагаемыми, записываем выражение для изменения внутренней энергии

$$dU = T dS + \sum_j \Xi_j d\xi_j + \sum_\alpha \mu_\alpha dN_\alpha. \quad (11.1)$$

Внутренние переменные ξ_1, ξ_2, \dots описывают неравновесную структуру Земли. Последним слагаемым в уравнении (11.1) можно пренебречь, поскольку химический потенциал фотонов равен нулю, μ_α , а обмен материальными частицами с космосом невелик. Значения энтропии S Земли, как *открытой сложной термодинамической системы*, определяется формулой

$$T dS = \Delta Q - \sum_j \Xi_j \Delta\xi_j + \sum_{\alpha=1}^K \eta_\alpha \Delta N_\alpha. \quad (11.2)$$

Записанные уравнения¹, в которых, при применении к Земле, существенны два первых слагаемых в левой части, демонстрирует, что

¹Заметим, что уравнение (11.2) представляет обобщение записанного Пригожиным (Prigogine, 1961, формула 3.52) уравнения для изменения энтропии в термодинамических системах с химическими реакциями. См. также книгу (Kondepudi & Prigogine, 1999). Возможный способ обоснования уравнения (11.2) и введения термодинамических функций для произвольных систем в неравновесии продемонстрирован в работах (Pokrovskii, 2013; Покровский, 2014).

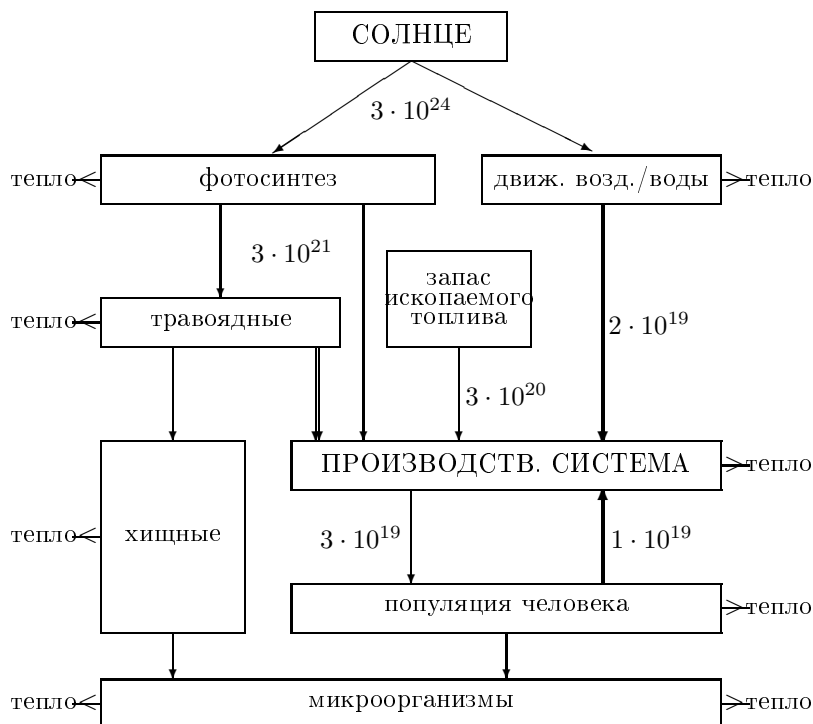


Рисунок 11.1 Энергетические потоки в земных системах

Показаны основные потоки химической энергии (одинарные линии) и механической энергии (двойные линии). Оценки потоков (Newman, 1993) в джоулях за год.

разнообразные воздействия на систему приводят к изменению одной универсальной величины – энтропии, причём изменения могут быть связаны как с потоками тепла ΔQ и веществ ΔN_j через границы системы, так и с изменениями внутренней структуры системы.

Неравновесное состояние Земли поддерживается, в конечном счёте, потоком энергии от Солнца: Земля получает потоки радиационной энергии излучения от Солнца и излучает тепло, в то время как поступающая энергия претерпевает множество преобразований при продвижении через систему (рис. 11.1). По современным оценкам (Harriss, 2000; Kleidon, 2009), ежегодно на Землю поступает около $5.5 \cdot 10^{24}$ джоулей радиационной энергии; около трети этой величины отражается

облаками и поверхностью Земли, а остальная часть (около $3 \cdot 10^{24}$ джоулей ежегодно) поглощается атмосферой и поверхностью Земли, причём оценки показывают, что фотосинтез является основным механизмом усвоения солнечной энергии. Поток внешней лучевой энергии приводит к изменениям термодинамических характеристик Земли в течение времени ее развития.

В текущую эпоху, энергетический поток от солнца уравновешен лучевым оттоком (Harriss, 2000), так что Землю можно рассматривать находящейся в стационарном состоянии, которое подразумевает, что термодинамические характеристики Земли не меняются. Хотя энтропия стационарной Земли постоянна, существует внутреннее производство энтропии в системе, как в любой неравновесной термодинамической системе. Производство энтропии связано с изменением внутренних переменных

$$d_i S = -\frac{1}{T} \sum_j \Xi_j d\xi_j, \quad d_i S \geq 0, \quad (11.3)$$

В стационарном состоянии внутреннее производство энтропии компенсируется изменением энтропии вследствие отбывающих потоков энергии,

$$d_i S = -d_e S. \quad (11.4)$$

Чтобы оценить величину $d_e S$, заметим, что Земля получает солнечный поток высокоэнергетических фотонов (соответствующий температуре $6000^\circ K$ с химическим потенциалом $\mu = 0$) и излучает тепло при намного более низкой температуре $300^\circ K$. Эти потоки радиационной энергии приводят к изменению энтропии Земли $d_e S$, которое, как оценено многими исследователями (Ребане, 1985; Kleidon, 2009), является отрицательным $d_e S < 0$.

В силу уравнения (11.4), это свидетельствует о внутреннем производстве энтропии, которое можно рассматривать как меру сложности Земли. Земля находится в стационарном, неравновесном состоянии с набором внутренних переменных ξ_1, ξ_2, \dots , характеризующих структурную и функциональную сложность системы. Внутреннее производство энтропии связано с разрушением сложности системы. Чтобы создавать и поддерживать специальную сложность (далекие-отравноесия объекты или диссипативные структуры), как в любой термодинамической системе (Morowitz, 1968; Nicolis and Prigogine, 1977; Prigogine, 1980), необходимы потоки энергии, проходящие через систему.

E/N , джоуль на человека в год

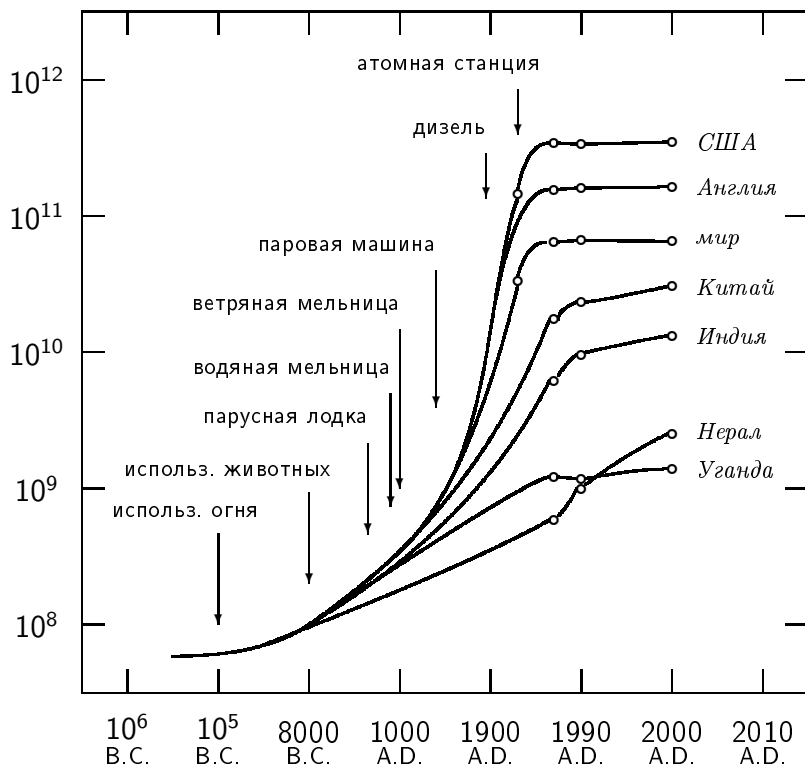


Рисунок 11.2 Общественно-организованный поток энергии

Увеличение потребления энергии связано с изобретением все более и более сложных устройств для использования энергии (ветер, проточная вода, уголь, нефть...). Числа, показанные пустыми кружечками, не включают работу животных, которая должны быть добавлена к потокам. Эта поправка существенна для Уганды и Непала, но может быть опущена для других стран. Значения для точек взяты из Статистического ежегодника энергии (*Energy Statistics Yearbook*, 1993 и последующие выпуски).

11.1.2 Популяция человека и потоки энергии

Жизнедеятельность любой биологической популяции основана на потоках энергии, поступающей к популяции через пищу и организм особей популяции. Можно рассматривать эти потоки как *биологически организованные потоки энергии*. Для популяции человека, биологически организованный поток энергии равен примерно $4 \cdot 10^9$ джоулей/год = $4 \cdot 10^6$ британских тепловых единиц в год на человека во всех столетиях человеческого существования.²

Кроме того, что, человек, как биологическая популяция, имеет естественный биологический механизм для извлечения энергии из окружающей среды, сообщества людей извлекают энергию через производственный механизм. Наряду с биологически организованными потоками энергии, человеческая популяция контролирует *общественно организованные потоки энергии*. Производственная система играет роль механизма, привлекающего энергию от разнообразных источников, среди которых мы находим остатки прежних биосфер: лес, уголь, нефть; использование прямой и косвенной солнечной энергии в форме потоков воздуха и воды; энергию расщепления и синтеза атомных ядер. Эти источники энергии через различные приспособления используются для преобразования веществ естественной окружающей среды в предметы искусственной окружающей среды, создавая полезную для людей сложность. Механизм использования энергии людьми был рассмотрен в предыдущих главах в некоторых возможных деталях.

Величины общественно-организованного потребления энергии из традиционных и коммерческих источников для некоторых стран и для всего мира в целом показаны на рис. 11.2. Уже в течение сельскохозяйственной эры общественно-организованный поток энергии на душу населения достигает величины биологически организованного потока энергии ($4 \cdot 10^9$ джоулей в год на человека). К середине девятнадцатого столетия величины двух потоков были приблизительно равны. В настоящее время, в развитых странах, общественно организованный поток энергии на душу населения в 50 - 100 раз превышает биологически организованный поток. В американской экономике, например, потребление первичной энергии приблизительно равно $4 \times 10^8 Btu \approx 4 \times 10^{11}$ джоулей на человека ежегодно в 2000 году, что в 100 раз превышает биологически организованный поток энергии.

²Британская тепловая единица (British thermal unit, Btu) = 252 кал = 1053.36 джоулей $\approx 10^3$ джоулей.

11.1.3 Принцип эволюции

Утверждается (Lotka, 1925; Печуркин, 1982; Odum, 1996; Зотин и Зотин, 1999), что справедлив *энергетический принцип эволюции*, согласно которому популяции и их ассоциации (экосистемы), способные извлекать наибольшее количество энергии из окружающей среды, имеют преимущество для выживания. Действительно, непосредственные оценки *сопоставимого стандартного обмена*, который является мерой поступающей с пищей на единицу массы организма энергии³, свидетельствуют, что в процессе макроэволюции животные (беспозвоночные и позвоночные) приобретают способность усваивать все бóльшие количества энергии (Зотин, 2018а, 2018б).

Можно утверждать, что энергетический принцип эволюции, который также называют принципом максимальной мощности (Odum, 1996), является справедливым для популяции человека при учёте того, что популяция использует два потока энергии, описанные в предыдущем разделе. Действительно, исследование производства в предыдущих главах демонстрирует, что принцип, по которому развивается производство, может быть сформулирован как принцип максимального поглощения доступных ресурсов. Фактически этот принцип развития является принципом эволюции, сформулированным указанными исследователями: траектория развития системы определяется стремлением системы использовать наибольшее количество доступной энергии.

В применении к популяции человека это формальное утверждение является следствием действий многих предпринимателей, стремящихся получить наибольшую прибыль. Реальный путь развития производственной системы определен доступностью труда и энергии. эволюция системы, в конечном счете, определена ростом рабочей силы и возможностями привлечения дополнительного количества внешней энергии, так что система уравнений эволюции производственной системы (5.36) сдержит две важные величины: темпы потенциальные роста трудозатрат и замещающей работы, $\tilde{\nu}(t)$ и $\tilde{\eta}(t)$, которые должны быть заданы как экзогенные функции времени, но, как обсуждалось в разделах 2.4.2 и 2.5.5, фактически, эти величины являются эндогенными характеристиками в проблеме развития популяции человека.

Всё большее количество энергии используется человеческой популяцией через усовершенствования технологии. Обладание огромным

³Фактически, *сопоставимый стандартный обмен* a вычисляется по формуле $a = Q/M^{0,75}$, где Q – скорость потребления кислорода животным в состоянии относительного покоя при 20° C, M – масса организма (Зотин и Зотин, 1999).

количеством энергии позволяет человеческой популяции выживать во всех климатических зонах Земли и распространиться по всему земному шару. Кроме того, как можно видеть из истории человечества, нации, которые обладали методами использования доступной энергии, приобретали преимущество перед другими нациями. Можно обратиться к классическим примерам: индустриальная революция и процветание Великобритании начались с изобретения паровой машины, которая позволила в большом количестве использовать химическую энергию, хранящуюся в угольных запасах. Мировая история может быть переписана как история борьбы за контроль над потоками энергии.

В начале 21-ого столетия главными первичными источниками энергии являются остатки прежних биосфер: нефть, газ, уголь. Предполагается, что потребность в энергии увеличится, однако, пик эры ископаемых топлив проходит. Потребление ископаемого топлива будет расти медленнее, чем суммарные первичные энергетические потребности. Будущее развитие человечества связано с доступной энергией. Только изобилие доступной энергии обеспечило бы преуспевающее развитие человеческой популяции. Можем ли мы получать энергию непосредственно от Солнца, которое дает Земле $3 \cdot 10^{24}$ джоулей ежегодно, или же мы сможем найти новые источники энергии?

11.2 Термодинамическая интерпретация стоимости

Можно отметить, что все искусственные вещи вокруг нас имеют специальные формы и приспособлены для того, чтобы быть использованными в специальных целях. Это означает, что существует некоторая *сложность* в окружающей среде, сложность, которая создана человеком и для человека. Человек окружен предметами потребления, которые могут быть рассортированы и подсчитаны, так что количество всех предметов потребления в естественных единицах может быть измерено и записано как

$$Q_1, Q_2, \dots, Q_n.$$

Все эти объекты: здания, машины, транспортные средства, канализационные сети, одежда, домашние приборы и так далее составляют национальное богатство, которое может быть характеризовано с различных точек зрения, однако общей характеристикой искусственных объектов является стоимость.

11.2.1 Стоимость набора продуктов

С обычной точки зрения, предметы потребления характеризуется их стоимостью, и существует эмпирическая оценка *стоимости продукта*. Стоимость единицы продукта является его *ценой*, предполагается, что цены всех продуктов могут быть определены

$$p_i, \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

Это позволяет оценивать изменение стоимости набора предметов потребления

$$dW = \sum_{j=1}^n p_j dQ_j. \quad (11.5)$$

Необходимо принять во внимание, что цена продукта не является характеристикой продукта как такового. Как было уже отмечено во второй главе (см. раздел 2.2), цена зависит от количеств всех продуктов, существующих в настоящее время. Как правило, цена уменьшается, если количество продукта увеличивается, хотя ситуация может быть более сложной. Можно заметить, что существуют наборы взаимосвязанных продуктов такие, что увеличение количества одного продукта в паре сопровождается увеличением (в случае дополняющих продуктов) или уменьшением (в случае замещающих продуктов) цены другого продукта из пары. Таким образом, следует полагать, что цена продукта является функцией количеств, вообще говоря, всех продуктов

$$p_i = p_i(Q_1, Q_2, \dots, Q_n).$$

При произвольных зависимостях цен p_i от количеств продуктов, едва ли можно ожидать, что форма (11.5) является полным дифференциалом какой либо функции $W(Q_1, Q_2, \dots, Q_n)$. Таким образом, нельзя сказать, что стоимость набора продуктов W является некоторой характеристикой набора продуктов, независимой от истории происхождения набора. Другими словами, стоимость не является функцией состояния системы. Однако, функция состояния, которая непосредственно связана со стоимостью, может быть введена.

11.2.2 Объективная функция полезности

На основе соотношения (11.5) при некоторых предположениях может быть определена функция состояния системы. Действительно, линейная форма (11.5) может быть умножена на некоторую величину,

которую называют интегрирующим множителем,

$$\phi = \phi(Q_1, Q_2, \dots, Q_n),$$

такую, что вместо формы (11.5) получаем полный дифференциал некоторой новой функции

$$dU = \sum_{j=1}^n \phi(Q_1, Q_2, \dots, Q_n) p_j(Q_1, Q_2, \dots, Q_n) dQ_j. \quad (11.6)$$

Требования на интегрирующий множитель, очевидно, связаны со свойствами цены как функции продуктов, и, таким образом, существование функции U зависит от свойств функций цен. В любом случае, интегрирующий множитель может быть взят положительным, и, таким образом, линейная форма (11.6) определяет монотонно возрастающую функцию каждой переменной. Это напоминает поведение стоимости. Можно ожидать, что другие свойства функции U можно также отнести к свойствам стоимости. В частности, также как и для величины стоимости (см. соотношение 11.5), отношение частных производных функции полезности U равно отношению цен

$$\frac{\partial U}{\partial Q_i} : \frac{\partial U}{\partial Q_j} = \frac{p_i}{p_j}. \quad (11.7)$$

Мы можем назвать введенную функцию U *функцией полезности (объективной)*, принимая во внимание, что свойства функции U совпадают со свойствами обычной *функции полезности*, которая была введена как *субъективная* функция полезности, связанная с ощущениями предпочтения одного набора продуктов по сравнению с другим (см. разделы 10.2 и 10.4). Фактически, эти функции следует рассматривать как идентичные, поскольку функция полезности определена с точностью до монотонного преобразования переменных. Кроме того, можно быть уверенным, что функция полезности существует, поскольку доказательство было достигнуто для субъективной функции полезности.

Продемонстрированное выше преобразование стоимости к полезности напоминает нам процедуру преобразования количества тепла, полученного телом, в функцию состояния тела – энтропию. В других выражениях аналогия между теорией полезности и теории тепла обсуждалась фон Нейманом и Моргенштерном (Neumann и Morgenstern, 1953, пункт 3.2.1).

Осознание того факта, что функция полезности U может заменить несуществующую функцию стоимости в теоретических рассуждениях, было достигнуто во второй половине девятнадцатом столетии и рассматривается как революционный шаг в экономической теории (Blaug, 1997), совершенный выдающимися исследователями.

11.2.3 Термодинамика производственной деятельности

Чтобы понять характер изменений, которые происходят на Земле при производственных процессах, с термодинамической точки зрения, удобно рассмотреть две подсистемы. Выделим *подсистему искусственных вещей*, которая включает популяцию человека и его непосредственное окружение: здания, одежду, машины, канализационные сети и все остальные объекты, созданные человеком. Полагаем, что естественными характеристиками искусственной окружающей среды являются количества наличных продуктов, которые можно перечислить и измерить натуральными единицами: Q_1, Q_2, \dots, Q_n . Оставшуюся часть будем считать *подсистемой естественной среды обитания* (*the environment*), содержащей все природные образования, которых не коснулась рука человека. Искусственная окружающая среда поддерживается и развивается производственной системой, которая совершает работу, являющуюся, в конечном счете, после многих преобразований, работой энергии, которую Земля получает от Солнца. При производстве продуктов используются ресурсы естественного окружения: естественная среда уменьшается, искусственная среда увеличивается; набор чисел Q_1, Q_2, \dots, Q_n определяет, таким образом, границу между двумя рассматриваемыми подсистемами.

Каждая из подсистем является открытой термодинамической системой, допускающей, в частности, обмен теплом и веществом друг с другом. В дальнейшем рассмотрении используем упрощённую схематизацию: естественная среда воспринимает энергию от Солнца и передаёт её другой подсистеме в химической форме. Обозначая двумя штрихами характеристические величины, относящиеся к подсистеме естественного окружения, записываем изменение внутренней энергии (11.1) и энтропии (11.2), предполагая, что при производственном процессе состояние и структура подсистемы естественного окружения существенно не меняется,

$$dU'' = T dS'', \quad dS'' = \frac{Q' - Q}{T} - \frac{J}{T}, \quad (11.8)$$

где T – температура в энергетических единицах, Q – поток рассеива-

емого Землёй тепла, Q' – поток тепла от подсистемы искусственных вещей, J – поток химической энергии от подсистемы естественного окружения в подсистему искусственного окружения. Мы предполагаем, что рассматриваемая подсистема не совершает никакой работы.

Подсистема популяции человека и искусственных вещей совершает работу A по созданию искусственных объектов. Эта работа выполняется с помощью производственного оборудования и источников энергии и существенно изменяет искусственную окружающую среду. Для рассматриваемой системы записываем изменение внутренней энергии и энтропии

$$\begin{aligned} dU' &= T dS' - dA, \\ dS' &= -\frac{Q'}{T} - \frac{1}{T} \sum_j \Xi'_j d\xi'_j + \frac{J}{T}, \quad dA = \frac{1}{T} \sum_j a_j dQ_j, \end{aligned} \tag{11.9}$$

где dA – положительная работа искусственной подсистемы по сдвигу границ с естественным окружением, a_j – работа по созданию единицы продукта j , Q' и J – введённые выше символы для потоков тепла и химической энергии.

При суммировании соотношений (11.8) и (11.9) мы возвращаемся, естественно, к термодинамическим характеристикам всей Земли, изменения которых при производственном процессе записываем в виде

$$dU = T dS, \quad dS = -\frac{Q}{T} - \frac{1}{T} \sum_j \Xi'_j d\xi'_j - \frac{1}{T} \sum_j a_j dQ_j. \tag{11.10}$$

Это выражение определяет изменение энтропии Земли при создании искусственных объектов. Обратим внимание, что два последних слагаемых в левой части выражения имеют одинаковый вид, и потому эта формула демонстрирует, что количества продуктов Q_1, Q_2, \dots, Q_n могут быть интерпретированы как внутренние переменные (параметры внутренней сложности) термодинамической системы Земли. Так же как и любые внутренние переменные, эти переменные, предоставленные сами себе, исчезают, что приводит к дополнительной диссипации энергии.

11.2.4 Совпадают ли отрицательная энтропия и функция полезности?

Выражение (11.10) для изменения энтропии в производственном процессе демонстрирует, что создание искусственных объектов связано с уменьшением энтропии Земли

$$dS = -\frac{1}{T} \sum_j a_j dQ_j, \quad (11.11)$$

так что отрицательная энтропия $-S$ оказывается естественной характеристикой сложности искусственной окружающей среды, в то время как количества продуктов Q_1, Q_2, \dots, Q_n можно рассматривать как внутренние параметры, характеризующие состав и архитектуру искусственной окружающей среды (сложность). Суммарная работа над окружающей средой, сделанной людьми и механизмами, которые используют внешние источники энергии, является работой в смысле, понимаемом в термодинамике, так что записанное выше соотношение является известным термодинамическим соотношением между энтропией S и работой A

$$-dS = \frac{1}{T} dA \quad (11.12)$$

Эта простая интерпретация осложняется тем, что одновременно с полезными продуктами, производственная система создает также бесполезные и вредные продукты (тепло и отбросы). Приращение отрицательной энтропии включает и полезную сложность и бесполезные, иногда вредные, но неизбежные последствия производства. Большая часть энергии преобразуется в тепло, которое, в конечном счете, выходит за пределы Земли. Производство полезных вещей стимулирует также процессы смешения, дисперсии и диффузии, так что можно думать о недостатке вещества, необходимого для производства (Georgescu-Roegen, 1971). Другими словами, химические элементы становятся все более и более смешанными вместе и, таким образом, становится всё более трудным отделить вещества друг от друга. Необходимые для производства вещества становятся всё более и более недоступными. Итак, должна ли Земля ждать диффузионную смерть? Нет. При доступной энергии материалы могут восстанавливаться из отходов как от руды (Ayres, 1997), так что Землю не ждёт диффузионная смерть: несмотря на некоторые процессы дегградации вещества, сущностью процессов производства является создание полезной сложности в окружающей среде.

Альтернативной характеристикой набора продуктов является функция полезности U , определенная уравнением (11.6). Следует отметить, в отличие от отрицательной энтропии, функция полезности традиционно описывает только полезную сложность, хотя оценки ущерба окружающей среды включены в цены продуктов. Таким образом, как характеристики набора продуктов, имеются две функции: U и $-S$, каждая из которых является монотонно увеличивающейся функцией всех переменных, эти характеристики совпадают, если пренебречь всеми бесполезными и вредными побочными продуктами.⁴ Мы можем выбрать функцию U , как характеристическую функцию для описания полезной искусственной сложности в системе, и интерпретировать эту величину как отрицательную энтропию системы искусственных вещей.

Стоимость не сводится к каким либо термодинамическим функциям, но, как следствие определений (11.6) и (11.11), можно думать, что стоимость соответствует отрицательной энтропии системы. Соответствие не является аккуратным, поскольку энтропия является функцией состояния в отличие от стоимости, которая не является функцией состояния. Увеличение стоимости набора продуктов dW близко, но может отличаться как от изменения полезности dU , так и от изменения отрицательной энтропии dS . В силу отношения (11.12), при предположении, что рассматриваются изотермические процессы с ничтожным изменением внутренней энергии системы, увеличение отрицательной энтропии, которая, в силу приведённых выше рассуждений, является полезностью, пропорциональна общему количеству работы, выполненной над системой, то есть,

$$dU \sim dA. \quad (11.13)$$

Соотношение между увеличением стоимости dW и полной работы dA исследовалось при анализе эмпирических данных для США (Costanza, 1980; Cleveland *et al*, 1984). Авторы рассматривают свои и подобные результаты как подтверждение так называемой воплощенной энергетической теории стоимости. Однако, это не энергия, но сложность, что остаётся в веществе после сделанной работы. Эта сложность существует и может быть, в принципе, оценена другим способом.

⁴Существование функции полезности оправдано фактом, что существуют отношения предпочтения в пространстве наборов продуктов. Подобно этому, существование энтропии оправдывается наличием отношения доступности в пространстве термодинамических переменных. Подобие между проблемой представления полезности в экономике и проблемой представления энтропии в термодинамике было продемонстрировано Sandeal *и другими* (2001). Удивительно, что это оказывается не только формальной аналогией: две функции оказываются различными оценками набора продуктов.

Кроме того, в отличие от отношения (11.12), нет никакого точного отношения между сделанной работой и произведенной стоимостью. Так, попытки вычислить воплощенную энергию в искусственных вещах напоминает попытки вычислить количество тепла в физическом теле. Со всех точек зрения, лучше рассматривать стоимость как нечто, что является очень близким к отрицательной энтропии нашей ближайшей окружающей среды. Потоки продуктов следует рассматривать как потоки отрицательной энтропии, но не как потоки энергии.

11.3 Энергетическое содержание денежной единицы

В теории стоимости Маркса постулируется, что трудозатраты являются абсолютной мерой стоимости, источником всего созданного богатства. При учёте эффекта замещения, можно ожидать, что общая сумма работы, включая должным образом оцененную работу занятых в производстве и истинную работу производственного оборудования, окажется абсолютной мерой стоимости. Мы можем убедиться в справедливости этого утверждения, следуя работе Бодро и Покровского (Beaudreau and Pokrovskii, 2010).

Полная работа по производству стоимости в единицу времени является суммой работы замещения P , измеренной энергетическими единицами, и работы занятых hL , где L измерено в человеко-часах, а $h \approx 4,18 \cdot 10^5 \text{ joule/hour}$ является оценкой работы одного человека в час, и потому полная работа может быть записана как

$$A = P + hL. \quad (11.14)$$

Эта работа производит 'полезные' изменения в нашей окружающей среде (в форме полезных предметов потребления и услуг), оцениваемые как производство стоимости, для которого на основании результатов раздела 6.3 записываем

$$Y = \beta L + \gamma P = \gamma \left(P + \frac{\beta}{\gamma} L \right). \quad (11.15)$$

Если стоимость оценивается денежными единицами постоянной покупательной способности, предельные производительности β и γ зависят от производственных факторов. При выборе денежной единицы с постоянным 'энергетическим содержанием' предельные производительности следует считать постоянными.

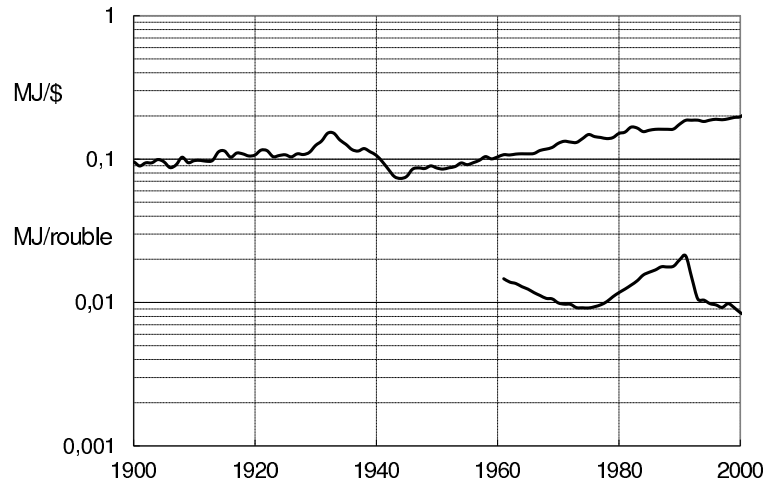


Рисунок 11.3 'Энергетическое содержание' денежных единиц

Кривые показывают количество работы, необходимое для создания продукта стоимостью один доллар 1996 года (верхняя кривая) и один рубль 2000 года (нижняя кривая) в различные годы. По работе Бодро и автора (Beaudreau and Pokrovskii, 2010) с уточнением значений для России.

Выражения (11.14) и (11.15) позволяют определить работу, необходимую для того, чтобы произвести вещь или услугу стоимостью в одну денежную единицу или, другими словами, 'энергетическое содержание' денежной единицы

$$\frac{A}{Y} = \frac{1}{\gamma} \frac{P + hL}{P + (\beta/\gamma)L} = \frac{1}{Y} (P + hL). \quad (11.16)$$

Не следует ожидать, что эта величина постоянна; в случае, если выпуск Y измерен денежной единицей постоянной покупательной способности, которая не является неизменной мерой стоимости в понимании классической политической экономии, её 'энергетическое содержание' меняется со временем, как можно видеть на рис. 11.3. Когда вклад замещающей работы преобладает, что, например, имеет место для США во второй половине прошедшего столетия (см. рис. 2.8), выражение (11.16) для 'энергетического содержания' может быть написано как

$$\frac{A}{Y} \approx \frac{P}{Y}, \quad P \gg hL.$$

Так как замещающаяся работа, как правило, увеличивается быстрее, чем выпуск, то 'энергетическое содержание' является возрастающей функцией времени. При экспоненциальном росте, когда, например, переменные определяются уравнениями (2.30) и (2.37), 'энергетическое содержание' денежной единицы возрастает как

$$\frac{A}{Y} \sim e^{(\eta-\delta)t}, \quad P \gg hL. \quad (11.17)$$

Для США во второй половине прошлого столетия, например, $\eta - \delta = 0.0272$; возрастание 'энергетического содержания' доллара после 1950 года можно видеть на графике рис. 11.3. В противоположном случае, когда $P \gg hL$, наблюдаем уменьшение 'энергетического содержания' денежной единицы

$$\frac{A}{Y} \sim e^{(\nu-\delta)t}, \quad P \ll hL. \quad (11.18)$$

где ν - темп роста трудозатрат в производстве.

Сравнение оценок 'энергетического содержания' денежной единицы для экономических систем Соединенных Штатов и Российской Федерации показаны на рис. 11.3. Пульсации этой величины могут быть связаны с естественными изменениями во вкладе труда (в единицах энергии) вопреки нашему предположению о постоянстве величины h . 'Энергетическое содержание' доллара 1996 года равно $(1 - 2) \times 10^5$ джоулей; его среднее значение в последние годы столетия (1960 - 2000) равно 1.4×10^5 джоулей на доллар. 'Энергетическое содержание' рубля 2000 года оказывается меньшим: среднее значение в те же самые годы (1960 - 2000) равно 0.12×10^5 джоулей на рубль. Среднее 'энергетическое содержание' доллара в 14 раз превышает 'энергетическое содержание' рубля, чему должна соответствовать большая покупательная способность доллара по сравнению с рублем. Паритет покупательной способности рубля примерно в два раза меньше официального валютного курса, который равен приблизительно 30 рублей за доллар, так что сравнение вычисленных 'энергетических содержаний' доллара и рубля подтверждает, что может быть введена универсальная энергетическая денежная единица стоимости.

Здесь необходимо вспомнить, что выпуск в выражениях (11.15) - (11.17) оценен особой денежной мерой с постоянной покупательной способностью во все времена, но такая единица стоимости, очевидно, изменяется с изменением производительности труда. Абсолютная мера стоимости эквивалентна некоторому энергетическому масштабу. При

этом выпуск определяется отношением

$$Y = \frac{A}{\epsilon_{\text{ref}}}, \quad (11.19)$$

где работа A определена выражением (11.14), а ϵ_{ref} представляет некоторое стандартное референтное 'энергетическое содержание' денежной единицы. Чтобы измерить производство стоимости в США, можно принять, например, значение $\epsilon_{\text{ref}} = 10^5$ джоулей, но, чтобы нарисовать отличительную кривую на рис. 2.1, мы вычисляем временную зависимость производства стоимости (ВВП американской экономики) по формуле (11.18) при значении $\epsilon_{\text{ref}} = 50000$ джоулей. Результаты представлены на рис. 2.1 верхней кривой.

Заметим, что при других подходах (Odum, 1996; Sciubba, 2001; Valero, 1998) исследователи стремятся к оценке полного потребления энергии (или экзергии) при выпуске продукции. При этом учитываются все 'предыдущие' расходы энергии, необходимые для производства 'с самого начала', включая все потери энергии в течение производственных процессов. В этом случае теряется универсальность: результаты зависят от эффективности преобразования энергии в процессах производства. Отметим, что наши оценки 'энергетического содержания' денежной единицы, естественно, ниже чем 'общее количество' exergy (Sciubba, 2001) или emergy (Odum, 1996), поскольку замещающая работа или, иными словами, производительная энергия является малой частью общего количества потребляемой энергии.

11.4 Термодинамика производственного цикла

Работа тепловых машин, которые изобретены, чтобы преобразовывать тепло в механическую работу, описывается термодинамикой посредством термодинамических циклов. Сама термодинамика появилась при изучении термодинамических циклов этого вида (Kondepudi, Prigogine, 1999). При рассмотрении производственных процессов мы имеем дело с термодинамическими циклами другого вида – производственными циклами, которые изобретены для того, чтобы преобразовывать 'дикие' формы веществ в 'полезные' формы (жилье, пища, одежда, машины и так далее).

Для выполнения производственного цикла необходимо производственное оборудование, которое выполняет специальные операции, оста-

ваясь неизменным (не говоря ничего об износе) после цикла, и некоторые вещественные тела, формы которых (можно предположить, что изменением энергии можно пренебречь) изменяются вследствие специальной работы производственного оборудования. Производственный цикл может быть рассмотрен как последовательность элементарных операций j_1, j_2, \dots , причём набор элементарных операций задан. Индекс j_l является индексом элементарной операции, выполняемой как номер l в последовательности операций. Уникальный выбор индексов определяет, где, когда и как приложенным извне силам разрешено действовать, чтобы выполнить работу, которая может быть вычислена как сумма работ при элементарных операциях

$$\Delta A = A_{j_1} + A_{j_2} + \dots$$

На простом примере, мы проанализируем, что необходимо для того, чтобы создать неравновесное состояние вещества искусственно.

11.4.1 Простейший производственный процесс

В качестве примера рассмотрим создание неравновесного состояния идеального газа из $2N$ частиц, который содержится в контейнере, состоящем из двух отделений объемом V каждый, как показано на рис. 11.4. Существуют некоторые устройства, которые позволяют отделениям быть соединёнными или изолированными (назовём это операцией А) и уменьшить объем второго отделения или восстановить его к предыдущему значению (операция В).

Допустим, что в начальном состоянии каждое отделение имеет объем V , и отделения соединены друг с другом, так что в предполагаемом равновесном состоянии каждое отделение в среднем имеет N частиц. Можно вообразить, что predetermined последовательность операций может быть приложена к системе. Мы рассматриваем изотермический процесс, состоящий из нескольких элементарных операций, причём каждая операция выполняется обратимым образом. После того, как выполнена последовательность: В – уменьшение объема 2 на ΔV , А – изолирование отделений, В – увеличение объема 2 на ΔV , и А – соединение отделений, средние числа частиц в каждом отделении изменяются, и могут быть оценены как

$$N_1 = N(1 + \xi), \quad N_2 = N(1 - \xi), \quad \xi = \frac{(\Delta V/2V)}{1 - (\Delta V/2V)}. \quad (11.20)$$

После цикла, конфигурация внешних устройств начальная, но газ оказывается в неравновесном состоянии. Энтропия системы может быть

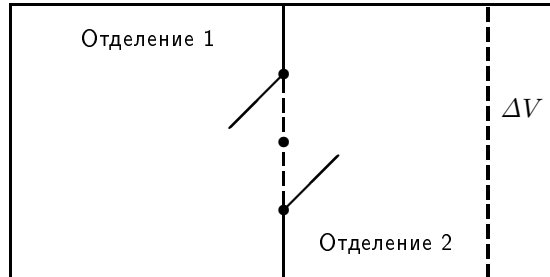


Рисунок 11.4 Схема производственного контейнера

Отделения содержат идеальный газ, состояние которого может быть изменено последовательностью двух производственных операций: *A* - отделения могут быть соединены или изолированы и *B* - объем второго отделения может быть уменьшен или восстановлен к предыдущему значению.

непосредственно оценена по формулам Больцмана, примененным к этому случаю

$$S = k \ln W, \quad W = \frac{(2N)!}{N_1! N_2!},$$

так что изменение энтропии системы может быть определено как

$$\Delta S = -kN\xi^2 \tag{11.21}$$

Слагаемыми третьего порядка здесь и далее пренебрегаем.

Работа ΔA , которая необходима, чтобы провести систему через цикл, может быть вычислена как работа идеального газа или работа над идеальным газом в каждом из четырех шагов цикла. В конечном счете, находим, что внешние силы производят дополнительную работу в течение цикла

$$\Delta A = kTN\xi^2 \tag{11.22}$$

Внутренняя энергия системы

$$E = 3NkT,$$

как внутренняя энергия идеального газа, не изменяется в процессе, так что первый закон термодинамики может быть записан, рассматривая каждый шаг процесса обратимым, в форме

$$T \Delta S = -\Delta A$$

и изменение энтропии системы в процессе может быть оценено как

$$\Delta S = -kN\xi^2 \quad (11.23)$$

Процесс привёл к уменьшению энтропии системы. Рассматриваемое специфическое неравновесное состояние не может быть создано без работы внешних сил и без predetermined последовательности элементарных операций. Некто должен обладать определенными источниками энергии и имеет цель создать уникальную неравновесную форму вещества. Чтобы достигнуть цели, создатель посылает сообщение в кодах элементарных операций: ВАВА. Никакие другие сообщения не могут привести к желаемому результату. Информационное содержание predetermined сообщения может быть оценено, если принять во внимание, что это сообщение является одним из восьми возможных. Так, сообщение несет информационную энтропию в количестве

$$\Delta I = -\log_2 \frac{1}{8} = 3 \quad (11.24)$$

Информационное содержание сообщения, можно полагать, материализовано в неравновесной форме (сложности) вещества. Стоимостью материализации является работа производственной системы ΔA .

11.4.2 Выпуск производственного цикла

Возвращаясь к общему случаю, утверждаем, что работа ΔA при информационной поддержке ΔI в конечном счете определяет новую организацию материи, которая в процессе производства приобретает формы различных предметов потребления. Новая организация материи характеризуется специальной сложностью, которая, с термодинамической точки зрения, связана с уменьшением энтропии. Уменьшение энтропии всей окружающей среды ΔS вследствие процессов производства может быть связано со специальной работой производственной системы

$$-\Delta S = \frac{1}{T} \Delta A \quad (11.25)$$

Это соотношение является совершенно идентичным соотношению (11.12), и можно утверждать ещё раз, что должным образом организованная работа производственной системы необходима, чтобы преобразовать

естественную окружающую среду в искусственную окружающую среду.

Искусственные вещи, созданные в процессе производства, могут быть также оценены их стоимостью, так что уменьшение энтропии соответствует увеличению выпуска производственной системы в денежном выражении

$$Y \sim -dS,$$

что означает, что выпуск должен соответствовать работе в течение производственного процесса

$$Y \sim \Delta A. \tag{11.26}$$

Полезная работа ΔA включает мускульную работу животных и людей, работу электрических моторов, работу мобильных двигателей машин, производимую энергией, подведенной, например, на ведущие колеса транспортных средств, но, в этой связи, не включает полезное тепло, доставляемое в здания или в технологические процессы.

Литература

- Зотин А.А. (2018а) Энергетическая макроэволюция беспозвоночных животных // Изв. РАН. Сер. биол. 2018. № 1. С. 5-15.
- Зотин А.А. (2018б) Энергетическая макроэволюция позвоночных животных // Изв. РАН. Сер. биол. 2018. № 4. С. 341-351.
- Зотин А.И., Зотин А.А. (1999) Направление, скорость и механизмы прогрессивной эволюции (Термодинамические основы биологической эволюции). М.: Наука, 1999. 320 с.
- Печуркин Н.С. (1982) Энергетические аспекты надорганизменных систем. Наука, Новосибирск.
- Покровский В.Н. (2014) Введение в термодинамику сложных систем. URSS: ЛЕНАНД, Москва, 2014.
- Ребане К.К. (1985) Энергия, энтропия, среда обитания. Знание, Москва.
- Ayres R.U. (1997) Comments on Georgescu-Roegen. *Ecological Economics* 22: 285-287.
- Beaudreau B.C. (1998) Energy and organization: Growth and distribution reexamined (Greenwood Press, the first ed., 1998; the second ed.: 2008).
- Beaudreau B.C. and Pokrovskii V.N. (2010) On the energy content of a money unit. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 389: 2597 - 2606.
- Blaug M. (1997) *Economic Theory in Retrospect*, 5th Ed. Cambridge University Press, Cambridge *etc.*
- Candéal J.C., De Miguel J.R., Induráin E. and Mehta G.B. (2001) Utility and entropy. *Economic Theory* 17: 233 - 238.
- Cleveland C.J., Costanza R., Hall C.A.S. and Kaufmann R. (1984) Energy and the U.S. economy: A biophysical perspective. *Science* 225: 890-897.
- Costanza R. (1980) Embodied energy and economic valuation. *Science* 210: 1219-1224.
- Georgescu-Roegen N. (1971) *The Entropy Law and the Economic Process*. Cambridge MA: Harvard University Press.
- Harries J.E. (2000) Physics of the Earth radiative energy balance. *Contemporary Physics* 41: 309-322.

- Kleidon A. (2009) Nonequilibrium thermodynamics and maximum entropy production in the Earth system. Applications and implications. *Naturwissenschaften* 96: 653-677
- Kondepudi D. and Prigogine I. (1999) *Modern Thermodynamics: From Heat Engines to Dissipative Structures*. John Wiley & Sons, Chichester.
- Lotka A.J. (1925) *Elements of Physical Biology*. Williams and Wilkins, Baltimore.
- Morowitz H.J. (1968) *Energy Flow in Biology: Biological Organisation as a Problem in Thermal Physics*. Academic Press, New York and London.
- Neumann J. von and Morgenstern O. (1953) *Theory of Games and Economic Behaviour*, 3d Ed. Princeton University Press, Princeton.
- Newman E.I. (1993) *Applied Ecology*. Blackwell Scientific Publications,
- Nicolis G. and Prigogine I. (1977) *Self-Organisation in Non-Equilibrium Systems: From Dissipative Structures to Order through Fluctuations*. John Wiley & Sons, New York.
- Odum H.T. (1996) *Environmental Accounting: Emergy and Environmental Decision Making*. John Wiley & Sons, New York *etc.*
- Pokrovskii V.N. (2013) A derivation of the main relations of non-equilibrium thermodynamics, *Hindawi Publishing Corporation: ISRN Thermodynamics*, vol. 2013, article ID 906136, 9 p.
<http://dx.doi.org/10.1155/2013/906136>.
- Prigogine I. (1961) *Introduction to Thermodynamics of Irreversible Processes*. Second revised edition. Interscience publishers, a division of John Wiley and Sons, New York and London.
- Prigogine I. (1980) *From Being to Becoming. Time and Complexity in the Physical Sciences*. Freeman & Company, New York.
- Sciubba E. (2001). On the possibility of establishing a univocal and direct correlation between monetary price and physical value: The concept of extended exergy accounting. In: Ulgiati S (ed) *Advances in Energy Studies Workshop: Exploring Supplies, Constraints, and Strategies*. Porto Venere, Italy 2000. Servizi Grafici Editoriali, Padova. P. 617 - 633.
- Valero A. (1998) Thermoeconomics as a conceptual basis for energy-ecological analysis. In: Ulgiati S (ed) *Advances in Energy Studies Workshop: Energy Flows in Ecology and Economy*. Porto Venere, Italy 1998. MUSIS, Rome. P. 415 - 444.