

# ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ АНАЛОГИ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Л.Я. Осипова, В.А. Зимин, Ю.Л. Рагис

## Введение

Современная парадигма общественных наук опирается на так называемый эволюционный подход к развитию социально-экономических систем.

В рамках этого подхода предполагается, что социально-экономические системы эволюционируют под действием совокупности различных факторов.

Часть этих факторов (так называемые динамические факторы) определяет интегральные закономерности общественного развития. Другая совокупность факторов может быть отнесена к статистическим. Совокупность статистических и динамических факторов определяет ширину коридора параметров, в рамках которого эволюционирует сложная социально-экономическая система.

Необходимо упомянуть, что весьма распространенная классификация факторов на объективные и субъективные не совпадает с упомянутой выше классификацией. Очень часто динамические факторы отождествляют с объективными факторами, а статистические (случайные) факторы считают субъективными. На самом деле это не так. И объективные, и субъективные закономерности могут быть в ряде случаев отнесены как к динамическим, так и к статистическим.

Под воздействием совокупности динамических и статистических факторов сложные социально-экономические системы эволюционируют как во времени, так и в пространстве. Изменяются показатели экономического развития, меняются очертания государств на карте мира и т.п. Все эти явления нуждаются в последовательном осмыслении и описании на языке науки, задачей которой является, в том числе, установление сущности происходящего.

Но социально-экономические системы невозможно описать с той степенью подробности и аргументированности, которая характерна для так называемых «точных наук». «Точное» описание социально-экономических процессов «строго запрещено» теоремой Геделя. В силу этого последовательное описание эволюции общества в терминах «причина-следствие» возможно только на базе аналогий.

Именно поэтому необходимо иметь запас аналогий из других предметных областей, в первую очередь, из физики. Но диалектика динамического и статистического в наибольшей степени отражена в термодинамике. Целью настоящей работы является анализ аналогий между законами термодинамики и общественно – экономического развития.

## 1. Термодинамические аналогии

Для корректного описания социально-экономических процессов нужна адекватная математика. Как показал опыт многолетних исследований, подобная математика на сегодняшний день в значительной мере разработана. Необходимый для социально-экономических исследований круг идей и понятий гармонично вписывается в современную синергетику [5]. Но совокупность идей, породивших синергетику, исторически сложилась в термодинамике. Термодинамика равновесных процессов была создана трудами Сади Карно, У. Томсона, Клаузиуса и других великих физиков. Первоначальную классическую версию термодинамики правильнее было бы назвать термостатикой, поскольку в уравнениях термодинамики отсутствовал такой архиважный физический параметр, как время.

Классическая термодинамика основана на нескольких постулатах, полученных путем теоретического обобщения совокупности опытных данных. Ниже мы приведем эти постулаты без излишней конкретизации. На практике оказалось, что термодинамические принципы и законы являются настолько мощными и общими, что с учетом незначительных поправок они допускают практически прямое применение к анализу социально-экономических процессов.

В частности, нулевое начало термодинамики гласит, что изолированная система с те-

чением времени приходит в состояние термодинамического равновесия. В статистической физике доказывается, что состояние равновесия является устойчивым. Ему отвечает максимум энтропии - состояние максимального хаоса. При удалении от равновесия состояние становится все более неустойчивым.

В истории и в экономике замкнутые системы (например, первобытно-общинные племена на островах Океании или Полинезии) устойчиво существовали на протяжении тысячелетий, являя собой пример экономически мертвого общества. Появление европейцев на островах сломало привычный ход событий. Замкнутая система стала открытой, вышла из состояния равновесия и начала бурно эволюционировать.

Отметим, что огромное количество проблем советской экономики также проистекало из квазизамкнутости СССР как политической, так и экономической. Самодостаточность великой державы позволяла достаточно успешно решать внутренние социально-экономические проблемы, невзирая на низкую экономическую эффективность принимаемых решений. «Окно в Европу» (точнее, в Америку), «прорубленное» в очередной раз в последнее десятилетие XX века, превратило Россию в открытую систему и дало старт многочисленным социально-экономическим процессам.

Но вернемся к термодинамике. Согласно первому началу термодинамики количество теплоты, полученное системой, превращается во внутреннюю энергию и расходуется на производство работы над внешними телами. То есть мы имеем дело с законом сохранения энергии. В социальных и экономических теориях систематически используются аналогичные соотношения. Только в роли энергии выступают денежные средства или материальные потоки, а динамику демографических показателей обычно связывают с экономическими факторами. Отметим, что здесь мы провели аналогию только между равновесными **замкнутыми** термодинамическими и социально-экономическими системами, которые существуют, строго говоря, только в виде удобных идеализированных моделей. Чуть ниже мы проведем обобщение этой аналогии на реалистичный случай открытых неравновесных систем.

Итак, продолжим проведение параллелей между термодинамикой и экономикой. Второе начало термодинамики гласит – **энтропия замкнутой системы не убывает. В состоянии теплового равновесия энтропия замкнутой системы максимальна.** В этой формулировке второе начало термодинамики представляет собой разновидность вариационного принципа, природа которого подробно изложена выше на примере принципа наименьшего действия.

Здесь уместно процитировать известного физика Р. Эмдена (1862-1940): "На вопрос, почему мы топим зимой, неспециалист ответит: чтобы сделать комнату теплее; знаток термодинамики выразится, возможно, так: чтобы подвести недостающую энергию. В этом случае правым окажется профан, а не ученый. Почему же мы все-таки топим? По той же самой причине, по которой жизнь на Земле была бы невозможна без солнечного излучения. При этом дело заключается не в падающей энергии. Последняя будет снова получена вплоть до пренебрежимо малой доли, подобно тому как человек не меняет своего веса, несмотря на принятие пищи. Условия нашего существования требуют известной температуры тела, и чтобы ее поддерживать, используется не увеличение энергии, а понижение энтропии".

Комментарии к интерпретации энтропии как мере хаоса в физических и социально-экономических системах мы уже приводили выше. Не вдаваясь пока в математику, отметим, что имеется несколько классических формулировок второго начала термодинамики, не использующих понятия энтропии. Например, одна из формулировок такова: «Теплота не может самопроизвольно переходить от тела менее нагретого к более нагретому». Другими словами, тепловые потоки возникают там и тогда, где и когда имеется градиент температуры (закон Фурье). Но точно такие же процессы имеют место в экономике. Товарные потоки устремляются туда, где выше цены, выше покупательная способность населения. Рыночное равновесие устанавливается тогда, когда спрос строго равен предложению. Можно даже ввести понятие энтропии рынка. Тогда в состоянии рыночного равновесия соответствующая энтропия будет максимальна. А «тепловая смерть» рынка не наступает только в силу того, что практи-

чески все экономические системы являются открытыми. Приведенный выше пример строго замкнутого рынка в Полинезии XVIII века – это, скорее, экзотика.

Если же социально-экономическая система далеко уходит от состояния равновесия, то наступает разбалансировка рынка. В частности, падение номинального курса рубля примерно в 50 000 раз в 1991-2001 годах явилось следствием более чем пятикратного превышения денежной массы над товарными запасами в России к началу рыночных реформ.

Следует сказать, что социально-экономический аналог имеется даже у третьего начала термодинамики. В самом деле, согласно теореме Нернста (третье начало термодинамики) при понижении температуры системы до абсолютного нуля ее энтропия также стремится к нулю. Как образно выражались физики в начале XX века, степени свободы вымораживались при приближении к абсолютному нулю. Похожие процессы имеют место и в обществе. Правда, эта аналогия годится только при рассмотрении вымирающих населенных пунктов или гибнущих цивилизаций. Ну, в чем здесь отличие от губернской программы «Малокомплектная сельская школа»? Но самое-го удивительное состоит в том, что сходные процессы можно описывать похожими уравнениями!

Как уже отмечалось выше, даже равновесная термодинамика замкнутых систем предоставляет исследователю набор фундаментальных аналогий для понимания социально-экономических процессов. Термодинамика открытых систем неизмеримо богаче.

Для того чтобы продолжить применение метода аналогий и создать подходящую «базу данных» для проведения параллелей между хорошо изученными физическими явлениями и менее изученными социально-экономическими системами, продолжим экскурсию в историю физики и синергетики.

Хорошо известно, что малые изменения какого-либо параметра могут перевести систему в новое состояние. Поэтому для изучения динамики тепловых (и не только тепловых) процессов следует перейти к рассмотрению открытых систем, которые могут обмениваться с окружающей средой веществом и энергией.

Первые успешные попытки создания термодинамики в прямом смысле этого слова были предприняты в середине XIX века У. Томсоном и Ж. Пельтье. (Термин «динамика» предполагает, что соответствующий процесс развивается во времени под действием некоторой совокупности причин.) В результате появилась теория термоэлектричества. В дальнейшем при решении частных задач границы применения термодинамики расширили Гельмгольд, Нернст и другие великие физики. Эти подходы были обобщены в XX веке Онсагером (лауреат Нобелевской премии по химии 1968 года).

В основе подхода Онсагера лежит предположение о квазизамкнутости системы, приближающейся к состоянию термодинамического равновесия. В этом случае система, описываемая совокупностью  $N$  термодинамических параметров  $x_i$  (температура, концентрация, etc.), подчиняется системе обыкновенных дифференциальных уравнений [1]:

$$\dot{x}_i = \dot{x}_i(x_1, \dots, x_N). \quad (1)$$

В случае близости системы к состоянию равновесия функция в правой части уравнения (1) может быть разложена в ряд Тейлора. Полагая, что в состоянии равновесия  $x_1 = \dots = x_N = 0$ , и удерживая в соответствующем разложении линейные члены, получаем

$$\dot{x}_i = -\sum_{j=1}^N \lambda_{ij} x_j. \quad (2)$$

Следуя Онсагеру, выразим макроскопические величины  $x_i$  через «термодинамически сопряженные» с ними величины:

$$x_i = -\frac{\partial S}{\partial x_i}, \quad (3)$$

где  $S$  - энтропия системы.

Поскольку в состоянии равновесия энтропия максимальна, постольку в равновесии  $x_1 = \dots = x_N = 0$ . При слабом отклонении от равновесия

$$X_i = \sum_{j=1}^N \beta_{ik} x_k . \quad (4)$$

В этом приближении энтропия представляет собой однородную квадратичную форму переменных  $x_i$  :

$$S = -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^N \beta_{ik} x_i x_k , \quad (5)$$

причем, очевидно, что

$$\beta_{ik} = \beta_{ki} . \quad (6)$$

Представим релаксационные уравнения в виде

$$\dot{x}_i = -\sum_{j=1}^N \gamma_{ik} X_k , \quad (7)$$

причем

$$\gamma_{ik} = \sum_{l=1}^N \lambda_{il} (\beta^{-1})_{lk} , \quad (8)$$

где  $(\beta^{-1})_{ik}$  - матрица коэффициентов, обратная по отношению к матрице коэффициентов  $\beta_{ik}$  .

Новые постоянные  $\gamma_{ik}$  называются кинетическими коэффициентами и подчиняются принципу симметрии Онсагера:

$$\gamma_{ik} = \gamma_{ki} . \quad (9)$$

Принцип симметрии (соотношения взаимности) Онсагера является следствием симметрии системы по отношению к операции обращения времени. Поэтому при наличии магнитного поля или во вращающейся системе координат эти соотношения модифицируются. Подробное доказательство этого утверждения имеется, например, в известном курсе теоретической физики [1].

На основе теории Онсагера в 40—50-е годы разрабатывались проблема разделения изотопов методом термодиффузии, вопросы физики плазмы, биологии и др. В своих рассуждениях Онсагер опирался на принцип микроскопической обратимости и на гипотезу о макроскопическом характере затухания флуктуаций. Но в потоках с внутренним трением бывают перепады макроскопической скорости, которые меняют знак при инверсии времени. Именно такие ситуации были рассмотрены Хенриком Казимиром. Он обобщил соотношения взаимности Онсагера на случай сил, которые меняют знак при изменении знака времени, а также на векторные явления (эффект Казимира).

Ниже будет показано, каким образом фундаментальные соотношения Онсагера входят в систему уравнений модели Гудвина - Калецкого, описывающей экономические процессы в так называемых мидиэкономических системах.

Очень образное описание роли энтропии и энергии дано в книге [2]: «В гигантской фабрике естественных процессов принцип энтропии занимает место директора, который предписывает вид и порядок исполнения всех сделок. Закон сохранения энергии играет роль бухгалтера, который приводит в равновесие дебет и кредит. Для биологических систем, являющихся принципиально открытыми системами, такой подход оказался очень плодотворным. Исследование открытых систем возможно на основе только термодинамики необратимых процессов: в них энтропия может возникать и переноситься, тогда как возрастание энтропии пригодно только для изолированных систем».

Законы синтеза языка науки таковы, что хотим мы того или нет, но в процессе исследования постоянно приходится осуществлять процесс восхождения от простого к сложному. Термодинамику неравновесных процессов приходится строить на базе классической равновесной термодинамики. И основополагающая идея этого подхода была высказана И.Р. Пригожиным, который сформулировал принцип локального равновесия.

Важное понятие локального равновесия можно ввести при медленности изменения внешнего воздействия и для времен, больших характерного времени элементарного релаксационного процесса, формирующего равновесие. Эти условия естественным образом возник-

кают при изучении термодинамических процессов методами статистической физики. Принцип локального равновесия ограничивает число систем, доступных термодинамическому рассмотрению [1,2,3].

Отметим, что принцип локального равновесия применим и в экономике. Так, например, московский и самарский рынки, каждый по отдельности, вполне равновесны. Однако средние цены на товары и услуги в Самаре и в Москве могут серьезно отличаться. Это связано с различиями в емкости региональных рынков, в уровнях платежеспособности населения, величине транспортных расходов и т.п.

Необходимо отметить взаимное влияние друг на друга необратимых процессов, одновременно протекающих в одной и той же системе. Причем это взаимовлияние регламентируется принципом симметрии Кюри, который в формулировке Вейля гласит: "Если условия, однозначно определяющие какой-либо эффект, обладают некоторой симметрией, то результат их действия не нарушит эту симметрию".

В соответствии с этим все неравновесные процессы разделяются на скалярные (химические реакции), векторные (теплопроводность, диффузия) и тензорные (вязкое трение). В соответствии с принципом симметрии величины разных размерностей не могут быть напрямую связаны друг с другом. Так, скалярная величина (химическое сродство) не может вызвать векторный поток (теплопроводность).

В процессе приближения системы к состоянию равновесия важную роль играют граничные условия. Очень часто условия на различных границах одной и той же термодинамической системы могут сильно отличаться. Так, если рассмотреть металлическую пластинку, которую с одной стороны нагревают, а с другой охлаждают, то в пластинке может установиться стационарное распределение температур. Приведенный пример весьма далек от теоретических абстракций. Именно в таком режиме функционируют стенки топливных баков с жидким водородом у ракетно-космических систем, таких как «Шаттл», «Буран» и т.д.

В экономике практически полную аналогию с описанной ситуацией мы имеем при определении цены товара с учетом транспортных расходов. Чем дальше находится потребитель от производителя при заданном способе транспортировки изделия, тем выше цена товара. Фактически описанные функциональные зависимости очень похожи.

Следует особо отметить, что для огромной открытой социально-экономической системы, каковой является Россия, роль граничных условий исключительно велика. Большая протяженность государственной границы, а также традиционная роль связующего звена между востоком и западом приводят к наличию значительных градиентов социальных, экономических, демографических, климатических, экологических и прочих параметров. Именно большие значения градиентов перечисленных выше параметров приводят к тому, что социально-экономические аналоги термодинамических сил и потоков перестают быть малыми. В силу этого задача моделирования социально-экономических процессов в современной России становится существенно нелинейной. Кроме того, в силу пространственной неоднородности исследуемой системы далеко не все аспекты задачи допускают описание в рамках моделей с сосредоточенными параметрами, даже если речь и идет о стационарных или квазистационарных процессах.

Возвращаясь к сопоставительному анализу процессов и явлений в природных и социальных системах, отметим, что стационарные состояния в открытых системах австрийский биолог-теоретик Л. фон Бергаланфи назвал текущим равновесием. Он же ввел в науку термин «открытая система». Бергаланфи построил один из первых вариантов теории биологических организмов на базе физической химии, кинетики и термодинамики. Он же назвал новую науку «теорией открытых систем», ввел формальное определение ряда системных параметров: сумма, целостность, организация, рост, конкуренция и т.д.

Понятие локального, или текущего, равновесия Бергаланфи ввел для живого организма, который он стал рассматривать как неравновесную открытую систему. Как уже упоминалось выше, квазиравновесные состояния часто встречаются в различных областях естествознания, экономики, математической экологии, социометрии и т.п.

В стационарных состояниях характеристики системы не зависят от времени, поэтому не меняется ее энтропия  $S$ . В то же время система непрерывно производит энтропию, поскольку обобщенные термодинамические силы и потоки в стационарном неравновесном состоянии отличны от нуля. Следовательно, полная энтропия системы будет постоянна только при поступлении в нее извне отрицательной энтропии (негэнтропии), компенсирующей производство энтропии внутри системы.

Фактически мы имеем дело с уравнением баланса. Однако любое уравнение баланса всего лишь констатирует нулевое «сальдо» эволюционирующей системы. Сценарий ее перехода из начального состояния в конечное должен определяться неким вариационным принципом. Таковым принципом в термодинамике неравновесных процессов является принцип минимума производства энтропии.

Теорема о минимуме производства энтропии в стационарном неравновесном состоянии, сформулированная И.Р. Пригожиным [3], отражает внутреннюю устойчивость неравновесных систем, ее своеобразную инерционность. Поэтому, если какие-то граничные условия не позволяют системе прийти в устойчивое равновесие, при котором  $\Delta S = 0$ , то она придет в стационарное состояние, произведя при этом минимальное количество энтропии. Этот вывод годится в случае независимости феноменологических коэффициентов (вязкости, диффузии, теплопроводности) от параметров среды, что справедливо при небольших значениях градиентов и линейной зависимости между потоками и термодинамическими силами.

В экономике и социологии также действуют похожие принципы. Например, желание поддерживать налаженное производство на заданном уровне приводит владельца фирмы к стратегии выживания в сложных экономических условиях. Так, при экономических кризисах менеджеры обычно стремятся выдерживать установившиеся пропорции в структуре расходов и доходов, а не осуществлять массированные инвестиции. По этому же сценарию в течение десятилетий работал Госплан СССР.

Приблизительно тех же принципов придерживаются политики в случае необходимости стабилизации демографической ситуации в стране.

Устойчивость стационарных состояний с минимальным производством энтропии определяется принципом, сформулированным в 1884 г. Ле-Шателье и обобщенным в 1887 г. с точки зрения термодинамики немецким физиком Карлом Брауном. В одной из своих работ Ле-Шателье писал: "Если в системе, находящейся в равновесии, изменить один из факторов равновесия, например, увеличить давление, то произойдет реакция, сопровождающаяся уменьшением объема, и наоборот. Если же такие реакции происходят без изменения объема, изменение внешнего давления не будет влиять на равновесие".

Принцип Ле-Шателье - Брауна в современной формулировке гласит, что система, выведенная внешним воздействием из состояния с минимальным производством энтропии, стимулирует развитие процессов, направленных на ослабление внешнего воздействия.

В самом деле, пусть внешнее воздействие меняет фиксированные термодинамические силы (например градиент температуры). При этом система откликнется на это воздействие изменением потока, связанного с этой силой (потока теплоты). Если в системе имеются некоторые незафиксированные термодинамические силы, которые могут испытывать флуктуации, то они увеличат производство энтропии по отношению к ее минимуму в стационарном состоянии. В результате система будет эволюционировать в новое стационарное состояние, в котором изменение потока теплоты будет меньше первоначального [2]. Другими словами, в стационарных неустойчивых состояниях, когда фиксирована одна из сил, другие силы могут испытывать флуктуации. При этом производство энтропии возрастет, и система может выйти из стационарного состояния. Однако в силу самопроизвольного стремления в состояние с наименьшим производством энтропии, она перейдет в новое стационарное состояние. Отметим, что общая теория устойчивости решений дифференциальных уравнений была разработана великим русским математиком А. М. Ляпуновым. Он показал, что устойчивые состояния не теряют своей устойчивости при малых флуктуациях физических параметров, поскольку система за счет внутренних взаимодействий способна погасить возникающие флук-

туации.

Неустойчивые системы, напротив, при возникновении флуктуаций способны усиливать их, и в результате такого нарастания амплитуд возмущений система уходит из стационарного состояния. Критерием эволюции при этом является величина изменения скорости производства энтропии  $\frac{d\sigma}{dt}$ , которая указывает направление развития физической системы к устойчивому стационарному состоянию.

Процессы, о которых шла речь выше, происходят достаточно медленно. Прирост энтропии за единицу времени в единице объема в открытых системах назван функцией диссипации, а системы, в которых функция диссипации отлична от нуля, названы диссипативными. В таких системах энергия упорядоченного движения переходит в энергию неупорядоченного движения и в конечном счете в тепло. Практически все системы являются таковыми, поскольку трение и прочие силы сопротивления приводят к диссипации энергии. Принципы локального равновесия и теорема о минимуме производства энтропии в равновесных состояниях были положены в основу современной термодинамики необратимых процессов. Крайне важным является то обстоятельство, что принцип Ле-Шателье - Брауна и принцип минимального производства энтропии могут применяться при рассмотрении социально-экономических структур практически без изменений. Дело в том, что принцип Ле-Шателье, фактически, констатирует свойство макроскопической инертности статистических систем. Но социально-экономические системы принадлежат к числу таковых.

Принцип минимума производства энтропии также применим к социально-экономическим системам, однако это утверждение не столь очевидно и требует детальной конкретизации понятия «энтропия социально-экономической системы». Кроме того, для того чтобы перенести физические методы описания статистических систем в экономику, необходимо дать достаточно полную картину описания термодинамических процессов с помощью энтропии, а также на языке термодинамических потенциалов. Однако один достаточно яркий пример из области экономики можно привести непосредственно в контексте принципа Ле-Шателье - Брауна. Так, инфляция в России в начале 90-х годов, а также во время дефолта в августе 1998 года с точки зрения синергетики представляла собой существенно нелинейный процесс быстрого перехода экономики из одного устойчивого состояния в другое. В то же время вялотекущая инфляция в 1999-2002 гг. вполне допускает описание в рамках линейного термодинамического подхода Онсагера [4].

### **Заключение**

Резюмируя изложенное выше, можно сказать, что в настоящей работе:

1. Переосмыслена роль первых принципов, позволяющих описывать социально-экономические процессы по аналогии с процессами в термодинамике.
2. Предложен экономический аналог принципа Ле-Шателье- Брауна.
3. Дан новый взгляд на проблему использования принципа минимального
4. производства энтропии применительно к социально-экономическим системам.

### **Список литературы**

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Курс теоретической физики. Т.5. Статистическая физика. Часть 1. М: Наука. 1976. 584 с.
2. Дубнищева Т.Я. Концепции современного естествознания. Новосибирск, ЮКЭА, 1997. 802 с.
3. Пригожин И.Р. От существующего к возникающему М.: Наука, 1985. 327 с.
4. Швидак А.И. Качественные методы анализа нестабильной экономики / СамИИТ, РАТ. Самара, 2000. 169 с.
5. Хакен Г. Синергетика. М.: Наука, 1980. 404 с.