

# ИНФОРМАЦИОННЫЕ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

А.А. Бородин<sup>1</sup>

## ЭНТРОПИЯ И ПРИМЕНЕНИЕ ЭНТРОПИИ ДЛЯ АНАЛИЗА СИСТЕМ

В данной работе показана эволюция знаний об энтропии и раскрыты ее возможности для оценки развития, деградации и разрушения систем, приведены примеры, в которых продемонстрировано применение энтропии для анализа систем, сформулированы направления исследований для того, чтобы энтропия применялась при решении практических задач.

**Ключевые слова:** энтропия в физике, информационная энтропия; 2-й и 3-й законы термодинамики; вероятность; микросостояния и макросостояния; система, подсистема; изолированные системы, не-изолированные системы; информация; кибернетика; рост и убывание энтропии; «порядок» и «хаос» в системе, дезорганизация системы; закон сохранения для энтропии.

А.А. Borodin

## ENTROPY AND APPLICATION OF ENTROPY FOR SYSTEMS ANALYSIS

The work shows the evolution of knowledge about the entropy and opens its possibilities for development evaluation, degradation and destruction of systems. The examples which demonstrate application of entropy for systems analysis are given, the directions of studies are formulated, so that the entropy would be used with the practical problem solving.

**Keywords:** entropy in physics, information entropy; The 2nd and the 3rd laws of thermodynamics; probability; microstate and macroscopic state; system, subsystem; isolated systems, non-isolated systems; information; cybernetics; increase and decrease of entropy; "order" and "chaos" in the system, disorganization of system; an entropy conservation law.

### 1. Эволюция представлений об энтропии

Энтропию в настоящее время следует считать современным и важным направлением прикладной математики. Энтропия появилась в термодинамике для анализа работы тепловых машин. В дальнейшем, усилиями всемирно известных математиков К. Шеннона, Э. Шредингера, Н. Винера и других ученых, было показано, что энтропия может быть применена для оценки меры дезорганизации систем любой природы.

**Энтро́пия** (от греч. *εντροπία* – поворот, превращение) – понятие, впервые возникшее в термодинамике как мера необратимого рассеяния энергии (обычно обозначается  $S$ ). В узком смысле энтропия характеризует равновесное состояние системы из большого числа частиц.

Используя понятие энтропии, Клаузиус (1865 г.) дал наиболее общую формулировку **второго закона термодинамики**: при реальных (необратимых) адиабатических процессах энтропия возрастает, достигая максимального значения в состоянии равновесия.

Статистическая механика связывает энтропию

<sup>1</sup>Кандидат технических наук, доцент кафедры общегуманитарных и естественно-научных дисциплин НОУ ВПО «Российский новый университет».

с вероятностью осуществления макроскопического состояния системы знаменитым соотношением Больцмана «энтропия – вероятность»:

$$S = kB \ln W,$$

где  $W$  – термодинамическая вероятность осуществления данного состояния (число способов реализации состояния);

$kB$  – постоянная Больцмана.

При адиабатически обратимом процессе энтропия не изменяется, так как при адиабатическом расширении газа за счет увеличения объема энтропия увеличивается, однако за счет уменьшения температуры, которое при этом происходит, она уменьшается. Эти две тенденции полностью компенсируют друг друга.

Таким образом, в процессах полностью изолированной системы энтропия не убывает. Но в природе полностью замкнутых систем не существует. В процессах неизолированных систем энтропия может возрастать, убывать или оставаться неизменной в зависимости от характера процесса. Открытость системы позволяет локальным образом уменьшать энтропию за счет обмена энергией с окружающей средой, что приводит к упорядочению и усложнению структуры системы.

Энтропия системы в каком-либо обратимом

процессе изменяется под влиянием внешних условий, воздействующих на систему. Механизм воздействия внешних условий на энтропию состоит в следующем: внешние условия определяют микросостояния, доступные системе, и их число. В пределах доступных для нее микросостояний система достигает равновесного состояния. В результате значения энтропии, следуя за изменениями внешних условий, достигают максимального значения, совместимого с внешними условиями.

Чем меньше число микросостояний, которыми осуществляется макросостояние, тем более сильно упорядочена система. Тогда энтропия системы минимальна. Чем больше число микросостояний, тем больше разупорядочена система. Тогда энтропия системы максимальна. Поэтому можно сказать, что энтропия является мерой упорядоченности системы.

В состоянии равновесия энтропия достигает своего максимального значения. В обычном понимании равновесие в системе означает хаос.

Система, предоставленная самой себе, движется в направлении равновесного состояния, поэтому энтропия такой системы возрастает.

Понимание физического смысла энтропии затруднено тем обстоятельством, что ее значение не может быть измерено никаким прибором, но зато вычисляется. Утверждение о существовании энтропии обычно относят ко второму закону термодинамики. Более чем 100-летний опыт использования понятия энтропии в термодинамике подтверждает правильность представления о ней как о физической величине, изменение которой (в равновесных процессах) однозначно связано с наличием обмена энергией в форме теплоты.

Известно, что абсолютное значение энтропии различных веществ при различных температурах можно определить на основе третьего закона термодинамики. **Теорему Нернста** часто называют **третьим законом термодинамики**: энтропия любой системы при абсолютном нуле температуры всегда может быть принята равной нулю.

Физический смысл теоремы состоит в том, что при  $T = 0$  все возможные состояния системы имеют одинаковую энтропию. Поэтому состояние системы при  $T = 0$  удобно взять в качестве начального состояния 0 и положить энтропию этого состояния равной нулю.

В термодинамике теорема Нернста принимается как постулат. Доказывается она методами квантовой статистики.

Этот закон устанавливает также начало отсчета энтропии и тем самым позволяет вычислить абсолютное значение энтропии.

Таким образом оказалось, что понятие энтропии является одним из фундаментальных свойств любых систем с вероятностным поведением.

В настоящее время понятие «энтропия» широко применяется в различных областях науки. Например, в статистической физике – как мера вероятности осуществления какого-либо макроскопического состояния; в теории информации – как мера неопределенности какого-либо опыта (испытания), который может иметь разные исходы. Понятие «энтропия» может быть применено также в различных научных дисциплинах: в биологии, в кибернетике и т.д. – как мера дезорганизации систем любой сложности.

В 1949 г. К. Шеннон, работая с задачами передачи сообщений в системах связи, опубликовал формулу:

$$S = - \sum_1^m p_i \log p_i, \quad (1)$$

где  $p_i$  – есть вероятности отдельных исходов;  $\sum_i p_i = 1$ .

Шеннон предложил называть эту величину энтропией, не поясняя связей и различий этого термина с известной энтропией в физике. Знак минус в этой формуле отражает тот факт, что вероятности всегда меньше единицы, а энтропия должна иметь положительный знак.

С появлением этой формулы возникло направление в науке, названное «информационная энтропия».

Информационная энтропия – это мера неопределенности сообщений, которые описываются множеством символов и вероятностей появления этих символов в сообщении. Энтропия в статистической механике имеет тесную связь с информационной энтропией, так как в этих двух областях применяют принципиально одинаковые методы вычисления энтропии. Информационная энтропия равна нулю, когда какая-либо вероятность сообщения равна единице (а остальные – нулю), то есть когда информация полностью предсказуема и не несет ничего нового для приемника. Энтропия принимает наибольшее значение для равномерного распределения, когда все вероятности  $p_i$  одинаковы, то есть когда неопределенность, разрешаемая сообщением, максимальна. Информационная энтропия также обладает всеми теми математическими свойствами, которыми обладает термодинамическая энтропия. Например, она аддитивна: энтропия нескольких сообщений равна сумме энтропий отдельных сообщений.

Связь между энтропией и информацией можно сформулировать следующим образом: **энтропия** – это мера множества тех состояний системы, о пребывании в которых система **должна забыть**, а **информация** – это мера множества тех состояний, о пребывании в которых система **должна помнить**.

Начиная с 50-х годов двадцатого столетия Э. Шредингер в своих работах предложил исполь-

зывать понятие энтропии как меры дезорганизации систем любой природы. Эта мера простирается от максимальной энтропии ( $H = 1$ ), то есть хаоса, полной неопределенности, до исчезновения энтропии ( $H = 0$ ), соответствующей наивысшему уровню организации, порядка.

С помощью энтропии стало возможным количественно оценивать такие на первый взгляд качественные понятия, как «хаос» и «порядок».

Все природные системы, включая человеческий организм и человеческие сообщества, не являются замкнутыми. Выше было отмечено, что для процессов, протекающих в физических изолированных системах, энтропия может возрастать, убывать или оставаться неизменной в зависимости от характера процесса. Это правило действует также для информационных систем. Открытость системы позволяет локальным образом уменьшать энтропию за счет обмена энергией с окружающей средой, что приводит к упорядочению и усложнению структуры системы, при этом происходит накопление дополнительной информации.

Энтропия и информация служат выражением двух противоположных тенденций в процессах развития. Если система эволюционирует в направлении упорядоченности, то ее энтропия уменьшается. Но это требует целенаправленных усилий, внесения информации, то есть управления.

Информация и энтропия связаны потому, что они характеризуют реальную действительность с точки зрения именно упорядоченности и хаоса, причем если информация – мера упорядоченности, то энтропия – мера беспорядка. Одно равно другому, взятому с обратным знаком.

Н. Винер, основоположник кибернетики, отмечал следующее: «В мире, где энтропия стремится в целом к возрастанию, существуют местные временные островки уменьшающейся энтропии, это области прогресса». Механизм их возникновения состоит в целенаправленном отборе таких устойчивых форм, в процессе формирования которых энтропия убывает. В общественных системах люди непрерывно борются с энтропией, понижая ее значение извлечением информации из окружающей среды.

В настоящее время кибернетику рассматривают как теорию организации, теорию борьбы с мировым хаосом, с роковым возрастанием энтропии. Это понимание энтропии позволяет применять ее для анализа систем, процессов самоорганизации систем в различных областях: технических, общественных, биологических и т.д.

Применение понятия «энтропия» позволяет сделать выводы о развитии систем, о том, какие

факторы влияют на развитие систем, о том, как вместе с развитием системы изменяется информационная составляющая системы.

## 2. Применение энтропии

Рассмотрим простой пример. В настоящее время в России у абитуриентов, поступающих в вузы, низкий уровень знаний. Будем считать среднюю школу отдельной системой. Для вычисления энтропии школы воспользуемся формулой [1]:

$$S = -\sum_i p_i \log p_i,$$

где  $p_i$  – вероятности того, что школьник успешно проходит тесты и сдает экзамены на разных этапах обучения.

Практика показывает, что вероятности  $p_i$  малы. Следовательно, энтропия  $S$  высока, при этом она с каждым годом угрожающе растет. Рост энтропии в школах означает, что в образовательном процессе в школах присутствуют недостатки. Для прекращения роста энтропии необходимы дополнительные затраты энергии и информации, которые должны включать увеличение расходов государства на среднее образование, повышение дисциплины в школах, оснащение школ современными учебными пособиями и т.д.

Если система состоит из нескольких взаимодействующих друг с другом подсистем, то применение энтропии сопровождается действием закона сохранения. **Закон сохранения для энтропии** можно сформулировать следующим образом: **если энтропия отдельной подсистемы убывает, то в других системах она возрастает.**

Рассмотрим действие этого закона. Несмотря на кризисы и войны, человечество в целом находится на пути поступательного развития. Человечество в целом можно рассматривать как подсистему. Энтропия этой подсистемы уменьшается. Уменьшение энтропии означает, что люди совершенствуют общественные отношения, делают открытия в различных областях наук, пользуются новыми технологическими достижениями и т.д. Человечество создает свою среду обитания и накапливает все больший объем информации. Человечество взаимодействует с другой подсистемой – окружающей средой. При этом энтропия окружающей среды возрастает. Люди уничтожают флору и фауну, ухудшают экологическую обстановку на Земле. Чтобы приостановить рост энтропии окружающей среды, необходимо затратить значительные усилия. Поскольку жизнь людей тесно связана с окружающей средой, то усилия и затраты должны быть направлены не только на то, чтобы восстанавливать флору и фауну Земли. В подсистему, которую образует человечество, необходимо внести дополнительную информацию и сфор-

мировать новые правила и порядки, с помощью которых люди должны взаимодействовать друг с другом и с окружающей средой. Должны появиться новые законы, которые регламентируют жизнь людей так, чтобы люди оказывали минимальные вредные воздействия на окружающую среду.

Другой пример применения энтропии. При анализе общественных, социальных и других институтов энтропия позволяет установить рамки, в пределах которых государство может успешно развиваться или, наоборот, деградировать.

Рассмотрим два типа государств: демократические и тоталитарные государства. Выберем для примера Северную Корею и Южную Корею.

Южная Корея опережает Северную Корею в развитии промышленности, науки, техники, сельского хозяйства. Уровень жизни населения в Южной Корее значительно выше, чем в Северной Корее.

Почему Северная Корея сильно отстает от Южной Кореи? Ведь образовались эти государства практически одновременно – в 1948 году.

Ответить на этот вопрос можно следующим образом. Северная Корея – это тоталитарное государство. Во главе ее находится диктатор, который управляет государством с помощью партийной и военной номенклатуры.

Южная Корея – это государство, построенное по образцу западной демократии.

Элементами такой системы, как государство, являются люди. Степенью свободы людей следует считать права человека, в числе которых должны присутствовать право на свободу выбора целей и путей их достижения, политические и экономические свободы. Следует отметить, что неограниченные свободы могут привести к распаду целого на части. Поэтому в любых государствах присутствуют законы, регламентирующие жизнь граждан.

Демократическое общество характеризуется большей степенью открытости. Более открытая система, с одной стороны, впускает в себя больше энергии из внешнего мира, а с другой стороны – позволяет увеличить отток «недоброкачественной энергии». Элементы системы, в которую поступает внешняя энергия, получают больше степеней свободы. *В открытой системе энтропия уменьшается, а структура системы усложняется.* Усложнение структуры системы происходит потому, что законы, регламентирующие жизнь граждан, непрерывно совершенствуются, позволяя людям защищать свои права и реализовывать свои интересы, появляются новые общественные и экономические структуры. Такую картину можно наблюдать в Южной Корее.

Иную картину можно наблюдать в Северной Корее.

Такое государство, как Северная Корея, представляет собой практически замкнутую систему. Права человека, экономические и политические свободы у людей сильно ограничены. Это государство как система, с одной стороны, не впускает в себя энергию из внешнего мира, а с другой стороны – не позволяет увеличить отток «недоброкачественной энергии». *Энтропия тоталитарного государства возрастает.* С возрастанием энтропии в системе увеличивается дезорганизация. Дезорганизация возникает потому, что накопление «недоброкачественной энергии» приводит к накоплению противоречий между людьми. Накопленные противоречия могут привести, в конечном счете, к распаду государства. Очень похожая ситуация привела к распаду СССР.

Рамки работы не позволяют показать возможности энтропии для анализа систем различной природы (биологических, военных и т.д.). Но даже эти простые примеры показывают возможности энтропии для получения выводов о периодах развития, деградации и разрушения систем.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на то, чтобы научиться вычислять энтропию. Это направление связано с моделированием функционирования системы таким образом, чтобы получать вычисленное значение энтропии на различных этапах функционирования системы.

Также необходимо провести дополнительные исследования для того, чтобы научиться оценивать изменение объема информации в системе вместе с изменением энтропии.

### Литература

1. Советский энциклопедический словарь. – М. : Советская энциклопедия, 1980. – 1 600 с.
2. Хазен, А.М. Происхождение и эволюция жизни и разума с точки зрения синтеза информации // Биофизика. – 1992. – Т. 37. – № 1. – С. 105–122.
3. Хазен, А.М. Принцип максимума производства энтропии и движущая сила прогрессивной биологической эволюции // Биофизика. – 1993. – Т. 38. – № 3. – С. 531–551.
4. Хазен, А.М. Интеллект как иерархия синтеза информации. // Новости искусственного интеллекта. – 1994. – № 1. – С. 71–98.
5. Прангишвили, И.В. Энтропийные и другие системные закономерности. Вопросы управления сложными системами. – М. : Наука, 2003.
6. Хинчин, А.Я. Понятие энтропии в теории вероятностей // Успехи математических наук. – 1953. – Т. 8. – № 3. – С. 3–20.