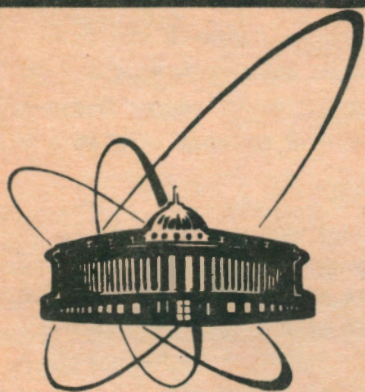


91-190



**сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
дубна**

P19-91-190

В. И. Корогодин

**ТЕОРИЯ ИНФОРМАЦИИ И НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ
ТЕРМОДИНАМИКИ**

1991

2. Негэнтропийный принцип и его критика

Мы уже отмечали, что негэнтропийный принцип информации возник из попыток распространить некоторые положения К.Шеннона за пределы математической теории связи *. Исходным пунктом для такого обобщения послужила известная формула К.Шеннона

$$H_i = -k \log_q p_i, \quad (I)$$

где H_i - "количество информации", приходящейся на i -й символ кода, передаваемый по каналу связи; p_i - частота встречаемости i -го символа в соответствующем языке; k - коэффициент, зависящий от избранных единиц измерения H и основания логарифма q (знак "минус" перед k поставлен для того, чтобы H было положительным), - так, при выражении H в б и т а х и при $q = 2$ величина $k = 1$.

Вскоре после выхода работы /3/ у.Р.Эшби /19/ и Л.Бриллюэн /4/ предложили использовать формулу (I) для исчисления "количества информации", связанной с л ю б ы м объектом или явлением, а не только с символами сообщений, передаваемых по каналам связи. Рассуждения здесь строились следующим образом /4,5/.

Пусть имеется некоторая система, состоящая из $m = p^{-1}$ элементов, или некое событие, вероятность которого есть p . Тогда "количество информации", соответствующей данной системе или осуществлению такого события, есть

$$I = k \log m = -k \log p. \quad (2)$$

* Заметим, что к подобным "обобщениям" весьма скептически относился ряд авторов, в том числе Г.Кастлер /17/, сам К.Шеннон /18/ и А.А.Харкевич /8/. Так, К.Шеннон писал: "Очень редко удастся открыть одновременно несколько тайн природы одним и тем же ключом... при помощи нескольких магических слов, таких, как и н ф о р м а ц и я , э н т р о - п и я , и з б ы т о ч н о с т ь ..., нельзя решить всех нерешенных проблем... поиск путей применения теории информации в других областях не сводится к тривиальному переносу терминов из одной области науки в другую. Этот поиск осуществляется в длительном процессе выдвижения новых гипотез и их экспериментальной проверки" (стр.667-668). "Теорию связи иногда называют теорией информации, - писал А.А.Харкевич. - Этот термин приобретает нежелательный оттенок в связи с тенденцией к распространению положений теории на области, в которых она едва ли компетентна" (стр.7-8).

I. Введение

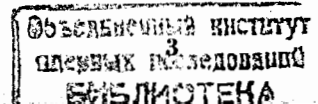
Как известно, начало теории информации было положено работами Н.Винера /1,2/ и К.Шеннона /3/. Попытки обобщить некоторые положения, сформулированные в этих работах, привели к так называемому "негэнтропийному принципу информации", предложенному Л.Бриллюэном /4,5/. В терминах этого принципа информация отождествляется с негэнтропией и рассматривается как третья ипостась материи, наряду с массой и энергией.

В 60-70-е гг. негэнтропийный принцип информации получил широкое распространение (см., напр., /6,7/). Не оказав влияния на развитие математической теории связи /8/, этот принцип, однако, был использован многими авторами в различных областях науки. Были даже попытки сопоставить негэнтропийный принцип, по его значимости, с принципом эквивалентности массы и энергии А.Эйнштейна. Так, автор работы /9/ писал: "Мы можем сказать, что энтропия есть мера недостатка информации о системе... Мы можем написать своего рода закон сохранения

$$I + S = \text{Const.}$$

Увеличение I означает уменьшение S , и наоборот" (стр.98) (здесь I - информация, а S - энтропия). И хотя негэнтропийный принцип уже неоднократно подвергался критике /10,11/ и постепенно придается забвению (см., напр., /12-14/), дискуссии о его научной значимости и эвристичности все еще продолжаются /15,16/.

Несомненной заслугой Л.Бриллюэна, в значительной мере определившей популярность негэнтропийного принципа, являлось стремление установить связь между теорией информации и термодинамикой. Если повышение упорядоченности физических и биологических систем характеризовать уменьшением их энтропии и увеличением количества "содержащейся в них" информации, то весьма заманчиво установить соотношение между этими их характеристиками. Л.Бриллюэн и попытался сделать это с помощью негэнтропийного принципа информации. Решение этой задачи сулит ряд существенных следствий, таких, например, как разрешение парадокса "демона Максвелла", выявление "информационной стоимости" технических устройств или "термодинамической стоимости" точности физических измерений и приобретаемого путем таких измерений "человеческого знания" /4,5/. Как мы увидим ниже, в терминах негэнтропийного принципа решить проблему связи между теорией информации и термодинамикой невозможно; этот путь заводит в тупик. В качестве альтернативного пути будет намечен другой подход, который, как я надеюсь, окажется более перспективным.



Каждой физической системе свойственна как некоторая неупорядоченность, так и некоторая упорядоченность. В качестве меры неупорядоченности системы можно использовать величину ее энтропии (S). В случае, если бы какая-либо система была абсолютно неупорядоченной, ее энтропия имела бы максимальное из возможных (для данной системы) значение $S_{\max} > S$. Тогда разность

$$S - S_{\max} = -\Delta S = N \quad (3)$$

можно назвать "отрицательной энтропией" или "негэнтропией" * системы и рассматривать ее как меру упорядоченности. Эта негэнтропия и является якобы и н ф о р м а ц и е й (I), внутренне присущей данной системе.

Это, однако, информация особого рода: это "связанная информация". Негэнтропия или связанная информация (I_b) может переходить в "свободную информацию" (I_f), не связанную с данной системой, что сопровождается возрастанием энтропии этой системы. Если же I_f поступает в систему извне, это сопровождается уменьшением энтропии системы и, в то же время, увеличением энтропии той системы, которая служит источником информации. I_f понимается здесь как информация, находящаяся как бы в процессе передачи по "каналам связи", которые могут иметь самую различную природу.

Постулировав, что "... оба вида информации могут быть превращены в негэнтропию и что информация, как связанная, так и свободная, могут быть получены только за счет негэнтропии некоторой физической системы" (/4/, стр.203), Л.Бриллюэн формулирует негэнтропийный принцип информации как преобразование

"Негэнтропия \rightarrow Информация \rightarrow Негэнтропия",

уже без подразделения информации на I_b и I_f , а также не вводя никаких ограничений на те физические системы, по отношению к которым этот принцип имеет смысл (/5/, стр.30). "Информация и физическая энтропия, - пишет он, - имеют одинаковую природу. Энтропия есть мера недостатка детальной информации о физической системе. Чем больше информация, тем больше энтропия" ** (/4/, стр.378).

* Термин негэнтропия был предложен Э.Шредингером /20/.

** Предоставив читателю самому судить о смысловом содержании этой цитаты, отметим лишь, что некоторые авторы всерьез считают, будто увеличение нашего знания (т.е. информации) о физической системе приводит к уменьшению присущей этой системе энтропии.

Таким образом, Л.Бриллюэн трактует негэнтропийный принцип информации как в с е о б щ и й принцип, как некий "закон природы". Правда, он отмечает, что в процессе "перехода" негэнтропии в информацию и соответственно часть информации может утрачиваться благодаря помехам, что приводит к возрастанию суммарной энтропии ("обобщенный принцип Карно", см. /4/, стр.202-205), но это не изменяет сути дела.

Как известно, математическая интерпретация физической энтропии была впервые рассмотрена К.Больцманом для случая идеального газа /21/. Позже для исчисления энтропии Н.Планк предложил формулу

$$H = k_B \ln W, \quad (4)$$

где H - энтропия, W - число "микросостояний" системы, которые могут соответствовать ее данному "макросостоянию", а k_B - "постоянная Больцмана", связывающая статистические микрохарактеристики системы с ее термодинамическими макрохарактеристиками; константа $k_B = 3,31 \cdot 10^{-24}$ кал/гр. Иногда величину термодинамической энтропии выражают в "энтропийных единицах" (э.е.), принимая, что 1 э.е. = 1 кал/гр.

Постулировав идентичность информации и энтропии и основываясь на том, что формулы (1), (2) и (4) совпадают вплоть до постоянного множителя, Л.Бриллюэн /4,5/, а затем и некоторые другие авторы (см., напр., /7,9/) делают вывод, что информацию и энтропию можно выражать в одних и тех же единицах измерения - как в информационных (битах), так и в энтропийных (э.е.). При этом оказывается, что 1 бит = $2,3 \cdot 10^{-24}$ э.е. и, соответственно, 1 э.е. = $4,3 \cdot 10^{23}$ бита.

Таким образом, негэнтропийный принцип целиком и полностью покоится на постулате о тождественности термодинамической энтропии, упорядоченности и информации. Но понятия "упорядоченность" и "информация" совпадают только в применении к тем системам, которые являются элементами кода, т.е. могут служить "информационной тарой" /22/; называть же информацию, которая может содержаться в таких системах, "энтропией" можно лишь в фигуральном смысле. Понятия "термодинамическая энтропия" и "упорядоченность" также совпадают лишь в применении к совершенно определенной системе - идеальному газу; при желании энтропию газа можно называть "информацией", но это будет примерно то же, что называть "троллейбусом" спичечный коробок. Неупорядоченность других физических систем можно, конечно, по аналогии с идеальным газом называть "энтропией" (что часто и делают), но это будет энтропия совершенно другого рода, понимаемая как синоним неупорядоченности, и никаких оснований для того, чтобы выражать ее в единицах измерения термодинамической энтропии, нет /16/. Разные сущности, конечно, целесообразнее именовать разными словами: информацию

- "информацией", энтропию - "энтропией", а упорядоченность - "упорядоченностью", что поможет избежать логических ошибок, связанных с подменной терминов.

Столь же бессодержательно отождествление физического смысла формул (I) и (4). Это становится очевидным при сопоставлении входящих в эти формулы коэффициентов. В формуле К.Шеннона (I) коэффициент k играет лишь подсобную роль - служит для перехода от одних единиц измерения "количества информации" (или, точнее, емкости информационной тары /22/) к другим; это - безразмерная величина, при определенных условиях превращающаяся в единицу. В формуле М.Плонка (4) коэффициент k_B является константой, имеет размерность и строго определенный физический смысл. Давно и хорошо известно, что одними и теми же формулами можно описывать самые разные феномены, что отнюдь не свидетельствует о тождестве их физической природы. Это имеет место и в данном случае. Поэтому приравнивание коэффициента k формулы (I) константе Больцмана k_B является грубой логической ошибкой.

Но есть еще одна, может быть, наиболее веская причина несостоятельности негэнтропийного принципа информации. Дело в том, что ни в работе К.Шеннона /3/, ни в работах адептов негэнтропийного принципа /4-7,9/ не дается определения понятия "информация", - речь идет лишь об ее количестве. Многочисленные попытки дать такое определение, сведенные в работах /12,23/, нельзя признать удовлетворительными. Мы определили информацию как нечто, необходимое для осуществления целенаправленного действия /24,25/. Из этого следует, что информация содержится лишь в объектах, способных совершать такие действия, т.е. в живых организмах, а в объектах неживой природы (за исключением некоторых производных живых организмов и, в первую очередь, человека) ее нет и быть не может.

Последнее утверждение хорошо согласуется с положением Л.А.Блюменфельда /26/ о том, что биологическая упорядоченность есть упорядоченность осмысленная, подчиненная определенной цели, чем и отличается коренным образом от упорядоченности небиологических систем. Биологические системы, "способные к созданию биологической упорядоченности, ... обладают одним общим свойством. Они создают осмысленные компоненты, конфигурации, время жизни которых превышает время одного цикла работы системы... По-видимому, это требование присутствия долгоживущих, медленно релаксирующих образований (конфигураций) обязательно для живой материи. Нельзя построить биологическую систему, используя только газовую фазу!" (стр.32-33). Если признать, что небиологические системы, какова бы ни была их упорядоченность, могут только изменяться, но не действовать целенаправленно, мы при-

дем к выводу, что "способность создавать новую информацию, придавать смысл упорядоченности есть, по-видимому, обязательное свойство живой материи" (стр.32) и что "живыми называются самовоспроизводящиеся системы, способные к созданию информации, прямо или косвенно влияющей на их самовоспроизведение" (стр.32).

Неудивительно поэтому, как ярко показал Л.А.Блюменфельд /26/, что основанные на негэнтропийном принципе попытки сопоставления "количества информации", якобы содержащейся в разных объектах живой и неживой природы, совершенно бессодержательны. Действительно, что, кроме недоумения, может вызвать получаемый при этом результат, согласно которому в организме человека содержится примерно 300 э.е. "информации" - столько же, сколько в 10^{13} бактериальных клетках, или в равном им по весу куске гранита, или в стакане теплой воды (стр.26-27)...

Сказанное выше, по-видимому, более чем достаточно, чтобы рассмотреть негэнтропийный принцип информации лишь как плод излишне вольных ассоциаций, лишенный логических оснований и научной значимости /10,II,27/. Поэтому следствия из этого принципа (одно из которых, например, состоит в утверждении, будто информация сама по себе может переходить от одной системы к другой и совершать работу, повышая упорядоченность какой-либо системы), рассмотренные в работах /4,5/ и других, я анализировать не буду.

3. Соотношение информации и термодинамики

Вернемся теперь к позитивному аспекту концепции Л.Брилляна. Как мы уже отмечали, это - идея о связи между теорией информации и термодинамикой. Отвергнув негэнтропийный принцип информации как подход к выявлению этой связи, я, однако, считаю, что сама идея о существовании подобной связи весьма эвристична, только к выявлению такой связи следует идти иным путем. Один из возможных таких путей я и хочу обсудить.

Как отмечал еще Н.Винер /1/, "информация есть информация, а не материя и не энергия" (стр.20I); сама по себе информация пассивна и не может оказывать влияния на течение событий в окружающем нас мире /24/. И в то же время информация необходима для осуществления целенаправленных действий: "Действенно жить, - писал Н.Винер /2/, - это значит жить, располагая правильной информацией" (стр.3I). Именно благодаря такому прагматизму информация столь высоко ценится людьми, и человеческое общество затрачивает огромные средства для развития технических систем передачи, хранения и обработки информации.

Действенность информации проявляется в том, что только на ее основе можно создавать материальные устройства, призванные осуществлять те

или иные целенаправленные действия в подходящих для этого условиях; такие устройства можно называть "операторами" /24/, хотя термин этот и не особенно удачен. Существуют природные операторы - соматические компоненты живых клеток и организмов, которые можно рассматривать как реализацию или материализацию кодирующей их генетической информации, "записанной" в молекулах ДНК их генома. Существуют искусственные операторы - различные технические системы и вся технология в целом (от первобытных орудий труда до современной электронной техники), создаваемые на основании специфической для человека информации - человеческого знания. Но, независимо от вида операторов, все они обладают общей особенностью - их строение, структура и возможности их "использования" однозначно определяются свойствами кодирующей их информации. Хотя характер связи количества и семантики информации со структурными особенностями кодируемых ею операторов еще не установлен, подходы к решению этой задачи намечены в работах А.Н.Колмогорова /28,29/.

Мы уже отмечали /24,25/, что в операторах получает свое воплощение не только количество и семантика соответствующей информации, но и такое ее свойство, как **п о л и п о т е н т н о с т ь** - возможность быть использованной для достижения одинаковых или разных целей как в одной и той же, так и в разных ситуациях. Это обуславливает то, что ценность информации C , в отличие от ее количества B ($B \leq H$, см. /22/), не может быть задана одним единственным числом. Если определить ценность информации как приращение вероятности, при ее использовании, достижения данной цели Z в данной ситуации S , то ее можно выразить через отношение

$$C_I = \frac{P - p}{1 - p}, \quad (5)$$

где p - вероятность "спонтанного" осуществления события Z , а P - вероятность его осуществления при использовании данной информации I или, точнее, кодируемого ею оператора Q_I /24/. (Заметим, между прочим, что параметры S , Q_I , p , P , Z и W , где W - "побочный продукт" достижения цели, необходимы и достаточны для полного описания любого целенаправленного действия, сколь бы простым или сложным оно не было /24/). Из этого следует, что C_I имеет определенное значение лишь для данной пары S и Z , а в общем случае может быть задано только как распределение по множестве пар S, Z . Этой же особенностью отличается и величина $A = B^{-1}C$, которую можно назвать "э ф ф е к т и в н о с т ь ю" информации.

Любой оператор Q_I можно рассматривать как "машину", для "работы" которой требуется затрата определенного количества энергии E_Q . Часть

этой энергии E_Z расходуется непосредственно для "достижения цели", а часть $E_W = E_Q - E_Z$ расходуется "впустую", за счет чего и образуются побочные продукты W . Тогда коэффициент полезного действия Q_I можно определить как $KPD_Q = E_Z^{-1}E_Q$.

Сделаем теперь ряд допущений. Допустим, что величина E_Q не зависит от S и Z , а определяется только структурой оператора. Допустим, что "сложность" и "громоздкость" оператора тем больше, чем большее количество B информации требуется для его кодирования. Допустим далее, что E_Q возрастает с увеличением сложности и громоздкости оператора, т.е. с увеличением B кодирующей его информации. Наконец, допустим, что величина E_Z увеличивается с увеличением ценности информации C_I . Отсюда следует, что KPD_Q , который равен $E_Q^{-1}E_Z$, должен увеличиваться с увеличением отношения $B^{-1}C = A$, т.е. с увеличением эффективности информации, кодирующей данный оператор /24/.

В работе /24/ было показано, что для любой данной пары S и Z существует множество таких информации, для которых при $B \rightarrow \infty$ величина $C \rightarrow 1$, тогда как зависимость A от B всегда описывается кривой с максимумом. Для каждой пары S и Z величине A_{max} соответствует определенное значение B^* . Из этого следует, что для каждой пары S и Z максимальная величина KPD_Q может быть достигнута только при максимальном значении эффективности A информации I , кодирующей оператор Q_I , причем количество B этой информации должно быть близким или равным B^* . Некоторые выводы из этих посылок, относящиеся к динамике и эволюции информации, обсуждались в работах /24,25,27/.

Насколько эвристичен этот подход к проблеме связи между теорией информации и термодинамикой, покажет будущее. Сейчас можно лишь утверждать, что ряд следствий из развитых выше представлений допускает экспериментальную проверку.

Автор благодарит Атоса Ночкина за идею о связи между КПД оператора и свойствами кодирующей его информации, а также В.Л.Корогодину, Ю.А.Кутлахмедова и М.И.Подгорецкого за обсуждение проблемы, чтение работы в рукописи и ряд ценных замечаний.

Литература

1. Винер Н. Кибернетика или управление и связь в животном и машине. "Советское радио", М., 1968.
2. Винер Н. Кибернетика и общество. ИЛ, М., 1958.
3. Шеннон К. Математическая теория связи. В кн.: К.Шеннон. Работы по теории информации и кибернетике. М.: ИЛ, 1964.

4. Бриллюэн Л. Наука и теория информации. Физматгиз, М., 1960.
5. Бриллюэн Л. Научная неопределенность и информация. "Мир", М., 1966.
6. Седов Е.А. Эволюция и информация. "Наука", М., 1976.
7. Стратанович Р.Л. Теория информации. "Советское радио", М., 1975.
8. Харкевич А.А. Очерки общей теории связи. Гос. издат. технико-теорет. лит., М., 1955.
9. Волькенштейн М.В. Физика и биология. "Наука", М., 1980.
10. Оксан А.И. Гносеологический анализ соотношения энтропии и информации. Философские науки, 1972, № 5, с.68-76.
11. Серавин Л.Н. Теория информации с точки зрения биолога. Изд-во Ленинградского университета, Л., 1973.
12. Гришкин И.И. Понятие информации (логико-методологический аспект). "Наука", М., 1973.
13. Поплавский Р.П. Термодинамика информационных процессов. "Наука", М., 1981.
14. Хакен Г. Синергетика. "Мир", М., 1980.
15. Термодинамика и регуляция биологических процессов. Отв. ред. А.И.Зотин. "Наука", М., 1984.
16. Шилейко А.В., Кочнев В.Ф., Химушкин Ф.Ф. Введение в информационную теорию систем. "Радио и связь", М., 1985.
17. Каствлер Г. Азбука теории информации. В кн.: Теория информации в биологии. ИЛ, М., 1960, с.9-53.
18. Шеннон К. Бандвагон. В кн.: К.Шеннон. Работы по теории информации и кибернетике. ИЛ, М., 1964, с.667-668.
19. Эшби У.Р. Введение в кибернетику. ИЛ, М., 1959.
20. Шредингер Э. Что такое жизнь с точки зрения физика. Атомиздат, М., 1972.
21. Больцман Л. Лекции по теории газов. М., 1953.
22. Korogodin V.I., Fayszi Cs. Int. J. Systems Sci., 1986, v.17, p.1661.
23. Налимов В.В. Вероятностная теория языка. "Наука", М., 1979.
24. Корогодина В.И. Определение понятия "информация" и возможности его использования в биологии. Биофизика, 28, 1, 1983, с.171-178.
25. Корогодина В.И., Файси Ч. Информация и целенаправленное действие. ОИЯИ, Р19-90-556, Дубна, 1990.
26. Блюменфельд Л.А. Проблемы биологической физики. "Наука", М., 1977.
27. Корогодина В.И. Теория информации и биология. ОИЯИ, Р19-83-590, Дубна, 1983.
28. Колмогоров А.А. Три подхода к определению понятия "количество информации". Проблемы передачи информации, 1, 1, 1965, с.3-11.
29. Колмогоров А.А. К логическим основам теории информации и теории вероятности. Пробл. пер. инф., 5, 3, 1969, с.3-7.

Рукопись поступила в издательский отдел
24 апреля 1991 года.

Корогодина В.И.

P19-91-190

Теория информации и некоторые аспекты
термодинамики

Рассматриваются некоторые возможные соотношения между теорией информации и термодинамикой. Проведен критический анализ негэнтропийного принципа информации как одного из подходов к решению этой проблемы и показана его неудовлетворительность. В качестве альтернативного предложен другой подход, согласно которому эффективность информации $A = B^{-1}C$ /где B – ее количество, а C – ценность/ определяет коэффициент полезного действия /КПД/ кодируемого данной информацией оператора – природного или искусственного устройства, предназначенного для осуществления целенаправленного действия в данном пространстве режимов.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1991

Перевод автора

Korogodin V.I.

P19-91-190

Theory of Information and Some Aspects
of Thermodynamics

Possible relations between the theory of information and thermodynamics are considered. A critical analysis of the negentropic principle of information as an approach to the solution of the problem is performed, and it is shown to be unsatisfactory. An alternative approach is proposed. According to it, the efficiency of information $A = B^{-1}C$ (where B is its amount, and C is its value) determines the efficiency of the operator coded with this information; the operator being a natural or artificial device designed for purposeful action in the given space of regimes.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Communication for Nuclear Research. Dubna 1991