

ИНФОРМАЦИЯ В ПРИРОДНЫХ КИБЕРНЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ (К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ТЕРМИНА ИНФОРМАЦИЯ)

Ключевые слова: компьютерные технологии, природа информации, энтропия управления, баланс энергии.

Введение

Компьютерные технологии вошли в наш быт, производственную и общественную деятельность так глубоко, что без них уже нельзя считать свою жизнь полноценной и комфортной. В сфере компьютерных технологий работают сотни миллионов людей. Изучением информатики и освоением компьютерных технологий заняты миллионы школьников и студентов. Очень важно, чтобы это изучение начиналось с четких, однозначных и объективных определений основных понятий. Одним из первых понятий, с которых начинают изучение информатики, есть понятие информации. Каждый человек, научившийся читать и считать, под словом информация понимает некоторые сведения, совокупность каких-либо данных, знаний и т.п. Такое определение информации самое простое и самое доступное для понимания. До и в начале эры освоения компьютерных технологий оно соответствовало уровню не только школьников начальных классов, но и ученых-философов, ибо напечатано в философском словаре [1]. Но понятие информации такое глубокое и многогранное, что даже сейчас, работая на компьютерах пятого поколения, профессионалы-ученые не договорились о едином согласованном определении термина информация, которое было бы объективным и охватывало все сферы ее существования. Поэтому даже в профессиональной литературе продолжают появляться новые необъективные определения, противоречащие определению внедренному в практику компьютерных технологий. Широкое разнообразие неоднозначных и необъективных определений создает путаницу с употреблением термина информация. Некоторые ученые, не вникая в природу информации, отрывают ее от энергии, придают ей сакральный смысл и, на этом спекулируют, пытаются создать новую науку «информациологию» [2]. О проблемах в сообществе ученых, к которым приводит отсутствие единого объективного и всеми профессионалами принятого научного термина, автор писал в [3, 4], поэтому повторяться считает нецелесообразным.

Природа информации — вопрос философский. Информацию, как философскую категорию, советские философы начали изучать с 50-х годов XX века, сразу после того, как перестали шельмовать кибернетику и признали ее наукой. В 1968 г. советский философ А.Д. Урсул опубликовал философский очерк «Природа информации» [5]. Во Введении он пишет «Вокруг понимания природы информации в философии идет борьба между материалистами и идеалистами. Последние пытаются оторвать информацию от материи, превратить ее в некую духовную субстанцию». Действительно, среди разнообразия необъективных определений информации есть чисто идеалистическое, например такое: «Информация — нематериальная сущность, при помощи которой с любой точностью можно описывать реальные (материальные), виртуальные (возможные) и понятийные сущности. Информация — противоположность неопределенности».

Это определение предлагается автором учебника по теории информации [6] для студентов ВУЗов специальности «Информатика и вычислительная техника».

Назвав свой очерк «Природа информации», его автор должен доказывать ее (информации) материальность. В первой главе он детально анализирует классическую статистическую модель информации К.Э. Шеннона и соответствующее ей определение информации как снятой энтропии. Как и все критики, он отмечает его вероятностную природу и ограниченность рамками дискретных систем и не отмечает никаких признаков материальности. Он и другие, рассматривают нестатистические подходы к оценке меры и качества информации — алгоритмический и топологический, но увидеть природу информации в этих математических подходах он не пытается. Особое внимание автор сосредотачивает на рассмотрении концепции разнообразия. Выдвигая в качестве основного доказательства материальности информации концепцию разнообразия энергии, он ссылается на работы известных отечественных и зарубежных ученых-кибернетиков: В.М. Глушкова, У.Р. Эшби, С. Бира. Согласно Эшби природа информации заключается в разнообразии, а количество информации выражает количество разнообразия. В.М. Глушков в ряде работ характеризует информацию как меру неоднородности в распределении энергии (или вещества) в пространстве и во времени. «Информация, — пишет он, — существует постольку, поскольку существуют сами материальные тела и, следовательно, созданные ими неоднородности». Очевидно, что концепция разнообразия, неоднородности энергии не отрицает материальности информации, и автор очерка считает ее достаточным доказательством. В дальнейших трех главах очерка автор анализирует философские аспекты информации, освещенные в работах современных советских и зарубежных философов. В заключении автор представляет свое, как он говорит, общее, определение понятия информации: информация — это разнообразие, которое один объект содержит о другом (в процессе их взаимодействия). Может, философу такое определение информации покажется объективным и общим, но широкому кругу пользователей оно непонятно, ибо в нем не просматривается ни природа информации, ни ее назначение в природе и обществе.

Постановка задачи

Итак, проблема в том, что в учебной литературе, словарях и стандартах нет однозначного объективного и всем понятного определения термина «информация», а те что есть — необъективны. Цель статьи — путем анализа внедренного в практику и всеми принятого определения информации К. Шеннона показать природу и назначение информации и сформулировать однозначное объективное определение термина информация.

Такое определение есть в научной литературе, именно оно внедрено в практику компьютерных технологий. Это определение творца теории информации К.Э. Шеннона «Информация — это снятая энтропия». Следствием этого определения являются биты, байты, ..., гигабайты материализованные в сотнях миллионов устройств памяти компьютеров и миллиардах «флешек». Материализация бита подтверждает объективность, практичность и достаточность определения Шеннона. Согласно этому определению информацию может создавать динамическая система, обладающая множеством состояний и возможностью переходить из одного состояния в другое под действием внутренних или внешних сил. Такая система обладает неопределенностью. За подобие неопределенности состояния молекул газа при броуновском движении в изолированной системе, Шеннон назвал эту неопределенность энтропией. Если система имеет множество состояний, априори неизвестно, в каком состоянии она находится в данный момент времени. Чтобы определить состояние системы, необходимо над ней произвести опыт — управление. Управление всегда целенаправлено и устанавливает систему в определенное (известное) состояние. Энтропия системы в определенном (известном) состоянии равна нулю. Снятие энтропии управлением эквивалентно введению в систему информации, а количество снятой энтропии равно количеству информа-

ции, которой не хватало системе, чтобы находиться в определенном состоянии. Поэтому Шеннон считает энтропию потенциалом информации. Следовательно, в модели Шеннона энтропия и информация — категории одной природы. Для оценки меры энтропии Шеннон предложил формулу

$$H(X) = -\sum_{i=1}^n p_i \log_a p_i, \quad (1)$$

где $i=1, 2, \dots, n$ — количество состояний системы, p_i — вероятность пребывания системы в i -м состоянии.

Единицей энтропии-информации должна быть система с минимальным множеством состояний — с двумя равновероятными состояниями, для которой $n=2$; $p_1 = p_2 = 2^{-1}$.

При двоичном коде основание логарифма $a=2$. Подставив численные значения, получим

$$H(X) = -\sum_{i=1}^n p_i \log_2 p_i = -\left(\frac{1}{2} \log_2 \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \log_2 \frac{1}{2}\right) = -\left(\frac{1}{2} \cdot (-1) + \frac{1}{2} \cdot (-1)\right) = 1 \text{ бит.} \quad (2)$$

Анализ внедренного в практику определения понятия информация

По определению Шеннона информация — это абстрактная математическая категория, не имеющая определенного физического смысла, не обозначенная единицами физической величины. Но каждая математическая абстракция есть общим случаем конкретных физических сущностей с подобными свойствами. Реальные динамические системы — это системы материальные, физические, с множеством состояний, которые они могут изменять, переходя из одного энергетического (материального) уровня на другой. Каждый такой переход сопровождается изменением энергетического уровня системы, которое в форме сигнала воспринимается приемником и преобразуется в сигналы управления. Управление погашает энтропию, превращая ее в информацию. Материальным аналогом энтропии Шеннона в природе выступает термодинамическая энтропия Больцмана [7]. Понятие термодинамической энтропии как меры неупорядоченности теплового движения молекул газа в изолированной системе ввел в науку Р. Клаузиус (1822–1888), а связь энтропии с вероятностью состояния молекул газа в изолированной системе установил Л. Больцман (1844–1906). В 1872 г. в основном своем сочинении «Дальнейшее исследование теплового равновесия газовых молекул» он сформулировал и доказал экспериментально постулат, получивший в науке название «принцип Больцмана» или «второе начало термодинамики». Приводим его в формулировке Л. Больцмана: «Изолированный газ, первоначально находящийся в любом неравновесном состоянии, с течением времени переходит самопроизвольно в равновесное состояние — наивероятнейшее. При этом существует функция H параметров газа, которая в процессе любых изменений его состояния с максимальной вероятностью уменьшается, вероятность же ее возрастания ничтожна».

Этой функцией в термодинамических системах является энтропия — интегральный параметр состояния термодинамической системы, физическая величина, которая вместе с остальными величинами — температурой T , давлением p и объемом v характеризует состояние термодинамической системы. Если энтропию обозначить S , то $dS = \frac{dQ}{T}$, где dQ — изменение энергии системы. Через несколько лет М. Планк, осмыслив результаты экспериментов Л. Больцмана, представил их в виде формулы

$$S = k \ln W, \quad (3)$$

где S — энтропия, k — постоянная Больцмана, равная $1,380649 \cdot 10^{-23}$ Дж/К, W — термодинамическая вероятность состояния системы, равная числу различных способов, которыми можно задать фиксированное микросостояние газа [8].

И хотя Л. Больцман никогда не писал этой формулы, в науке ее называют формулой Больцмана. Математическая аналогия энтропии Шеннона и энтропии Больцмана передается свойствами логарифма. Адекватность моделей Шеннона и Больцмана для систем с равномерным законом распределения вероятностей состояния абстрактной и физической модели можно показать на примере:

$$\text{формула Шеннона } H = -\sum_{i=1}^{2^n} \frac{1}{P_i} \cdot \log_2 \frac{1}{P_i} = -\left[2^n \cdot \frac{1}{2^n} \cdot \log_2 \frac{1}{2^n} \right] = n,$$

$$\text{формула Больцмана } S = k \cdot \log_2 \frac{1}{2^n} = k(-n).$$

В табл. 1 приведены значения энтропии систем с одинаковым числом равновероятных состояний, рассчитанные по моделям Шеннона и Больцмана.

Знак «-» в формуле физической модели отражает направление процесса изменения термодинамической энтропии.

Таблица

Число состояний 2^n	Энтропия Шеннона в абстрактных битах	Энтропия Больцмана в физических битах ($1\text{фб} = 1\text{к}$)
1	0	0
2	1	- 1
4	2	- 2
8	3	- 3
...
1024	10	- 10
...
2^n	n	- n

Детальный анализ модели информации Шеннона выполнил Л. Бриллюэн [9]. Он считает определение Шеннона объективным, ибо оно исключает человека из оценки количества и качества информации. Он называет информацию Шеннона абсолютной, такой, что ее количество имеет одно и то же численное значение для любого приемника. Он показывает, что информация должна рассматриваться как недостаток энтропии. Он вводит в науку негентропийный принцип информации, согласно которому энтропия и информация неотрывны одна от другой и не могут рассматриваться отдельно.

По определению термодинамическая энтропия имеет размерность Дж/К, т.е. размерность теплоемкости, термодинамического потенциала системы. Физический смысл энтропии в том, что она есть выражением количественной меры отклонения изолированной системы от термодинамического равновесия. При идеальном равновесии она должна быть равной нулю. В соответствии с третьим началом термодинамики в физических системах идеального равновесия не существует. В реальных физических системах оно осуществляется на уровне флуктуаций, белого шума. По мнению автора, флуктуация энтропии в термодинамических системах возле уровня равновесия — это аналог принципа неопределенности на молекулярном уровне. Это аналог дробового эффекта в радиоэлектронных лампах, аналог флуктуаций шума в линиях связи. Можно предположить, что равновесие (баланс энергии) на уровне флуктуаций является общим принципом природных устойчивых систем, а возрастание энтропии в природных кибернетиче-

ских системах при нарушении баланса энергии — это сигнал информации и сигнал управления к восстановлению баланса.

Таковыми устойчивыми системами являются атмосфера, гидросфера, электрическое и магнитное поля Земли. Наиболее убедительным доказательством материальности и назначения информации служит управление в природных кибернетических системах: атмосфере, гидросфере, электрическом и магнитном полях Земли.

Рассмотрим атмосферу. Понятия равновесного газа и принципа Больцмана будем рассматривать применительно к локальным в пространстве зонам приграничного слоя. Атмосфера в глобальном смысле — устойчивая кибернетическая система. Свыше 3 млрд. лет она существует в установившемся режиме и после всяких локальных возмущений возвращается к состоянию равновесия, параметры ее состояния в локальных зонах сохраняют свои среднестатистические значения в пределах флуктуаций. Условимся считать локальную зону атмосферы на некотором интервале времени изолированной системой газа, подчиняющейся принципу Больцмана. Наиболее вероятным состоянием этой системы есть состояние, близкое к равновесию. Рассмотрим уравнение (3), характеризующее энтропию некоторой условно закрытой локальной зоны атмосферы. Атмосфера локальной зоны, как система с газом, может находиться в одном из двух состояний — равновесном или неравновесном. Равенство температур во всех точках есть условие равновесия системы. Вертикальным градиентом температуры в приграничном слое из-за его малости можно пренебречь. При идеальном равновесии $W = 1; S = 0$. Но такое могло быть только в абстрактной системе при «абсолютном нуле температур», а в соответствии с третьим началом термодинамики в реальных физических системах «абсолютный нуль температуры» недостижим [8]. Реальная физическая система в соответствии с принципом Больцмана стремится к наиболее вероятному, стационарному, состоянию, при котором $W \neq 1$, но близко к 1, а энтропия стремится к минимуму, ни при каких условиях не достигая нуля. Вблизи состояния равновесия флуктуации параметров состояния — температуры, давления воздуха, скорости ветра в ту и другую сторону от среднего равновероятны.

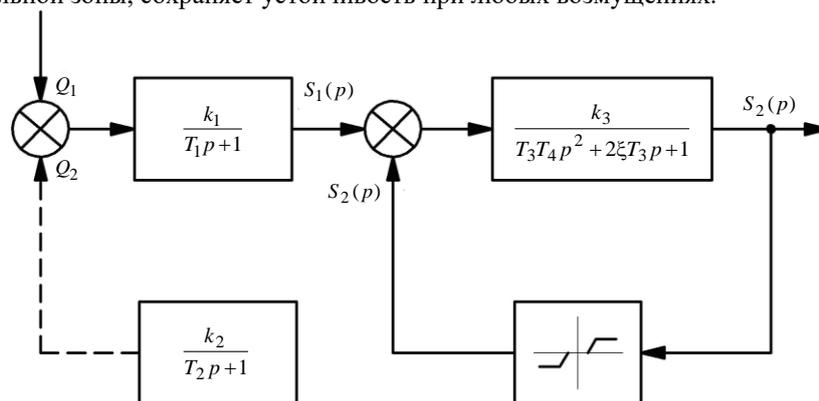
Другой крайний случай, случай термодинамически неравновесных состояний: когда в данную локальную зону из соседних зон приходят массы нагретого или холодного воздуха и в атмосфере ламинарный процесс переходит в турбулентный. Такое состояние соответствует буре, урагану, шторму, смерчу. Вероятность такого состояния крайне мала и, в этом состоянии энтропия возрастает, что подтверждается формулой Больцмана:

$$S = k \cdot \log_2 \frac{1}{2^n} = k(-n), \quad (4)$$

где 2^n — число микросостояний. Число микросостояний в локальной зоне очень велико, при $n \rightarrow 100$ и более для вероятности W получается очень малая величина, а для энтропии — большая. Поэтому такие процессы в атмосфере редки и случаются при совпадении многих факторов. Попробуем изложить управление по принципу Больцмана на языке и понятиях кибернетики.

Динамическая система Солнце–Атмосфера–Земля–Океан — это многомерная автоматическая система с распределенными в пространстве и времени параметрами. Полную и близкую к адекватной модель этой системы создают метеорологи [10]. Для нашей цели достаточно рассмотреть грубую одномерную модель системы автоматического регулирования, в которой управляющим сигналом служит интегральный параметр состояния атмосферы — энтропия. По мнению автора, принцип Больцмана могла бы реализовать система, структурная схема которой изображена на рисунке. Первое звено — апериодическое — это источник тепловой (солнечной) энергии Q_1 и энтропии $s_1(p)$. Это нагретый солнцем воздух или облака над локальной зоной. Выходным сигналом этого звена является энтропия,

которая служит управляющим сигналом следующего, колебательного звена. В наиболее вероятном равновесном состоянии энтропия флуктуирует на минимальном уровне. Второе звено колебательное. Оно преобразует энтропию в скорость механического движения воздуха и частоту волн на водной поверхности. Параметры этого звена (k_3, T_3, T_4, ξ) в равновесном состоянии и отсутствии возмущений изменяются возле среднестатистических значений как параметры случайного процесса, поддерживая систему в состоянии слева от границы устойчивости. Сигнал на выходе системы $s_2(p)$ сохраняется на минимальном уровне флуктуаций энтропии. Скорость движения воздуха при этом медленно изменяется, в атмосфере — безветрие или небольшой ветер. Спорадически сочетание параметров изменяется и становится таким, при котором звено становится консервативным, а в атмосфере наблюдаются колебания и слабые порывы скорости ветра. Через некоторый промежуток времени значения параметров изменяются, и система переходит в прежнее состояние. Через нерегулярные промежутки времени процесс повторяется. При отсутствии возмущений Q_2 , приходящих из соседних локальных зон, систему можно считать изолированной, находящейся в состоянии, близком к равновесному. По понятиям кибернетики система разомкнута. Замкнем систему через нелинейное звено с зоной нечувствительности и зоной насыщения. Тогда при малых уровнях энтропии на входе, соответствующих равновесному состоянию, она ведет себя как разомкнутая. Когда же на эту условно изолированную локальную зону начинают действовать возмущения Q_2 , приходящие в виде подогретых или охлажденных облаков из соседних локальных зон, уровень энтропии повышается, превышает порог нечувствительности нелинейного звена обратной связи. Система становится замкнутой. Задающий сигнал на входе системы повышается, растет и выходной сигнал, который мы ощущаем как скорость ветра в атмосфере и частоту и амплитуду волн в гидросфере. Характеристики процесса механического движения молекул газа в атмосфере локальной зоны определяются характеристиками случайного процесса возмущений, приходящих из соседних локальных зон. Основной из характеристик является частотный спектр возмущений и соответственно задающего (управляющего) сигнала. Очевидно, в этом спектре есть резонансные частоты, на которых обратная связь становится положительной, система возбуждается и переходит в режим автоколебаний с возрастающей, но ограниченной амплитудой. В атмосфере и гидросфере наблюдается шквал, шторм, ураган. В этом режиме система «работает» пока на вход поступают возмущения из соседних зон. При прекращении возмущений энтропия на входе уменьшается до уровня флуктуаций на минимальном уровне, система размыкается и возвращается к состоянию, близкому к равновесию. Система, т.е. атмосфера локальной зоны, сохраняет устойчивость при любых возмущениях.



Корректно ли применение принципа Больцмана к локальной зоне атмосферы, которая является системой открытой и неравновесной? Опираясь на приведенные ниже соображения профессора МГУ А.И. Осипова [11], считаем, что корректно.

«В любой физической системе происходят процессы, стремящиеся вернуть систему в состояние равновесия (ведь предоставленная самой себе система всегда приходит в состояние равновесия). Таким образом, происходит своеобразное противоборство между процессами переноса, нарушающими равновесие, и внутренними (релаксационными) процессами, стремящимися его восстановить. В разреженном газе внутренние процессы — это процессы столкновения. Если процессы, возмущающие равновесие, менее интенсивны, чем процессы, его формирующие, то можно говорить с определенной степенью точности о локальном равновесии, т.е. о равновесии в физически бесконечно малом объеме». По нашему мнению, такое равновесие наблюдается в приграничном слое атмосферы, когда на некоторой территории устанавливается одинаковая температура и давление воздуха.

В [12] утверждается, что распределение Больцмана совокупности молекул газа справедливо не только в потенциальном поле сил земного тяготения, но и в любом потенциальном поле сил для совокупности одинаковых частиц, находящихся в состоянии хаотического теплового движения. Очевидно, что таким потенциальным полем является электрическое поле Земли, в котором в состоянии теплового движения находятся молекулы атмосферного газа. Аналогом энтропии в электрическом поле Земли является потенциал какой-либо точки по отношению к Земле, или разность потенциалов между двумя точками, которую измеряют в вольтах. Размерность вольта в единицах СИ — $\text{Дж}/\text{А}\cdot\text{с}=\text{Дж}/\text{Кл}$. По форме — аналогия с выражением размерности термодинамической энтропии, по содержанию — вместо единицы температуры единица электрического заряда. Если принять, что $\text{Дж}/\text{Кл}$ — энтропия электрического поля и распределение концентрации заряженных частиц в электрическом поле Земли подчиняется распределению Больцмана, то можно сделать вывод, что электрическим полем управляет принцип Больцмана.

Аналог энтропии в магнитном поле Земли — магнитный поток, единицей которого является Вебер. Его выражение в единицах СИ — $\text{Дж}/\text{А}$. Тоже по форме полная аналогия с энтропией Больцмана. Наиболее вероятным состоянием и электрического, и магнитного полей, в котором они пребывают на длительных интервалах времени, есть установившееся состояние, в котором энтропия флуктуирует на уровне наиболее вероятного равновесного состояния. Спорадически, при грозах и молниях в электрическом поле и при магнитных бурях на Солнце в магнитном поле Земли, баланс энергии поля нарушается, энтропия при этом возрастает и система выходит из установившегося состояния. По опыту знаем, что при прекращении возмущений и электрическое, и магнитное поля возвращаются к прежнему установившемуся состоянию. Это дает основание предполагать, что и в этих системах действует принцип Больцмана.

Для полноты раскрытия темы рассмотрим информацию, создаваемую человеческим сознанием в форме идей, моделей, формул, отражающих законы природы. Ведь формулы Архимеда, Ньютона, таблица Менделеева, базы данных из сферы экономической, финансовой и культурной деятельности общества и другие — это информация, созданная мозгом человека. Некоторые считают эту информацию духовной, т.е. нематериальной. Но ведь мозг — это сеточная структура из нейронов, по которым передаются импульсы. Каждая идея, возникающая в мозгу человека, — это локальная область сеточной структуры из активированных нейронов, насыщенных органической энергией, т.е. природа «духовной» информации тоже материальна.

Заключение

Анализ изложенного приводит к следующим выводам:

- сигналом информации о нарушении баланса энергии в природных системах является возрастание энтропии;
- природа информации материальна, информация не «духовная субстанция», а свойство материи (энергии);
- информация создается материальными системами с множеством энергетических состояний при изменении состояния системы;

- назначение информации — адекватное управление;
- информации нет, если нет приемника.

На основании изложенного автор рекомендует ввести следующее регламентированное определение термина информация: информация — это сигналы и сведения, принятые приемником и преобразованные в сигналы управления или записанные на любом носителе. Это определение по основным признакам — объективности, природе и назначению информации — полностью соответствует определению Шеннона, реализованному в компьютерных технологиях.

В.Я. Решетник

ІНФОРМАЦІЯ В ПРИРОДНИХ КІБЕРНЕТИЧНИХ СИСТЕМАХ (ДО ВИЗНАЧЕННЯ ТЕРМІНА ІНФОРМАЦІЯ)

Розглянуто модель атмосфери як природної кібернетичної системи з керуванням за принципом Больцмана і показано, що інформацією в природних системах є зростання ентропії при порушенні балансу енергії. Виконано аналіз визначення інформації Шеннона і сформульовано об'єктивне визначення інформації, яке за всіма ознаками співпадає з визначенням Шеннона.

Ключові слова: комп'ютерні технології, природа інформації, ентропія управління, баланс енергії.

V.Ya. Reshetnyk

INFORMATION IN THE NATURAL CYBER SYSTEMS (TO DEFINITION OF THE TERM INFORMATION)

The model of natural cyber system, realising the control of the atmosphere state according to the Boltzman principle, has been analysed. It was shown that the information in the natural systems is that of entropy raising under the energy balance break. The analysis of the Shannon information statement was performed and the single objective determination of information was stated due to all features according to the Shannon statement.

Keywords: computer technology, the nature of information, entropy of control, energy balance.

1. Інформація. Філософський словник за ред. чл-кор АН УРСР В.І. Шинкарука. Головна редакція УРЕ. Київ — 1973. С. 192–193.
2. Юзвішин І.І. Основи інформаціології. 2-е изд, перераб. и доп. М. , 2000.
3. Решетник В. Про природу інформації та інформацію в природі. *Соціально-економічні проблеми і держава*. 2017. Вип. 2 (17). С. 230–241.
4. Решетник В. Ентропія Больцмана як сигнал розбалансу енергії в природних системах саморегулювання *Метрологія та прилади*. 2016. № 4. С. 65–69.
5. Урсул А.Д. Природа інформації. Філософський очерк. М.: Политиздат, 1968.
6. Лидовский В. В. Теория информации. М. : Компания Спутник +, 2004. 111 с.
7. Осипов А.И. Термодинамика вчера, сегодня и завтра. *Соросовский Образовательный Журнал*. 1999. № 4. С. 79.
8. Сивухин Д.В. Общий курс физики. В 5 т. Т. 2. Термодинамика и молекулярная физика. 5-е изд., испр. М. : ФИЗМАТЛИТ, 2005. 544 с.
9. Бриллюэн Л. Наука и теория информации. М. : Госиздат физмат литературы. 1960.
10. Пархоменко В.П., Стенчиков Г.Л. Математическое моделирование климата. М. : Знание, Сер. «Математика. Кибернетика», 1986. № 4. 32 с.
11. Осипов А.И. Термодинамика вчера, сегодня и завтра. *Соросовский Образовательный Журнал*. 1999. № 5. С. 91.
12. Савельев И.В. Курс общей физики, Т.І. Механика. Молекулярная физика. 2-е изд., перераб. М. : Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1982. 432 с.

*Получено 14.03.2019
После доработки 30.05.2019*