

## **Информационное взаимодействие в технических и живых системах**

**Н.А.Кузнецов**

*Институт проблем передачи информации, Российская академия наук, Москва, Россия*

Поступила в редколлегию 25.02.2001

**Аннотация**—Дан краткий обзор количественных и качественных определений "информации". Введено понятие информационного взаимодействия. Дана классификация компонент информационного взаимодействия для технических и живых систем.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В последние годы слова информация, информационные телекоммуникационные, компьютерные сети и технологии мы постоянно слышим и читаем. Наверное, это связано с тем, что информация стала ценным товаром. Созданы транспортные средства для эффективной доставки потребителю товара-информации – это компьютерные сети, в частности, Интернет. Следует подчеркнуть отличие компьютерных сетей от других средств доставки информации-товара, таких как радио, телевидение и периодическая печать. Эти средства предназначены для доставки товара широкого потребления, т. е. одинакового для многих, а компьютерные сети – для доставки товара-информации по индивидуальному заказу. Это обстоятельство и объясняет стремительное развитие информационных и телекоммуникационных компьютерных технологий и сетей.

Для доказательства стремительности развития Интернета можно вспомнить пример, приведенный президентом США Биллом Клинтонем в речи на форуме в Давосе в январе 2000 г. о том, что семь лет назад было 50 веб-сайтов в Интернете, а сейчас их насчитывается около 50 миллионов. Растущая потребность общества в информационных услугах стимулирует развитие фундаментальных и прикладных исследований в области информационно-телекоммуникационных технологий. Эти исследования носят мультидисциплинарный характер. В них принимают участие специалисты всех отраслей науки: математики, физики, химии, биологи, лингвисты и т. д., которые являются не только пользователями компьютерных сетей и информационных технологий, но и развивают эти технологии, специализируя и дорабатывая их для своей области знаний. Это стимулирует все большее применение количественных методов, математических и структурных моделей, баз данных и знаний в каждой области научных исследований.

В начале 70-х годов мультидисциплинарный характер исследований в области информационных технологий привел к жарким дискуссиям о дисциплине “информатика”. Эта дисциплина по-разному понималась специалистами в области научно-технической информации и учеными, развивающими компьютерные технологии передачи и обработки информации.

Существует разное толкование слова “биоинформатика” среди различных групп исследователей. Одни полагают, что биоинформатика это дисциплина, изучающая способы построения баз данных и знаний о строении биологических объектов; другие – что биоинформатика это наука, изучающая процессы передачи и обработки информации (информационные процессы) в живых системах.

## 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНФОРМАЦИИ

Столь широкий интерес к информационным процессам и многообразию этих процессов породили много толкований, определений понятия “информация”. Приведем четыре из них, с нашей точки зрения наиболее удачных и точных:

1. *Информация есть сущность, сохраняющаяся при вычислимом изоморфизме.*
2. *Информация о какой-либо предметной области (её объектах, явления и пр.) есть результат гомоморфного (т. е. сохраняющего основные соотношения) отображения элементов этой предметной области в некоторые отторжимые от этих элементов сущности – сигналы, характеристики, описания.*
3. *Информация – это содержательное описание объекта или явления.*
4. *Информация, заключенная в сообщении, есть сущность, определяющая изменение знаний при получении сообщения.*

Очевидно, что первое определение годится для достаточно формального (математического) описания моделей реальных объектов, полученных с помощью развитого математического аппарата. Второе определение отражает процесс формализации информационных характеристик объекта с помощью формальных сигналов. Третье определение связывают с процессом передачи сведений о каком-либо объекте, явлении или событии. При этом обычно подчеркивают содержательность этих сведений. Наконец, четвертое определение подчеркивает новизну этих сведений для получателя сообщения.

Столь широкое многообразие характерно не только для качественного определения понятия “информация”, большое разнообразие существует и при определении количества информации. Условно все подходы к определению количества информации можно разделить на пять видов:

1. Энтропийный.
2. Алгоритмический.
3. Комбинаторный.
4. Семантический.
5. Прагматический.

Первые три вида дают количественное определение сложности описываемого объекта или явления. Четвертый – описывает содержательность и новизну передаваемого сообщения для получателя (пользователя) сообщения. Наконец, пятый вид обращает внимание на полезность полученного сообщения для пользователя.

### 2.1. Энтропийный подход

Исторически первым возник энтропийный подход, потому что еще в XIX-м веке физики ввели понятие “энтропия” для определения величины, характеризующей процессы перехода тепловой энергии в механическую. В какой-то мере эта величина характеризовала меру хаотичности (неопределенности) движения молекул. Наверное поэтому К. Шеннон [1] назвал энтропией количество информации, испускаемой источником. Энтропией, или неопределенностью, называется вещественно-значная функция, зависящая от вероятностей событий и удовлетворяющая следующим условиям:

1. Событие, наступающее с вероятностью единица, имеет нулевую неопределенность.
2. Если одно событие имеет меньшую вероятность чем другое, то неопределенность первого события больше неопределенности второго.
3. Неопределенность одновременного наступления двух событий равна сумме их неопределенностей.

Согласно Шеннону, информация, испускаемая дискретным источником  $X$  за единицу времени, характеризуется энтропией

$$H(X) = - \sum p_i \log P_i,$$

где  $P_i$  – вероятность одной из возможных последовательностей сигналов, исходящих из источника  $X$  за единицу времени (в предположении, что источник испускает конечное число таких неисправностей). Количество информации  $J(X, Y)$ , переданной источником  $X$  приёмнику  $Y$  также характеризуется с помощью энтропии

$$J(X, Y) = H(X) - H_y(X),$$

где  $H_y(X)$  – условная энтропия источника. В случае, рассмотренном Шенноном, обмен сообщениями между источником и приёмником (информационное взаимодействие) характеризуется количеством информации, фактически получаемой приёмником. Работы Шеннона показали, что для описания информационного взаимодействия важны количественные характеристики участвующей в нем информации.

Сегодня принято считать, что энтропийный подход к характеристике самого понятия информации и введению её количественных характеристик, создан в работах Шеннона. Теория, развитая Шенноном, позволила с единой точки зрения осмыслить разрозненные, но важные работы его предшественников. Прежде всего, в этой связи следует упомянуть Р. Хартли, который ввел понятие, являющееся частным, но важным случаем шенноновской энтропии в случае равновероятного исхода случайных событий. После появления в 1948 году работы Шеннона последовало большое количество работ по развитию энтропийного подхода к теории информации. Отметим отдельно основополагающую работу А. Н. Колмогорова [2], в которой введено понятие энтропии динамических систем как метрического инварианта преобразований, сохраняющих меру. Работы Колмогорова и его последователей по энтропии динамических систем показали, что все энтропии, в том числе и шенноновская, близки к энтропиям частных классов динамических систем. С помощью энтропии выражается количество информации в данном случайном объекте и информации, которую он несет о другом случайном объекте.

Обзор работ, посвященных энтропийному подходу, дан в монографии Н. Мартина и Дж. Ингланда [3] и содержит около 700 ссылок (вместе с дополнительным списком литературы).

## 2.2. Алгоритмический подход

Энтропийный подход в теории информации позволяет ответить на вопрос “Сколько информации содержит объект  $Y$  относительно объекта  $X$ ?” В рамках другого подхода – алгоритмического – можно ответить и на вопрос “Сколько нужно информации, чтобы воссоздать (описать) объект  $X$ ?” Как показал Колмогоров, эту задачу можно строго сформулировать не только для стохастических объектов, но и для объектов, имеющих вид последовательности из нулей и единиц. В этом случае теория рекурсивных функций позволяет строго ввести понятие сложности объекта. На этой основе А. Н. Колмогоровым [4] был разработан алгоритмический подход к определению количества информации. Этот подход основан на теории алгоритмов и предполагает наличие априорной вероятностной меры на множестве сигналов. Пусть имеется слово  $W$  в алфавите  $X$ . Описанием слова  $W$  относительно способа описания  $f$  назовем такое слово  $\alpha$  в алфавите  $\{0, 1\}$ , что  $f(\alpha) = W$ , и сложностью этого слова при данном способе  $f$  – длину кратчайшего описания. Оказывается, что среди алгоритмических способов описания есть оптимальный (дающий с точностью до константы более короткие описания, чем любой другой). Сложность относительно этого оптимального способа называется колмогоровской сложностью  $R(W)$  и определяет количество информации в слове  $W$ .

### 2.3. Комбинаторный подход

В алгоритмическом подходе количество информации, содержащейся в слове (последовательности нулей и единиц), по существу, измеряется минимальной длиной программы, необходимой для воспроизведения этого слова (последовательности). Возможно иное измерение количества информации, содержащейся в слове (последовательности из нулей и единиц). Комбинаторный подход, развиваемый В. Гоппа [5], приводит к “алгебраической теории информации”. Количество информации в последовательности определяется степенью её асимметрии. Пусть имеется алфавит  $X$  и слова длины  $n$  в этом алфавите. На словах действует группа перестановок. Тогда логарифм числа перестановок, переводящий слово в себя, называется 0-информацией этого слова. Чем меньше симметрий в слове, тем больше 0-информации в нем.

### 2.4. Семантический подход

Основное достоинство трех перечисленных подходов к определению количества информации состоит в том, что они опираются на строгие системы аксиом и поддерживаются развитым математическим аппаратом для исследования свойств определяемого так количества информации. Основной недостаток этих подходов состоит в том, что в рамках этих формальных моделей не удается оценить содержательную сущность каждого сообщения, его семантику. Этот недостаток был замечен исследователями в скором времени после появления работы Шеннона. Предпринимались многочисленные попытки формального описания сущности интеллектуальных процессов в информационном взаимодействии “источник – приёмник”. Однако большинство из них нельзя назвать удачными. Наиболее известна работа И. Бар-Хилпела и Р. Карнана [6], основанная на теории формальных логических систем. Однако и эта работа не получила конструктивного развития. В последние годы интерес к построению формальных моделей смысла, содержащегося в сообщении, необычайно возрос в связи с созданием систем автоматического перевода с одного естественного языка на другой. Само преобразование содержательной сущности сообщения (его семантики) в текст скрыто от нашего непосредственного наблюдения. Нам доступна только его начальная и конечная точки, т. е. смысл, который мы хотим выразить, и текст, который при этом получается. Для того чтобы построить систему автоматического перевода, необходимо создать формализованную процедуру построения моделей “Текст  $\Leftrightarrow$  Смысл”, “Смысл  $\Leftrightarrow$  Текст”.

По существу, система автоматического перевода с языка  $A$  на язык  $B$  и обратно состоит в построении формализованных моделей “Текст  $\Leftrightarrow$  Смысл”, “Смысл  $\Leftrightarrow$  Текст” для этих языков. Лидером в построении моделей естественных языков является Московская семантическая школа, основы которой заложены в работах И. А. Мельчука [7] и Ю. Д. Апресяна [8].

### 2.5. Прагматический подход

В работе А. А. Харкевича [9] количество информации, получаемой приемником, предлагалось оценивать степенью её полезности для достижения поставленной цели. Такой подход особенно привлекателен для оценки количества информации в системах управления, в которых применяется более сложная схема информационного взаимодействия “источник – приёмник”, чем в концепции Шеннона. В них информация рассматривается не сама по себе, а как средство, с помощью которого управляющий объект  $A$  может влиять на управляемый объект  $B$  с целью получения желательного поведения этого объекта, оцениваемого критериями качества. В этом случае рассматривается двойная схема информационного взаимодействия. С одной стороны, передается управляющая информация от  $A$  к  $B$  о том, как должны меняться состояния  $B$  (прямая связь). С другой стороны, передается информация от  $B$  к  $A$  о том, насколько реальные изменения состояний  $B$  соответствуют должным (обратная связь). В этой схеме количество получаемой информации как в прямой, так и в обратной связи можно оценивать степенью её полезности для достижения цели, стоящей перед системой управления.

## 3. ИНФОРМАЦИОННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ

Термин “информация” происходит от латинского “informatio”, что в переводе на русский язык означает “осведомление”, “разъяснение”, и, по сути, предполагает наличие какой-либо формы диалога между отправителями и получателями информации.

Все приведенные выше качественные и количественные определения информации также предполагают наличие отправителей и получателей информации, т. е. речь идет о некотором виде взаимодействия объектов.

***Взаимодействие объектов, приводящее к изменению знаний хотя бы одного из них, будем называть информационным взаимодействием.***

Для того, чтобы процесс передачи знаний от одного объекта к другому был успешным, необходимо соблюдение ряда условий. Рассмотрим процесс информационного взаимодействия на примере передачи знаний посредством устной речи. Процесс этот многокомпонентный (векторный). Первая компонента – физическая, т. е. необходимо наличие физического источника звука (голосовых связок), физической среды распространения звука (воздуха) и физического приемника (уха). Вторая компонента – сигнальная: амплитудно и частотно модулированные колебания. Третья компонента – лингвистическая: необходимо, чтобы оба собеседника знали хотя бы один общий язык. Четвертая компонента – семантическая, т. е. в передаваемом сообщении должно присутствовать содержательное описание объекта или влияния, чтобы при получении сообщения могли измениться знания у принимающего эти сообщения. Наконец, пятая компонента – прагматическая: необходимо наличие желания (мотивации) передавать и принимать сообщение.

Следовательно, информационное взаимодействие можно представить пятикомпонентной (пятимерной векторной) величиной, состоящей из компонент:

1. физической;
2. сигнальной;
3. лингвистической;
4. семантической;
5. прагматической.

Заметим, что приведенное разбиение информационного взаимодействия на пять компонент носит условный характер и возможно частичное пересечение в этом разбиении. Так, отдельные составляющие передаваемого сообщения можно отнести к физической или сигнальной, сигнальной или лингвистической компонентам.

На сложный, многокомпонентный характер информации указывал еще А. Н. Колмогоров [10]: “Подчеркну и качественно новое и неожиданное, что содержится . . . в теории информации. По первоначальному замыслу “информация” не есть скалярная величина. Различные виды информации могут быть чрезвычайно разнообразны . . . было совершенно неясно, можно ли качественно различные информации . . . считать эквивалентными”.

В качестве примера классификации информационных взаимодействий можно напомнить протокольные уровни в международных стандартах открытых компьютерных сетей типа Интернет. При взаимодействии двух пользователей в телекоммуникационной сети реализуется совокупность протоколов семи уровней:

1. физического;
2. канального;
3. сетевого;
4. транспортного;
5. сеансового;
6. представительского;

### 7. прикладного.

Первые три протокольных уровня определяют такие особенности работы сети связи при обслуживании пользователей, как стандарт электрических сигналов в сети, обнаружение и исправление ошибок, маршрутизация в транспортной сети и т. д.

Последующие четыре уровня определяют такие стандарты взаимодействия самих пользователей, как контроль за целостностью сообщения, восстановление без потерь сеанса взаимодействия в случае прерывания, представление данных на дисплеях и печатающих устройствах и т. д.

Спектр информационных взаимодействий необычайно широк. Можно условно разделить изучаемые информационные взаимодействия по объектам на три класса:

- 1-й класс – взаимодействие искусственных (технических) систем;
- 2-й класс – взаимодействие смешанных систем;
- 3-й класс – взаимодействие естественных (живых) систем.

К первому классу относятся информационные взаимодействия в технических системах – от простейших регуляторов до глобальных компьютерных сетей. Ко второму классу – информационные взаимодействия типа “живой организм – искусственный орган”, “человек – машина”, “живой исследователь – неживой объект исследований” и т. д. К третьему классу относятся информационные взаимодействия, действующие в пределах от молекулярно-генетического уровня до уровня социальных сообществ.

При таком многообразии взаимодействующих объектов задача описания законов информационного взаимодействия необычайно сложна, поскольку надо описать как обмен одноканальной информацией типа “включено – выключено” в технических системах, так и формирование морали в человеческих сообществах.

При описании каждого из этих уровней приходится опираться на специфическую для соответствующего уровня концепцию преобразователя информации, свои языки описания, закономерности, разрабатываемые в рамках соответствующих дисциплин (наук), которые, тем самым, изучают информационное взаимодействие на данном уровне.

В таблице представлены примеры, относящиеся к описанию информационного взаимодействия в природе и технике для трех типов объектов и пяти компонент информационного взаимодействия. Несмотря на явно упрощенный характер описания информационного взаимодействия, она может быть полезна для анализа различных определений информации. Так, энтропийный подход описывает информацию на сигнальном уровне, алгоритмический и алгебраический – на лингвистическом уровне, а логический – на семантическом уровне.

Наибольшие успехи были достигнуты при изучении информационного взаимодействия для относительно простых сигнальной и лингвистической компонент. Из этих компонент удалось сформулировать простые и достаточно общие законы преобразования информации, подобные законам сохранения энергии. Так, Шеннон вывел зависимость скорости передачи информации по каналу с шумом от полосы пропускания, а Колмогоров доказал сохранение сложности при алгоритмических преобразованиях.

К сожалению, многочисленные попытки формализованного описания информационного взаимодействия семантической компоненты не привели еще к открытию простых закономерностей, подобно тому, как обстоит дело для сигнальной компоненты.

Для других компонент информационного взаимодействия можно сформулировать сегодня только некоторые принципы – условия, при выполнении которых информационное взаимодействие будет проходить успешно. Для информационного взаимодействия недостаточно только передать сообщение, нужно, чтобы приёмник (адресат) обладал возможностью его адекватно воспринять. Из этого следует принцип тезауруса: важность наличия априорной информации, достаточной для дешифровки и усвоения полученного сообщения. Это означает, в частности, что участники информационного

взаимодействия должны обладать согласованной информацией об используемых кодах, языках и их семантиках. Этот принцип подчеркивает первостепенную важность для информатики лингвистических и семантических исследований в широком смысле этого слова. В первую очередь речь идет о фрагментах языков человеческого общения и их семантиках, ставших сегодня основой для разработки средств человеко-машинного диалога.

КОМПОНЕНТЫ ИНФОРМАЦИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ	ТИП ОБЪЕКТА		
	ИСКУССТВЕННЫЙ (ТЕХНИЧЕСКИЙ)	СМЕШАННЫЙ	ЕСТЕСТВЕННЫЙ (ЖИВОЙ)
ФИЗИЧЕСКАЯ	Датчики. Сети и каналы связи. Элементы вычислительной техники. Исполнительные устройства.	Вживляемые датчики. Элементы искусственных органов. Физические сенсоры сенсомоторики.	Морфология и физиология рецепторов, эффекторов, нейронов.
СИГНАЛЬНАЯ	Системы автоматического кодирования и декодирования. Системы первичной обработки сигналов.	Искусственные органы. Интерактивные системы первичной обработки информации.	Функции и архитектура нейронных сетей. Первичная обработка сенсорной информации.
ЛИНГВИСТИЧЕСКАЯ	Автоматические системы перевода, программирования, интерпретации и представления сенсорной информации.	Формальные грамматики. Языки программирования. Операционные системы. Интерактивные системы работы с базами данных.	Представление знаний в памяти человека и животных. Словарь синтаксиса и механизмы работы естественного языка.
СЕМАНТИЧЕСКАЯ	Автоматические системы решения задач, формирования понятий, распознавания образов, логического вывода.	Базы знаний. Экспертные системы. Автоматизированные системы научных исследований, моделирования и проектирования.	Феноменология и принципы ассоциаций, обобщений и умозаключений.
ПРАГМАТИЧЕСКАЯ	Системы формирования и оценки важности целей. Интеллектуальные роботы. Автоматические системы оптимального управления.	Теория управления. Оценки качества управления. Интерактивные системы управления.	Принципы организации поведения человека и животных. Механизмы мотиваций, эмоций, постановки целей и задач.

Успешное восприятие сообщения зависит не только от способности адресата дешифровать (понять) содержание сообщения. Важную роль играет привлекательность сообщения, наличие у адресата стимула для освоения содержания сообщения. Это обстоятельство позволяет сформулировать принцип фасцинации (привлекательности) сообщения, которая зависит от мотивов и целей адресата,

формы сообщения и т. д. Важно отметить, что фасцинация характеризует состояние адресата, форму сообщения и, в меньшей степени, его содержание [8].

Фасцинация как необходимая спутница информации может играть существенную роль в организации человеко-машинного диалога, в проблеме понимания текстов на естественных языках и в других задачах информационного взаимодействия. Следует заметить, что участники информационного взаимодействия в процессе диалога могут выступать не только как получатели информации, но и как ее создатели. Поэтому полезно рассматривать поступающее сообщение не просто как контейнер с готовой информацией, но и как стимул для порождения адресатом на основе прошлого опыта и модели ситуации мира новой информации – принцип маевтики, или родовспоможения, восходящий к Сократу [11]. В результате такого информационного взаимодействия адресат может “получить” больше информации, чем содержалось в сообщении.

Не исключено, что на этом пути будут созданы принципиально новые способы организации человеко-машинного информационного взаимодействия и, возможно, новые структуры систем искусственного интеллекта.

Кроме вышеперечисленных законов и принципов следует упомянуть о разработанных к настоящему времени методах, моделях и алгоритмах информационного взаимодействия, имеющих огромное значение для развития научных исследований.

Если говорить об информационном взаимодействии “исследователь – исследуемый объект”, то среди них – методы планирования эксперимента, методы математического и компьютерного моделирования, служащие методологической основой экспериментальных и теоретических исследований. Популярны у исследователей также методы распознавания образов, идентификации, адаптации, теории массового обслуживания.

Этот перечень можно было бы продолжать, однако перечисленное позволяет заключить, что система представлений об информационном взаимодействии сущностей разной природы уже существует, успешно развивается и заслуживает пристального внимания, дальнейшего осмысления и поддержки как новая наука. Следует отметить, что развитие фундаментальных исследований в этой области возможно только при совместной работе специалистов по информатике с математиками, физиками, химиками, биологами, социологами, лингвистами, психологами, т. е. с представителями различных естественных и гуманитарных наук. В то же время, модели и методы информационного взаимодействия будут служить катализаторами развития функциональных исследований природных и социокультурных объектов – от уровня фундаментальных структур материи до уровня взаимодействия социальных групп.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Shannon C. A Mathematical Theory of Communication. *Bell System Tech. J.*, 1948, no. 27.
2. Колмогоров А.Н. Новый метрический инвариант транзитивных автоморфизмов пространств Лебега. *Доклады АН СССР*, 1958, том 119, № 5.
3. Мартин Н., Ингленд Дж. *Математическая теория энтропии*. М.: Мир, 1988.
4. Колмогоров А.Н. Три подхода к определению понятия “количество информации”. *Проблемы передачи информации*, 1965, вып. 1, № 1, стр. 3–11.
5. Гоппа В.Д. *Введение в алгебраическую теорию информации*. М., 1995.
6. Barr-Hillel Y., Carnap R. Semantic Information. *British J. of the Philosophy of Science*, 1953, vol. 4, no. 4.
7. Мельчук И.А. *Опыт теории лингвистических моделей “Смысл ⇔ Текст”*. М.: Наука, 1974.
8. Апресян Ю.Д. *Лексическая семантика. Синонимические средства языка*. М.: Наука, 1974.
9. Харкевич А.А. О ценности информации, *Проблемы кибернетики*, 1960, № 4, стр. 54.

10. Колмогоров А. Н. *Теория передачи информации*. М.: АН СССР, 1956.
11. Платон. Тезет. В кн.: Платон. *Собрание сочинений в 4-х томах*. М.: Мысль, 1993, том 2, стр. 192–274.