

О фундаментальных основах системодинамики: опытные факты, методология, приложения

*Аверин Г.В., д.т.н., проф.,
Донецкий национальный технический университет, г. Донецк
averin@donntu.edu.ua*

Предлагаются три научных направления вне области исследований естественных наук, где объем опытных фактов достаточен для построения объективных теорий. Приводятся положения и постулаты системодинамики по аналогии с принятыми подходами в термодинамике. Уделяется внимание прикладным аспектам системодинамики.

Введение

Развитие вычислительной науки создает условия для качественного совершенствования методов моделирования систем. В будущем теория системного анализа и интеллектуальный анализ данных (ИАД) приведут к возникновению науки нового качества. Методы анализа и описания данных позволят преобразовывать базы данных в базы знаний. Однако основной недостаток многих методов ИАД связан с отсутствием возможности учета при анализе данных фундаментальных закономерностей в поведении систем.

Сегодня в естественных науках много внимания уделяется поиску единой теории физической картины мира. Не менее актуален вопрос поиска теории, применимой во многих областях знаний – биологии, экологии, экономике и т.д. Именно это направление системного анализа, связанное с общей теорией систем (ОТС) и методами ИАД, а также предметами исследований вне области естественных наук, является наиболее перспективным путем к новой парадигме моделирования.

Использование естественнонаучных методов в различных науках является актуальной задачей общей теории систем. Синтез методологий наук может дать импульс развитию ОТС. Осмелимся утверждать, что истоки подобного синтеза следует искать в теории термодинамики. Говоря о логике термодинамики, отметим, что ее исходные положения основаны на постулировании общесистемных закономерностей, свойственных физическим системам и установленных опытным путем.

Если подобное возможно в других науках, то такие подходы могут получить распространение в различных областях знаний. Однако метод термодинамики не должен буквально переноситься в другую область исследований, идейно должна использоваться только логическая схема построения моделей. В этой сфере лежат истоки науки анализа и описания данных, которую сегодня уже часто называют системодинамикой.

Опытные факты из различных областей знаний

Построение любой теории основано на систематизации опытных данных, установлении базовых эмпирических закономерностей, а также разработке методологии, использующей математический аппарат.

Развитие опытной базы научных дисциплин формируется различными темпами. По многим направлениям идет процесс создания обширных баз данных. Однако, относительно не большое количество наук за годы своего существования накопило достаточно систематизированных фактов, позволяющих выйти на уровень постулирования или аксиоматизации исходных положений. Вне сферы естествознания перечень таких наук относительно не велик. Тем не менее можно говорить о том, что в области токсикологии, оценки развития человеческого потенциала, изучения биоразнообразия, в некоторых сферах экономики и т.д., накоплен значительный объем опытных фактов. Это позволяет осуществить общесистемное (в рамках этих наук) обобщение базовых закономерностей, направленных на построение теорий, которые будут использовать уже объективный, а не субъективный (экспертный) подход при анализе данных.

Например, с точки зрения общей теории систем актуально установление определенных аналогий между токсикологией и термодинамикой. Токсикология является широкой и многогранной областью человеческих знаний. Сегодня известно около 10^7 химических соединений, среди которых широко используются более 60 тысяч веществ. Также как и термодинамика, токсикология изучает определенный класс свойств различных веществ, в данном случае токсических свойств. Процесс изучения идет преимущественно опытным путем, благодаря чему накоплен громадный опытный материал, систематизированный в различных базах данных и обширной литературе [1, 2]. При этом можно говорить о достаточности опытных данных, позволяющих получать закономерности на феноменологическом уровне. Кроме того, токсикология – это одна из тех немногих наук, где в опыте возможна оценка вероятностей событий. Это дает возможности

для статистических обобщений и получения общих закономерностей по аналогии с тем, как это делается в термодинамике.

Вторая область перспективных системных исследований связана с оценкой развития человеческого потенциала и анализом социально-экономического развития стран и регионов мира. Обширные базы данных (<http://www.hdr.undp.org/>; <http://data.worldbank.org/>; <http://www.weforum.org/>; <http://www.yale.edu/esi/>; <http://www.heritage.org/>) и крайне высокая актуальность вопроса определяют необходимость построения обоснованной теории, которая бы не использовала при получении научных выводов экспертные методы анализа информации.

В области изучения эволюции и распространения биологических видов и оценки биоразнообразия также накоплена обширная информация в виде баз данных и всемирно известных энциклопедий [3, 4]. Здесь сегодня достаточно опытных фактов, чтобы поэтапно реализовать идею построения теории эволюции биосферы, которая в начале 30-х годов прошлого века была высказана русским ученым В.А. Костициным [5].

Законы и постулаты системодинамики

В связи с обширностью вопроса изложим материал работы сжато. Доказательства некоторых положений, на которые даются ссылки, приведены в статьях автора [6 – 8, <http://ksm.donntu.edu.ua/pub2011.pdf>].

Определим системодинамику как науку о закономерностях процессов развития и изменения сложных систем во времени. Системодинамика будет рассматривать систему в виде концептуальной совокупности окружающей среды и объектов воздействия, находящихся под действием факторов среды, которые обеспечивают при воздействии появление у объектов некоторых наблюдаемых изменений.

Изначально не делаем предположений о том, является ли изучаемая сложная система живой или не живой. Накладываем только ограничение, что система подвержена медленным и непрерывным (эволюционным) изменениям во времени. Нет ограничений на количество элементов, входящих в систему, а также условия их взаимодействия между собой и с окружающей средой. Однако исключены любые скачкообразные (революционные) изменения. Такая общая постановка задачи требует от метода системодинамики при анализе и описании данных необходимости учета объективных закономерностей развития систем. Сформулируем основы системодинамики, исходя из фундаментальных закономерностей природы, которые можно представить в виде трех принципов.

Первый принцип – это объективность законов природы и относительность проводимых в процессе познания измерений, которые

позволяют количественно описать закономерности процессов развития и изменения систем. *Второй принцип* – эмпирический факт устойчивости частот для большинства наблюдаемых в природе событий. *Третий принцип* – возможность количественной оценки качеств и свойств сложных систем. Данные закономерности для большинства объектов, процессов и явлений подтверждены практическим опытом человечества.

Известно, что каждый предмет (объект) обладает определенным количеством основных свойств, единство которых и является его качеством. Таким образом, качественная определенность системы – это и есть одна из основ характеристики ее состояния. Второй основой характеристики состояния является количественная определенность системы, связанная с ее свойствами. При воздействии изменение качественных признаков системы обычно связано с событиями – соответствующими наблюдаемыми фактами, которые могут произойти или не произойти. Эти события могут характеризовать качественную сторону, в отличие от свойств, которые определяют количественную сторону системы через параметры ее состояния. Предположим, что качественная определенность системы может быть оценена, при этом вероятности характерных событий, которые связаны с множеством качественных признаков и изменениями в состоянии системы, будут выступать такой количественной оценкой. Это позволяет ввести понятие *функции состояния* сложной системы.

Пусть задано множество Z упорядоченных элементов $\{z_1, z_2, \dots, z_n\}$ из n параметров z_k , представленных измеряемыми числами. При этом каждому k -тому свойству системы соответствует один вполне определенный параметр z_k . Предположим также, что задано множество W упорядоченных элементов $\{w_1, w_2, \dots, w_p\}$ из p чисел, являющихся оценками качественного состояния системы по каждому j -тому признаку. При этом всякому качественному признаку системы соответствует одна вполне определенная вероятностная оценка w_j , свойственная некоторому характерному j -тому событию. Если в силу некоторого закона каждому элементу множества Z приведен в соответствие элемент из множества W , то будем считать, что на множестве Z определена функция состояния системы по p компонентам вида:

$$\begin{cases} w_1 = W_1(z_1, z_2, \dots, z_n) \\ \dots \\ w_p = W_p(z_1, z_2, \dots, z_n) \end{cases} \quad (1)$$

Далее, как показано в статье [6], в связи с тем, что вероятности сложных событий представляются в виде аддитивно-мультипликативных соотношений, построение теории может быть основано на известной теореме Каратеодори о существовании энтропии для систем, обладающих свойством, которое известно в термодинамике как постулат «адиабатической недостижимости» [9]. Показано, что данный постулат может быть заменен более общим постулатом: в любом процессе, протекающем в окрестности произвольно заданного и качественно однородного состояния, свойства сложной системы эволюционно развивающейся во времени подобны [6].

Дальнейшая система доказательств приводит к следующим выводам. На основе теоремы Каратеодори каждое уравнение из (1) в дифференциальной форме для произвольного опорного состояния приводится к виду $dw_j = \sum_{k=1}^n \frac{\partial W_j}{\partial z_k} dz_k = \lambda_j \cdot ds_j$, где λ_j – интегрирующий делитель, а s_j – энтропия j -того компонента системы. Энтропия является характеристической функцией состояния системы (семейством характеристик в случае p компонентов) и может выступать мерой качества [6]. Любое множество качественно одинаковых состояний системы, свойственных j -тому компоненту, однозначно определяется двумя функциями состояния – энтропией и потенциалом, который назовем индексом развития системы (ИР). В первом случае имеем векторную линию, а во втором случае – потенциальную поверхность. При этом энтропия в параметрическом представлении является длиной дуги векторной линии, а поверхность потенциала ортогональна векторной линии. Системодинамика по своей сути сводится к геометрической системе преобразования координат на многообразии, допускающем введение параметризации, и для которого опытным путем доказано существование функции состояния вида (1).

Метод системодинамики предполагает в процессе ИАД следующую последовательность действий. Первый этап – создание базы данных индикаторов, характеризующих процессы в системе. Далее осуществляется группировка данных по основным компонентам, определяются базовые атрибуты системы для моделирования и за счет теоретических представлений или методов ИАД находится класс

функций для оценки энтропии и индекса развития системы. Следующий шаг – осуществление процесса многомерного шкалирования по компонентам системы. С этой целью база данных переводится в безразмерный вид путем выбора опорного состояния (базового объекта с заданными в выбранный момент времени индикаторами) и устанавливаются корреляционные связи между ИР системы, зависящим от ее атрибутов, и всеми индикаторами, входящими в различные компоненты. Общий подход несколько подобен построению шкал температур в термодинамике. При существовании значимых корреляционных связей определяются регрессионные зависимости и база данных переводится в базу знаний.

Проще всего метод системодинамики иллюстрировать конкретными примерами. С этой целью отсылаем к работам [6, 8], где проведено обобщение токсикологических данных и сформулированы подходы к построению общей теории. Пример в области оценки развития человеческого потенциала стран мира приведем ниже.

Практический пример анализа данных

Для демонстрации предложенного подхода выполним анализ данных в области развития человеческого потенциала. С этой целью будем использовать базу данных Программы развития ООН (<http://www.hdr.undp.org/>).

Данная база данных содержит информацию о более чем 100 индикаторах развития 177 стран за последние 25 лет. С 2004 года информация по 25 индикаторам развития стран является достаточно полной, позволяющей применить данный метод анализа данных. В качестве атрибутов системы выберем общепринятые показатели: средняя продолжительность жизни; уровень грамотности населения; коэффициент охвата детей и молодежи образованием; ВВП страны в пересчете по ППС; доля городского населения в стране. Для установления связей с событиями выберем различные индикаторы – удельное потребление энергии; младенческую и детскую смертность; фертильность; случаи заболевания туберкулезом; количество пользователей Интернет, коэффициент Джинни и т.д. (всего 20 индикаторов). Находим класс функций для определения индекса развития – мультипликативные зависимости по атрибутам системы [6]. Опорным состоянием выбираем базовые показатели страны Нигер в 2004 году, как наименее развитой страны [7].

Результаты реализации метода для этого примера представлены в табл. 1 и на рис. 1 и 2. В базе данных ПРООН из 20 индикаторов значимые связи с атрибутами системы установлены для 16 индикаторов.

Таблица 1. Ранги стран по индексу и темпам развития в 2004 – 2005 годах

Индикаторы системы	США	Германия	Польша	Украина	Белоруссия	Россия
<i>Положительная корреляция: увеличение индикатора и увеличение ИР</i>						
Удельное потребление энергии	10/16	22/53	50/49	51/42	55/31	33/22
Кол-во пользователей Интернет	8/20	19/44	49/46	83/75	58/36	70/63
Доля населения старше 65 лет	37/60	3/62	35/39	16/12	24/7	30/25
<i>Отрицательная корреляция: увеличение индикатора и уменьшение ИР</i>						
Младенческая смертность	135/118	156/142	136/107	113/84	130/87	103/80
Заболеваемость туберкулезом	167/140	159/141	125/101	66/53	93/69	63/58

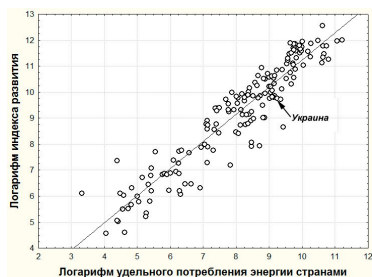


Рис. 1. Зависимость ИР стран мира от удельного потребления энергии

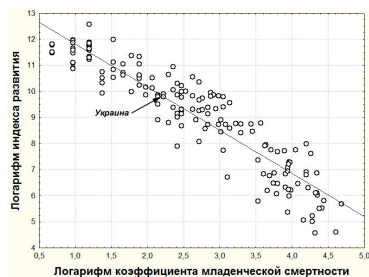


Рис. 2. Зависимость ИР стран мира от уровня младенческой смертности

Выводы

Метод системодинамики позволяет при анализе данных учитывать фундаментальные закономерности развития и изменения сложных систем. Научная значимость метода связана с возможностью построения моделей развития биологических и социально-экономических систем.

Литература

1. Database IRIS. – <http://www.epa.gov/IRIS/> (25.02.11).
2. Вредные химические вещества / Справочник под ред. В.А. Филова, том 1 - 10. – Л.: Химия. – 1989.
3. AnAge Database.– <http://genomics.senescence.info/species/> (25.02.11).
4. Животные / Под ред. Д. Берни. – М.: Астрель. – 2008. – 624 с.
5. Костицын В.А. Эволюция атмосферы, биосферы и климата / Пер. с франц. – М.: Наука. – 1984. – 96 с.

6. *Аверин Г.В.* Об основаниях системодинамики // Труды ДонНТУ: Системный анализ и информационные технологии. – 2011. – № 1. – С. 6 - 52.
7. *Аверин Г.В., Звягинцева А.В., Аверин Е.Г.* Методы системной динамики при анализе социально-экономического развития стран и регионов // Труды ДонНТУ: Системный анализ и информационные технологии. – 2011. – № 1. – С. 108 - 122.
8. *Звягинцева А.В., Аверин Г.В.* Построение уравнений состояний сложных токсикологических систем // Труды ДонНТУ: Системный анализ и информационные технологии. – 2011. – № 1. – С. 57 - 70.
9. *Каратеодори К.* Об основах термодинамики / В кн.: Развитие современной физики: Пер. с нем. – М.: Наука. – 1969. – С. 188 - 222.