



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

---

ФГБОУ ВПО «МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

---

Библиотека научных разработок и проектов МГСУ

# СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ В СТРОИТЕЛЬНОМ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИИ

---

МОСКВА 2012

---

УДК 519.7:691  
ББК 38  
С40

СЕРИЯ ОСНОВАНА В 2008 ГОДУ

Рецензенты:

кафедра строительных конструкций Национального исследовательского  
Мордовского государственного университета им. Н.П. Огарева  
(заведующий кафедрой — академик РААСН, доктор технических наук,  
профессор *В.П. Селяев*);  
доктор физико-математических наук, профессор *О.А. Голованов*  
(Военный учебно-научный центр СВ «Общевойсковая академия  
Вооруженных сил Российской Федерации», филиал, г. Пенза)

*Монография рекомендована к публикации  
научно-техническим советом МГСУ*

Авторы:

**Ю.М. Баженов, И.А. Гарькина, А.М. Данилов, Е.В. Королев**

**С40** Системный анализ в строительном материаловедении :  
монография / Ю.М. Баженов [и др.] ; М-во образования  
и науки Росс. Федерации, ФГБОУ ВПО «Моск. гос. строит.  
ун-т». Москва : МГСУ, 2012. — 432 с. (Библиотека научных  
разработок и проектов МГСУ).

**ISBN 978-5-7264-0683-1**

С позиций системного анализа рассмотрены методы и алгоритмы структурно-параметрического синтеза, идентификации и управления в сложных системах. Предложены методы оптимизации, основанные на скаляризации глобального критерия и построении множеств Парето. Применительно к синтезу строительных композиционных материалов функционального назначения сформулированы принципы проектирования сложных систем.

Для магистрантов, аспирантов и научных сотрудников в области строительства.

**УДК 519.7:691  
ББК 38**

ISBN 978-5-7264-0683-1

© ФГБОУ ВПО «МГСУ», 2012

## Оглавление

Предисловие .....	6
Введение.....	9
1. Системные методологии в научных исследованиях .....	18
2. Композиционные материалы как системы.....	34
2.1. Системные атрибуты композиционных материалов.....	34
2.2. Качественный анализ материалов как систем: когнитивное моделирование.....	43
2.3. Разработка иерархических структур .....	51
3. Алгоритм синтеза сложных систем .....	57
3.1. Методика ПАТТЕРН .....	57
3.2. Структурная схема синтеза .....	67
4. Некоторые методы оптимизации.....	71
4.1. Задачи однокритериальной оптимизации.....	71
4.2. Линейное программирование.....	73
4.2.1. Методы решения задач линейного программирования.....	74
4.2.2. Двойственная задача линейного программирования.....	85
4.2.3. Получение начального допустимого базисного решения .....	89
4.3. Нелинейное программирование .....	97
4.4. Градиентные методы .....	101
4.4.1. Метод Франка—Вулфа .....	101
4.4.2. Метод штрафных функций.....	106
4.5. Метод линейной аппроксимации .....	112
4.6. Квадратичное программирование.....	115
4.7. Планирование эксперимента .....	117
5. Оценка качества сложных систем .....	143
5.1. Методы экспертных оценок .....	143
5.2. Ранговая корреляция .....	147
5.2.1. Задачи ранговой корреляции .....	147
5.2.2. Анализ парных ранговых статистических связей .....	151
5.2.3. Множественная корреляция.....	159
5.2.4. Неполные последовательности рангов.....	163
5.2.5. Парные сравнения .....	165
5.2.6. Определение весовых коэффициентов методом экспертных оценок.....	169
5.2.7. Комплексные показатели .....	170
5.3. Элементы квалиметрии. Количественная оценка качества .....	176

6. Оценка качества композиционных материалов: кинетические процессы, идентификация . . . . .	179
6.1. Основные виды кинетических процессов . . . . .	179
6.2. Параметрическая идентификация кинетических процессов в гомогенных и дисперсных системах . . . . .	185
6.3. Кинетические процессы как временные ряды . . . . .	213
6.4. Регрессионные методы идентификации . . . . .	230
6.4.1. Статическая задача для системы с одним выходом . . . . .	230
6.4.2. Статическая задача для системы с несколькими входами и несколькими выходами . . . . .	233
6.4.3. Регрессионная идентификация динамических процессов . . . . .	234
7. Методологические принципы проектирования композиционных материалов . . . . .	238
7.1. Методология проектирования сложных систем . . . . .	238
7.2. Эволюция представлений о строительных материалах . . . . .	242
7.3. Полиструктурная теория . . . . .	245
7.3.1. Основные закономерности формирования микроструктуры композитов . . . . .	246
7.3.2. Основные закономерности формирования макроструктуры композитов . . . . .	250
7.4. Синтез радиационно-защитных строительных композитов . . . . .	253
7.4.1. Определение химического состава . . . . .	253
7.4.2. Выбор типа структуры . . . . .	258
7.4.3. Декомпозиция критериев качества . . . . .	261
7.4.4. Определение управляющих рецептурных и технологических факторов . . . . .	267
7.4.5. Определение исходных областей компонентов структурных уровней. Вяжущее вещество . . . . .	276
7.5. Некоторые особенности проектирования серных композиционных материалов . . . . .	292
7.5.1. Серные композиты с заданной подвижностью смеси . . . . .	292
7.5.2. Бетоны с заданной средней плотностью . . . . .	293
7.5.3. Дисперсно-армированные серные материалы . . . . .	307
7.5.4. Модели серных композиционных материалов по частным критериям . . . . .	310
8. Многокритериальный синтез материалов специального назначения . . . . .	342
8.1. Однокритериальная оптимизация. Функционалы качества . . . . .	342
8.2. Оптимизация структуры и свойств эпоксидных композитов повышенной плотности . . . . .	353
8.3. Определение весовых констант в функционале качества . . . . .	364
8.4. Управление качеством. Многокритериальная оптимизация . . . . .	368
8.4.1. Постановка задачи многокритериальной оптимизации . . . . .	368

---

8.4.2. Синтез материалов на основе решения лексикографической задачи оптимизации .....	371
8.4.3. Метод последовательных уступок .....	373
8.4.4. Некоторые способы преодоления неопределенностей целей .....	377
8.4.5. Определение множеств Парето .....	387
8.4.6. Минимизация размерности критериального пространства. Метод главных компонент .....	393
8.4.7. Принцип Парето в управлении качеством .....	398
Заключение .....	402
Библиографический список .....	403
Приложение .....	413
Термины и определения .....	413

## Предисловие

Предлагаемая Вашему вниманию книга написана известными специалистами в области строительного материаловедения, системного анализа и математического моделирования сложных систем.

Сложная система определяется как «составной объект, части которого можно рассматривать как системы, закономерно объединенные в единое целое в соответствии с определенными принципами или связанные между собой заданными отношениями» (БСЭ). Ее можно (необязательно единственным образом) расчленить на конечное число частей (подсистем). Каждую подсистему (высшего уровня) можно, в свою очередь, расчленить на конечное число более мелких подсистем и т. д., вплоть до получения подсистем первого уровня (элементов, которые объективно не подлежат расчленению на части либо относительно их дальнейшей неделимости имеется соответствующая договоренность). Свойства каждого из элементов в общем случае зависят от условий, определяемых поведением других элементов. Свойства же сложной системы в целом определяются не только свойствами элементов, но и характером взаимодействия между ними. Важно отметить, что две системы с попарно одинаковыми элементами, но с различными взаимодействиями между ними должны рассматриваться как две разные системы.

Главное достоинство книги для материаловедов заключается именно в представлении материалов с позиций теории сложных систем: публикации авторов в этом направлении не прошли незамеченными, вызвали значительный интерес научной общественности, в том числе в ряде зарубежных стран (Израиль, Украина и др.).

Авторами во многом впервые с системных позиций рассматриваются вопросы *долговечности* материалов. Разрушение системы с позиций теории систем можно рассматривать как катастрофу, связанную с нарушением гомеостаза. Способность к катастрофе — свойство сложных систем. Устранить это свойство как присущее природе сложной системы невозможно. Можно считать, что сложные системы всегда работают как поврежденные. Система продолжает функционировать, поскольку содержит множество дополнительных средств обеспечения устойчивости. Ее работу можно рассматривать как непрерывно меняющееся сочетание сбоев и восстановлений компонентов. Когда происходят заметные глобальные сбои и не-

сколько мелких по отдельности безобидных сбоев объединяются, создается возможность глобальной системной аварии. Каждый из этих сбоев провоцирует аварию, но только вместе к ней приводят. Иными словами, возможностей для возникновения системных аварий гораздо больше, чем проявившихся аварий. Большая часть этих возможностей блокируется специалистами на ранней стадии развития созданными для этого средствами защиты. Системная авария происходит как следствие сочетания множества ошибок. Однако не существует единственной причины аварии и невозможно определить ее «корневую причину». С этих позиций ретроспективный анализ катастроф, в особенности при экспертной оценке, является необъективным (техническое недопонимание природы сбоя позволяет с легкостью найти виновного катастрофы). Случившиеся сбои выглядят единственно возможным следствием прошлых событий. Действия специалистов воспринимаются как ошибки. На самом деле действия специалистов — попытки угадать будущее *неопределенное* событие. Успешная работа системы есть также *результат угадывания*, хотя это и не является очевидным и общепринятым.

Авторами в полной мере используется *принцип моделируемости* сложной системы: «*сложная система представима конечным множеством моделей, отражающих определенную грань ее сущности*». Этот важный принцип дает возможность исследовать определенное свойство или группу свойств сложной системы при помощи одной или нескольких упрощенных (узкоориентированных) моделей. Выявление новых свойств и сущностей необязательно должно сопровождаться построением обобщающих моделей, а может ограничиваться наращиванием множества упрощенных. Отражение сложной системы в целом обеспечивается взаимодействием упрощенных моделей. Модель, ориентированная на определенную группу свойств сложной системы, всегда проще самой системы. Создание полной модели практически невозможно, ибо она будет столь же сложной, как сама система.

*Принцип целенаправленности* позволяет сопоставить сложной системе любого содержания некоторый функционал, описывающий ее существование как целого.

В соответствии с *принципом физичности* всякой системе независимо от ее природы присущи физические законы, возможно уникальные, определяющие внутренние причинно-следственные связи,

существование и функционирование; никаких других законов для описания действия системы не требуется.

Только на первый взгляд принцип моделируемости выглядит противоречащим постулату целостности, а принципы физичности и целенаправленности могут показаться несовместимыми. Однако это не так. Законы физики известны достаточно хорошо — по крайней мере в части, непосредственно связанной с человеческими потребностями, кроме того они формализованы. Искусственные системы действуют в соответствии с закономерностями, приданными им их создателем. В системе все взаимосвязано, но это не мешает ее рассмотрению с различных точек зрения.

Авторами значительное внимание уделяется созданию специальных методов идентификации и обработки экспериментальных данных. Неизвестные параметры оцениваются посредством сравнения значений функциональных и структурных характеристик сложных систем, устанавливаемых экспериментально и в результате моделирования. Это дает возможность определять поправки к первоначальным значениям параметров и добиваться достаточной точности оценки неизвестных параметров методом последовательных приближений. Развиваются также и аналитические методы исследования, основанные на теории случайных процессов.

Считаю, что книга несомненно будет полезна специалистам, научным работникам, аспирантам и студентам вузов, интересующимся вопросами моделирования, синтеза и управления сложными системами, особенно создания строительных материалов как сложных систем.

*Академик Российской академии архитектуры  
и строительных наук, доктор технических наук,  
профессор*

*В.П. Селяев*

## Введение

*Идентификация* — экспериментальное изучение действительности и построение необходимых для решения практической или познавательной проблемы всех возможных с точки зрения исследователя моделей. К настоящему времени идентификационный подход еще окончательно не оформился в связи с размытостью представлений об *идентификации* как об *особом типе человеческой деятельности*. Процесс познания действительности при создании реальных систем не всегда можно научно объяснить. Пока в нем *доминирует математический уровень строгости, и математический язык рассматривается как наилучшее средство представления системы*. В большинстве работ ограничиваются лишь постановкой и исследованием математических задач и не затрагивают содержательные и человеческие аспекты практической идентификации. Подобная избирательность во многом определяется тем, что при значительном объеме представлений о потенциально возможных способах исследователь не в состоянии разработать детальную общую схему идентификации, ориентированную на использование определенной системы научных понятий, достаточных с точки зрения большинства исследователей для обоснования. На сегодня *понятия, отражающие роль человека при определении целей идентификации, теоретически не сформулированы*.

В теории управления под идентификацией [1; 2] понимается определение структуры системы и ее параметров на основе анализа ее входных и выходных данных; рассматривается как инструмент проверки гипотез о соответствии структуры и/или параметров системы и модели на основе экспериментальных данных о ее функционировании. *Структурная идентификация* состоит в определении *вида математической модели* системы (общая задача идентификации). После того как математическая модель системы определена, проводят *параметрическую идентификацию* (частная задача идентификации), заключающуюся в определении *числовых параметров* математической модели, при которых решение задачи соответствовало бы экспериментальным данным (найденные значения констант не должны противоречить физическому смыслу и теоретическим соображениям). Роль структуры модели трудно переоценить, неудачный выбор ее сводит на нет и все результаты параметрической идентификации.

К *статическим* относят модели, инвариантные относительно времени (используются для описания процессов и явлений, не зависящих от времени). Для описания изменения систем и процессов во времени используются *динамические модели* (допускается изменение структуры и параметров во времени). Построение динамических моделей (например, для задач управления), как правило, более сложно, чем построение статических. Поэтому как упрощение динамических моделей используются *квазидинамические*.

Модели могут быть в разной степени формализованными, но все они обладают тем главным свойством, что связывают наблюдения в некоторую общую картину. Решение задачи построения математических моделей динамических систем по данным наблюдений за их поведением и составляет предмет теории идентификации, которая тем самым становится элементом общей научной методологии.

В *динамической системе* происходит взаимодействие между его разнотипными частями и формируются наблюдаемые (выходные) сигналы. Все остальные сигналы рассматриваются как *возмущения* (*входные* сигналы; измеряемые и не измеряемые *шумы*). Совокупность предполагаемых связей между наблюдаемыми сигналами и является моделью в широком смысле. Модель может принимать разные форму и степень математической детализации (или вообще без использования языка математики). В большинстве случаев соотношения, описывающие взаимодействие различных составляющих динамической системы, задаются в виде систем алгебраических, дифференциальных (разностных), алгебро-дифференциальных или интегральных уравнений. Такие модели называются *математическими* (непрерывные и дискретные по времени, сосредоточенные и распределенные, детерминированные или стохастические, линейные или нелинейные и др., в зависимости от типа используемых уравнений).

Численные характеристики изучаемой системы (процесса) могут быть константами (не изменяются в ходе процесса) или переменными. Часть из них может быть измерена лабораторными методами в ходе эксперимента (измеряемые константы и переменные), а другая либо вообще не может быть измерена современными методами, либо их измерение чрезвычайно трудоемко и дорого (не измеряемые константы и переменные).

Выбор метода идентификации определяется неоднозначно, ибо в самой постановке задачи заранее предполагается неопределенность (неполнота знаний об объекте, ограничения в наблюдениях объекта во времени, неточность измерения сигналов на входе и на выходе объекта и т. п.).

Как видим, идентификация включает три этапа:

- выбор структуры модели по результатам изучения системы или по имеющимся априорным сведениям;
- определение критерия близости (подобия) модели и системы;
- определение по экспериментальным данным, исходя из выбранного критерия, параметров модели.

В силу значительной сложности структурная идентификация часто сводится к эвристическому заданию структуры модели с опорой на априорные данные. В том случае эффективность последующей параметрической идентификации во многом определяется тем, насколько удачно была выбрана структура модели. В известных методах параметрической идентификации учитываются особенности исследуемой системы, условия функционирования, способ тестирования, способы анализа экспериментальных данных, вид получаемых моделей и др.

Методы идентификации по временным затратам разделяются на оперативные и ретроспективные. При *оперативной идентификации* обеспечивается отслеживание меняющихся параметров объекта на основе рекуррентных алгоритмов обработки данных аппаратными средствами в темпе, близком к скорости протекания процессов в изучаемом объекте. При *ретроспективной идентификации* значительно упрощаются условия решения задач. Здесь возможно многократное обращение к накопленным экспериментальным данным, что позволяет осуществить подбор наиболее эффективных алгоритмов их анализа.

Всегда важным остается выбор процедуры сравнения для оценки *адекватности* получаемой модели объекту.

Основное требование к модели — адекватность объекту изучения, иначе теряется смысл моделирования. Создание адекватной модели возможно лишь в случае, когда свойства и взаимосвязи моделируемого объекта в достаточной степени изучены. Налицо парадокс: если объект изучен, зачем его моделировать, а если объект не изучен, то как можно построить адекватную модель. Традиционно

этот парадокс разрешается тем, что модель не обосновывается, а постулируется на основе эмпирических сведений, которыми располагает исследователь.

В настоящее время используется так называемая *гомеостатическая концепция моделирования систем*, выражающаяся в *пошаговом приведении исходной модели к состоянию, подобному объекту-оригиналу*, за счет включения в модель программных механизмов адаптации и интерпретации, а также организации эффективного диалога с исследователем. Сначала на основе данных описательной модели строится *каркас системной модели* (нулевое приближение), учитывающий априори известные свойства моделируемой системы. Далее проводится *модельный эксперимент*, и полученные при этом данные используются для корректировки каркаса; формируется *модель системы в первом приближении*. Полученная модель вновь корректируется по результатам эксперимента, формируется *второе приближение* модели системы и т.д. *Циклический обучающий процесс* «эксперимент — данные — корректировка» многократно повторяется, но никогда не завершается построением окончательной системной модели (полученное приближение к системе-оригиналу может нуждаться в уточнении в ходе дальнейших исследований).

Адекватность системной модели объекту изучения нельзя доказать: модель может быть принята либо отвергнута на том основании, что получаемые с ее помощью оценки и выводы противоречат наблюдаемым фактам. Системная модель всегда будет отличаться от оригинала, можно говорить об асимптотическом приближении к нему при выполнении определенных условий для каждой практической задачи. Асимптотическая сходимость обеспечивается тем, что объектом моделирования является конкретная система с присущими только ей *автономными законами функционирования* (свойственны и присущи только данной системе). Отметим, *адекватность достигается сужением сферы использования данной системной модели, ограниченностью ее практической применимости*. Адекватность повышается за счет модельных экспериментов: появляются новые знания интуитивного характера, которые могут использоваться для повышения адекватности модели и ее свойств к свойствам изучаемого объекта. Процесс моделирования позволяет глубже проникнуть в существо объекта

оригинала, а модельные исследования приводят к открытию новых свойств и закономерностей функционирования изучаемой системы.

На сегодня пока нет единой теории построения системных моделей, в полной мере реализующей концепцию системного гомеостаза. *Системные модельные исследования итеративны*: любая системная проблема решается на основе последовательного приближения и не имеет окончательного решения. Это согласуется с одним из основных принципов системного подхода: ни при каком сколь угодно глубоком познании невозможно получить исчерпывающую характеристику изучаемого объекта.

Для оценки эффективности и надежности модели используются *количественные критерии*. На основе *качественных критериев* модель оценивается с точки зрения ее понятности, простоты использования, тестируемости, возможности развития, а также применения в других проблемных областях. Критерий является количественным, когда его значения имеет смысл сравнивать: насколько или во сколько раз одно значение больше другого. В случае качественного критерия такие сравнения бессмысленны. Промежуточное положение между количественными и качественными критериями занимают критерии с балльными шкалами. Утверждение о значениях критериев с заданными типами шкал называется адекватным, если его истинность сохраняется после любых допустимых преобразований, определяемых типами шкал. Так что при анализе и решении многокритериальной задачи оптимизации необходимо применять только те определения и понятия, методы и процедуры, которые приводят к получению адекватных выводов и рекомендаций.

Системные исследования являются симбиозом теоретических модельных экспериментов с наблюдениями, эмпирическими исследованиями, натурными (лабораторными) экспериментами. Ведущая роль моделирования состоит в том, что модель должна предшествовать натурным экспериментам и указывать направления сбора информации в процессе наблюдений. В то же время результаты модельных исследований нуждаются в фактических исходных данных и требуют экспериментального подтверждения.

Системный подход к анализу и синтезу сложных систем состоит в упрощении сложности и ограничении разнообразия формализованного описания системы (работа исследователя) с учетом воз-

возможного проявления свойств и неопределенности состояния системы (свойства реальной системы).

Под фактором сложной системы понимается независимая переменная величина, при изменении значений которой изменяются критерии качества сложной системы. *Простой фактор* не подразделяется на другие факторы (есть функция самого себя). *Сложный фактор* — функция других, физически независимых факторов.

Критерием качества  $q_j$  является численная (иногда качественная) величина, характеризующая способность удовлетворить установленные и/или предполагаемые потребности. Совокупность критериев качества  $\{q_j\}$  определяет качество системы.

Факторы по возможности управления ими можно разделить на группы. *Управляемые факторы*  $x_1, x_2, \dots, x_k$  можно изменять и поддерживать на определенных уровнях в процессе эксперимента с необходимой точностью. Предполагается, что случайные и систематические ошибки уровней факторов в повторных опытах пренебрежимо малы, а их коэффициенты вариации существенно (на порядок и более) меньше, чем коэффициенты вариации критериев качества. Напомним, коэффициент вариации

$$V = \frac{\sigma[X]}{M[X]} \cdot 100\%$$

случайной величины  $X$  есть мера относительного разброса случайной величины; показывает, какую долю среднего значения этой величины составляет ее средний разброс; в отличие от среднего квадратического отклонения дает не абсолютную, а относительную меру разброса значений признака в статистической совокупности (вычисляется только для количественных данных). Управляемые факторы позволяют целенаправленно изменять параметры качества сложной системы.

*Неуправляемые факторы*  $z_1, z_2, \dots, z_n$  можно контролировать с необходимой точностью, но их нельзя изменять и поддерживать с заданной точностью в условиях исследовательского эксперимента. Их значения заключены в определенных пределах, устанавливаемых допусками, либо неподвластны влиянию исследователя.

*Неконтролируемые факторы*  $w_1, w_2, \dots, w_l$  — те факторы, информация о которых во время проведения эксперимента у исследователя отсутствует.

Для получения многофакторной математической модели необходимо из значительного числа факторов, влияющих на моделируемые критерии качества, выбрать статистически значимые (определяются на основании отсеивающего эксперимента). Для последующего включения их в оптимизационный или модельный эксперимент осуществляется априорный анализ группы факторов.

Кроме главных эффектов различных порядков на критерии качества могут влиять и различные взаимодействия факторов (*создают системный эффект влияния факторов на моделируемый критерий качества*). Выявление взаимодействия факторов, их оценка при создании многофакторных математических моделей являются определяющими для получения качественных моделей.

При формализованном описании входные параметры системы рассматриваются как факторы, а выходные параметры — критерии качества.

Сведем воедино наиболее важные системные свойства.

*Целенаправленность* (смысл создания и функционирования системы) — достижение поставленных перед системой целей (*критериев качества*). Определяющим является достижение *экстремальных значений целей*. Наличие цели/целей объединяет отдельные элементы системы между собой в единое целое.

*Эффективность* — показатель достижимости системой заданной желаемой точки  $q^0(q_1^0, q_2^0, \dots, q_m^0)$  в критериальном пространстве;  $q_j$ ,  $j = \overline{1, m}$  — частный критерий качества (показатель качества или *эффективности*, критериальная функция, целевая функция) функционирования сложной системы.

*Эмергентность* (*существование интегративных качеств*) — несводимость свойств системы к сумме свойств ее отдельных подсистем (англ. *emergence* — возникновение, появление нового); наличие у системы особых свойств, не присущих ее подсистемам и блокам; несводимость свойств системы к сумме свойств ее компонентов (*системный эффект*). Описание системы должно быть целостным.

*Функциональность* — свойство, заключающееся в получении необходимой информации о системе по результатам ее функционирования. Основной способ получения информации — проведение системного эксперимента.

*Целостность* — анализ полного набора взаимосвязанных подсистем  $C_1, C_2, \dots, C_n$  системы  $C$  (связана с потерей свойств системы

при рассмотрении лишь отдельных, не связанных между собой, подсистем).

*Неопределенность* — отсутствие необходимой информации о фактических свойствах состояния и функционирования системы (о значимости влияния факторов и их значениях, вероятностных свойствах случайных ошибок факторов и критериев качества, формализованном описании функционирования системы и др.).

*Оптимальность* — соответствие критериев качества системы возможным наилучшим значениям.

*Сложность* — свойство, определяемое структурой составного объекта, части которого можно рассматривать как системы, закономерно объединенные в единое целое в соответствии с определенными принципами или связанные между собой заданными отношениями.

Сложную систему можно расчленить (необязательно единственным образом) на конечное число частей (подсистем). Каждую подсистему можно расчленить на конечное число более мелких подсистем и т. д., вплоть до получения подсистем низшего, первого уровня (*элементов*) сложной системы, которые либо объективно не подлежат расчленению на части, либо относительно их дальнейшей неделимости имеется соответствующая договоренность. Таким образом, подсистема является, с одной стороны, сложной системой из нескольких элементов (подсистем низшего уровня), а с другой — элементом системы старшего уровня.

*Иерархичность* — свойство, определяющее место системы в иерархии «надсистема — система — подсистема». Иерархичность влияет на цели, стоящие перед системой, ее связи с другими системами, руководящую или подчиненную роль в ряду иерархии и другие определяющие свойства.

*Статистичность* — свойство, характеризующее известными законами распределения параметров системы, вероятностным типом связей между факторами и критериями качества системы.

Системными свойствами критериев качества порождается системный эффект (принцип Ле Шателье–Самуэльсона): внешнее воздействие, выводящее систему из устойчивого равновесия, стимулирует в ней процессы, стремящиеся ослабить результат этого воздействия.

В книге проблемы идентификации рассматриваются, прежде всего, с позиций *синтеза сложных систем*. Основные приложения

---

касаются синтеза композиционных материалов как сложных систем. Под синтезом системы понимается определение оптимальных рецептурно-технологических параметров материала, обеспечивающих его необходимую структуру и свойства. Исходя из этого рассматриваются непосредственно связанные с проблемой синтеза вопросы *управления качеством материалов*.

*Авторы будут признательны за любые пожелания и предложения по улучшению структуры и содержания книги.*

## 1. Системные методологии в научных исследованиях

В настоящее время системные исследования пока находятся на начальном этапе своего становления. Системный подход представлен мозаикой отдельных направлений, плохо скоординированных между собой. Отсутствует практика подготовки ученых и специалистов в области системных исследований.

В 1954 г. Л. Берталанти было создано «Общество по исследованию в области общей теории систем» и были определены задачи общей теории систем. В системном подходе появился ряд направлений: целеустремленные системы (Р. Акофф), функциональные системы (П.К. Анохин), системы гомеостатического типа (Ю.Н. Горский), системы как триада «вещь – свойство – отношение» (А.И. Уемов), общая теория систем (Ю.А. Урманцев). Определились основные задачи: разработка математического аппарата; описание разных типов систем; установление изоморфизма (соответствие между объектами, выражающее тождество их структуры (строения)) законов в различных областях знания. К сожалению, ни одна версия системного подхода по стандартам научности XXI века не получила развития до ранга теории. Существуют различные мнения относительно системных исследований: от восторженного до оценки системного анализа академиком Н.Н. Моисеевым как «несостоявшейся» науки. Что касается приложений, как отмечается рядом авторов, «есть только отдельные опыты применения системной методологии, причем и они отличаются сравнительно небольшим масштабом решаемых задач; ...системный подход к настоящему времени реализует себя, скорее, как искусство, чем как наука, технология и учебная дисциплина» [3].

Можно выделить четыре фундаментальных и взаимно дополняющих друг друга подхода к научному познанию: системный, синергетический, информационный и гомеостатический (рис. 1.1).

*Системный подход* к научному познанию природы, общества и человека дал мощный импульс для развития в науке направления, известного как «*теория систем*» [4]. Он представляет собой совокупность методов, средств, позволяющих исследовать свойства, структуру и функции объектов, явлений или процессов в целом, представив их в качестве систем со всеми сложными межэлементными взаимо-



Рис. 1.1. Системология как новая методология научных исследований

связями, взаимовлиянием элементов на систему и на окружающую среду, а также влиянием самой системы на ее структурные элементы.

При исследовании любого сложного объекта, явления или процесса подход базируется на их целостном видении. Главной его особенностью является наличие доминирующей роли целого над частным, сложного над простым.

Системный подход показывает, что главные свойства и результаты деятельности системы любой природы хотя и зависят существенным образом от состава и свойств составляющих ее элементов, но принципиально не могут быть познаны на уровне изучения только характеристик этих элементов [5; 6].

Для сложных технических объектов [7; 8] именно целостное, синтетическое описание позволяет воедино связывать их различные стороны, ранее нередко рассматриваемые отдельно.

Существенное значение также имеют протекающие в системах процессы управления, требующие исследования систем в плане циркулирующей в них информации, поведения и выбора цели.

*Система представляет собой совокупность взаимосвязанных элементов, которые объединены единством цели и функциональной целостностью, и при этом свойство самой системы не сводится к сумме свойств элементов.*

Свойства системы как целого определяются не только свойствами его отдельных элементов, но и свойствами структуры системы. Для многих типов систем под *структурой системы* понимают:

- пространственное расположение всех ее элементов;
- совокупность устойчивых межэлементных связей и отношений элементов;
- внутреннее устройство;
- закон взаимодействия и взаимосвязи.

Иногда понятие структуры отождествляют с понятием организации системы. *В простейшем случае структура системы представляется как совокупность всех элементов, связей между этими элементами и отношений между ними.*

Свойства системы не сводятся к сумме свойств составных элементов. Любая система образуется в результате взаимодействия составляющих ее элементов, причем это взаимодействие придает системе новые свойства, отсутствовавшие у отдельно взятых элементов. Поэтому количество свойств у системы больше, чем сумма свойств

у отдельно взятых элементов; разница между ними — особые новые системные свойства. Функциональная целостность системы характеризует завершенность ее внутреннего строения. *Совокупность взаимосвязанных структурных элементов образует систему только в том случае, когда отношения между элементами порождают новое особое качество целостности, называемое системным, или интегративным, качеством.*

На сегодня нет строго однозначного и корректного определения системы; имеется много различных, хотя и близких друг к другу, определений системы и ее структуры [9; 10]. Во многих случаях *система определяется как совокупность элементов, соединенных отношениями, порождающими интегративное, или системное, качество*, отличающее данную совокупность от среды и приобщающее к этому качеству каждый из ее компонентов. Иногда понятием системы пользуются неправильно: применяют в случаях, когда отсутствует интегративное качество (когда свойство системы не превышает суммы свойств составных частей, а объединение частей в систему не порождает нового свойства по сравнению с тем, чем они обладали до объединения). В частности, рассмотрим многослойные панели из различных слоев материалов (теплозащитного, паронепроницаемого, конструктивного и др.) с определенными функциями. Количество и последовательность расположения слоев зависит от климатических условий региона эксплуатации. Формальное объединение в заданной последовательности слоев нельзя рассматривать как систему (ее свойства являются только суммой свойств всех слоев).

Наиболее существенные признаки и свойства системы указываются в [11—13]. Здесь *под системой понимается «совокупность элементов, находящихся в отношениях и связях между собой и образующих определенную целостность, единство»*. Такое определение получило наибольшее распространение и признание в отечественных системных исследованиях.

Устойчивая упорядоченность в пространстве и во времени элементов системы и связей между элементами, определяющая функциональную компоновку системы и ее взаимодействие с внешней средой, определяется как *внутренняя структура (или просто структура)* системы. Она является консервативной характеристикой системы и может сохраняться неизменной длительное время

без существенного изменения состояния. Система называется *стационарной (стабильной)*, если структура и функции системы практически не изменяются в течение рассматриваемого периода ее существования. Когда структура системы отождествляется с ее организацией, под структурой системы понимается пространственное расположение и система отношений элементов; закон взаимодействия; совокупность устойчивых межэлементных связей; внутреннее устройство системы. Виды систем различаются именно своей структурой (так, классификация композиционных материалов возможна по масштабу — микро- и макроструктуры; по типу — ячеистые, волокнистые, поризованные и др.).

Внутри системы и между системами существуют связи. Элементы (подсистемы) считаются **взаимосвязанными**, если по изменениям в одном из элементов можно судить об изменениях в других. При формировании межэлементных связей часть свойств элементов может подавляться, а другая — усиливаться (например, введение наполнителей приводит к снижению усадочных деформаций и повышению прочности композита).

Чем сложнее система, тем больше эффект от применения системного целостного подхода. Здесь все частные локальные цели и задачи подчиняются общей конечной цели.

Имеющиеся определения системы либо не охватывают некоторые типы объектов, которые принято называть системами, либо, хотя и позволяют отличить системы от других объектов, но являются слишком упрощенными (характеризуют системы недостаточно полно для понимания их сути).

Отметим наиболее характерные признаки систем (рис. 1.2), содержащиеся в определениях.

1. *Наличие структуры.* Упрощенно многие определения отождествляют понятие системы с понятием ее структуры.

В типичных определениях **структура**:

- форма представления некоторого объекта в виде составных частей;
- множество всех возможных отношений между подсистемами и элементами внутри системы;
- совокупность элементов и связей между ними, которые определяются исходя из распределения функции и цели, поставленных перед системой;

• то, что остается неизменным в системе при изменении ее состояния, при реализации различных форм поведения, при совершении системой операции и т.п. [14].



Рис. 1.2. Характерные признаки системы:

\* Свойства системы как целого определяются свойствами его отдельных элементов и свойствами структуры.

\*\* Определяется наличием существенных связей (отношений) между элементами системы.

\*\*\* Возникает при наличии закономерных устойчивых связей и/или отношений

В указанных определениях отражается главное, что присутствует в любой структуре: элементный состав, наличие связей, неизменность (инвариантность) во времени.

Структура — часть системы, поэтому необходимо указать, какая именно часть, какие свойства и признаки системы являются структурными, а какие нет. *Часто под структурой понимается совокупность тех свойств системы, которые являются существенными при исследованиях, обладают инвариантностью на всем рассматриваемом интервале функционирования системы* или на каждом из непересекающихся подмножеств, на которые разбит интервал функционирования (например, неизменность расположения зерен дисперсной фазы — наполнителей и заполнителей — в процессе эксплуатации материала).

*В простейшем случае под структурой понимается множество элементов системы, между которыми имеются связи (взаимоотно-*

шения). Математически это выражается множеством элементов с одним или более отношениями, определенным на данном множестве. В такой простой структуре все элементы считаются неделимыми.

Ясно, что очень многие реальные системы обладают более сложной структурой и не соответствуют такому простому описанию.

*Под структурными элементами системы понимают ее наименьшую часть, поведение которой еще подчиняется структурным закономерностям системы* (порождают те свойства системы, которые выделяют эту систему как целую среди других). Структурный элемент сам может содержать свои собственные структурные элементы.

Часто элементарной системой или подсистемой (структурным элементом системы) называют систему (элемент системы), которая хорошо научно изучена и исследована (например, смачивание и влияние на него поверхностно-активных веществ — ПАВ).

В сложных системах связь между системами строится по *принципу иерархии*, предусматривающему подчиненность системы надсистеме и подсистемы системе (в понятие структуры системы вводят *иерархию ее подсистем*). *Цель каждого элемента нижнего уровня — подчинение цели более высокого уровня*. Только тогда вся сложная иерархическая система может функционировать как единое целое.

Иерархическое строение имеет место также для отношений и связей в системе. Для любой системы и они могут быть разложены на более элементарные. На их основе формируется система более низкого уровня. В результате система выступает как сложное *иерархическое образование, в котором выделяются различные уровни, разные типы взаимосвязей между различными уровнями* [15]. Как элемент иерархии, в частности, можно рассматривать ковалентные, ван-дер-ваальсовские, ионные, металлические связи. *Иерархические системы называются структурированными*.

Существуют и *неиерархические, неструктурированные, так называемые сетчатые системы*, в которых каждый элемент или подсистема связаны со многими другими элементами системы сложными обратными связями и так сильно влияют друг на друга, что невозможно систему однозначно структурировать или выделить в ней какую-то иерархию.

В большинстве определений и интуитивных трактовок понятия структуры системы предполагается, что *структура представляет*

*собой совокупность устойчивых связей и отношений между элементами системы и является ее инвариантом [16; 17].*

Однако такое понятие структуры не совсем пригодно для развивающихся систем, у которых структура меняется с развитием системы и поэтому является относительно устойчивой.

2. *Целостность совокупности элементов системы.* С одной стороны, система — это целостное образование и представляет целостную совокупность элементов, а с другой стороны, — в системе четко можно выделить ее элементы. Для системы главным является признак целостности, т.е. она рассматривается как единое целое, состоящее из взаимодействующих или взаимосвязанных частей (элементов), часто разнокачественных, но совместимых.

*Под целостностью понимается внутреннее единство и принципиальная несводимость свойств системы к сумме свойств составляющих ее элементов.*

Не всякие отношения придают множеству элементов целостность. Поэтому выделяются специальные отношения, которые принято называть *системообразующими*.

В качестве признаков, характеризующих целостность систем, могут быть: единство цели, функциональное назначение, определенные функции, наличие окружающей среды (мира вне системы), с которой система взаимодействует как целое.

Важной характеристикой системы являются ее свойства, прежде всего отличающие ее как целостность и не сводящиеся только к сумме свойств ее элементов. Такие свойства (качества) и называются *интегративными*. Они присущи системе в целом, но не присущи ее элементам в отдельности. Интегративное свойство системы обуславливает тот факт, что свойство системы, несмотря на зависимость от свойств элементов, не определяется ими полностью. Из этого следует, что простая совокупность элементов и связей между ними еще не система, и поэтому, расчленяя систему на отдельные части (элементы) и изучая каждую из них в отдельности, нельзя познать все свойства нормально (хорошо) организованной системы в целом. *Интегративное свойство (качество) — это то новое, которое формируется при согласованном взаимодействии объединенных в структуру элементов и которым элементы до этого не обладали.*

Объединение элементов в систему осуществляется в результате формирования согласованного взаимодействия (сложения усилий)

в нечто новое, обладающее интегративным качеством, которым сами эти элементы до объединения не обладали (например, смачиваемость дисперсных фаз вяжущим веществом и управление этим процессом).

*Только в составе системы отдельно взятые элементы вместе со всей совокупностью элементов приобретают интегративное системное качество, которым они не обладали вне системы. Поддержание путем управления этих интегративных параметров в допустимых пределах и, следовательно, сохранение системы называют гомеостазисом системы.*

Понятия «интегративные и системные качества» очень близки по содержанию и часто тождественны.

Среди любых связей и отношений главные — системообразующие связи и отношения. Именно они выражают целостные интегративные свойства системы (являются внутренними для данной системы), определяют ее специфику (например, отсутствие адгезионных взаимодействий превращает строительный материал в смесь компонентов).

3. *Наличие устойчивых связей (отношений) между элементами системы, превосходящих по своей силе (мощности) связи (отношения) этих элементов с элементами, не входящими в данную систему.*

С системных позиций определяющими являются не любые связи, а только лишь существенные связи (отношения), которые определяют интегративные свойства системы. Именно *интегративные свойства отличают систему от простого конгломерата и выделяют ее в виде целостного образования из окружающей среды.* Обмен информацией, энергией и веществом между элементами системы и между системой и окружающей средой осуществляется при помощи связи, представляющей физический канал. Так, например, зерновой материал связан силами аутогезии (взаимодействие при точечных контактах между зёрнами).

4. *Организация (организованность) развивающихся систем.* Этот признак характеризует наличие в системе определенной организации, что проявляется в снижении степени неопределенности системы или ее энтропии, по сравнению с энтропией системоформирующих факторов, определяющих возможность создания системы.

К системообразующим факторам относятся:

- число элементов системы;

- число существенных связей, которыми может обладать элемент;
- число системозначимых свойств элемента;
- число квантов пространства и времени, в которых может находиться и существовать элемент;
- связи и их свойства [16; 18].

Понятия «организация» и «система» связаны весьма тесно. Так, свойства композиционного материала в значительной степени определяются пространственным расположением контактов и энергией взаимодействия между компонентами (адгезия) и самих компонентов (когезия). Однако организация охватывает только те свойства элементов, которые связаны с процессами сохранения и развития целостности, т.е. существования системы. Организация возникает при наличии закономерных устойчивых связей или/и отношений; *связана с упорядоченностью и согласованностью функционирования автономных частей системы и проявляется, прежде всего, в снижении их энтропии по сравнению с энтропией системоформирующих факторов, в структурных особенностях системы, сложности, способности сохранения системы и ее развития. Степень организованности обычно связывается с информацией, или негэнтропией, системы. Считается, что чем выше степень организованности, тем выше негэнтропия системы и ниже ее энтропия.*

При формировании межэлементных связей образуется определенная структура системы. В зависимости от вида организации из комбинации элементов и их связей можно образовать различные структуры. *Структура — это наиболее консервативная характеристика системы.* Структура системы может сохраняться неизменной весьма длительное время, а состояние системы при этом изменяться (пока имеются системообразующие связи).

*Если структура системы не меняется в течение всего периода ее «жизни», то она является стабильной структурой.* Элементы системы обладают большим количеством свойств, одни из которых при формировании межэлементных связей подавляются, другие, напротив, усиливаются и приобретают более отчетливое выражение. Однако степень подавления системообразующих (системозначимых) свойств элементов, как правило, бывает частичной, не полной, поэтому при формировании системы возникают не только полезные функции, положительно влияющие на функционирование системы

и обеспечивающие сохранение системой ее качественной особенности, но и функции, негативно влияющие на ее функционирование.

К основным системным характеристикам относится также *совместимость на элементном уровне*. Известно, что внешнее воздействие разрушает систему, если его сила (мощность) становится больше силы (мощности) внутренних связей системы. Из-за дезорганизующих внешних воздействий происходит возрастание энтропии системы. *Снижение энтропии системы до нулевого значения означает полную «заорганизованность» системы и приводит к негативному результату (вырождению системы), так же как и ее чрезмерное возрастание* (например, особо качественный бетон — заорганизованная система, а стекло — система с недостаточной организацией).

*Для систем, наделенных поведением*, под структурой системы понимается: пространственное расположение элементов, система отношений элементов, совокупность устойчивых межэлементных связей системы, а также закон взаимодействия и взаимосвязи (расширение понятия структуры). Структура системы отождествляется с понятием организации системы. В большинстве случаев структурная организация системы определяется взаимовлиянием элементов друг на друга, их взаимообусловленностью, порождением одним элементом другого.

Существует мнение, что системный подход является адекватным исследовательским подходом при исследовании не любых объектов, произвольно называемых системами, а лишь таких объектов, которые представляют собой органичные целые [6; 11]. *Критерием для отнесения объектов к классу систем считается признак органичной целостности как системообразующего качества*. По этому критерию все объекты разбиваются на классы:

- органичные (настоящие) системы;
- неорганичные (плохие) системы;
- неорганизованные совокупности системы.

Таким образом, все многообразие объектов разделяется на системы («настоящие» и «плохие» — псевдосистемы) и не системы [6].

Во многих системных исследованиях наблюдается нечеткость и размытость в рассмотрении объектов как систем и размытость границ применения системного подхода. Это иногда выражается в разделении объектов либо на системы и не системы (аддитивные

совокупности), либо на целостные и не целостные системы. Аналогично этому многозначны и понятия целостности, а возможность изменения степени целостности создает некоторую неопределенность для строгого понятия системы. Так, в стохастических, хаотических, ценностно-ориентированных системах присутствуют связи неинтегративного характера; нельзя выделить иерархию структурных уровней; не действуют механизмы управления.

Отметим, что часто понятие системы неправильно распространяется на абсолютно все объекты сложной природы, в том числе на дезынтегрирующие и иррациональные типы связей и взаимодействий. Иногда в качестве системы рассматривают такую совокупность объектов, которая не обладает целостностью или не имеет единых субъектов управления, или содержит антагонистические и конфликтные взаимодействия [19].

Системный подход и системное мышление базируются на целостном видении объектов, явлений и процессов. При системном подходе к синтезу композиционных материалов даже с преобладанием фактора интуиции могут использоваться методы как *дедуктивного* (сначала определяются системные проблемы, а затем находят решения этих проблем), так и *индуктивного* (сначала находится новая идея — «прорывное» решение, а затем это решение применяется для решения возникшей проблемы) мышления. В связи с этим применение системного подхода к исследованию сложных систем можно считать своевременным и актуальным.

*Синергетический подход* представляет собой новый метод научного познания, переосмысливающий роль случайных факторов, открывающий новые возможности для анализа воздействия этих факторов, пересматривающий роль организации и хаоса в природе и обществе.

Случайные факторы в природе и обществе ранее должным образом не учитывались. Это происходило потому, что со времен Ньютона в науке господствовал принцип детерминизма, предполагающий, что каждое следствие имеет свои вполне определенные причины. Развитие теории вероятностей и теории случайных процессов, принцип единства и борьбы противоположностей, случайности и необходимости в диалектике свидетельствуют об усилении внимания к проблеме случайности. Однако и сегодня случайности отводится роль досадной «помехи», «шума» [6].

Многие считают, что в силу принципа детерминизма неопределенность при анализе и решении сложных задач является лишь следствием недостатка информации. В действительности, во многих системах неопределенность имеет объективную природу. Таким образом, *природа и общество устроены не только по принципу детерминизма; наряду с детерминизмом неотъемлемыми свойствами природы и общества являются неопределенность и случайность.*

Синергетический подход позволил по-новому взглянуть на роль хаоса в природе и обществе. *С позиции синергетики хаос — это не только стадия полной дезорганизации и разрушения какой-либо структуры, процесса или явления, но также и необходимое условие для зарождения нового процесса, это потенциальный источник нового развития более сложной и более высокоорганизованной системы.*

С позиций синергетики *последовательности этапов и отдельных фаз саморазвития или динамики развертывания процесса саморазвития хорошо характеризуются релятивистским, а не дискретным временем* [20].

Синергетический и информационный подходы можно рассматривать как дальнейшее развитие системного подхода, которое дает новые возможности для исследования сложных объектов, процессов и явлений в природе и обществе [18; 20—23].

*Информация* — это мера порядка, противостоящего хаосу; мера сложности системы; характеристика внутреннего разнообразия системы; мера вероятностного выбора одной из возможных траекторий развития процесса. Информационные процессы лежат в основе практически всех явлений в природе и обществе.

Системный подход использует и *когнитивные подходы к слабоструктурированным и плохо формализованным задачам.* Системный подход к управлению нелинейными системами способствовал появлению *новой концепции управления нелинейными системами — «резонансного» управления, когда в управлении важным становится не столько величина управляющего воздействия на систему, сколько правильная пространственная организация, или топология, системы.* Такой подход к управлению носит более универсальный характер и повышает эффективность управления, особенно сложными системами.

*Гомеостатический подход — системный подход к гармонии и дисгармонии сложных систем.* Гомеостатика изучает такие механизмы управления системами, которые обеспечивают поддержание в допустимых пределах жизненно важных для систем параметров. Большинство сложных систем, включая природные, общественные и искусственные системы (например, строительные материалы), являются гомеостатическими и поэтому подчиняются гомеостатическим принципам и закономерностям. Именно фундаментальные исследования в области гомеостаза и гомеостатики показали [24—31], что механизмы гомеостаза и гомеостатического управления лежат в основе мироздания и охватывают не только живые организмы и экономические, экологические, социальные системы, но и неживые, и даже искусственные (созданные человеком) системы.

В основе гомеостатики лежит утверждение: мир двойственен и устойчивая гомеостатическая система состоит из балансирующих (или компенсационных) противовесов (противоположностей или антагонистов), объединенных между собой определенным образом. Если эта двойственность в виде балансирующих противовесов нарушается, то теряется устойчивость системы. Гомеостатика изучает принципы организации устойчивых систем из двух или более антагонистов (противоположностей), методы и условия их объединения в устойчивые системы, а также условия развала или разрушения устойчивой системы и последствия такого разрушения. Поэтому весьма существенна роль гомеостатических механизмов при рассмотрении композиционных материалов как систем. При наличии изоморфизма структур двух систем возникает возможность переноса и распространения результатов исследований с одной гомеостатической системы на другую.

Объект, как правило, изучается с разных точек зрения и с применением различных формализованных количественных или хотя бы концептуальных моделей [18; 20; 22] при необходимых уточнениях и структурированиях сложного объекта (предварительно выделяются элементы, подсистемы, системы и надсистемы). При структурном исследовании композиционных материалов предметом являются строение, фазовый состав, связи, топология и т. п.; при функциональном — динамические характеристики (кинетические процессы сорбции агрессивных сред, разрушения материала и др.), стойкость в эксплуатационной среде, экономическая эффектив-

ность (что при неизменной структуре системы зависит от свойств ее элементов и их отношений).

При исследовании систем *наблюдаемое, типичное свойство (связь или зависимость), присущее многим объектам, процессам и явлениям, устанавливаемое опытом, часто называют закономерностью.*

Выявление закономерностей позволяет в значительной степени облегчить перенос знаний об основных процессах, происходящих в сложных системах, из одной области в другую, независимо от их природы.

Универсальные закономерности в синергетике сложных нелинейных неравновесных открытых систем позволяют при определенных условиях переносить знания о механизмах бифуркации, деградации, самоорганизации и т.п. с одних систем на другие.

Они помогают определять заранее, в каком направлении и в каких пределах может происходить развитие систем, в каких пределах и направлениях исключается их совершенствование. Ими определяются ограничения по управлению сложными открытыми системами различной природы аналогично тому, как известные универсальные законы термодинамики предопределяют рост энтропии, деградации и хаоса для закрытых систем, а рост негэнтропии предопределяет процесс организации и самоорганизации открытых систем.

Условия самоорганизации или дезорганизации открытых систем определяются на основе общесистемной закономерности возрастания и убывания энтропии. Для стабилизации открытых систем необходимо рационально управлять энтропийными процессами в системах, в том числе точкой энтропийного равновесия, или критическим уровнем организации систем, амплитудой и частотой энтропийных колебаний, отводом излишней энтропии из системы во вне и т.п. [18; 32; 33].

Из энтропийной закономерности вытекает важное следствие — зависимость потенциала системы от степени ее организованности или характера взаимодействия структурных элементов системы. Исходя из этой закономерности, можно определить зависимость потенциала системы от потенциала структурных элементов для хорошо, плохо и нейтрально организованной системы, что позволяет выработать рекомендации по рациональной организации и управлению системой.

Наконец, отметим, среди различных теорий систем в настоящее время еще не существует универсальной, пригодной для различных практических приложений. Это относится и к общей теории систем Ю.А. Урманцева [34—36] с ее высокой абстракцией (само определение системы включает более двух десятков признаков-атрибутов) и поэтому трудно приложимой к практическому решению системных задач [37].

В соответствии с распространенной мировоззренческой позицией мир устроен целостно и неделимо. Разделение мира на отдельные составные части — его структурирование — чисто условное и *делается исследователем* ради достижения определенных целей, решения определенных задач. Во многих случаях, как и в материаловедении, структурирование привычно и общепринято.

Существование системы определяется некоторыми основными определяющими ее параметрами. Их сохранение поддерживает существование самой системы и определяет ее гомеостаз. *Системный (общий) гомеостаз обеспечивает сохранение интегративного качества, а частный — конкретной компоненты* [6].

Влияние изменения системных параметров на систему неодинаково и, в частности, зависит от диапазона их изменения. Пока значение системообразующего параметра не выходит за пределы области, сохраняется интегративное качество системы. Выход системообразующего параметра за пределы области частичного гомеостаза ведет к переходу системы в новое качественное состояние без разрушения системы. С выходом системообразующего параметра за пределы области системного гомеостаза система утрачивает интегративное качество и перестает существовать. Приближение интегративных параметров системы к предельно допустимым порождает системный кризис с непредсказуемыми последствиями, когда дальнейшее существование системы оказывается под вопросом. Система вступает в зону бифуркации. Под влиянием внутренних или внешних флуктуаций она либо вернется в нормальное состояние, либо перейдет в другие состояния, приобретая новое качество [6; 24].

Изложенное выше позволяет *рассматривать системное мышление как совокупность методов и способов исследования, описания и конструирования систем.*

## 2. Композиционные материалы как системы

### 2.1. Системные атрибуты композиционных материалов

В материаловедении во многих случаях неявно уже использовался и используется системный подход. Композиционные материалы, будучи сложными объектами, обладают системными атрибутами и являются системами (рис. 2.1.).

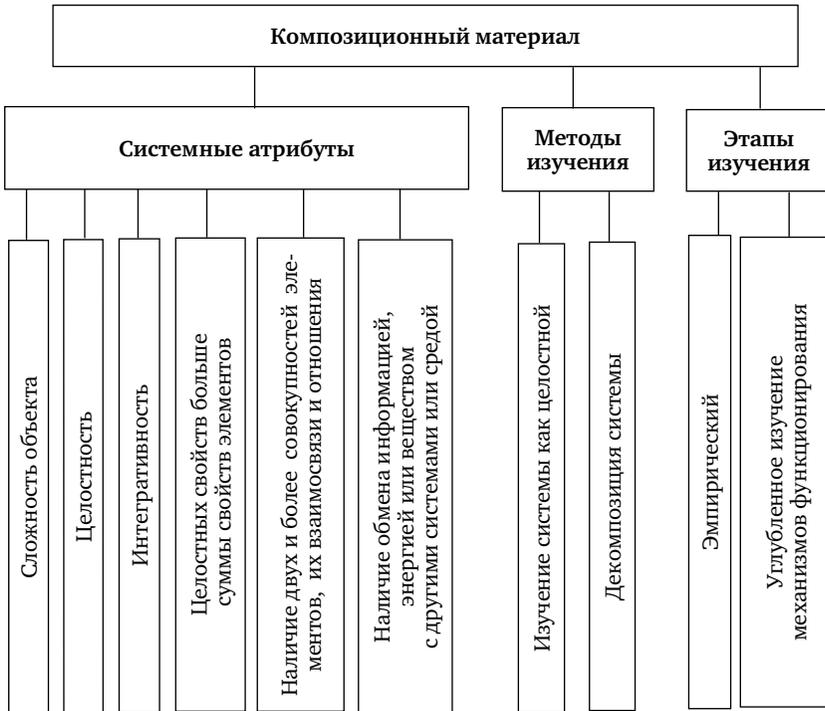


Рис. 2.1. Композиционный материал как система

Налицо все указанные характерные признаки системы:

- наличие структуры;
- целостность совокупности элементов;
- наличие устойчивых связей между элементами, в том числе существенных, определяющих интегративные свойства системы.

При решении технологических задач с использованием принципов системного анализа технологический процесс рассматривается как сложная система, состоящая из элементов различных уровней детализации: от атомного до отдельного процесса.

Система состоит из взаимодействующих элементов. Сущность системы невозможно понять, рассматривая только свойства элементов; существенны как способ взаимодействия элементов, так и взаимодействия элементов (или системы) с окружающей средой. Анализ элементарных процессов, проводимый отдельно, не позволяет установить стадию технологического процесса (например, массоперенос вещества осуществляется на нескольких технологических переделах: при химической реакции взаимодействия вяжущего с активатором; при перемешивании компонентов, тепловой обработке и др.). Без выявления взаимосвязи между отдельными стадиями процесса и с окружающей средой нельзя судить обо всем технологическом процессе.

При анализе технологического процесса можно выделить несколько *уровней иерархии*, между которыми существуют отношения соподчиненности. На первом уровне располагаются элементарные процессы технологии (химические, массообменные, тепловые, механические, гидромеханические и др.), на более высоких уровнях — элементы, выделяющиеся по какому-либо признаку. При анализе отдельного процесса в качестве элементов или ступеней иерархии выступают явления, определяющие в совокупности целевую функцию процесса (например, химическое превращение, теплообмен и т. д.). Основная идея системного анализа и здесь состоит в применении общих принципов декомпозиции системы на отдельные элементы и установлении связей между ними, в определении цели исследования и этапов для достижения этой цели.

Системный подход к исследованию технологических процессов используется для получения оценок функционирования процесса на любом уровне декомпозиции и осуществляется в несколько этапов. Отдельный элемент системы в зависимости от поставленной цели рассматривается как отдельная система с более детализованными уровнями декомпозиции. Так, в [38—40] выделяются четыре основных этапа системного исследования процесса:

1. *Смысловой и качественный анализы* объекта (учитываются цель исследования, выявляются уровни декомпозиции, отдельные элементы и связи между ними).

2. *Формализация имеющихся знаний об элементах и их взаимодействиях* (представление этих знаний в виде математических моделей — структурная идентификация — с формализацией рассматриваемых процессов для определения связей между входными и выходными параметрами).

3. *Математическое моделирование процесса* и определение адекватности модели. Адекватность (соответствие результатов моделирования экспериментальным данным) определяется уровнем знаний о процессе и обоснованностью принятых допущений. Математическая модель представляет собой совокупность математического описания и алгоритма решения.

4. *Идентификация математических моделей элементов*. Математические модели сложных процессов (состоящих из нескольких элементарных) являются системами уравнений, представляющих *детерминированные фундаментальные законы* и отражающих только *общий характер явления при совокупности ограничений и допущений*. Реальные условия протекания процессов далеки от «идеальных», и поэтому модели содержат коэффициенты (*параметры модели*), определяемые экспериментально.

Наиболее полно теоретические проблемы структурной и параметрической идентификации рассматриваются в [41] с обзором трудов IV Международной конференции «Идентификация систем и задачи управления SICPRO '05». В заключении работы отмечается, что содержание ее (идентификации!) основных результатов должно быть понятно субъекту идентификации, и эти результаты должны предоставляться субъекту в форме, не вызывающей особых интеллектуальных трудностей при их практическом использовании. Подобная позиция, в частности, означает, что *собственные методологические и математические исследования дисциплины рассматриваются как инструменты для получения практически эффективных средств идентификации*. И с этой точки зрения определяются их ценность и актуальность. Практическая реализация подобной позиции невозможна без:

— рассмотрения идентификации в целом, *комплексно, системно*;

— отношения к идентификации как к особому типу человеческой деятельности;

— *осознания роли и функций человека в процессе идентификации.*

При **декомпозиции технологического процесса** по основным операциям элементами будут: подготовка материалов, смешение компонентов, формование полуфабриката, тепловая обработка и дополнительные операции.

Элементы в системе находятся в определенных **отношениях** между собой и окружающей средой (связи). Связи подразделяются на *входы*, или *факторы*, оказывающие влияние на функционирование элемента (системы), и *выходы*, или *отклики*, являющиеся воздействием элемента (системы) на окружающую среду.

В числе причин неконтролируемости факторов в частности могут быть:

- недостаточная изученность процесса (неизвестно, существенно или нет данный фактор влияет на функционирование системы);
- неспособность исследователя контролировать выделенный фактор;
- наличие большого количества малозначимых факторов, суммарное воздействие которых оказывается существенным для системы (влияние этих факторов имеет случайный характер).

Определенная последовательность выполнения основных операций в технологическом процессе предполагает наличие очевидной взаимосвязи между элементами: отклики предыдущего элемента являются входами последующего. Выход предыдущего элемента может быть как управляемым, так и неуправляемым входом последующего элемента.

При структурном подходе запись модели процесса базируется на фундаментальных законах (применяется для хорошо изученных систем).

Эмпирический подход основан на определении модели функционирования системы только по экспериментальным данным (используется при исследовании сложных систем, теоретическое описание которых ограничено или невозможно).

На практике изучение сложных систем проводят поэтапно: на первом — эмпирически; на втором — углубленно изучаются механизмы функционирования, которые значительно улучшают ранее полученные результаты.

Системному мышлению присуща внутренняя противоречивость и парадоксальность [19]. Она четко проявляется в системном подходе к синтезу композиционных материалов (рис. 2.2).

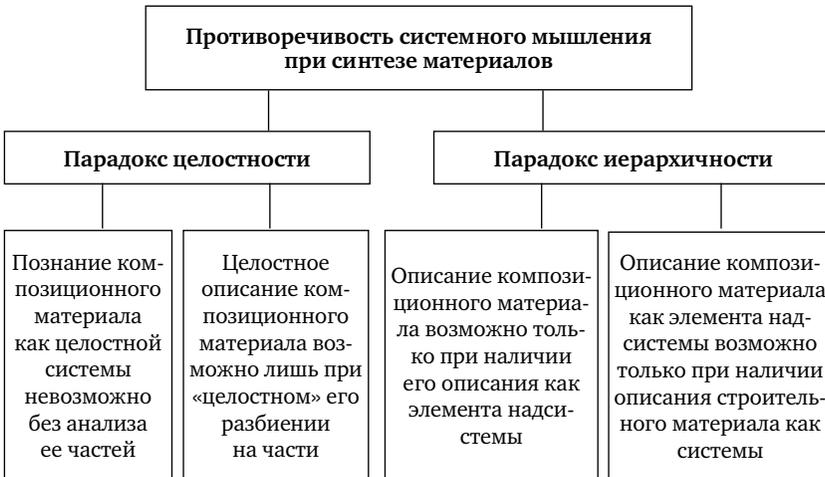


Рис. 2.2. Противоречивость системного мышления при синтезе материалов

**Парадокс целостности**, характеризующий противоречивость системного мышления, заключается в том, что *познание системы как целостности невозможно без анализа ее частей*.

Возможны два способа декомпозиции (разбиения) целостной системы (рис.2.3).

- После разбиения целостной системы получаются элементы (части), которые *не несут на себе целостные свойства исходной системы* (такое разбиение практической ценности не имеет).

При разработке бетона (системы) естественным представляется разбиение системы на отдельные входящие в систему компоненты. Однако такое представление системы не позволяет, изучая свойства компонентов (элементов), с необходимой достоверностью предсказать свойства всей системы. Такая декомпозиция практической ценности действительно не представляет. Указанное справедливо и при декомпозиции системы по масштабному структурному признаку (макро- и микроструктура, рассматриваемые в полиструктурной теории).

• Выделяются такие части (элементарные образования), которые сохраняют в специфической форме целостные свойства исследуемой системы (такое разбиение условно называется «целостным» разбиением).

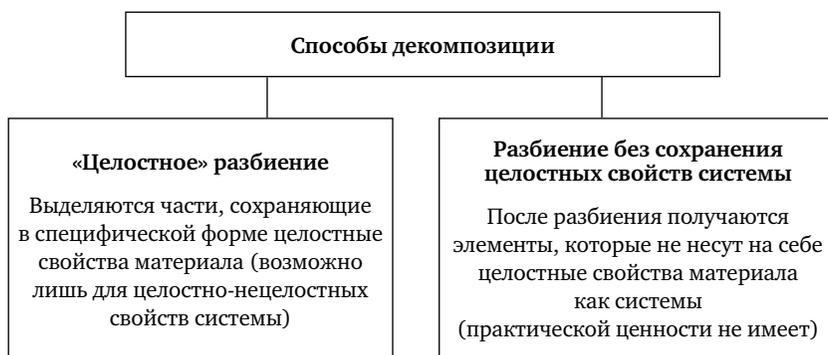


Рис. 2.3. Способы декомпозиции

В качестве элементарного образования служит образец материала, свойства которого определяются как свойствами составляющих компонентов, так и присущими материалу (системе) интегративными свойствами. Откуда следует, что без целостного системного подхода невозможно изучение материала с целью прогноза возможности его практической эксплуатации.

Как видим, *парадокс целостности состоит в том, что целостное описание системы возможно лишь при «целостном» ее разбиении на части, т. е. при описании данной системы как некоторой целостности* [34—36].

Однако даже интегративное свойство системы на качественном уровне может изучаться по существу вне системы. Так, например, смачиваемость поверхности заполнителя вяжущим может быть определена в отдельном эксперименте. При этом полученные результаты могут служить лишь качественным описанием процесса смачивания и не позволяют осуществить целостное описание системы, так как в системе смачивание протекает в стесненных условиях с дополнительным влиянием распределения компонентов и границ раздела фаз. *Используемый элемент декомпозиции не позволяет проводить последующее агрегирование системы.*

Отметим четыре вида свойств системы (рис. 2.4.):

- целостное — принадлежит рассматриваемой системе в целом, но не принадлежит ее составным элементам;
- нецелостное — принадлежит составным элементам, но не принадлежит системе в целом;
- целостно-нецелостное — *принадлежит как системе в целом, так и его составным элементам*;
- «небытийное» — не принадлежит ни системе в целом, ни его элементам.

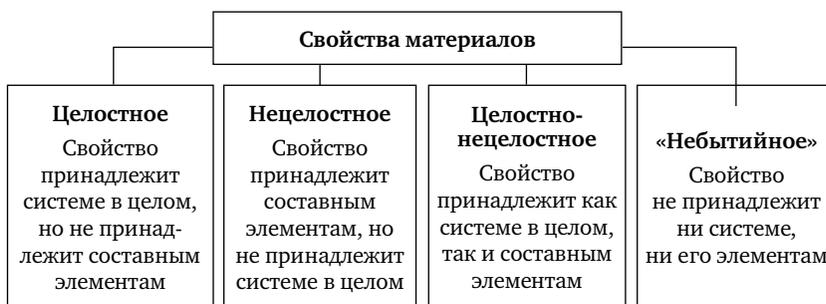


Рис. 2.4. Свойства материалов

Приведем последовательно примеры для каждого из указанных свойств.

- *Целостное свойство.*

Рассмотрим композиты (системы) на основе цемента. Компоненты: цемент, заполнители (дисперсные фазы), добавки, вода; без воды нет бетонной смеси; в процессе структурообразования бетонная смесь превращается в бетон (систему). Компоненты можно рассматривать как элементы системы. Свойства системы, например, прочность, эксплуатационная стойкость, определяющие систему в целом, не принадлежат ее отдельным элементам (компонентам).

- *Нецелостное свойство.*

Элементы системы (компоненты композита) обладают свойствами, которыми система не обладает. Например, цемент (элемент) как минеральное вяжущее имеет определенную дисперсность (т.е. находится в виде порошка). В бетоне (системе) цемент образует цементный камень, равномерно распределенный в объеме композита (система не обладает свойствами составных элементов).