В. А. Акимов

Общая теория безопасности жизнедеятельности в современной научной картине мира

Москва

2018

УДК 614.8
А39

А39 Акимов В. А. Общая теория безопасности жизнедеятельности в современной научной картине мира. М.: ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2018. 136 с.
ISBN 978-5-93970-235-5

В монографии рассмотрены актуальные теоретические вопросы безопасности жизнедеятельности в современной научной картине мира.

Структурно монография состоит из трех глав, введения, заключения, списка литературы и двух приложений.

Первая глава посвящена актуальным проблемам безопасности жизнедеятельности в современной научной картине мира. Показано, что преимущественным типом объектов постнеклассической науки являются сложные нелинейные системы, эволюционирующие объекты, человек, общество, биосфера и техносфера.

Во второй главе кратко изложены основные положения общей теории безопасности жизнедеятельности, в том числе, объект, предмет, принципы и закономерности указанной теории.

Третья глава монографии посвящена исследованию чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера современными методами математической теории катастроф, которая является частью качественной теории сложных нелинейных систем.

Научная монография может быть полезной магистрам и аспирантам, обучающимся по направлению «Техносферная безопасность».

Работа выполнена в рамках соглашения № 177-10-2018-003 от 14.06.2018 года о предоставлении субсидии на финансовое обеспечение и возмещение расходов, предусмотренных Программой «Развитие государственно-общественной системы оценки рисков, совершенствование подготовки и обучения населения и специалистов в области защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера, заключенного между Общероссийской общественной организацией «Российское научное общество анализа риска» и МЧС России.

Ключевые слова: общая теория безопасности жизнедеятельности; современная научная картина мира; синергетика; сложные системы; объект, предмет, принципы и закономерности теории; математическая теория катастроф; исследование чрезвычайных ситуаций.

ISBN 978-5-93970-235-5

Содержание

Введение

В течение тысяч лет перед человечеством стояли три основные проблемы: голод, мор и война [1]. Поколение за поколением люди продолжали миллионами умирать от нехватки пищи, эпидемий и насилия. Но в последние несколько десятилетий голод, мор и войну удалось обуздать. Полностью эти напасти не побеждены, но из непостижимых и неконтролируемых явлений их удалось превратить в вызовы, поддающиеся контролю.

Бедствия из роковой троицы случаются все реже. Сегодня ожирение убивает больше людей, чем голод; от старости умирают чаще, чем от пандемий; количество самоубийств превышает число смертей от военных действий, террористических актов и преступлений вместе взятых.

В течение последней сотни лет экономическое развитие создавало все более солидную подушку безопасности, которая теперь отделяет человечество от биологической черты бедности. Массовый голод еще случается в некоторых регионах мира, но сейчас это явление исключительно политическое. Больше не существует голода по естественным причинам. Даже когда войны и стихийные бедствия разоряют целые страны, общими усилиями обычно удается предотвратить наступление голода. В 2010 году голод и плохое питание вместе убили один миллион человек, а ожирение — три миллиона.

Вторым после голода смертельным врагом человечества был мор, то есть инфекции, эпидемии и пандемии:

в 1330—1340-х годах от эпидемии чумы в Азии и Европе погибло около 200 миллионов человек – более четверти населения Евразии;

в 1520—1570-х годах от оспы и других инфекционных болезней в Мексике число жителей сократилось с 22 до 2-х миллионов человек, то есть погибло более 90% населения страны;

в 1918 году от злостного штамма гриппа — «испанки» пали около 100 миллионов человек. В Первой мировой войне с 1914 по 1918 год погибло 20 миллионов человек.

Однако в последние несколько десятилетий размах и сила эпидемий резко снизились, что объясняется беспрецедентными достижениями медицины XX—XXI веков, обеспечившей нас вакцинами, антибиотиками, новыми средствами дезинфекции и усовершенствованной медицинской инфраструктурой. Так что серьезные эпидемии будут угрожать человечеству в будущем только в том случае, если человек сам будет создавать их в угоду какой-нибудь безжалостной идеологии. Эпоха, когда человечество было практически беспомощно перед природными эпидемиями, скорее всего, миновала.

В современном мире войны тоже сходят на нет. В средние века насилие было причиной 15 % смертей, в XX веке — только 5 %, в начале XXI века на счету насилия всего 1 % мировой смертности. Ядерное оружие превратило войну между сверхдержавами в безумный акт коллективного самоубийства. Одновременно с этим ресурсоемкую экономику потеснила наукоемкая. Сегодня главный источник благосостояния — это знания. И если залежи нефти можно завоевать, то знание не завоюешь.

Конечно, нет никакой гарантии, что это мирное состояние будет вечным. Так же как ядерное оружие помогло установлению нового вида мира, так дальнейшее развитие технологий способно породить новые типы войн. В частности, мир может изменить кибероружие, позволив даже малым странам результативно воздействовать на сверхдержавы. Но если современной оружие массово заработает, то в этом будет вина самого человечества, а не его неизбежная учесть.

Если при всех достижениях люди в XXI веке будут страдать от голода, мора и войны, то в этом надо винить не природу, а самих себя. История не терпит пустоты. Если голод, мор и война отходят на задний план, то какие угрозы займут их место в XXI веке?

Во-первых, мы так и не научились противостоять стихийным бедствиям. Согласно [2] за последнее десятилетие в результате бедствий более 700 тысяч человек погибли, свыше 1,4 миллиона получили увечья, 23 миллиона человек лишились жилья. В общей сложности в результате бедствий пострадали более 1,5 миллиарда человек. Общий экономический ущерб превысил 1,3 триллиона долл. США. Бедствия, многие из которых усугубляются изменением климата и становятся все более частыми и интенсивными, существенно препятствуют достижению прогресса на пути к устойчивому развитию. Во всех странах уровень подверженности населения и территорий повышался быстрее, чем снижалась уязвимость, порождая новые риски и обусловливая устойчивое увеличение ущерба от бедствий.

Во-вторых, защита человечества от угроз, заключенных в нашей собственной мощи. Феноменальный экономический рост, который обеспечил нас едой, медикаментами, энергией и сырьем, нарушает экологическое равновесие на планете. Несмотря на все разговоры о загрязнении атмосферы, глобальном потеплении и изменении климата, большинство стран не готово идти на серьезные экономические и политические жертвы ради улучшения ситуации.

В-третьих, защита от централизованной обработки данных, биотехнологий и искусственного интеллекта. Человечество либо окажется во власти всемогущих алгоритмов, либо само «растворится» в потоке информации, либо превратится в «лишних» людей, подталкиваемых к вымиранию узкой элитой.

В XXI веке обострились многие глобальные проблемы, чреватые негативными и угрожающими последствиями не только для человечества, но и в значительной степени для всей жизни на планете.

Повышение интереса к феномену безопасности ставит перед учеными фундаментальную проблему поиска оснований безопасности, выявления ее природы как для социальных, так и материальных систем. Причем речь должна идти не только о прикладных исследованиях, но и о становлении фундаментального и междисциплинарного научного знания в области безопасности.

Сегодня проблема безопасности в том или ином виде существует в большинстве научных дисциплин, то есть имеет реальный междисциплинарный характер. Поскольку различные аспекты безопасности разрабатываются многими науками и каждая из них вносит вклад в формирование *общей теории безопасности,* то должна появиться общая интегрирующая наука, опирающаяся на опыт и результаты остальных наук.

Данная теория уже приблизилась к общенаучному статусу и имеет фундаментальную и прикладную части. Фундаментальность этой науки видится в том, что она исследует закономерности такой сферы и такой деятельности, как обеспечение комплексной безопасности, которые в полной мере не входят ни в одну другую дисциплину.

В настоящее время разработаны частные теории безопасности жизнедеятельности: теория гражданской обороны, теория защиты от чрезвычайных ситуаций, теория пожарной безопасности, теория промышленной безопасности и другие, которые оценивают состояние защищенности личности, общества и государства от конкретных опасностей и угроз, что не позволяет произвести интегрированную оценку состояния безопасности жизнедеятельности.

Более того, в настоящее время получены новые научные результаты как в рамках традиционных (естественных и общественных) наук, так и современных (постнеклассических) наук, приложения которых необходимо использовать при междисциплинарных исследованиях проблем безопасности жизнедеятельности.

Поэтому разработка междисциплинарной теории безопасности жизнедеятельности является актуальной, обладающей научной новизной и практической значимостью.

Глава 1. Проблемы безопасности в современной научной картине мира

1.1. Основные этапы развития науки

Общенаучная картина мира — один из основных элементов общенаучного знания определенной исторической эпохи. В развитии науки выделяют следующие периоды: античный (VII в. до н.э. — III в. н.э.), средневековый (IV — XVII вв.), классический (XVII—XIX вв.), неклассический (XX в.) и постнеклассический (конец XX — начало XXI вв.) [3] (см. рис. 1).

Рис. 1. Исторические этапы развития науки

Научная картина мира в античную эпоху была предметом такой области знания, как натурфилософия Аристотеля. Конкретно-научные теории античной науки (геометрия Евклида, физика Аристотеля, астрономия Птолемея) находились в полном соответствии с общенаучным знанием античной эпохи и преимущественно светским характером греко-римской цивилизации.

Средневековая наука была по своему содержанию и направленности социально-гуманитарным знанием. Развитие математики, естествознания, а тем более технических наук, не было востребовано сформировавшимся в средневековой Европе религиозным (христианским) типом цивилизации. К числу чисто светских научных дисциплин можно отнести только формальную логику, результаты которой предвосхитили исследования в области математической логики и семантики.

Общенаучная картина мира классической науки опиралась на ряд новых научных теорий: классическую механику Галилея—Ньютона, астрономию Коперника—Кеплера, теорию электромагнетизма Фарадея—Максвелла, термодинамику (Джоуль—Клаузиус—Томпсон), аналитическую геометрию (Декарт), математический анализ (Ньютон—Лейбниц—Коши), теорию эволюции (Ламарк—Дарвин), аналитическую химию (Гей-Люссак—Ломоносов), математическую логику (Буль—Морган). Перечисленные фундаментальные теории отвечали целям формирования и развития индустриального типа цивилизации. Предпринимаются первые попытки построения общенаучной картины мира путем обобщения (синтеза) частнонаучных картин мира (физической, химической, биологической, социальной).

После открытия Кельвином и Клаузиусом второго начала термодинамики господствовало достаточно пессимистическое представление, что базовым состоянием материи является состояние термодинамического равновесия (хаоса) — самого простого из всех возможных состояний системы, не обменивающийся энергией и веществом с окружающей средой. Господствующей тенденцией материи считалось стремление к разрушению спонтанно возникшей упорядоченности и возвращению к исходному хаосу [4]. Следовательно, упорядоченное состояние вещества, которое наблюдается в доступной части Вселенной, возникло случайно. Так возникла модель стационарной Вселенной.

Лидерами неклассической науки являются: теория относительности, квантовая механика, теория элементарных частиц, молекулярная биология, генетика, биохимия, релятивистская космология, информатика и вычислительная математика.

Преимущественным типом объектов современной (постнеклассической) науки являются сложные системы, системы открытого типа, эволюционирующие объекты, человек, общество, биосфера и техносфера.

1.2. Исследования проблем безопасности в современной научной картине мира

Проблемы комплексной безопасности России в течение последних 20-ти лет остаются в центре внимания руководства страны и являются одним из приоритетных направлений работы Совета Безопасности РФ, РАН, МЧС России, ведущих научных центров и вузов страны. При поддержке администрации Президента РФ с 1997 года ведется подготовка и издание многотомной серии «Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты». К ее работе было привлечено около 1000 специалистов, в которой обобщены актуальные отечественные достижения, современные разработки и мировой опыт по различным проблемам безопасности.

К настоящему времени издано 50 томов указанной серии, посвященных фундаментальным и прикладным проблемам экономической, природной, техногенной, социальной, региональной, экологической, энергетической, продовольственной, транспортной, промышленной, ядерной, радиационной, информационной, биологической, психологической, национальной, международной и другим видам безопасности [5] и сводный том [6].

В сводном томе отмечается, что в результате глобальных военных, социальных, экономических, экологических, природных и техногенных катастроф, проблема обеспечения комплексной безопасности в полном объеме вошла в число междисциплинарных проблем современной цивилизации.

Проблема безопасности как междисциплинарная область научных знаний исследуется учеными МЧС России уже более 15-ти лет [7, 8].

В [9] рассматривается общенаучная методология исследований проблемы безопасности, акцентируя внимание на синергетическом подходе. Показано, что наиболее эффективный способ обеспечения безопасности лежит на пути самоорганизации, усложнения и повышения информационного содержания социальной системы, а не через ее защиту и изоляцию.

Кардинальным отличием синергетического подхода от традиционного термодинамического является рассмотрение сложных систем в качестве открытых в пространстве и времени, то есть взаимодействующих с окружающей средой и обменивающихся с ней веществом, энергией и информацией. При взаимодействии систем с внешней средой в системе уменьшается энтропия, протекают процессы самоорганизации, образование новых диссипативных структур.

В закрытых же системах идет только процесс непрерывной дезорганизации, хаотизации, разрушения изначально заданной структуры, что и установила классическая термодинамика, которую иногда называют теорией разрушения структур. Проблема безопасности как раз и связана с обеспечением сохранения структур от разрушительного или неблагоприятного воздействия внешних и внутренних возмущений.

С синергетической точки зрения закрытые системы в принципе являются менее безопасными, нежели открытые, поскольку последним доступны ресурсы окружающей их среды, имеются источники и стоки вещества, энергии и информации. Поэтому изоляция системы, использование защитных способов обеспечения безопасности — не самый эффективный механизм сохранения системы и поэтому такое обеспечение может быть лишь кратковременным, о чем свидетельствует история использования защитной идеологии обеспечения безопасности. Таким образом, безопасность — это первичная, базовая потребность, которая «вырастает» из свойства самосохранения сложных систем на пути их прогрессивной эволюции.

Синергетика изучает самосохранение систем в результате их эволюции не только в процессах самоорганизации, но и в противоположных процессах, негативно влияющих на системы [10]. Если самоорганизация — это процессы спонтанного перехода от хаоса к порядку и появления более сложных структур в открытых нелинейных системах, то самодезорганизация — это процессы перехода от порядка к хаосу, кризисным явлениям и катастрофам. Поэтому самый лучший способ обеспечения безопасности лежит на пути самоорганизации и усложнения систем, а не на пути сохранения достигнутой системой сложности с помощью ее изоляции от внешней среды.

Эволюция носит нелинейно-бифуркационный характер, и элементарный цикл развития происходит от одной бифуркации к другой. В зоне бифуркации усиливаются положительные обратные связи между системой и средой, происходит снижение устойчивости систем и появляется за счет случайной флуктуации возможность скачкообразного изменения траектории эволюции, ее ветвление на два или большее число возможных траекторий.

В связи с проблемой безопасности нас интересует, прежде всего, альтернатива, когда система, вступившая в фазу бифуркации, либо сохраняется, либо разрушается. В процессе развития система не находится в стабильном состоянии, в ней происходят изменения, и она либо накапливает, либо теряет элементы и связи. Это приводит ее в неравновесное состояние, когда любое малое и случайное воздействие на систему может вызвать ее деградацию, либо выход на более высокий уровень устойчивости. То или иное состояние системы при выходе из зоны бифуркации зависит от того, под притяжение какого аттрактора попадает система.

В принципе эволюционный процесс может идти по двум основным сценариям:

сценарий прогрессивного развития, когда идет рост сложности, увеличение информационного содержания системы, которая вступает в бифуркационный период не в силу обострения внутренних противоречий, а благодаря воздействию тех или иных внешних факторов в открытой нелинейной среде;

сценарий деструктивного развития, когда кризисное состояние системы достигается благодаря как внешним, так и внутренним факторам, происходит разрушение объекта и последующее движение к хаосу более низкого структурного уровня.

Очевидно, что существует определенная мера (соотношение) между сохранением (безопасностью) системы и ее прогрессивным развитием, что связано с действием обратных связей. Положительная обратная связь приводит к неустойчивости, выходу на режим с обострением, усиливая внешние воздействия на систему, способствуя ее усложнению и росту информационного содержания. Отрицательные обратные связи ослабляют внешние воздействия, стабилизируют систему, способствуя сохранению ее квазиравновесия с окружающей средой. Таким образом, в зависимости от соотношения положительных и отрицательных обратных связей система движется по прогрессивной или регрессивной эволюционной траектории.

Очевидно, что настало время для создания науки о безопасности человека и окружающей среды. Сразу можно утверждать, что новая наука должна возникнуть на стыке всех ранее появившихся естественных и общественных наук [11].

Преимущественным типом объектов *современной (постнеклассической) науки* являются сложные системы, системы открытого типа, эволюционирующие объекты, человек, общество, биосфера и техносфера.

Сегодня физики и математики ввели в научный оборот и теоретически обосновали кардинальные концепции и понятия теорий самоорганизации материи — *диссипативные структуры* (Пригожин)[12, 13], *синергетику* (Хакен) [14, 15], *теорию катастроф* (Том, Арнольд) [16, 17] и др.

Самоорганизация — это процесс, в ходе которого создается, воспроизводится и совершенствуется организация сложной динамической системы. Система называется самоорганизующейся, если она стремится сохранить свои свойства и природу протекающих процессов за счет структурных изменений.

Класс систем, способных к самоорганизации, — это открытые, нелинейные системы. Открытость системы означает постоянный обмен с окружающей средой веществом, информацией и энергией.

Выяснилось, что все разномасштабные самоорганизующиеся системы, независимо от того, каким разделом науки они изучаются, имеют единый алгоритм перехода от менее сложных и менее упорядоченных к более сложным и более упорядоченным состояниям. Тем самым открывается возможность единого теоретического описания подобных процессов во времени и пространстве.

Адекватная и полная реконструкция содержания общенаучной картины мира постнеклассической науки затруднена в связи с тем обстоятельством, что она находится в процессе становления. Тем не менее, целый ряд новых онтологических (сущностных) *принципов современной общенаучной картины мира* уже можно сформулировать [18]:

все реальные объекты и системы являются открытыми и постоянно обмениваются веществом, энергией и информацией;

изменения всех объектов и систем носят эволюционный, то есть направленный характер;

однозначный (линейный) характер поведения наблюдается только у устойчивых и способных полностью себя самовоспроизводить в некотором временном интервале систем;

любая система со временем становится неустойчивой и проходя точку бифуркации либо погибает, либо переходит в новое устойчивое состояние;

все сложные системы ведут себя вероятностным образом, в целом их поведение имеет нелинейный характер;

прогрессивное развитие систем в течение длительного времени возможно только за счет «подкачки» для них энергии извне;

человек, общество, биосфера, техносфера являются сложными системами, подчиняющимися законам функционирования открытых, диссипативных (неравновесных) и нелинейных систем.

В основе современной общенаучной картины мира лежит *синергетика* — междисциплинарное направление научных исследований, методы которой могут использоваться как в естественных, так и гуманитарных науках[19]. Происходит это слово от греческого «synergeia» — совместное действие, соактивность. Сегодня под синергетикой понимают междисциплинарную науку о самоорганизации — спонтанном (естественном) возникновении порядка из хаоса [20]. Основными источниками появления и развития синергетики были термодинамика и новый раздел математики, получивший название «теория катастроф».

Одним из основных «корней», из которых произрастает синергетика, является термодинамика — наука о тепловых процессах. В составе современной термодинамики выделяют более ранние и классические разделы, получившие название «равновесная термодинамика», и более поздние и неклассические ее разделы, называемые обычно «неравновесной термодинамикой».

В равновесной термодинамике основным является понятие термодинамического равновесия, т.е. такого состояния термодинамической системы, при котором она не обменивается материей и энергией с окружающей средой и не меняется во времени, то есть является изолированной и стационарной.

Равновесная термодинамика базируется на трех основных законах:

первый закон — это закон сохранения энергии (количество энергии в замкнутой системе остается постоянным, только переходит из одной формы в другую);

второй закон — закон неубывания энтропии (в изолированной системе энтропия не уменьшается, а только увеличивается до максимального значения, которое характеризует наиболее однородное состояние системы);

третий закон — закон недостижимости абсолютного нуля температур.

В неравновесной термодинамике рассматриваются процессы, в той или иной мере отклоняющиеся от термодинамического равновесия. Это прежде всего открытые системы, в которых второй закон термодинамики не выполняется.

В линейной неравновесной термодинамике такое отклонение еще невелико, что выражается в так называемом *принципе локального равновесия*, при котором термодинамическое равновесие сохраняется в достаточно малых частях системы. В этом случае термодинамические процессы могут быть описаны в форме линейных зависимостей присутствующих в системе потоков вещества или энергии от различных термодинамических сил, вызывающих эти потоки.

В работах Л. Онсагера и И. Пригожина была сформулирована идея некоторой величины, получившей название «производство (продукция) энтропии», к минимизации которой стремится стационарная термодинамическая система в случае небольших отклонений от состояния равновесия.

Производство энтропии — это величина скорости изменения энтропии, так что стационарная система стремится минимизировать скорость изменения энтропии, максимально приближаясь в этом к состоянию термодинамического равновесия, когда производство энтропии равно нулю.

Более того, стационарное состояние с минимумом производства энтропии оказывается термодинамически устойчивым состоянием, т.е. происходит погашение малых отклонений (флуктуаций), удаляющих систему от этого состояния.

В нелинейной неравновесной термодинамике отклонение от состояния равновесия может быть достаточно значительным [21]. Здесь уже нельзя пользоваться линейными соотношениями между потоками и силами, перестает выполняться принцип локального равновесия. Неравновесие присуще не только системе в целом, оно проникает и на уровень малых частей системы.

Тем не менее, было обнаружено, что как раз в такого рода далеко отстоящих от равновесия состояниях спонтанно возникают различные упорядоченные структуры, которые способны поддерживать свое состояние только в высоконеравновесных условиях. Такие структуры были названы «диссипативными структурами» («диссипация» — рассеяние энергии): это структуры в открытых системах, в которых в ходе неравновесного процесса из пространственно-однородного состояния самопроизвольно (спонтанно) возникает пространственная или временная структура. В таких системах обычно локально энтропия уменьшается, хотя глобально она по-прежнему растет.

В нелинейной неравновесной термодинамике существует ряд типичных примеров возникновения и существования диссипативных структур[22]. Это:

1) переход ламинарного («спокойного») течения жидкости в турбулентное («вихревое»). Хотя внешне кажется, что турбулентное движение представляет собой потерю всякой упорядоченности, на деле оказывается, что здесь обнаруживается более сложный порядок;

2) возникновение «ячеек Бернара». Если поставить на огонь сковородку с налитым в нее минеральным маслом, то при определенной температуре в масле возникнут красивые гексагональные ячейки, вызванные конвенцией (циркуляцией) масла между более горячим и менее плотным нижним слоем и более холодным и более плотным верхним слоем масла;

3) возникновение когерентного излучения в лазере, когда, после первоначального хаотического излучения и начиная с некоторой мощности накачки, атомы вещества начинают излучать фотоны одной фазы, что выражается в возникновении мощного пучка лазерного излучения;

4) реакция Белоусова-Жаботинского, выражающаяся в красивой пространственной организации химических реакций, которая особенно заметна при окрашивании среды в различные цвета, в зависимости от состава реагирующих компонентов;

5) модель «хищник—жертва», описывающая периодические процессы зависящих друг от друга численностей популяций двух биологических видов, один из которых выступает как хищник, другой — как его жертва. Нарастание численности хищников приводит к последующему падению численности жертвы, что затем сказывается в падении численности хищника, что впоследствии позволяет размножиться жертве, что, в свою

очередь, влечет увеличение численности хищника, который уменьшает численность жертвы... и так далее, процесс начинает циклично повторяться.

На последнем примере мы видим, что нелинейная неравновесная термодинамика начинает порождать некоторые общие методы рассмотрения процессов самоорганизации, которые выходят за границы только тепловых процессов. Еще более ясно это видно в математическом аппарате синергетики — теории катастроф.

Знаменательно, что для синергетики, которая выходит за границы только тепловых процессов, уже не удается сформулировать принцип, подобно принципу минимума продукции энтропии, как в случае линейной неравновесной термодинамики.

При такой трактовке синергетика оказывается шире даже нелинейной неравновесной термодинамики, распространяя свои принципы на любые динамики, в том числе разного рода субъектные динамики био-психо-социальных процессов, в которых важную роль могут играть разного рода «целевые критерии» — критерии достижения тех или иных субъектных целей.

Математический аппарат синергетики [23] предполагает описание различных систем — физических, химических, биологических, экономических, социальных. Для этого синергетике нужен достаточно универсальный язык. Одно из основных понятий такого языка — понятие «фазовое пространство» или «пространство состояний» системы.

В общем случае, при изучении самых различных систем может оказаться, что состояние системы возможно описать некоторым набором параметров, или «степеней свободы».

Например, чтобы описать механическую систему из N точек, нужно описать положение каждой точки в пространстве и ее скорость. Положения и скорости — это вектора в трехмерном пространстве, и каждый такой вектор представляет собой три числа в некоторой системе координат. Следовательно, на каждую точку придется три числа вектора положения и три числа вектора скорости — всего 6 чисел. Для описания N точек потребуется в этом случае $6N$ чисел. Каждое из этих чисел будет степенью свободы системы в $6N$-мерном фазовом пространстве. Чтобы описать систему «хищник—жертва», достаточно две степени свободы — численность популяции хищника и численность популяции жертвы.

Таким образом, синергетика работает с некоторыми абстрактными пространствами, каждая точка которых — это не обязательно положение в пространстве, но общее состояние системы. В качестве координат в таких пространствах выступают некоторые степени свободы — параметры, на основе которых может быть однозначно описано каждое состояние системы. Такое пространство называется «пространством состояний» системы.

Хотя пространства состояний не обязательно являются геометрическими пространствами (например, они могут иметь число измерений более трех), но эти пространства можно пытаться изучать так, словно они являются геометрическими пространствами.

Например, обычно та или иная синергетическая система может принимать не все возможные состояния в пространстве состояний, но только лишь некоторую их часть. Это связано с наложением каких-либо ограничений, например, законов или правил, на возможное поведение системы. Обычно такие части пространств, в которых система может принимать свои состояния, называют «поверхностями», по аналогии с геометрическими поверхностями. Система в этом случае принимает свои состояния, находящиеся только на поверхности. Она может быть представлена как точка, движущаяся по поверхности.

В этом случае обычно оказывается, что все параметры системы можно разделить на два класса — управляющие (независимые) и управляемые(зависимые). Управляющие параметры системы — это такие ее параметры, которые можно менять независимо от остальных параметров, через них можно как бы управлять поведением всей системы в целом, в то время как управляемые параметры оказываются зависимыми от управляющих параметров, меняются вслед за их изменением таким образом, чтобы состояние системы всегда находилось на соответствующей поверхности.

В связи с этим оказалось, что теория поверхностей в абстрактных многомерных пространствах тесно связана с описанием поведения различных систем в синергетике. Первые фундаментальные результаты в этой области были получены американским математиком Хасслером Уитни, который развил так называемую «теорию особенностей» [24].

Представим себе трехмерное пространство с координатами XYZ, в котором расположена двумерная сфера. Построим проекцию этой сферы на координатную плоскость XY (см. рис. 2).

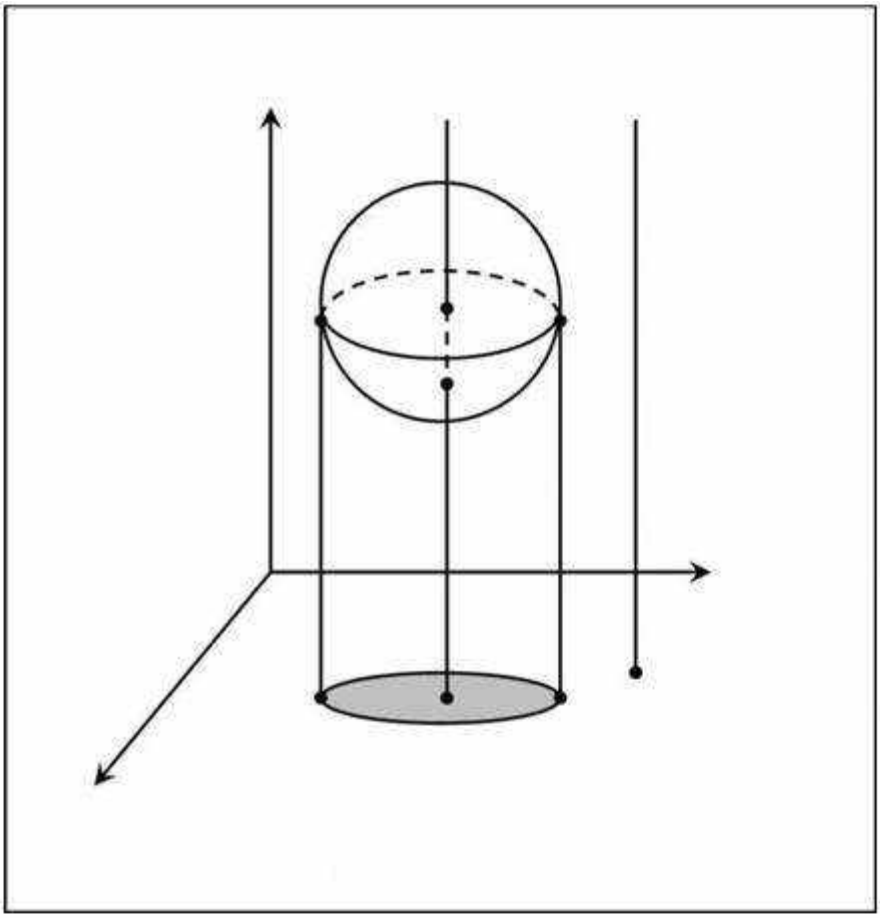


Рис. 2. «Складка Уитни»

Тогда все точки на плоскости проецирования XY можно разбить на три класса, в зависимости от того, сколько прообразов имеют эти точки на сфере.

Точки вне круга имеют 0 прообразов. Точки на границе круга — 1 прообраз (эти прообразы лежат на «экваторе» сферы). Наконец, точки внутри круга имеют по два прообраза — один на нижней, второй — на верхней полусфере. В этом случае особенностью под названием «складка Уитни» будет являться то множество точек на сфере, проекции которых на плоскости проецирования XY разделяют области точек с разным числом прообразов. В данном случае это будет «экватор» сферы. Именно его проекция на плоскость XY образует окружность, разделяющую области с нулевым и двойным числом прообразов на сфере.

Еще одним примером широко распространенной особенности является так называемая «сборка Уитни» (см. рис. 3). В этом случае на поверхности образуется область изогнутой деформации, передне-верхний и задне-нижний край которой образуют особенность, разделяющую множества точек на плоскости проецирования с одним и тремя прообразами (в проекции самой особенности лежат точки с двумя прообразами).

Какое же отношение имеет теория особенностей к синергетике?

Дело в том, что самое интересное и сложное в поведении синергетической системы — это наличие разного рода скачков, или «катастроф», когда система, при непрерывном изменении управляющих параметров резко и скачком меняет значение управляемых параметров. Оказалось, что такого рода катастрофы удается описывать как процессы пересечения особенностей на поверхности состояний системы. В этом случае управляющие параметры принадлежат плоскости проецирования поверхности, а управляемые параметры испытывают «бифуркацию» (раздвоение или размножение), выбирая из множества прообразов на поверхности один из нескольких прообразов. Поверхности могут быть деформированы, и если система попадает в область деформации, то она качественно, скачком меняет свои состояния, возникают катастрофы, которые можно предсказать, только исследуя эти особенности.

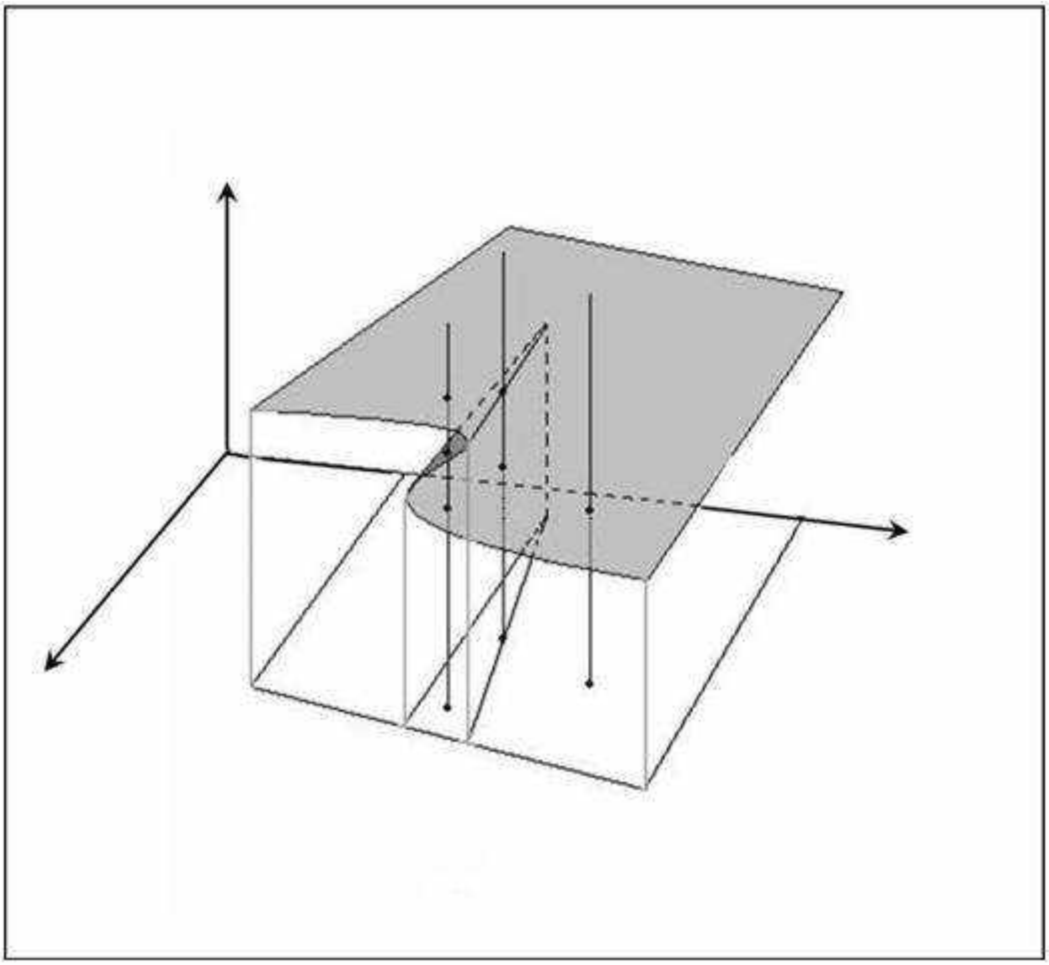


Рис. 3. «Сборка Уитни»

Рассмотрим этот процесс на примере так называемой «машины катастроф» английского математика К. Зимана.

Это довольно простое устройство (см. рис. 4), представляющее собой плоскую дощечку с закрепленным в ее правой части вращающимся диском. Через гвоздик и край диска натянута резинка с карандашом, который может рисовать на левой части дощечки. Передвигая карандаш, мы будем заставлять вращаться тем или иным образом диск.

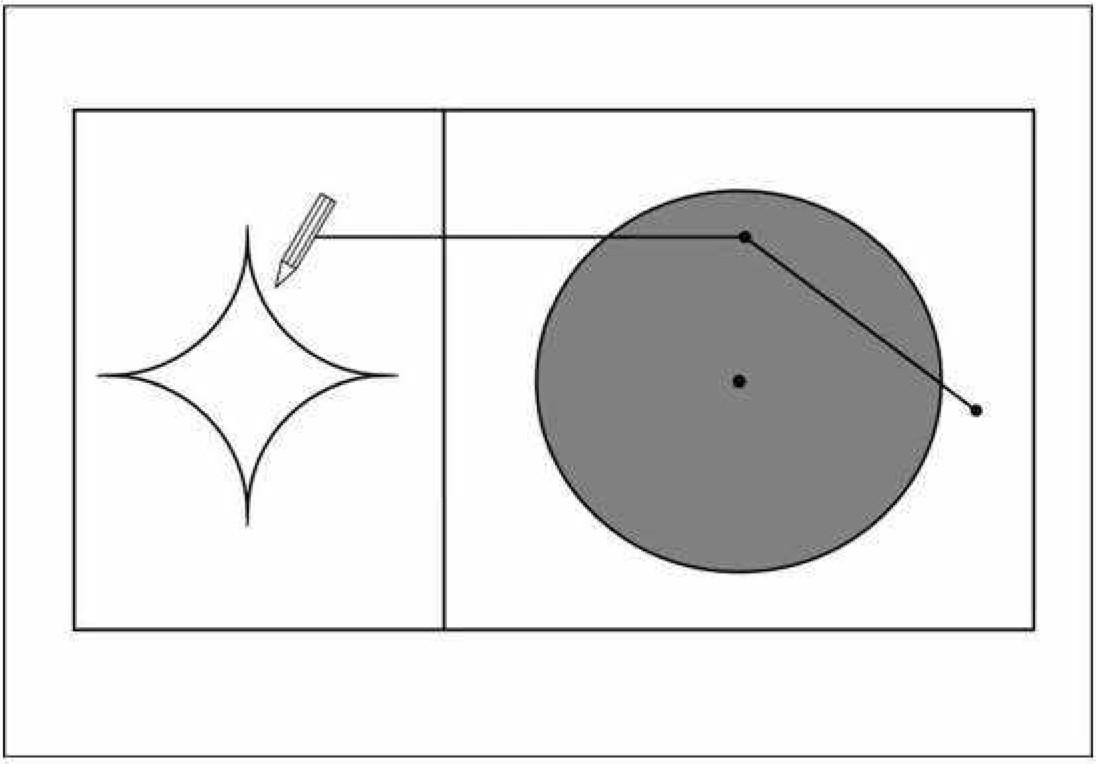


Рис. 4. «Машина катастроф» Зимана

Таким образом, состояние этой системы описывается положением карандаша и диска. Положение карандаша — это две координаты (x, y) его кончика в левой части доски.

Положение диска можно описать через угол отклонения **φ** от линии, соединяющей гвоздик и центр диска. В целом состояние системы описывается здесь как точка (x, y, φ) трехмерного пространства состояний системы. Положение карандаша (x, y) представляет собой систему управляющих параметров, а положение диска φ-управляемый параметр. Меняя положение карандаша, мы тем самым меняем положение диска, причем диск в этом случае принимает не какие угодно положения, а только определенные.

Следовательно, изменение системы может быть описано в этом случае как движение по некоторой поверхности в трехмерном пространстве состояний системы. Самое интересное в этом случае состоит в том, что если карандаш непрерывно подводить к некоторой кривой в левой части дощечки, то при пересечении этой кривой будет происходить резкий скачок («катастрофа») диска из одного положения в другое.

Оказалось, что такая кривая, которая называется «кривой катастроф», представляет собой проекцию на плоскость сборки Уитни, так что изменение системы в случае машины катастроф может быть представлено как перемещение по поверхности состояний, имеющей особенность в виде сборки Уитни.

Хотя сама поверхность геометрически не видна, и представляет собой поверхность в абстрактном пространстве состояний системы, но проекция особенности этой поверхности может быть наглядно изображена в виде кривой катастроф в левой части дощечки.

Математический аппарат синергетики имеет дело с различными фазовыми пространствами, эволюция динамической системы в которых обычно описывается той или иной системой дифференциальных уравнений. Эволюционный процесс может быть изображен как траектория в фазовом пространстве (*фазовая кривая*), производная этой кривой представляет собой *фазовую скорость*.

В этом случае *положением равновесия* системы называется точка фазового пространства, в котором фазовая скорость равна нулю. Положения равновесия могут быть устойчивыми или неустойчивыми, в зависимости от того, будут ли компенсироваться со временем небольшие отклонения системы от положения равновесия.

Графическое представление фазовых траекторий вблизи положений равновесия носит название *фазового портрета*.

В фазовом пространстве могут существовать такие множества точек, к которым со временем стремятся фазовые траектории. Такие множества точек называются *аттракторами* — центрами притяжения системы.

Самый простой аттрактор — точка в фазовом пространстве, к которой стремится состояние системы. Такой аттрактор называется *фокусом*.

В качестве аттракторов могут выступать устойчивые состояния равновесия или, например, *предельные циклы* — замкнутые кривые в фазовом пространстве, попав на которые, точка начинает как бы вращаться по этим кривым. Внешне такие вращения выражаются в разного рода колебаниях параметров системы, например, в колебаниях численности популяций хищника и жертвы.

Особо выделяются так называемые *странные аттракторы*. Они представляют собой множество точек со сложной геометрией, попав в которое, фазовая кривая навсегда остается в этом множестве, но очень сложно ведет себя в нем.

Геометрия странных аттракторов является фрактальной. *Фракталами* называют такие математические структуры, которые обычно обладают свойствами самоподобия и дробной размерности [25].

Классическим примером фрактальной структуры является так называемая *кривая Коха* (см. рис. 5).

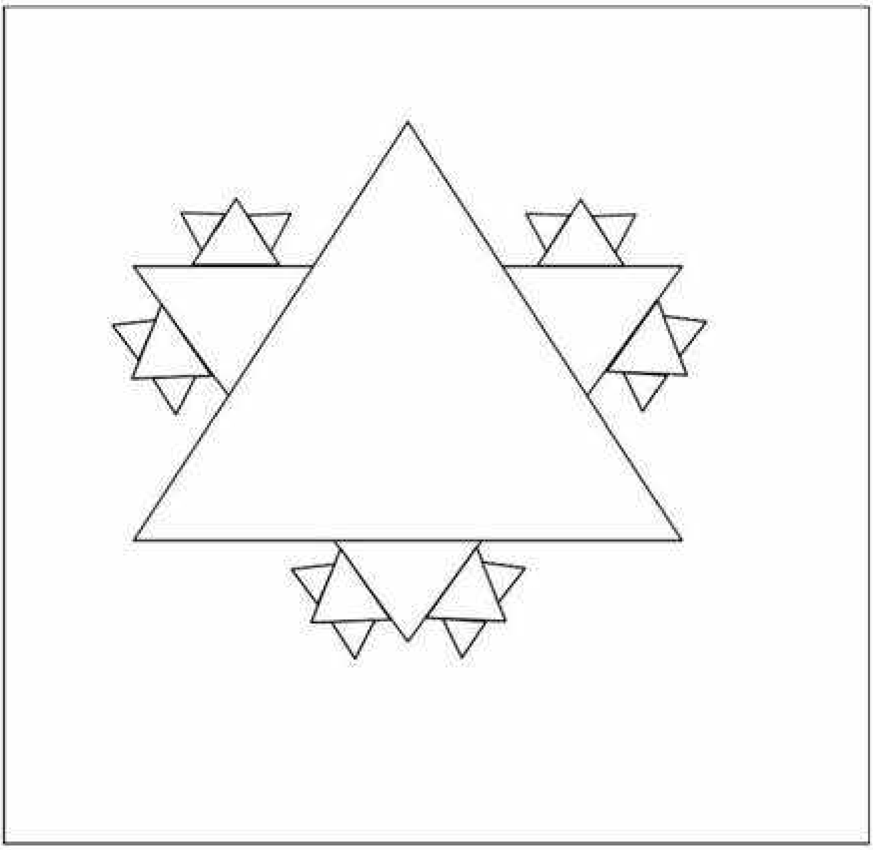


Рис. 5. Кривая Коха

На рисунке изображены последовательные этапы ее построения:

строится равносторонний треугольник;

на каждой из его сторон достраиваются малые треугольники;

на их сторонах — еще меньшие треугольники, и так далее, до бесконечности. Кривой Коха называется то, что получится при оставлении только внешнего контура фигуры (см. рис. 6)

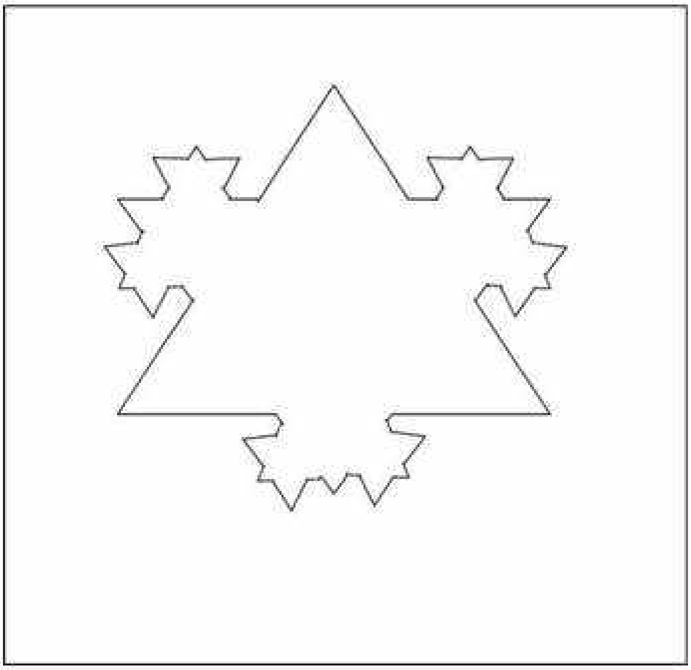


Рис. 6. Фрактальная структура

и в бесконечном пределе такого построения.

Наглядно представить себе такую «кривую» конечно невозможно. Замечательно также и то, что размерность этой кривой больше единицы, но меньше двух. Это и не одномерная кривая, и не двумерная поверхность. Это нечто среднее, напоминающее «уплотненную кривую» или «продырявленную поверхность». Кроме того, если мы увеличим под микроскопом любой участок кривой Коха, то он обнаружит тот же «рисунок», что и первоначальный участок — так наглядно в этом примере проявляет себя самоподобие, т.е. подобие частей целому, во фрактальных структурах.

Еще один наглядный пример фрактала — так называемый *ковер Серпинского*. На рис. 7 показан один из этапов его построения.

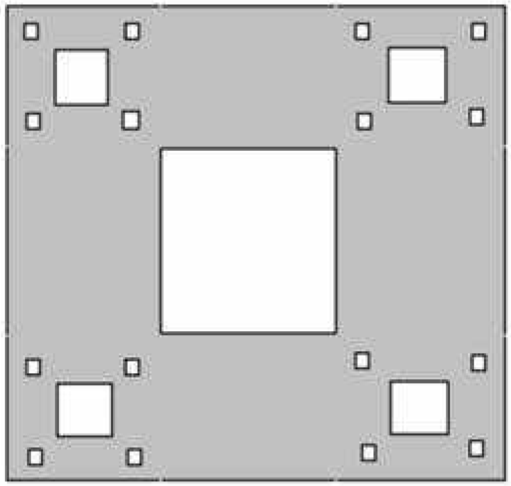


Рис. 7. Ковер Серпинского

Мы начинаем с квадратного участка плоскости, затем вырезаем в нем центральный квадрат. В получившихся угловых малых квадратных участках также вырезаем центральные малые квадраты, и так повторяем до бесконечности — бесконечно «продырявливая» первоначальный кусок. В пределе получается «бесконечно-дырявая плоскость», которая уже не является плоскостью, но в то же время еще не становится линией. Это и есть ковер Серпинского, обладающий промежуточной — между единицей и двумя — размерностью.

Странные аттракторы представляют собой фрактальные структуры. Попадая в них, фазовая кривая начинает сложно блуждать, со временем бесконечно близко подходя к любой точки фрактала, и в то же время две разные фазовые кривые очень быстро расходятся внутри странного аттрактора, даже если вначале они были близки. Из-за последнего свойства резко затруднены предсказания точного поведения фазовой кривой внутри странного аттрактора — небольшие отклонения от известной траектории здесь могут повести к непредсказуемым особенностям поведения внутри аттрактора. Именно с этим связаны, например, трудности предсказания погоды в современной метеорологии и, соответственно, опасных природных явлений.

Поведение фазовой кривой в странном аттракторе хотя и весьма непредсказуемо, но тем не менее это поведение отличается от просто случайного, например, от броуновского движения. Дело в том, что случайное поведение системы не может быть в точности воспроизведено во второй раз, в то время как поведение фазовой кривой даже внутри странного аттрактора в точности воспроизводимо при тех же начальных условиях. Чтобы выделить поведение системы внутри странного аттрактора и отличать его от просто случайных блужданий, используется такой специальный термин, как *детерминированный хаос*. Это и есть тип поведения фазовой кривой в странном аттракторе.

Часть фазовой кривой до ее попадания в аттрактор может быть названа *нестационарным* поведением динамической системы. Внутри аттрактора фазовая кривая выражает *стационарное* поведение системы.

Часто эволюция динамической системы описывается не просто дифференциальным уравнением, но уравнением, в которое входит некоторый *характеристический параметр*. Для каждого частного значения такого параметра будет получаться свое дифференциальное уравнение, а значит и своя структура решений этого уравнения.

Для множества структур решений, зависящих от параметра, можно ввести понятие *режима функционирования* динамической системы - как такого множества решений уравнения, которые качественно не отличаются друг от друга. В рамках одного режима функционирования изменение параметра уравнения приводит к непрерывному изменению структуры решения уравнения.

Каждому режиму функционирования присуща своя структура решения со своими аттракторами. Переход от одного режима функционирования к другому при непрерывном изменении характеристического параметра называется *бифуркацией*, что буквально означает «удвоение», так как классическим примером смены режимов стали случаи удвоения положений равновесия.

Значение характеристического параметра, при котором происходит бифуркация, называется *точкой бифуркации*. Здесь наблюдается прямая аналогия с теорией особенностей, как она была описана выше, когда происходит скачкообразное изменение управляемых параметров при непрерывном изменении управляющих параметров системы. Следует только иметь в виду, что выше мы использовали теорию особенностей для описания структуры фазового пространства в рамках *одного* режима функционирования, в то время как понятие «бифуркация» предполагает «теорию особенностей второго порядка», когда рассматриваются переходы между *разными* режимами функционирования динамической системы.

При переходе от одного режима функционирования к другому происходит потеря устойчивости старых аттракторов и возникает устойчивость аттракторов нового режима функционирования.

Бифуркации можно разделить на «мягкие» и «жесткие».

Мягкие бифуркации характеризуются небольшим отличием режимов функционирования, например, достаточной близостью новых аттракторов по отношению к старым.

Жесткие бифуркации, которые после работ французского математика Рене Тома в начале 70-х годов стали называть «катастрофами», характеризуются значительным отличием старого и нового режимов функционирования, например, значительным удалением новых аттракторов от старых в фазовом пространстве системы. В этом случае качественный скачок в изменении поведения системы может быть особенно значительным - «катастрофическим».

В работах Рене Тома все катастрофы были сведены к 7 элементарным, которые носят следующие названия: складка, сборка, ласточкин хвост, бабочка, гиперболическая, эллиптическая и параболическая омбилики.

Таким образом, синергетическая система — это:

открытая система, как правило находящаяся в состоянии, далеком от термодинамического равновесия;

обладает высокой степенью чувствительности к влияниям внешней среды, так как находится в состоянии неустойчивого фазового равновесия и способна выйти из этого состояния под действием малых отклонений (флуктуаций);

из всех флуктуаций системой фиксируется наиболее оптимальная и невероятная флуктуация, способная привести к новому режиму функционирования системы;

новый режим функционирования проявляет себя в виде новой диссипативной структуры, которая постепенно распространяется из некоторой локальной области («ядра»). Этот процесс носит название *нуклеация*;

нуклеация распространяется, части системы обнаруживают кооперативность, и наконец скачком (катастрофически) возникает новая упорядоченная структура;

новая структура выражает максимальную адаптацию системы к изменившимся условиям среды, представленным как управляющие параметры системы или характеристические параметры ее динамики (описывающих эту динамику дифференциальных уравнений).

Здесь мы видим следующие корреляции: по мере удаления от равновесия повышается чувствительность системы к внешней среде, возникает своего рода различимость системы по отношению к нужным флуктуациям, которые отбираются и усиливаются в форме разного рода когерентных (кооперативных) эффектов.

На фоне синергетики как строгой науки рождается сегодня некоторое новое мировоззренческое движение, использующее идеи синергетики далеко за пределами ее конкретной области приложения. Это своего рода «синергетическая парадигма», пытающаяся выразить некоторый новый образ мира в постнеклассической науке XXI века.

О такой «синергетике» говорят, как о «сильной синергетике», поскольку она предполагает равноправное расширение своих методов на область в том числе «сильных систем» — биологических, социальных и даже духовных [26]. В этом случае синергетику как науку, преимущественно рассматривающую «слабые системы» — физические и химические, — можно было бы условно обозначить как «слабую синергетику».

«Слабая» синергетика обеспечена хорошо развитым математическим аппаратом, принципы которого вкратце были описаны выше. В то же время попытки прямо перенести этот аппарат на процессы в человеческом сознании, искусстве, культуре обычно не удаются.

«Сильная» синергетика, провозглашаемая как некоторый новый универсальный язык науки, хотя и обладает, по-видимому, большим потенциалом развития, но большинством ученых воспринимается пока с некоторой осторожностью. Скорее перенесение методов синергетики в гуманитарную область рассматривается сегодня в большей степени на уровне некоторой метафоричности.

Хорошей иллюстрацией такой манеры использования языка синергетики является следующий пример английского математика К.Зимана.

Предположим, что творческий субъект, например ученый, может быть охарактеризован такими параметрами научного творчества, как уровень владения техникой (Т) исследований в некоторой науке, степенью увлеченности (У) и уровнем научных достижений (Д). Последний параметр во многом определяется первыми двумя, т.е. Т и У могут быть представлены как управляющие параметры, Д — как управляемый параметр в некотором трехмерном фазовом пространстве.

Можно предположить, что творческая эволюция ученого может быть описана как движение по некоторой поверхности в фазовом пространстве.

На основе опытных данных можно говорить о трех основных типах творческих личностей:

«нормальные ученые» (если использовать терминологию Т. Куна), отличающиеся небольшой увлеченностью. Их уровень достижений медленно возрастает по мере улучшения техники исследований;

«гении» — ученые, наряду с высокой увлеченностью, постоянно наращивающие технику исследований, что в итоге может привести к резкому скачку их научных достижений;

«маньяки» — личности, сочетающие высокую увлеченность с достаточно низкой техникой, что рано или поздно приводит их к резкому падению научных достижений.

Такого рода типологию, считает Зиман, можно было бы выразить в форме поверхности в фазовом пространстве, имеющей сборку Уитни в качестве особенности (см. рис. 8).

В этом случае эволюция «нормальных ученых» может быть выражена как линия вне особенности, выражающая непрерывную зависимость Д от У и Т. При небольшом У постепенное нарастание Т приводит здесь к столь же постепенному и небольшому нарастанию Д. Траектории «гениев» и «маньяков», в силу высокой увлеченности У, попадают в зону особенности, однако движутся они здесь по-разному. «Гении», при высоком уровне У, начинают повышать Т и пересекают особенность «снизу» (от точки 1 к точке 2) что дает им возможность скачка на верхнюю часть поверхности.

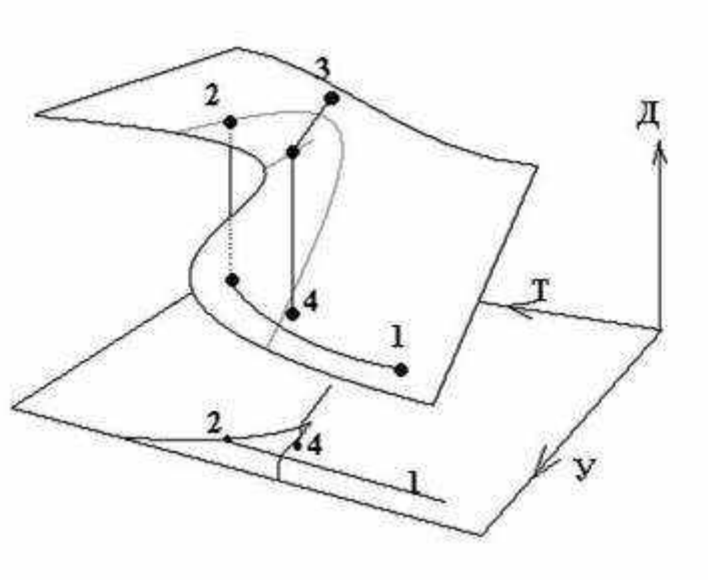


Рис. 8. Творческая эволюция ученого

«Маньяки», наоборот, все более усиливая У и оставаясь примерно на одном уровне Т, попадают в особенность «сверху» (от точки 3 к точке 4), что грозит им падением «вниз», на нижнюю часть поверхности. Хотя в некоторые промежуточные моменты эволюции «гении» и «маньяки» могут быть близки друг другу, но финалы их эволюции в этом случае качественно различны.

Хотя такого рода модели могут быть интересны, но пока их можно воспринимать лишь качественно, без возможности строгого количественного анализа. Трудности количественного анализа в этом случае носят глобальный характер, вытекающий из проблематичности соотношения субъектности и математических структур.

Таким образом, к составным частям современной синергетики можно отнести следующие теории:

1. Статистическая физика в приложении к описанию существенно неравновесных процессов, в рамках которой создаются кинетические модели, определяются параметры, необходимые для ее описания, выявляются

корреляции, крупномасштабные флуктуации, устанавливаются закономерности перехода в состояние равновесия.

2. Неравновесная термодинамика в приложении к изучению стационарных состояний, сохраняющих устойчивость в определенном диапазоне внешних условий, поиск условий самоорганизации, то есть возникновения упорядоченных структур из неупорядоченных при диссипации энергии.

3. Теория динамического хаоса, исследующая сверхсложную, скрытую упорядоченность поведения наблюдаемой системы.

4. Теория катастроф, базирующаяся на нелинейных дифференциальных уравнениях, определяющих состояния, далекие от равновесия и зависящие от входящих параметров. С ее помощью определяются границы устойчивости и изменения структуры состояний.

5. Теория фракталов, изучающая сложные самоподобные структуры, возникающие в результате самоорганизации.

При рассмотрении перспектив развития синергетики можно ожидать, что эта наука окажется полезной при дальнейшем развитии концепции устойчивого развития и создании общей теории безопасности.

Одной из основных технологий постнеклассической картины мира становится методология прогноза кризисов и катастроф современной цивилизации. Прорыв в этой области может быть связан с развитием общей теории безопасности, которая позволит с единой точки зрения взглянуть на сложные системы, в которых возможны редкие, но катастрофические события: стихийные бедствия и техногенные катастрофы, мировые войны и экономические кризисы.

Глава 2. Основные положения общей теории безопасности жизнедеятельности

2.1. Объект и предмет общей теории безопасности жизнедеятельности

Можно выделить два подхода к построению любой теории: классический и междисциплинарный (см. рис. 9).

Рис. 9. Подходы к построению общей теории безопасности

При *классическом подходе* в каждом наборе экспериментальных данных устанавливается некоторая закономерность или порядок, который указывал бы на внутренние отношения между этими данными. Окончательным описанием наблюдаемого порядка является эмпирический закон. Далее определяется, из чего вытекает данный эмпирический закон, или выявляется его основание, то есть строится гипотеза, описывающая механизм действий закона. Если гипотетические предсказания согласуются с разнообразными явлениями, то это означает, что построена новая теория.

В настоящее время сами понятия «естественные и технические науки» и «общественные и гуманитарные науки» демонстрируют неопределенность границ своего существования, что приводит к тому, что линия демаркации между ними достаточно сильно размыта. Кроме того, нарастающие процессы интеграции научного знания приводят к проникновению методов одних наук в другие и заимствованию как методологического, так и понятийного аппарата разных наук, что делает различение социальных, гуманитарных и естественных наук еще более условным.

В современной системе наук выделяют три иерархических уровня [27]:

науки, оказывающие прямое влияние на все другие в силу их масштабности, абстрактности и обобщенности знания (математика, логика, кибернетика, синергетика и др.);

науки об отдельных сторонах реальности, с которыми сталкивается природа, техносфера, человек и общество (естественные, технические, гуманитарные и социальные науки);

науки, существующие в рамках сложившихся «материнских» наук (например, в рамках физики: механика, электродинамика, оптика, термодинамика, статистическая физика, теория относительности, квантовая механика, теория поля и т.д.).

Каждая наука имеет свой объект и предмет. Объект — это то, что изучает наука, в нашем случае — безопасность. Предметом науки являются закономерности, свойства и связи объекта, то есть предметом является одна из сторон, с которых можно подойти к объекту. На рис. 10 категория «безопасность» представлена как объект междисциплинарного исследования, предметом которой являются приложения отдельных наук к проблемам безопасности.

Рис. 10. Безопасность как объект междисциплинарного исследования

В данном случае объекты всех наук совпадают, но каждая из них изучает свои явления, процессы, законы и закономерности безопасности, то есть свой предмет.

Основным видом и формой теоретического знания является *теория* — система логически взаимосвязанных утверждений, объясняющих суть процессов и явлений в той или иной области реальности, такой способ организации знания, который позволяет проникать в сущность явлений и процессов, устанавливать законы и закономерности.

Теория основывается на нескольких исходных положениях, и объясняет действие законов и их взаимосвязей, устанавливая закономерности и предсказывая неопределенности протекания тех или иных процессов и явлений. Не всякая совокупность положений может являться теорией: они должны быть взаимосвязаны, обоснованы, при этом одно из положений должно быть ведущим. Теория формулируется так, чтобы ее положения можно было доказать, а ее утверждения должны быть непротиворечивыми и согласованными с положениями других теорий. Не все теории могут быть аргументированы результатами прямых экспериментальных доказательств (к числу таких теорий относится и общая теория безопасности), и ученые обосновывают их либо по наличию предсказательной силы (трактуя отдельные факты и явления как следствия проявления законов, обосновываемых в теории), либо ссылаясь на отсутствие фактов, опровергающих утверждения теории. Теория может быть различной степени обобщенности и абстрактности, в том числе, общей и междисциплинарной.

При этом сформулированная теория должна содержать:

исходные принципы и формулировки законов;

основные системообразующие категории и понятия;

схему (модель) основных связей изучаемой реальности (от фактов до теоретических обобщений);

правила вывода новых знаний из основных положений теории.

2.2. Принципы и закономерности общей теории безопасности жизнедеятельности

В настоящее время используется много теоретических схем, отражающих разнообразные задачи безопасности. Появление глобальных угроз, изменяющих последствия разрозненных решений частных задач, породило потребность в обобщениях. Таким образом, *общая теория безопасности* должна служить для одновременной реализации обществом *двух путей* обеспечения безопасности в сложившихся в настоящее время условиях [28]:

во-первых, через формирование целостного в**и**дения обществом всего современного комплекса проблем безопасности, включая глобальные, что позволит выстроить полноценный комплекс систем обеспечения безопасности;

во-вторых, через создание общей теоретической базы для частных теорий безопасности, что позволит при решении локальных практических задач учитывать последствия принятых решений на всех уровнях, включая глобальный.

Безопасность обеспечивается защитой от непосредственных угроз и предотвращением потенциальных опасностей с помощью преобразования окружающей среды. При этом, результативность предотвращения определяет уровень безопасности общества, а результативность защиты позволяет реализовать достигнутый обществом уровень безопасности.

Действия человека, благодаря его разуму, отличаются прогнозированием развития событий, оценкой последствий своих действий, анализом причин опасностей, выбором наиболее эффективного варианта действий по обеспечению своей безопасности. Кроме непосредственного противодействия обнаруженным угрозам человек стремится ликвидировать причины потенциальных опасностей. В результате в число *мер безопасности* входят как *защита* от угроз, так и *предотвращение* потенциальных опасностей с помощью преобразования окружающей среды. При этом, под за***щитой будем понимать меру безопасности, заключающуюся в парировании проявившихся угроз, а под предотвращением — меру безопасности, заключающуюся в ликвидации причин возникновения опасностей.***

Деление мер безопасности на защиту и предотвращение иллюстрируется схемой, представленной на рис. 11.

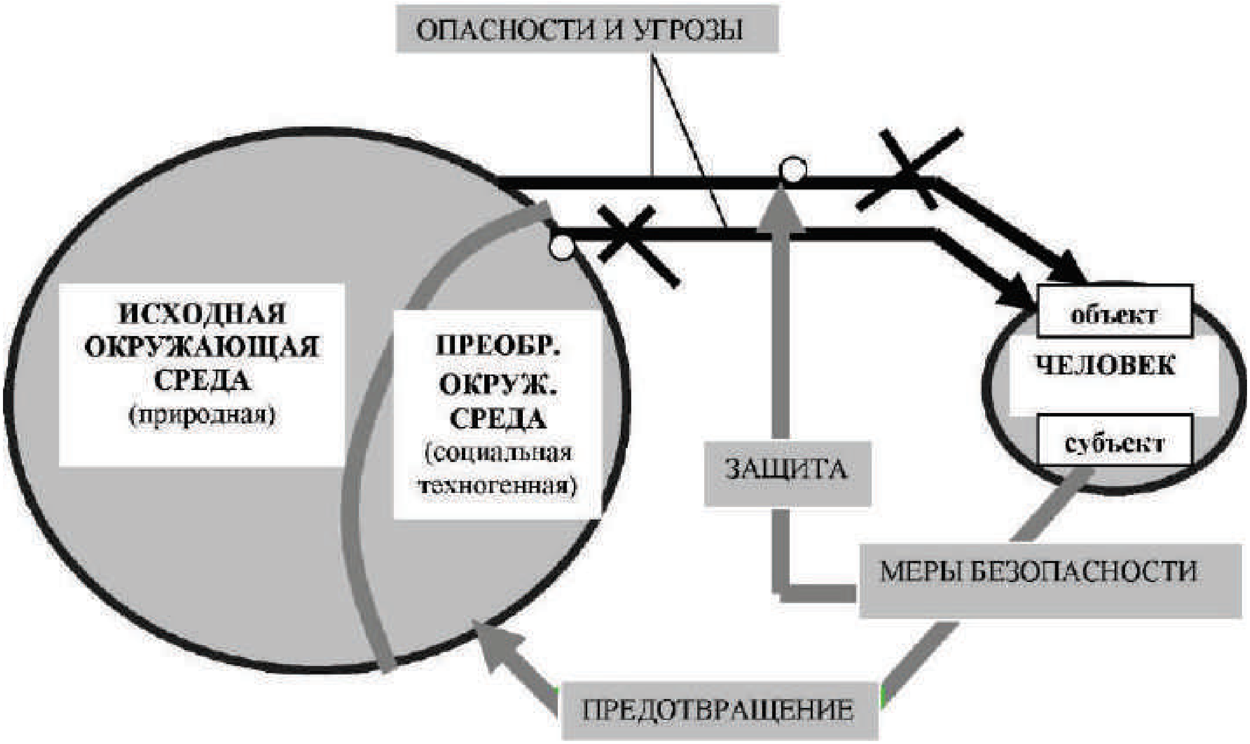


Рис. 11. Каноническая схема общей теории безопасности

Она может считаться **канонической схемой** общей теории безопасности, так как на ней отображены основные взаимосвязи между объектами и предметами исследования этой теории. Обобщённый *человек* здесь представляет собой и *объект,* и *субъект* безопасности, а *окружающая среда,* несущая человеку *опасности* и *угрозы,* состоит из *исходной* (природной) среды и среды, *преобразованной* человеком (социальной и техногенной).

Взаимосвязи между человеком и окружающей средой формируют *два контура* обеспечения безопасности. Первым является ***контур защиты.*** В этом контуре субъектами безопасности только реализуется достигнутый сообществом уровень безопасности. Достигается же этот уровень в ***контуре предотвращения,*** отражающем преобразовательную жизнедеятельность человека. В контуре предотвращения присутствуют *все сферы жизнедеятельности* современного цивилизованного общества. Вследствие этого человечество в целом, как и составляющие его сообщества, являются субъектами своей безопасности, и все сферы жизнедеятельности общества должны быть включены в поле зрения общей теории безопасности. Следует подчеркнуть, что именно в контуре предотвращения формируются те глобальные угрозы, которые стали причиной построения общей теории безопасности.

К концу XX в. сменилась научная парадигма и изменилось научное мировоззрение: мир предстал хаотическим, катастрофическим, непредсказуемым. Классические представления Лапласа об однозначно детерминированном и предсказуемом мире, и представления Эйнштейна, что «Бог не играет в кости», были полностью разрушены. В изменившейся картине мира однозначная детерминированность оказалась частным случаем, а предсказуемость — принципиально ограниченной. В прежние времена наука рассматривала главным образом устойчивость, равновесие, порядок, замкнутые системы и линейные зависимости, переход же к информационным технологиям привел к появлению новых подходов.

Новая обширная область междисциплинарных исследований, которую принято именовать нелинейной наукой, включает, прежде всего, нелинейную термодинамику и теорию катастроф. Нелинейная неравновесная термодинамика порождает общие методы рассмотрения процессов самоорганизации, которые выходят за границы только тепловых процессов. Еще более ясно это видно в математическом аппарате общей теории безопасности — математической теории катастроф.

Глава 3. Математическая теория катастроф как научная основа исследований чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера

3.1. Основные положения современной теории катастроф

Теория катастроф — часть качественной теории сложных нелинейных систем. Её основой является теория особенностей гладких (дифференцируемых) отображений, сформировавшаяся на стыке топологии и математического анализа, и являющаяся обобщением задач на экстремум. Элементарная теория катастроф сводит огромное многообразие ситуаций к небольшому числу стандартных схем, которые можно детально исследовать. Анализ качественного поведения нелинейных динамических систем при изменении описывающих их параметров, позволяет описывать состояния, далёкие от равновесия, а также предсказывать резкую смену этих состояний.

Теория катастроф позволяет прогнозировать неустойчивости различных систем. Такое название она получила потому, что потеря устойчивости может быть катастрофична, даже если не приводит к гибели или разрушению системы, а лишь обуславливает переход к иной траектории развития.

Основными предположениями теории катастроф являются следующие:

система является динамической, то есть её состояние меняется во времени;

система стремится сохранять свое состояние как можно дольше;

текущее состояние системы зависит от того, каким образом система пришла в это состояние;

траектории системы необратимы, то есть система, пережив бифуркацию, не может вернуться в исходное состояние.

Теория катастроф исследует эволюцию сложных динамических систем, под которыми понимаются нелинейные системы, свойства которых не сводимы к свойствам компонентов и проявляют вновь возникающие, эмерджентные (*emerge* — возникать) черты.

Сложные динамические системы включают флуктуирующие, случайным образом изменяющиеся компоненты. Отдельные флуктуации или их сочетания в системе с обратной связью, усиливаясь, вызывают разрушение прежнего состояния системы — происходит катастрофа. Случайные воздействия в точке бифуркации могут подтолкнуть систему на новый путь развития. После же выбора одного из возможных путей, траектории развития, действует однозначный детерминизм — развитие системы предсказуемо до следующей точки бифуркации.

При анализе поведения динамической системы в первую очередь обращают внимание на её устойчивость, т.е. на реакцию динамической системы на малое возмущение её состояния. Если сколь угодно малые изменения состояния системы начинают нарастать во времени, система неустойчива. Если же малые возмущения затухают со временем, система устойчива.

Решение дифференциального уравнения называется устойчивым, если поведение решений с близким начальным условием «не сильно отличается» от поведения исходного решения. Существуют различные критерии устойчивости: устойчивость по Ляпунову, асимптотическая устойчивость, экспоненциальная и т.д.

Теория катастроф в основном изучает статические неустойчивости, т.е. только те, которые исключительно связаны с действием потенциальной энергии.

Понятие устойчивости необходимо для описания сложной, многокомпонентной системы, поскольку её развитие сопровождается потерей устойчивости некоторыми режимами её функционирования и рождением новых, устойчивых. Одни структуры гибнут, рождаются новые, которые видоизменяются, совершенствуются и затем вновь уступают место новым. Изменения могут накапливаться плавно, а могут происходить скачком в виде катастроф. При фазовых переходах формирование новых структур сопровождается потерей устойчивости (даже разрушением) предшествующих. Система переходит из одного режима функционирования в другой режим. Старый режим потерял устойчивость, возник новый устойчивый режим, который может наследовать некоторые свойства предыдущего, а может быть и резко отличным. В таких случаях говорят о бифуркациях динамических систем.

Теория бифуркаций — один из разделов теории гладких динамических систем. Термин «бифуркация» применяется для обозначения качественных изменений рассматриваемых объектов при изменении параметров, от которых эти объекты зависят. В математике и физике существует понятие грубости (структурной устойчивости системы): при малом изменении параметра грубая система хоть и изменяет в деталях режим функционирования, но не принципиально. Для грубых систем переход через точку бифуркации означает смену одного структурно устойчивого режима на другой. При этом в точке бифуркации система не является грубой: малое изменение параметра в ту или иную сторону приводит к резким изменениям состояния.

Возникновение диссипативных структур носит пороговый характер. Неустойчивость и пороговый характер самоорганизации связаны с нелинейностью дифференциальных уравнений, описывающих систему. Известно, что для линейных уравнений существует одно стационарное состояние, для нелинейных — несколько. Поэтому пороговый характер самоорганизации связан с переходом из одного стационарного состояния в другое. Потеря системой устойчивости, есть катастрофа, т.е. скачкообразное изменение, возникающее при плавном изменении внешних условий.

Для описания эволюции нелинейных систем во времени основным математическим аппаратом являются нелинейные дифференциальные уравнения. Они задают зависимость скорости изменения каждой переменной от значений самих переменных. Нелинейные уравнения, как правило, не решаются аналитически, поэтому для их исследования используют численные методы. Существует, однако, второй способ описания динамики нелинейных систем: с помощью итерационных уравнений, которые определяют закон изменения переменных в некоторые избранные, дискретные моменты времени. Такие уравнения называют отображениями, когда каждому элементу некоторого заданного множества X ставится в соответствие вполне определённый элемент другого заданного множества Y.

Проще всего представить себе такой способ описания в ситуации, когда в системе имеется некоторый ритм, например, период внешнего воздействия T. Тогда можно фиксировать дискретные значения переменных точно в соответствии с этим ритмом, т.е. в моменты времени T, $2T$, $3T$ и т.д. Этот способ описания динамики не уступает по общности дифференциальным уравнениям, но гораздо проще для исследования.

Поскольку в точках катастроф даже незначительные движения могут повлиять на ход развития, то нужно определить, далеко ли от такой точки находится система. Формально для этого следует изучить зависимость системы от внешних параметров в математических моделях, однако нередко экспериментатор не знает, каким уравнением описывается развитие системы. Тем не менее, существуют признаки того, что изучаемая система находится вблизи точки катастрофы (флаги катастроф):

наличие нескольких устойчивых состояний;

существование неустойчивых состояний, из которых система выводится слабыми воздействиями;

возможность быстрого изменения состояния системы при малых изменениях внешних условий;

необратимость системы, то есть невозможность вернуться к прежним условиям;

гистерезис, то есть поведение исследуемой системы во многом определяется ее предысторией.

Теперь остановимся на роли теории особенностей гладких отображений в теории катастроф. Под особенностью будем понимать нарушение гладкости функции при каких-то значениях аргументов. В таких точках значения функции могут изменяться скачкообразно (происходят бифуркации). В простейшем случае особенности гладких отображений представляют собой функции двух переменных $F(x, y)$, которые в трёхмерном пространстве изображаются некоторыми поверхностями над плоскостью XY. Если поверхность образует складки так, что перпендикуляры к плоскости XY пересекают ее два или более раза, то функция неоднозначна и может испытывать скачки.

Теория особенностей гладких отображений обобщает исследование экстремумов функций на случай нескольких функций любого числа переменных. Критическая точка функции — точка, в которой все первые частные производные равны нулю; критическая точка называется невырожденной, если определитель её матрицы отличен от нуля.

Описание системы, претерпевающей бифуркации включает и детерминистический и вероятностные элементы, так как в окрестности точек бифуркации существенную роль играют флуктуации и именно они выбирают ветвь, которой далее будет следовать система. Для этих систем нельзя точно указать ход их эволюции — можно лишь предсказать вероятность возможных сценариев развития.

Теория катастроф анализирует критические точки потенциальной функции, то есть точки, где не только первая производная функции равна нулю, но и равны нулю же производные более высокого порядка. Динамика развития таких точек может быть изучена при помощи разложения потенциальной функции в рядах Тейлора посредством малых изменений входных параметров. Если потенциальная функция зависит от трёх или меньшего числа активных переменных, и пяти или менее активных параметров, то в этом случае существует всего семь обобщённых структур описанных геометрий бифуркаций. Сегодня эти семь фундаментальных типов катастроф известны под именами, которые им дал Рене Том [16].

1). Катастрофа типа «Складка» ($x^3 + \alpha x$) (см. рис. 12).

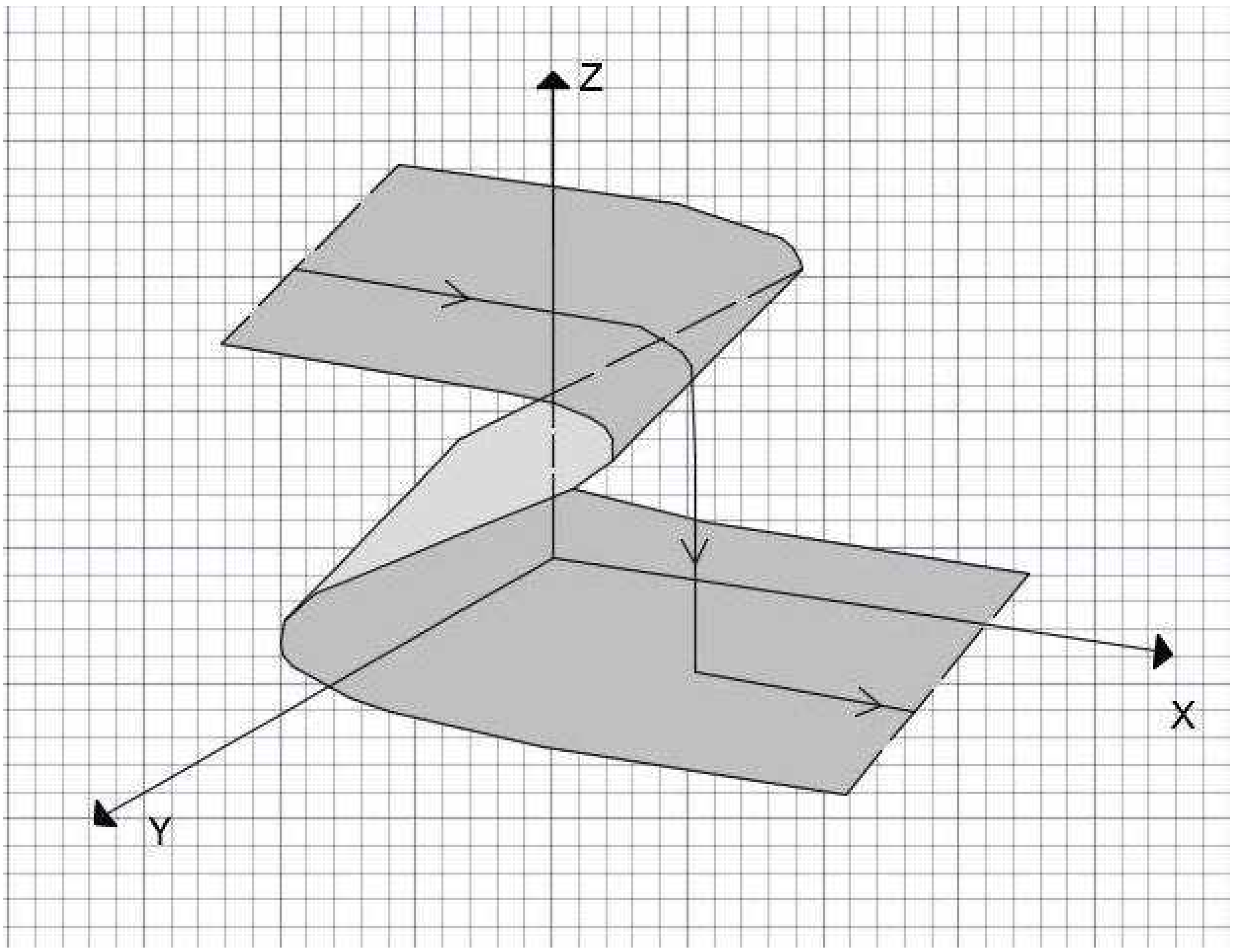


Рис. 12. Катастрофа типа «Складка»

Гладкость этой поверхности не гарантирует, что при плавном изменении одной переменной, две другие тоже меняются плавно.

2). Катастрофа типа «Сборка» ($x^4 + \alpha_1 x^2 + \alpha_2 x$).

В катастрофе «сборка» (см. рис. 13) есть как траектории без перескока, с плавным развитием, так и со скачком в развитии.

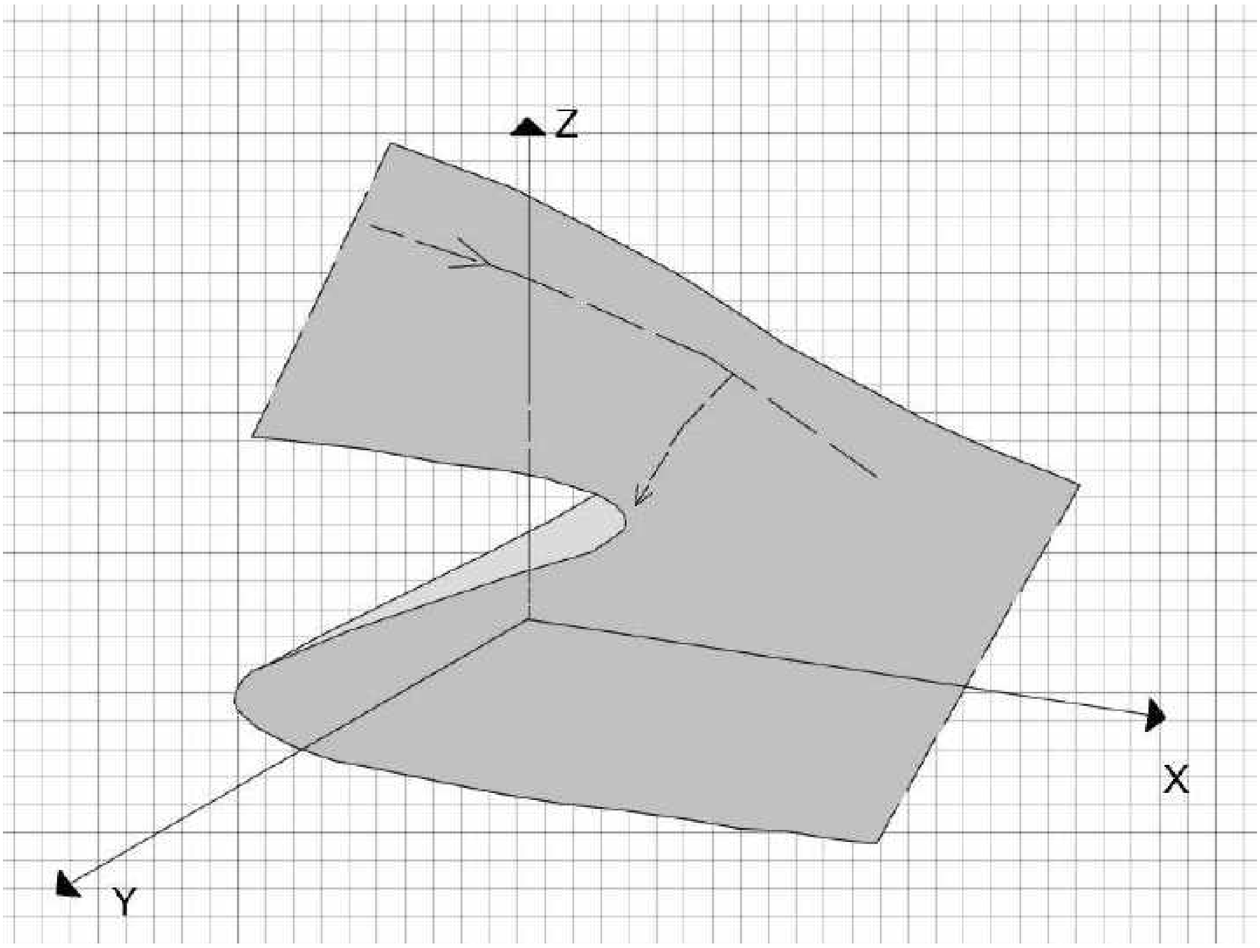


Рис. 13. Катастрофа типа «Сборка»

3). Катастрофа типа «Ласточкин хвост» ($x^5 + \alpha_1 x^3 + \alpha_2 x^2 + \alpha_3 x$).

Управляющее пространство в данном типе катастроф является трёхмерным. Каскад бифуркаций в фазовом пространстве состоит из трёх поверхностей бифуркаций типа «свёртки», которые встречаются на двух кривых бифуркаций с точками возврата, которые в конечном итоге встречаются в одной точке, представляющей собой бифуркацию типа «ласточкин хвост» (см. рис. 14).

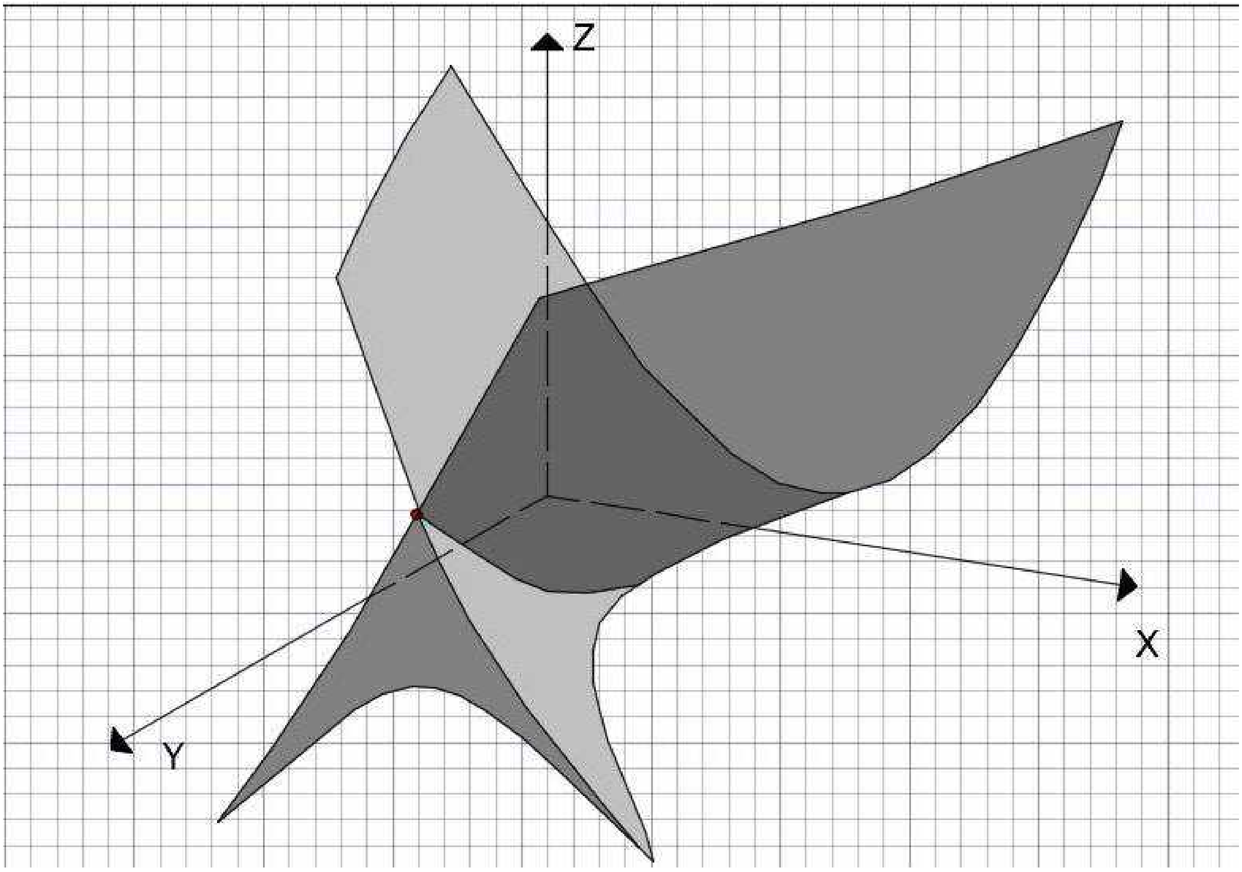


Рис. 14. Катастрофа типа «Ласточкин хвост»

По мере прохождения значений параметров по поверхностям областей бифуркаций типа «свёртка» пропадает один минимум и один максимум потенциальной функции. В области бифуркаций с точкой возврата два минимума и один максимум замещаются одним минимумом; за ними бифуркации типа «свёртка» исчезают. В точке ласточкиного хвоста два минимума и два максимума встречаются в одном значении переменной x. Для значений $a_1 > 0$ за ласточкиным хвостом существует либо одна пара (минимум, максимум), либо не существует вообще никаких бифуркаций. Это зависит от значений параметров a_2 и a_3. Две поверхности бифуркаций типа «свёртка» и две линии бифуркаций с точками возврата встречаются при $a_1 < 0$, а потому исчезают в самой точке ласточкиного хвоста, заменяясь одной поверхностью бифуркаций типа «свёртка».

4). Катастрофа типа «Бабочка» ($x^6 + \alpha_1 x^4 + \alpha_2 x^3 + \alpha_3 x^2 + \alpha_4 x$).

В зависимости от значений параметров потенциальная функция может иметь три, два или один локальный минимум, причём все минимумы разделены областями с бифуркациями типа «свёртка». В точке с наименованием «бабочка» (см. рис. 15) встречаются три различные пространства (трёхмерных плоскости) таких бифуркаций типа «свёртка», две поверхности бифуркаций с точками возврата и кривая бифуркаций типа «ласточкин хвост».

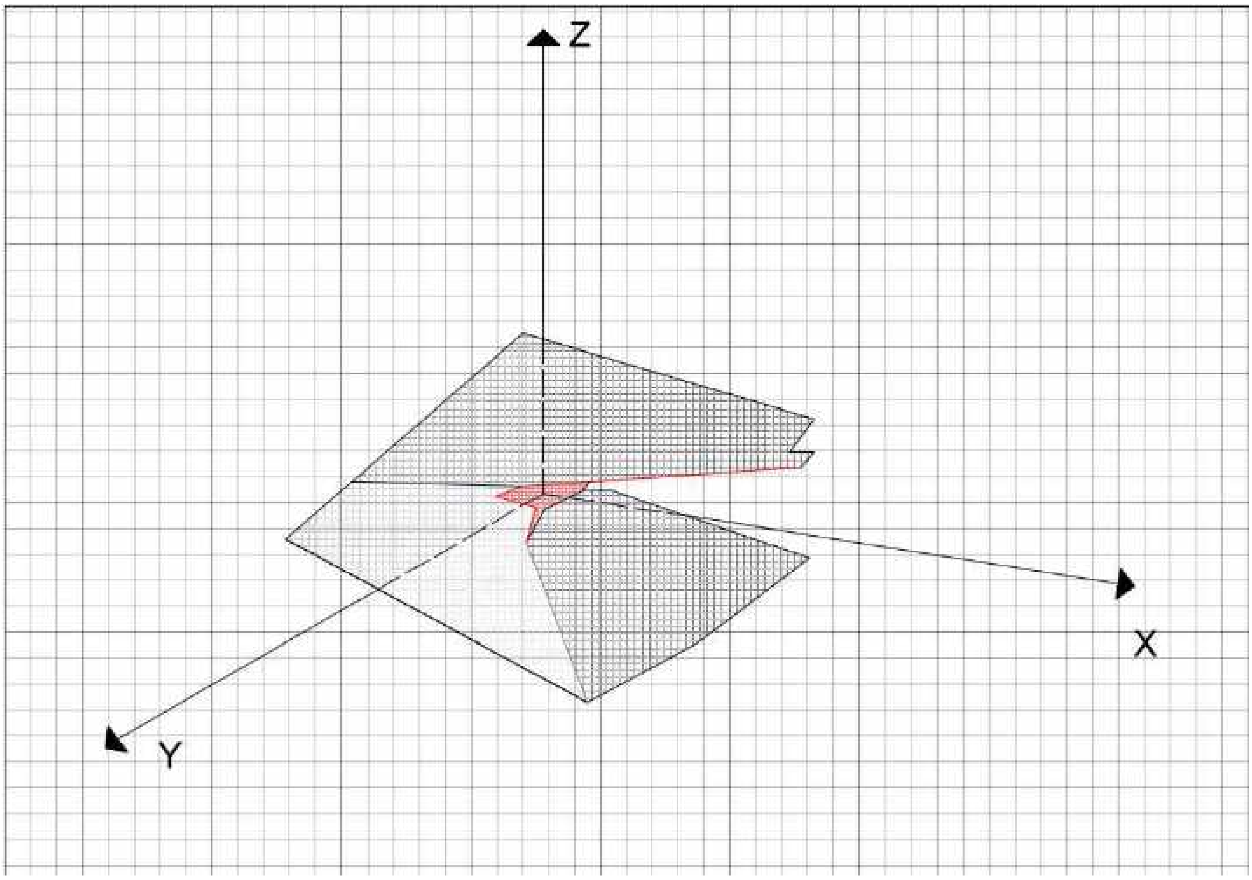


Рис. 15. Катастрофа типа «Бабочка»

Все эти бифуркации пропадают в одной точке и преобразуются в простую структуру с точкой возврата тогда, когда значение параметра становится положительным.

Омбилические катастрофы являются примерами катастроф второго порядка (см. рис. 16 — рис. 18), которые тесно связаны с геометрией почти сферических поверхностей.

5). Гиперболическая омбилика $(x_1^2 + x_2^2 + \alpha_1 x_1 x_2 - \alpha_2 x_2 - \alpha_3 x_1)$.

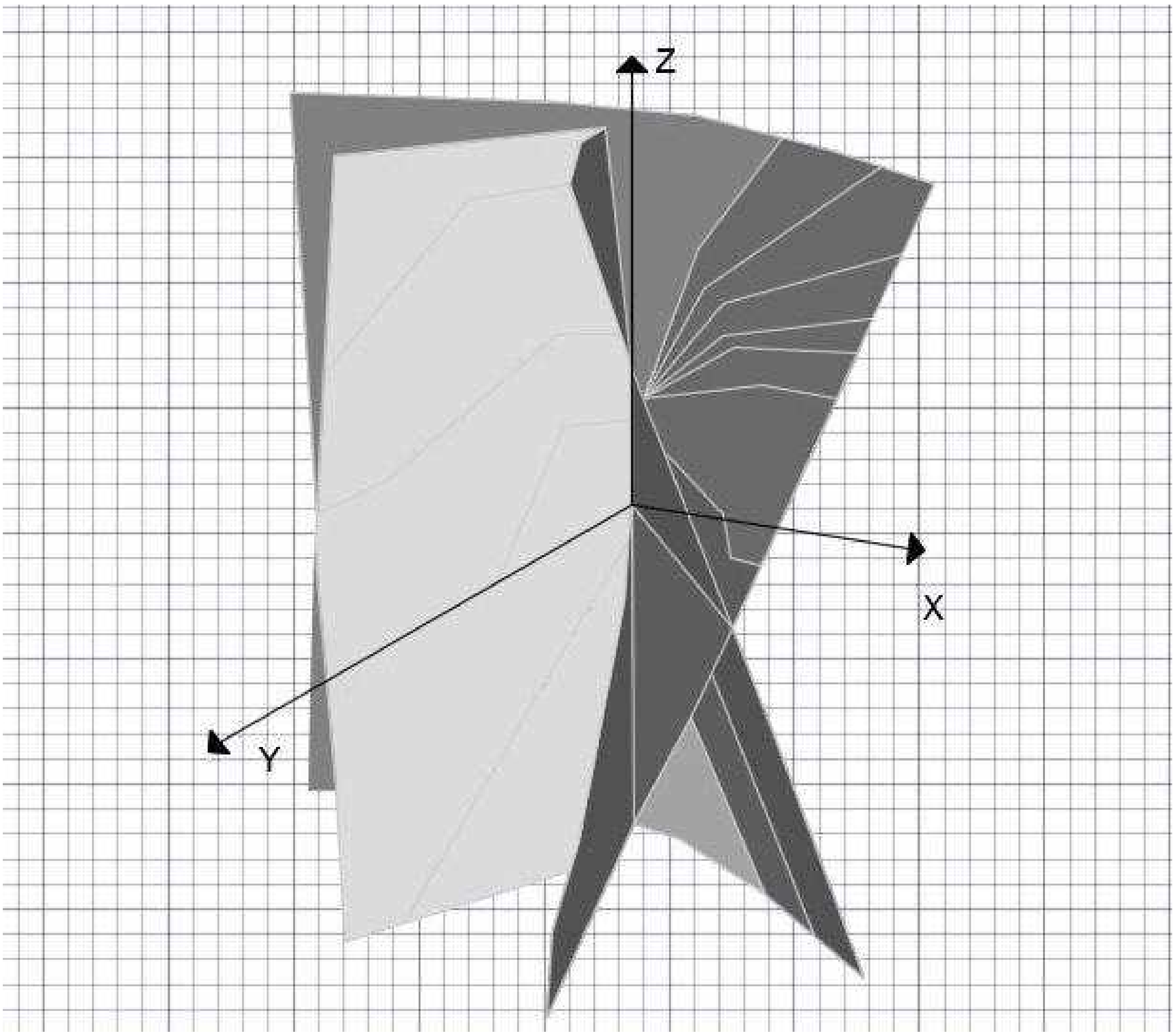


Рис. 16. Кат аст рофа т ипа «Гиперболическая омбилика»

б). Эллипт ическая омбилика $(x_2^2 - 3x_2^2 x_1^2 + \alpha_1(x_1^2 + x_2^2) - \alpha_2 x_2 - \alpha_3 x_1)$.

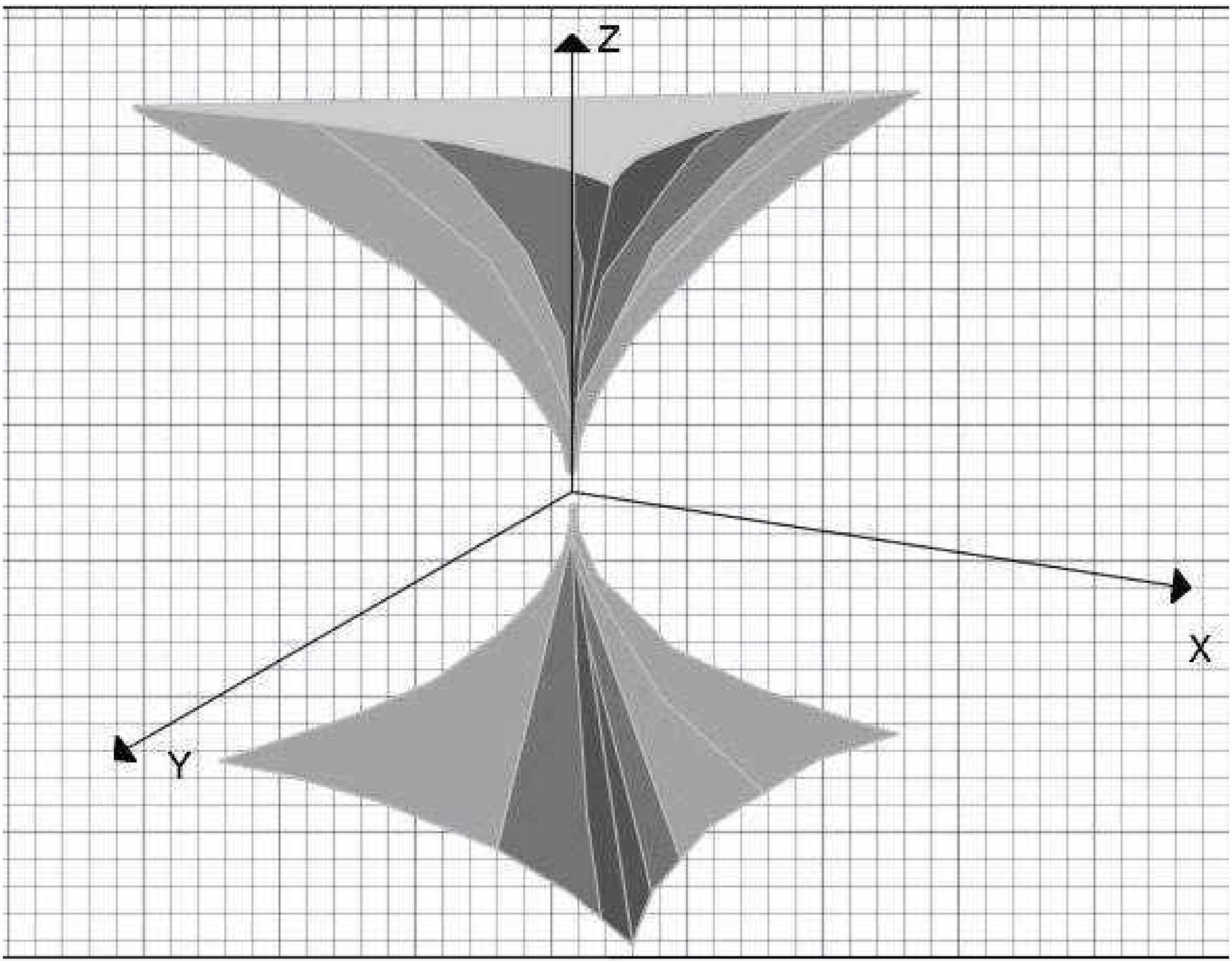


Рис. 17. Кат аст рофа т ипа «Эллипт ическая омбилика»

7) Параболическая омбилика $(x_2^2 x_1 + x_1^2 + \alpha_1 x_2^2 + \alpha_2 x_1^2 - \alpha_3 x_2 - \alpha_4 x_1)$.

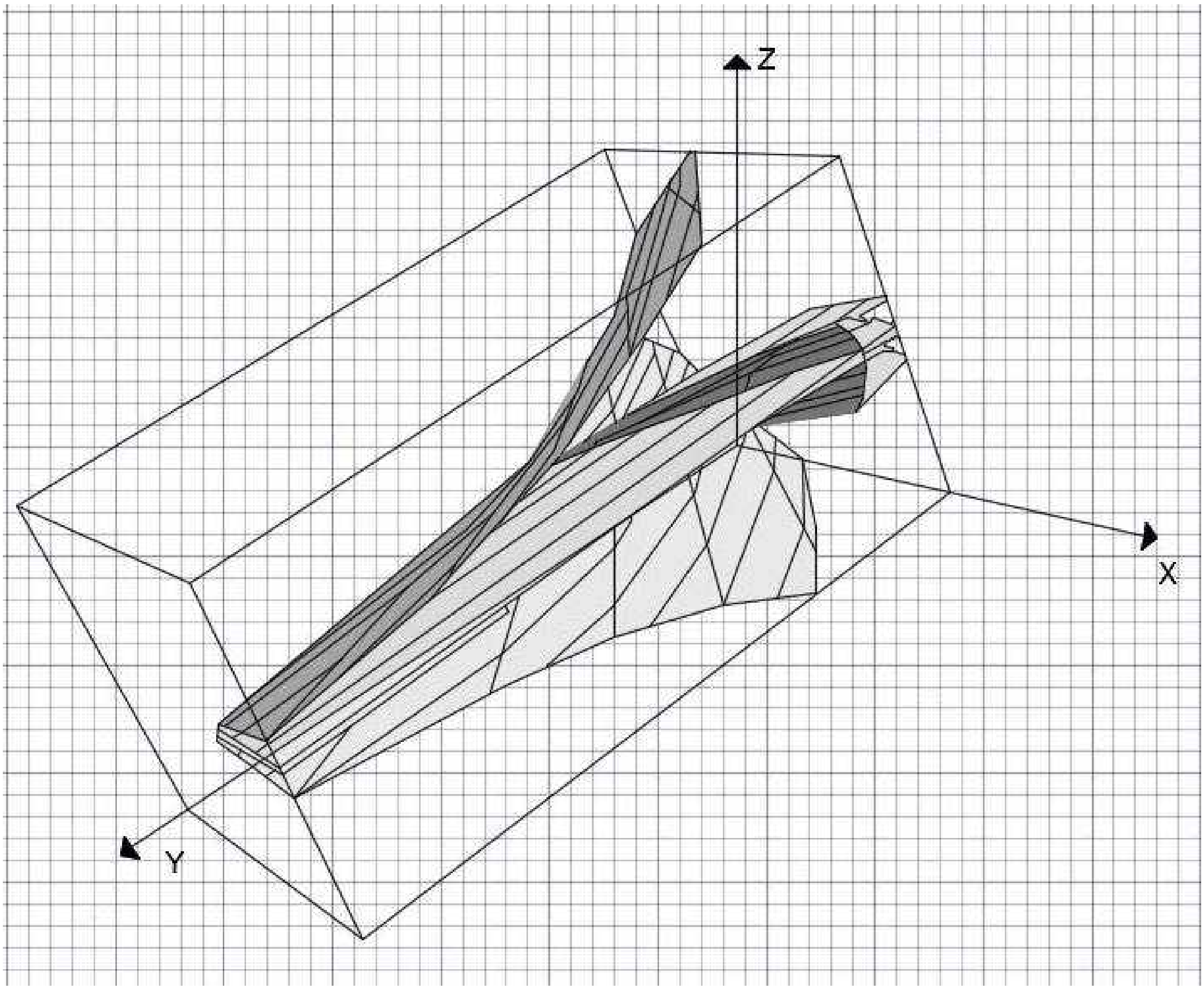


Рис. 18. Катастрофа типа «Параболическая омбилика»

Теория катастроф является универсальным методом для исследования скачкообразных переходов, разрывов, внезапных качественных изменений. Существуют множество публикаций, в которых теорию катастроф применяют к исследованиям природных и техногенных чрезвычайных ситуаций.

3.2. Исследование чрезвычайных ситуаций природного характера методами теории катастроф

Рассмотрим исследование чрезвычайных ситуаций природного характера методами математической теории катастроф на примере землетрясений.

Согласно определению [29], землетрясение — это колебания поверхности Земли во время синергетических подвижек относительно друг друга отдельных элементов геологической среды различного масштаба, происходящих вдоль активных разломов. Сильные землетрясения являются типичными катастрофами, потому что возникают внезапно и приводят к человеческим потерям и большому экономическому ущербу.

Катастрофа определяется как резкое, скачкообразное изменение состояния исследуемой системы, возникающее при плавном изменении её внешних управляющих параметров. В настоящее время теория катастроф — это хорошо разработанный раздел математического анализа, основанный на теории особенностей гладких отображений *Х.* Уитни и теории бифуркаций А. Пуанкаре и А.А. Андронова. Название введено Р. Томом в 1972 году. Иногда катастрофой называют потерю устойчивости динамической системы. Поэтому теория катастроф должна определить область существования катастрофической системы и границы её устойчивости. Главная задача теории — получение нормальной формы исследуемого объекта в виде дифференциального уравнения или отображения в окрестности особой точки катастрофы, которое и описывает поведение системы при переходе через эту точку. Успехи теории катастроф делают актуальной задачу применения методов этой теории и для анализа процессов возникновения землетрясений.

Рассмотрим сейсмически активный разлом, один из берегов которого движется относительно другого со скоростью v_0 [30].

Это движение может возникнуть во время подвижки при образовании нового разлома, активизации старого разлома или существовать постоянно в виде очень медленного крипа, как это имеет место в сейсмофокальных зонах субдукции Заварицкого-Беньёфа. На рис. 19 показана соответствующая геомеханическая модель: блок с массой m лежит на движущемся со скоростью v_0 основании.

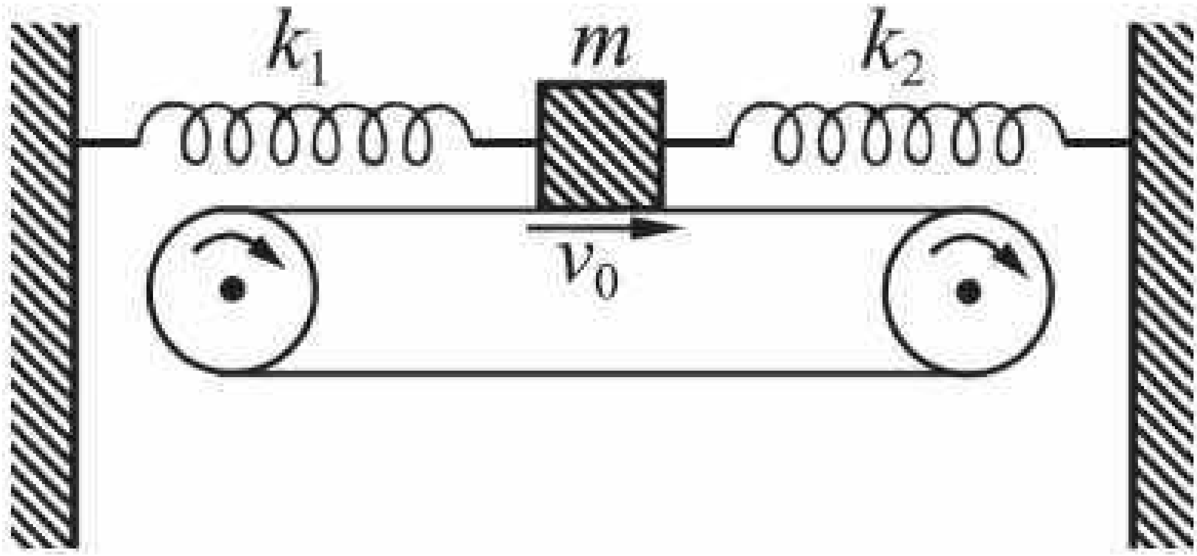


Рис. 19. Геомеханическая модель движ ения вдоль геологических разломов

Упругое взаимодействие с соседними блоками в разломе показано в виде пружин с жесткостью k_1 и k_2. Обозначая результирующий коэффициент упругости буквой k и смещение блока буквой x, запишем уравнение движения блока в виде

$$mx_{tt} + hx_t + kx = F, \qquad (1)$$

где индексом t обозначены производные по времени t. Сила трения F, действующая на блок, зависит от многих факторов, рассмотренных в работе [31]. Наиболее существенной с точки зрения колебаний является зависимость этой силы от относительной скорости $V = v_0 - x_t$, обнаруженная Шарлем Кулоном [32]. Её можно описать с помощью закона трения

$$F = \mu G, \qquad (2)$$

в котором $G = mg$ — вес блока. Коэффициент трения μ зависит от скорости V в соответствии с гиперболическим законом

$$\mu = \frac{p-b}{1+\beta V} \qquad (3)$$

Он был предложен Боше-Петровым по результатам многочисленных экспериментов с тормозами железнодорожных составов весом несколько тысяч тонн, причём Н.П. Петров составил для определения коэффициентов p, b и β специальные таблицы [32]. Формула Боше-Петрова была проверена на данных лабораторных экспериментов с блоками горных пород, опубликованных в монографии [34]. Они показаны на рис. 20 кружками, квадратиками, треугольниками, ромбами с указанием авторов измерений. Кривая 1 была рассчитана по формуле (3) при $p = 0{,}620$, $b = 0{,}540$, $\beta = 0{,}166$ с/микрометр, а кривая 2 — при $p = 0{,}625$; $b = 0{,}585$, $\beta = 0{,}30$ с/микрометр. Разброс точек измерений связан с зависимостью коэффициентов в формуле (3) от наличия смазки, температуры, электропроводности и других факторов. Тем не менее, диапазон изменения коэффициентов p, b, β в лабораторных опытах оказался небольшим. Из рисунка видно, что, слегка варьируя эти коэффициенты можно добиться хорошего соответствия формулы (3) с данными измерений. Таким образом, формула Боше-Петрова (3) позволяет решить задачу определения колебаний блока в активном разломе в моменты времени соответствующие движению одного края разлома, относительно другого.

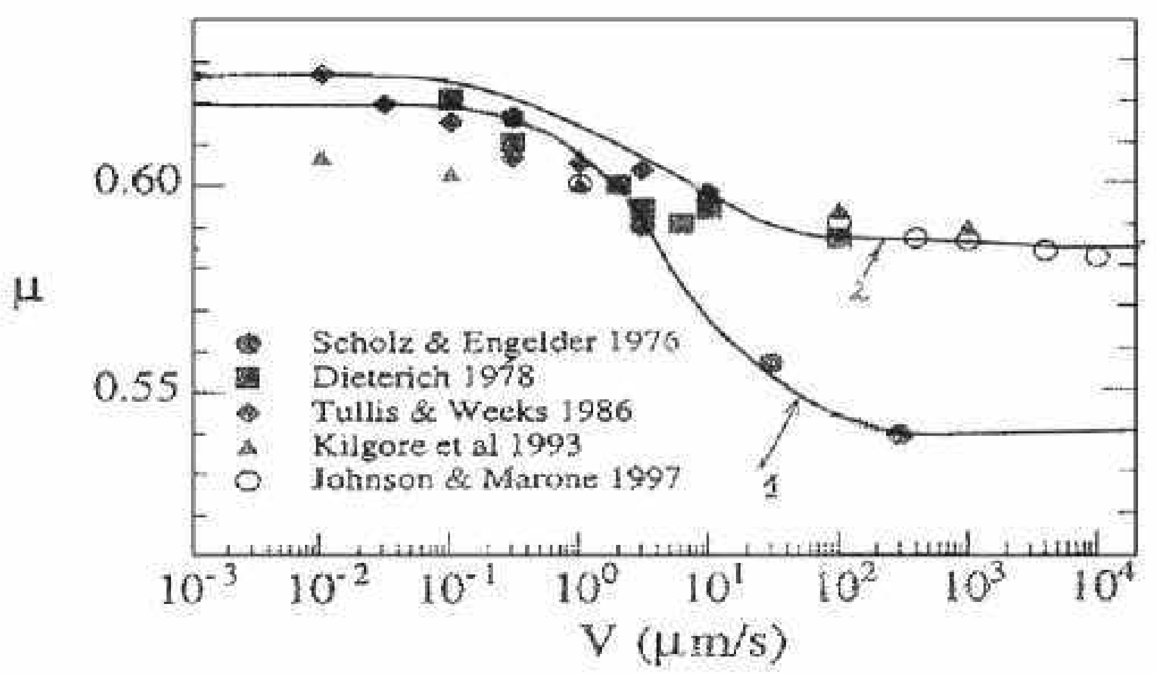


Рис. 20. Результаты экспериментальных данных с блоками горных пород

Введем безразмерное время $\tau = \omega_0 t$, частоту собственных колебаний блока $\omega_0 = (k/m)^{1/2}$, безразмерное демпфирование колебаний $\delta = h/(m\omega_0)$, безразмерную относительную скорость $W = \beta V$, масштаб силы $F_* = m\omega_0/\beta$ и безразмерную координату $\xi = x\omega_0\beta$. Тогда уравнение (1) можно записать, учитывая формулы (2), (3) в безразмерном виде:

$$\xi_{\tau\tau} + \delta\xi_\tau + \xi = bN + \frac{rN}{1+W} \quad (4)$$

Здесь $r = p - b$, $N = G/F_*$ — безразмерная нагрузка. Введем новую координату $y = \xi - bN$. Тогда уравнение (4) принимает вид

$$y_{\tau\tau} + \delta y_\tau + y = \frac{rN}{1+W} \quad (5)$$

Относительную скорость $V = v_0 - x_t$ можно считать малой величиной, так как она является разностью двух близких по порядку величин v_0 и x_t. Поскольку величина β также меньше единицы (в приведенных выше примерах β изменяется от 0,1 до 0,6), то малой величиной является и безразмерная относительная скорость $W = \beta(v_0 - x_t) = s - y_t$, *где* $s = \beta v_0$ —

безразмерная скорость движения края разлома. Таким образом, естественно разложить функцию трения в ряд Тейлора по малому параметру W

$$(1 + W)^{-1} = 1 - W + W^2 - W^3 + W^4 - W^5 + ... \quad (6)$$

Подставляя разность $W = s - y_\tau$ в формулу (6) и уравнение (5) получим

$$y_{\tau\tau} + y = \varepsilon\kappa_0 + \varepsilon\left[\left(к_1 - \frac{\delta}{\varepsilon}\right) y_\tau + к_2 y_\tau^2 + к_3 y_\tau^3 + к_4 y_\tau^4 + к_5 y_\tau^5\right] \quad (7)$$

где коэффициенты

$$\kappa_0 = 1 - s + s^2 - s^3 + \quad (8)$$

$$\kappa_1 = 1 - 2s + 3s^2 - 4s^3 + 5s^4, \quad (9)$$

$$\kappa_2 = 1 - 3s + 6s^2 - 10s^3, \quad (10)$$

$$\kappa_3 = 1 - 4s + 10s^2, \quad (11)$$

$$\kappa_4 = 1 - 5s, \quad (12)$$

$$\kappa_5 = 1, \quad (13)$$

зависят только от скорости края разлома s. Наконец, заменяя y на новую переменную $z = y - \varepsilon\kappa_0$, приводим уравнение (7) к нормальной форме

$$z_{\tau\tau} + z = \varepsilon\left[\left(к_1 - \frac{\delta}{\varepsilon}\right) z_\tau + к_2 z_\tau^2 + к_3 z_\tau^3 + к_4 x_\tau^4 + к_5 z_\tau^5\right]. \quad (14)$$

Уравнение (14) существенно нелинейно и выписать его точное решение затруднительно. Тем не менее, мы можем его решить приближенно, с достаточной для практики точностью, используя метод медленно меняющихся амплитуд. Согласно этому методу решение уравнения (14) записывается в виде

$$z = \alpha(\tau)\cos[\tau + \theta(\tau)]. \quad (15)$$

Входящие в (15) амплитуда $\alpha(\tau)$ и фаза $\theta(\tau)$ должны удовлетворять двум уравнениям

$$\alpha_\tau = -\varepsilon\sin(\tau + \theta) f(z_\tau), \quad (16)$$

$$\alpha\theta_\tau = -\varepsilon\cos(\tau + \theta) f(z_\tau), \quad (17)$$

в которых введено обозначение

$$f(z_\tau) = \left(к_1 - \frac{\delta}{\varepsilon}\right) z_\tau + к_2 z_\tau^2 + к_3 z_\tau^3 + к_4 x_\tau^4 + к_5 z_\tau^5 \quad (18)$$

После осреднения уравнений (16), (17) по периоду 2π, в течение которого амплитуда и фаза почти не меняются, получим уравнение для амплитуды

$$\frac{d\alpha}{d\tau} = C_o\alpha + \lambda\alpha^3 + e\alpha^5, \tag{19}$$

с коэффициентами

$$\mathrm{C_o} = \frac{\varepsilon}{2}\left(\kappa_1 - \frac{\delta}{\varepsilon}\right);\ \lambda = \frac{3\varepsilon}{8}\kappa_3;\ \mathrm{e} = \frac{5\varepsilon}{16}\kappa_5 \tag{20}$$

Уравнение для фазы после осреднения приводит к решению q = const, то есть фаза колебаний не меняется со временем. Произвольность фазы позволяет считать ее степенью свободы данной динамической системы.

Уравнение (19) впервые получено Л.Л. Ландау при изучении гидродинамической катастрофы: скачкообразного перехода от плавного, ламинарного течения к бурному турбулентному потоку [33]. В рассматриваемом случае оно описывает сейсмически активный разлом, как динамическую систему

$$\frac{d\alpha}{d\tau} = -\frac{dU}{d\alpha}, \tag{21}$$

где потенциал U есть

$$U = \frac{C_o}{2}\alpha^2 + \frac{\lambda}{4}\alpha^4 + \frac{e}{6}\alpha^6. \tag{22}$$

В теории катастроф важно найти критические, экстремальные точки $dU/d\alpha = U^{I} = 0$, соответствующие согласно (21) предельным аттракторам — стационарным колебаниям или состоянию покоя. Кроме того, необходимо найти точки α_c максимумов $U'(\alpha_c) = 0$, $U''(\alpha_c) < 0$ и минимумов потенциала $U^{I}(\alpha_c) = 0$, $U''(\alpha_c) > 0$, а также точки перегиба $U'(\alpha_c) = 0$, $U''(\alpha_c)$ 0, $U'''(\alpha_c) \neq 0$. Они зависят от параметров Co, λ и e, определяемых внешними условиями, в частности поведением функции трения $F(V)$. По классификации Арнольда-Тома, потенциал типа (22) описывает сложную капсоидную катастрофу типа бабочки, так как является полиномом 6-ой степени. К счастью, в изучаемом случае потенциал (22) содержит только чётные степени, поэтому анализ оказывается сравнительно простым.

В линейной теории [34] $\lambda = 0$, $e = 0$ и решение уравнения (19) легко находится: $\alpha = \alpha_0 \exp(Co\alpha)$. Величина Co является инкрементом (если $Co > 0$) или декрементом (если $Co < 0$) колебаний. Этот управляющий параметр называется контрольным (Co — от слова control), он зависит от разности двух чисел $Co = Ti - Da$. Число $Ti = \varepsilon\kappa_1/2$ (от англ. Tilt — наклон) определяет крутизну спадания характеристики трения. Число $Da = \delta/2$ (от англ. Damper — демпфер) зависит от величины h, обеспечивающей затухание колебаний.

При $Co > 0$, энергия от движущегося края разлома передаётся колебаниям блока внутри разлома, и амплитуда колебаний экспоненциально нарастает, то есть возникает землетрясение. При $Co < 0$ доминирует демпфирование и возникшие колебания затухают. При $Co = 0$, $Ti = Da$ в разломе возможно возникновение автоколебаний типа тектонического тремора.

В нелинейной теории условия возникновения землетрясения усложняются. Введём интенсивность колебаний $\psi = \alpha^2$. Тогда уравнения (21), (22) можно записать в виде

$$\frac{d\psi}{d\tau} = 2e\psi\left(\psi^2 + \frac{\lambda}{e}\psi + \frac{Co}{e}\right). \tag{23}$$

Стационарных решений у этого уравнения три: $\psi_1 = 0$,

$$\Psi_2 = \alpha_2^2 \equiv q = -\frac{\lambda}{2e} + \sqrt{\frac{\lambda^2}{4e} - \frac{Co}{e}}, \tag{24}$$

а третий корень Ψ_3 является отрицательным и физического смысла не имеет, так как $\Psi = \alpha^2 > 0$. Таким образом, потенциал U, описываемый формулой (22), имеет три экстремальные точки $\alpha_{c1} = 0$, $\alpha_{c2} = +(q)^{1/2}$, $\alpha_{c3} = -(q)^{1/2}$. Отбрасывая корень Ψ_3, мы можем записать уравнение (23) в виде

$$\frac{d\alpha}{d\tau} = e\,(\alpha^3 - q\alpha). \qquad (25)$$

Решение уравнения (25) существенно зависит от знака q, который определяется знаком параметра *Co*.

На рис. 21 показана зависимость $U(\alpha)$, рассчитанная по формуле (22) при различных значениях управляющего параметра *Co* и фиксированных значениях $\lambda = 0{,}01$ и $e = 0{,}008$.

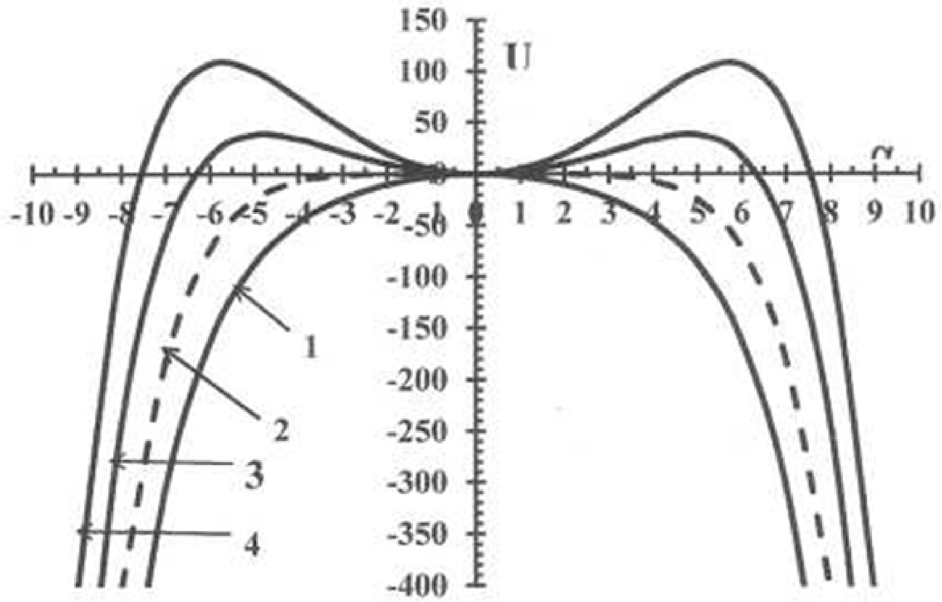


Рис. 21. Графики зависимост и U(α) от парамет ра Co

Кривая 1 соответствует положительному значению *Co* = 5, *Ti* > *Da*. Она имеет максимум потенциала *U* в точке $\alpha = \alpha_{c1} = 0$. Однако это состояние неустойчиво, в чём легко убедиться, интегрируя уравнение (25) при *Co* > 0, $q < 0$. Соответствующее решение имеет вид

$$\alpha = \left[\frac{|q|}{K\exp(-2|q|e\tau) - 1}\right]^{1/2}. \qquad (26)$$

Здесь $K = [(|q| + \alpha_0^2)/\alpha_0^2]$ — постоянная интегрирования, в которой α_0 — начальная амплитуда при $t = 0$. Из формулы (26) видно, что в начальный момент $\tau = 0$ знаменатель в (27) максимален, а величина амплитуды $\alpha = \alpha_0$ — минимальна. С течением времени $\tau > 0$ знаменатель в (26) уменьшается, а амплитуда растет. Наконец, в момент времени

$$\mathrm{t_e} = \frac{1}{2e|q|\omega_0} ln\left(1 + \frac{|q|}{\alpha_0^2}\right) \qquad (27)$$

происходит катастрофа типа взрывной неустойчивости, при которой амплитуда α стремится достигнуть очень больших величин за конечный промежуток времени от 0 до t_e.

Кривая 2 на рис. 21 соответствует значению $Co = 0$, $Ti = Da$. В линейной теории здесь возникают автоколебания типа тектонического тремора. Учёт нелинейности показывает, что эти колебания неустойчивы, в чём легко убедиться, интегрируя уравнение (25) при $Co = 0$, $q = 0$. Имеем

$$\alpha = \alpha_0 \left(1 - \frac{t}{t_e}\right)^{-1/2}, t_e = \frac{1}{2\mathrm{e}\omega_0\alpha_0^2} \qquad (28)$$

Это классическая взрывная неустойчивость, наблюдаемая в неравновесных средах. Рассматриваемая нами динамическая система — сейсмически активный разлом. Поэтому взрывная неустойчивость проявляется здесь как катастрофическое землетрясение. Нарастающие колебания приводят, в конечном счете, к разрушению геологических пород, самоуничтожению системы и землетрясение прекращается. Из формулы (28) видно, что решение существует только до момента наступления катастрофы t_e, которое обратно пропорционально a_0^2. При малых начальных амплитудах a_0время наступления землетрясения велико. В разломе, возмущаемом слабыми внешними воздействиями, долго ничего не происходит. Однако, если начальный толчок был большим, время наступления катастрофы t_e невелико, быстро происходит взрывной рост колебаний, то есть землетрясение.

Наконец, рассмотрим случай докритической неустойчивости $Co < 0$, когда $Da > Ti$. В линейном случае здесь имеет место устойчивость, то есть колебания затухают. Однако учет нелинейности вносит существенные коррективы. Интегрируя уравнение (25) при $q < 0$, получим

$$\alpha = \left[\frac{\alpha_L^2\alpha_0^2}{(\alpha_L^2 - \alpha_0^2)\exp(2\alpha_L^2\tau) + \alpha_0^2}\right]^{1/2} \qquad (29)$$

Здесь $\alpha_L = (|q|)^{1/2}$ — стационарная амплитуда, которая обращает правую часть уравнения (25) при $q < 0$ в ноль. Как видим, решение зависит от соотношения начальной амплитуды α_0 и пороговой амплитуды α_L. Если, $\alpha_0 < \alpha_L$, то из решения (29) следует, что колебания затухают со временем ($\alpha \to 0$ при $\tau \to \infty$). Наоборот, при $\alpha_0 > \alpha_L$ колебания оказываются неустойчивыми. При приближении к моменту времени

$$t_e = \frac{1}{2\omega_0\alpha_L^2} ln\left(\frac{\alpha_0^2}{\alpha_0^2-\alpha_L^2}\right),\ \alpha_0 > \alpha_L \qquad (30)$$

происходит катастрофа — землетрясение. Другими словами, в данном случае докритической неустойчивости землетрясения возбуждаются жестко: начальная амплитуда α_0 должна превышать порог α_L. Докритическая неустойчивость хорошо видна на рис. 20, где кривые 3, 4 соответствуют случаю $Co < 0$. Кривая 3 получена при $Co = -5$, кривая 4 — при $Co = -10$. Внутри образовавшейся потенциальной ямы колебания затухают. Однако, если амплитуда превысит пороговый уровень α_L, то колебания быстро нарастают, формируя удар землетрясения. Положения краев потенциальной ямы соответствуют критическим точкам $a_{c2} = +(|q|)^{1/2}$, $a_{c3} = -(|q|)^{1/2}$. Они рассчитываются по формуле (24).

Отметим, что иногда сейсмологи сравнивают активный разлом с триггером, а пороговую амплитуду, инициирующую землетрясения, называют триггерной [35]. На наш взгляд, сейсмически активный разлом подобен *мультивибраторным* системам. Действительно, триггерная система является бистабильной и в каждом из двух своих состояний она может находиться бесконечно долго, до тех пор, пока управляющий сигнал не переведет ее из одного состояния в другое. Однако мультивибраторные системы имеют только одно состояние покоя, которое *метастабильно*, то есть устойчиво только по отношению к слабым внешним воздействиям. Когда достаточно сильное начальное возмущение превышает пороговый уровень, в мультивибраторной системе возникает вспышка активности и после ее окончания система успокаивается. Активный разлом работает как мультивибратор потому, что в докритическом состоянии, при $Ti < Da$, колебания в нем метастабильны и затухают, если амплитуда внешних воздействий α_0 меньше порогового уровня α_L. Однако, если начальный толчок α_0 больше α_L, то происходит землетрясение, которое разрушает разлом, и он вновь приходит в метастабильное состояние.

3.3. Исследование чрезвычайных ситуаций техногенного характера методами теории катастроф

Рассмотрим исследование чрезвычайных ситуаций методами теории катастроф на примере разрушений различных механических конструкций (мост, здание и т.п.).

Многие крупногабаритные технические конструкции могут быть описаны с помощью потенциальной функции, минимальное значение которой определяет локально устойчивое состояние конструкции. Само состояние описывается положением точки в некотором пространстве состояний конструкции. С увеличением нагрузки на конструкцию потенциальная функция изменяется. Значительная нагрузка может привести к разрушению конструкции вследствие нарушения локально устойчивого состояния, которое является для данной системы расчетным. Равновесие, устойчивость и потеря устойчивости — это основные вопросы, рассматриваемые теорией катастроф. Методы теории катастроф позволяют определить чувствительность критической нагрузки как к несовершенству самой конструкции, так и к динамическому воздействию. Кроме того, они оказываются эффективными при изучении составных систем, для которых возможны различные формы разрушения. Последнее обстоятельство имеет важное практическое значение, так как свидетельствует о том, что в «оптимизируемых» системах, составленных из нескольких «неприводимых» конструкционных элементов, могут проявляться неожиданные формы разрушения с жесткой чувствительностью к несовершенству, если между элементами существует сильная связь.

На практике конструкции собирают обычно из большого числа отдельных элементов. Анализ процесса разрушения, как правило, проводится методами теории бифуркаций. Используемые при этом стандартные алгоритмы вычисления универсального возмущения обеспечивают систематизированный подход к изучению оптимизируемых систем, спектра форм их разрушения и типа чувствительности таких систем к несовершенству.

Для описания свойств конструкции, модели или реальной физической системы необходимо прежде всего ввести координаты состояния системы x_1, x_2, ..., x_n, или так называемые параметры порядка. Полезно также ввести дополнительное множество параметров c_1, c_2, ..., c_k, которые будут представлять нагрузку (внешние силы) на систему, дефекты, возникшие при изготовлении элементов конструкции, и дефекты, появившиеся в процессе сборки системы.

Общая энергия ξ подобной системы, как правило, есть сумма кинетической и потенциальной энергии

$$\xi = \mathrm{KE} + \mathrm{PE}. \tag{31}$$

Кинетическую энергию часто можно представить в виде положительно определенной квадратичной формы от обобщенных скоростей $\dot{x}_i$, а потенциальную энергию — как функцию переменных состояния $x \in R^n$ и управляющих параметров $c \in R^k$:

$$KE = \frac{1}{2} M_{ij}\dot{x}_i\dot{x}_j \geq 0, PE = V(x;c). \tag{32}$$

Рассмотрим сначала статические консервативные системы, т. е. системы, для которых $KE = 0$ и $\xi = V$.

Если предположить, что равновесные конфигурации конструкции (в пространстве параметров порядка) определяются минимумом ξ, то в этом случае условия равновесия, устойчивости и потери устойчивости могут быть записаны соответственно как

$$\nabla V = 0; V_{ij} \cong M_k^n;\ k = 0;\ \det V_{ij} = 0.$$

Такая форма записи наглядно показывает, почему теория катастроф может быть полезным инструментом при описании равновесия, устойчивости и характера разрушения физических конструкций.

Конструкция обычно проектируется так, чтобы были обеспечены определенные рабочие параметры. Однако подобное возможно только при условии использования совершенных материалов и при участии профессиональных исполнителей.

Потенциальную функцию $\boldsymbol{V(x; c)}$**,** описывающую состояние идеальной системы, разложим в ряд вблизи проектируемого состояния равновесия, устойчивого при малых внешних нагрузках:

$$\boldsymbol{V\ (x; F) = \frac{1}{2} V_{ij}(F) x_i x_j} + \text{Члены более высокой степени} \qquad (33)$$

(постоянный член не имеет существенного значения и может быть опущен). Линейный член отсутствует в силу выполнения в точке $\boldsymbol{x} = 0$ условия $dV/dx_i = 0$, и, следовательно, ряд Тейлора будет начинаться с квадратичных членов. Коэффициенты ряда Тейлора являются функциями управляющих параметров $c \in R^k$. При отсутствии дефектов управляющими параметрами являются только внешние силы F, действующие на конструкцию. При возрастании нагрузки от нуля до тех пор, пока матрица V_{ij} остается положительно определенной, проектируемое устойчивое состояние равновесия остается локально устойчивым. Условие

$$detV_{ij}(F) = 0 \qquad (34)$$

определяет критическую нагрузку $F = F_p$, которую идеальная (совершенная) система уже не выдержит.

Когда росток потенциала $V(x;\ F)$ в точке $F = F_p$ известен, для определения вида функции $V(x;F)$, описывающей самый общий вид деформации идеальной системы, могут быть применены методы, основанные на замене переменных. Эта функция может быть использована для моделирования всех несовершенств, возникающих в системе из-за отсутствия классных исполнителей и использования нестандартных строительных материалов.

Аналогично может быть изучена потенциальная функция $V(x;F,\boldsymbol{\varepsilon})$, описывающая несовершенную систему. Критическая нагрузка F_c, которую не выдерживает несовершенная система, определяется из соотношения

$$det\boldsymbol{V_{ij}}(\boldsymbol{F},\varepsilon) \ = \ 0. \qquad (35)$$

Естественно ожидать, что несовершенная система имеет меньшую несущую способность $(\boldsymbol{F}_c \leq \boldsymbol{F_p})$, чем совершенная. Теория катастроф позволяет представить снижение несущей способности конструкции в количественном виде. Для моделей, которые рассматриваются ниже, имеем

$$\boldsymbol{F_c = F_p - k|\varepsilon|^p} \qquad (36)$$

где k — некоторая положительная постоянная, p — положительная рациональная дробь, а ε — некоторый параметр несовершенства. Чувствительность к несовершенству при разных значениях показателя p приведена на рис. 22: чем меньше p, тем выше чувствительность к несовершенству.

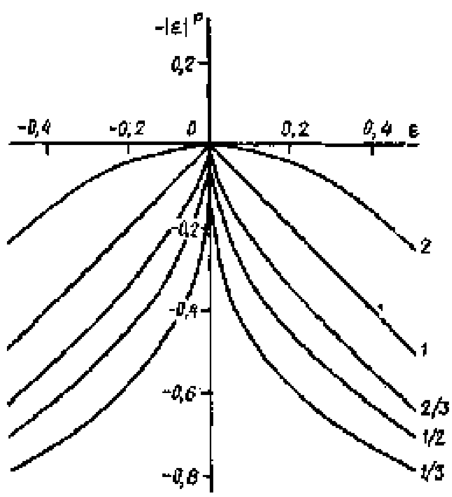


Рис. 22. При малом p чувст вит ельност ь крит ической нагрузки F_c сущест венно зависит от парамет ра несовершенст ва ε. Здесь $F_c = F_p - k|\varepsilon|^p$

Чувствительность к несовершенству конструкции, находящейся под нагрузкой, можно определить следующим образом. Критические точки $x^{(0)}$, $x^{(1)}$, ... потенциальной функции V при любой нагрузке Fопределяются из уравнения $\nabla V = 0$. В каждой критической точке находятся критические значения $V^{(i)} = V(;\mathrm{x}^{(\mathrm{i})};\ \boldsymbol{F},\boldsymbol{\varepsilon})$. Если $x^{(0)}$ — локально устойчивое состояние равновесия, а $x^{(1)}$ — наименьшее ближайшее морсовское 1-седло, то динамическая чувствительность к несовершенству определяется формулой

$$\Delta E = V^{(1)} - V^{(0)}. \tag{37}$$

Физически это означает, что система остается в локально устойчивом состоянии $x^{(0)}$ при нулевых или малых колебаниях $\left(V^{(0)} + \Delta E < V^{(1)}\right)$до тех пор, пока кинетическая энергия, вносимая в систему извне, не станет настолько большой, что система может «перескочить» через потенциальный барьер $V^{(1)} - V^{(0)}$ некоторую другую равновесную конфигурацию. Значения динамической чувствительности к несовершенству, получаемые из формулы (37), имеют при $\varepsilon \to \Delta E$ вид (36). Для рассматриваемых систем динамическая чувствительность к несовершенству более существенна, чем статическая чувствительность.

Две конструкции с тождественными потенциальными функциями $V(x; F, \boldsymbol{\varepsilon})$ могут различаться функциями кинетической энергии. В этом случае их поведение при статических нагрузках будет идентичным, однако их реакции на динамическую нагрузку могут быть различными.

Даже если система является консервативной, действующие на нее возмущения определенного класса могут и не быть консервативными. Таковы нагрузки, вызываемые ветром и дождем, а также некоторые виды динамических нагрузок, как, например, нагрузка на мост, вызванная движущимся поездом. Это обстоятельство следует иметь в виду, так как иначе может создаться впечатление, что анализ устойчивости и чувствительности к несовершенству полностью сводится к алгоритмам элементарной теории катастроф.

В качестве конкретного примера, иллюстрирующего использование описанных выше методов, рассмотрим выпучивание эйлерова стержня под действием сжимающей нагрузки [36]. Предположим, что к одному концу идеального несжимаемого стержня приложена сила F (рис. 23): если нагрузка (сила F), действующая на стержень, невелика, стержень остается прямым; при очень большой нагрузке F стержень сильно изгибается.

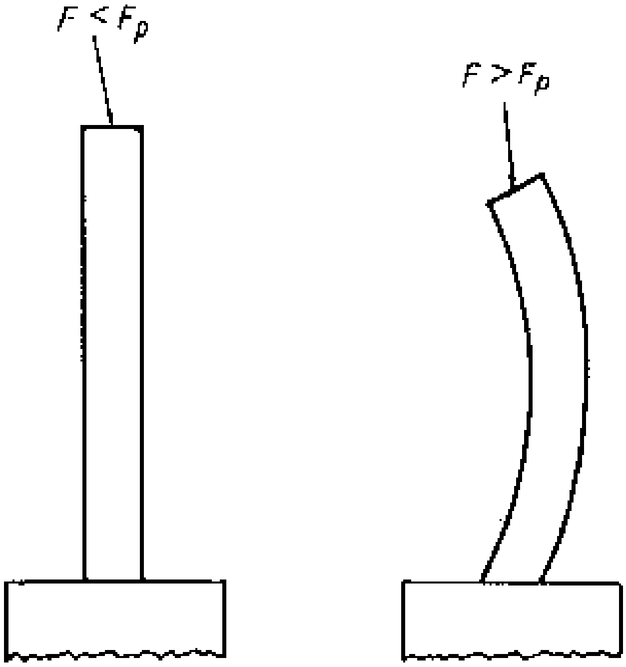


Рис. 23. Выпучивание стержня под действием сжимающей нагрузки.

Изучим подробнее процесс изгиба стержня при промежуточных значениях F.

Удобно представить функцию, описывающую поведение (форму) стержня, в виде разложения в ряд Фурье

$$y(x) = \sum_{i=1}^{\infty} a_j sin\frac{j\pi x}{l} \qquad (38)$$

Здесь $y(x)$ — горизонтальное отклонение стержня, рассматриваемое как функция расстояния x от одного из концов; l — координата другого конца стержня. Поскольку коэффициенты Фурье a_j определяют форму стержня, они играют роль переменных состояния системы; прилагаемая сила F играет роль управляющего параметра.

Фиксированная длина L несжимаемого стержня выражается через параметр l и отклонение $y(x)$ следующим образом:

$$L = \int_0^l \sqrt{1 + (dy/dx)^2}\, dx. \qquad (39)$$

Уравнение (39) задает ограничение на параметр l и переменные состояния $a_1, a_2, \ldots$, которое может быть представлено также в виде

$$L = \int_0^l \left\{1 + \frac{1}{2}\left(\frac{dy}{dx}\right)^2 - \frac{1}{8}\left(\frac{dy}{dx}\right)^4 + \cdots\right\} dx = l + \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{\infty} \alpha_j^2 \left(\frac{j\pi}{l}\right)^2 \frac{i}{2} +$$

$$+ \text{Члены более высокой степени.} \qquad (40)$$

Из членов высшего порядка для дальнейшего рассмотрения важен лишь член четвертой степени по α_1: $-l\,(3/2^{+6})\,(\pi/l)^4\alpha_1^4$.

Потенциальная энергия, накопленная в изогнутом стержне, пропорциональна

$$\frac{B}{2}\int_0^l \left(\frac{d^2y}{dx^2}\right)^2 dx = \frac{B}{2}\frac{l}{2}\sum_{l=1}^{\infty} \left(\frac{j\pi}{l}\right)^4 \alpha_l^2. \qquad (41)$$

Выполненная внешней силой работа равна

$$\mathrm{W} = \int_{\boldsymbol{L}}^{\boldsymbol{l}} \boldsymbol{F\,dx} = \boldsymbol{-F(L-l)} \qquad (42)$$

Потенциальная функция, описывающая состояние (форму) совершенного статического стержня, является суммой (41) и (42), т. е.

$$\mathrm{V_p}\,(\alpha_j;\, \mathrm{F}) = \frac{Bl}{4}\sum_{l=1}^{\infty}\left(\frac{j\pi}{l}\right)^4 \alpha_l^2 - \frac{Fl}{4}\sum_{l=1}^{\infty}\left(\frac{j\pi}{l}\right)^2 \alpha_l^2 +$$

$$+ \text{Члены более высокой степени} =$$

$$= \frac{l}{4}\sum_{l=1}^{\infty}\left(\frac{j\pi}{l}\right)^2 \left[B\left(\frac{j\pi}{l}\right)^2 - F\right]\alpha_l^2 +$$

$$+ \text{Члены более высокой степени.} \qquad (43)$$

Состояние стержня определяется минимумом потенциальной функции $\mathrm{V_p}(\alpha_j;\, \mathrm{F})$, которая положительно определена при $F \ll F_1 = \mathrm{B}\,(\pi/\mathrm{l})^2$. Как у функции возрастающей нагрузки F, первая неморсовская критическая точка потенциальной функции имеет место при $F = F_1$. В пределах неустойчивой ветви, отвечающей недеформированному стержню, дополнительные неморсовские точки существуют при F_2, F_3,…, где $F_j =$ B $(j\pi/l)^2$. Функция $V_p(\alpha_j; F)$ будет морсовской для всех значений F, за исключением $F = F_j (j = 1, 2, \ldots)$. При этих же значениях $V_p(\alpha_j; F)$ является неморсовской функцией переменной состояния α_j и морсовской функцией всех остальных переменных состояния.

Для того чтобы описать состояние стержня при $F > F_1$, т. е. после выпучивания, необходимо рассмотреть члены выше второй степени по переменной состояния α_1. Потенциальная функция, описывающая состояние стержня, будет иметь вид

$$V_p(\alpha_j; F) \to \mathrm{V}(\alpha_1;\ \mathrm{F}) = \frac{l}{4}\left(\frac{\pi}{l}\right)^2 (\mathrm{F}_1 - \mathrm{F})\alpha_1^2 + \frac{3Fl}{2^6}\left(\frac{\pi}{l}\right)^4 \alpha_1^2 + \ldots \quad (44)$$

При $F > F_1$ величина первого коэффициента Фурье определяется формулой

$$\alpha_1^2 = \frac{8}{3F}\frac{F - \boldsymbol{F1}}{(\pi/l)^2},\ \ \mathrm{F} \geq \boldsymbol{F_1}. \quad (45)$$

Если стержень зафиксирован так, что он не может перейти в конфигурацию с меньшей энергией ($j = 1$), при большем значении $F(=F_2)$ он перейдет в следующую высшую ($j = 2$) конфигурацию, т.е. произойдет выпучивание. Вообще говоря, если первые $j - 1$ мод выпучивания запрещены ограничениями, то выпучивание будет иметь место при j-й моде, форма которой определяется членом $\sin j\pi x/l$ при $Fj = B(j\pi/l)$. Значения α_j при $F > F_j$ приведены на рис. 24.

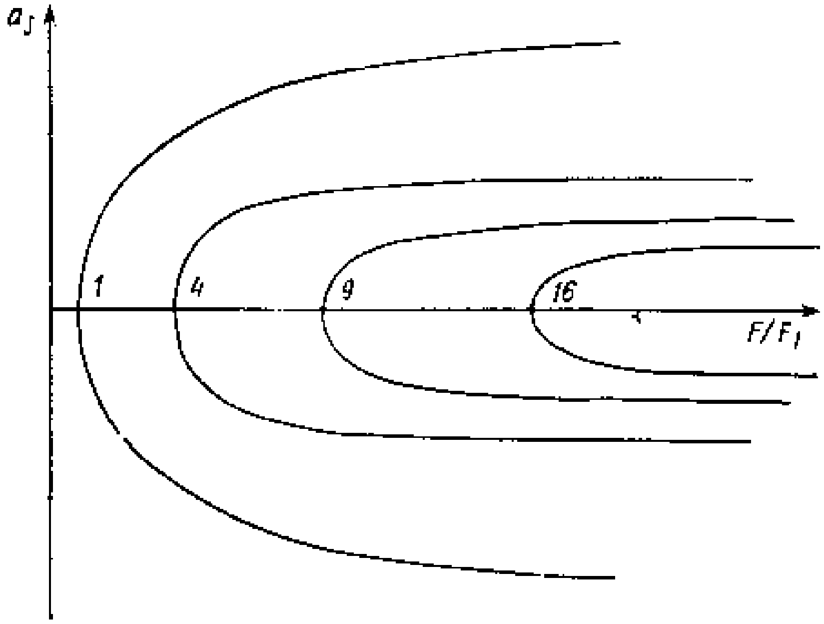


Рис. 24. При значительной нагрузке один из первых коэффициентов Фурье a_1 может быть отличен от нуля

До сих пор мы исследовали статические свойства идеального стержня. Теперь рассмотрим влияние дефектов формы стержня на его состояние. Наиболее общий вид возмущения потенциальной функции (43) включает также линейный член, поэтому

$$V_i(a_i;\ F,\varepsilon) = \varepsilon a_1 + \frac{l}{4}\left(\frac{\pi}{l}\right)^2 (F_1 - F)\alpha_1^2 + \frac{3Fl}{2^5}\left(\frac{\pi}{l}\right)^4 \alpha_l^2 \tag{46}$$

т. е. наиболее общий вид начального дефекта стержня может быть смоделирован отличным от нуля изгибом (искривлением). Значения a_1 в состоянии равновесия определяются из условия равенства нулю градиента ($\nabla_1 V_i(a_1;\ F,\varepsilon) = 0$). Как следует из рис. 25, приведенные кривые являются результатом сечения многообразия катастрофы сборки $x^3 + \alpha x + b = 0$ плоскостями $b = \mathrm{const}$.

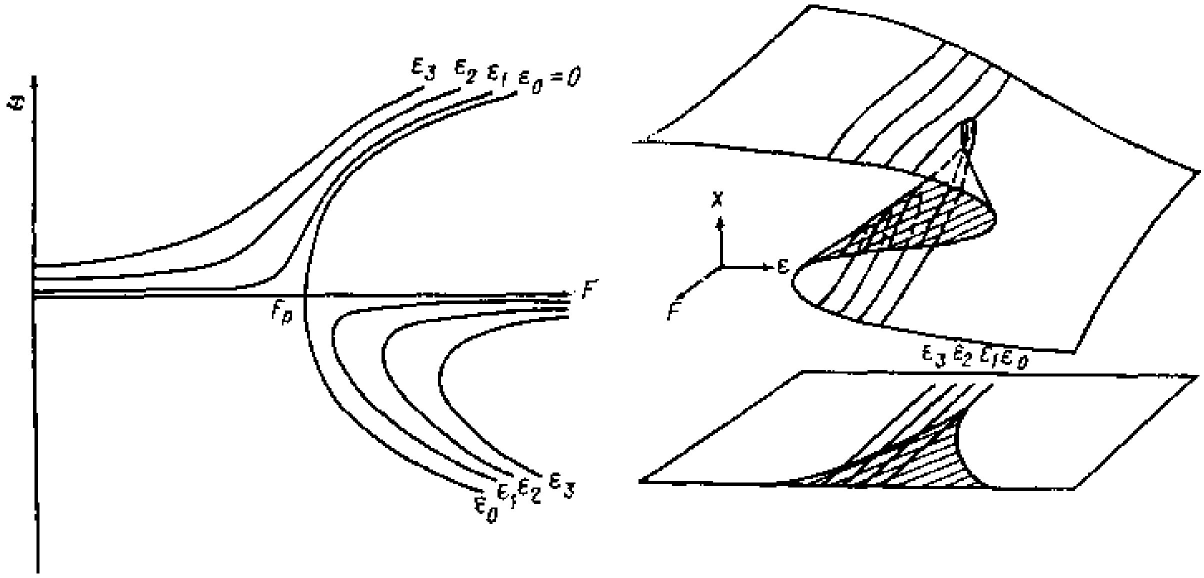


Рис. 25. Зависимост ь равновесной конфигурации несовершенного ст ерж ня от нагрузки и парамет ра несовершенст ва

Устойчивость стержня вдоль кривых равновесия определяется свойствами устойчивости катастрофы сборки.

Если стержень находится не в статическом состоянии и его кинетическая энергия ∇E полностью определяется нижней модой, то величина параметра a_1 будет колебаться около соответствующего статическому состоянию стержня значения $a_1(F)$ (рис. 26).

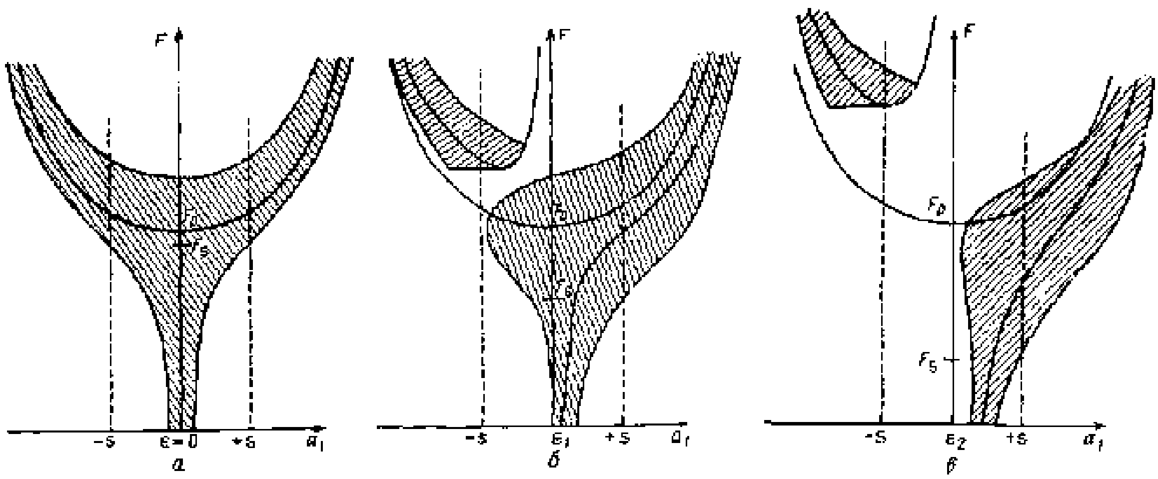


Рис. 26. Диапазон изменения парамет ров порядка (зашт рихованные област и) при колебаниях ст ерж ня около его равновесной конфигурации для различных значений парамет ра несовершенст ва ε

Выпучивание нагруженного эйлерова стержня по существу представляет собой фазовый переход второго рода. Переход к выпученному состоянию является «мягким», так как состояния системы до и после выпучивания связаны непрерывным образом. Конструкции, демонстрирующие «мягкий» переход в выпученное состояние, не разрушаются при превышении предельной нагрузки — они лишь умеренно изгибаются. Поэтому можно сформулировать некоторый вид критериев безопасности для определения пределов безопасных нагрузок. Так, для многих практических целей состояние стержня является опасным, если амплитуда начального изгиба стержня превышает предписанное безопасное значение $s{:}|a_1| > (s) > 0$. Так как амплитуда изгиба определяется из условия равенства нулю градиента, то максимальная безопасная нагрузка F_s будет определяться максимальным безопасным изгибом, т. е.

$$\nabla_1 V(a_1 = s;\, F_s, \varepsilon) = 0 = \varepsilon + \frac{1}{2}\left(\frac{\pi}{l}\right)^2 + (\mathrm{F}_1 - \boldsymbol{Fs})\mathrm{s} + \frac{3Fsl}{2^4}\left(\frac{\pi}{l}\right)^4 s^3 \quad (47)$$

$$Fs = F_c(s) - k(s)\ \varepsilon,$$

$$\text{где } F_c(s) = \frac{\boldsymbol{F_1}}{\mathbf{1} - \frac{3}{8}(\boldsymbol{\pi s/l})^2},\ k(s) = \frac{(2/|\boldsymbol{s}|\boldsymbol{l})(\boldsymbol{l/\pi})^2}{1 - \frac{3}{8}(\boldsymbol{\pi s/l})^2}. \quad (48)$$

Чувствительность безопасной нагрузки к несовершенству достаточно мягкая и зависит от параметра несовершенства в первой степени. Здесь $F_c(s)$ является безопасной нагрузкой в отсутствие дефектов. Для достаточно больших дефектов безопасных нагрузок не существует.

Аналогично может быть определена максимальная несущая способность колеблющегося стержня. Колебания имеют место вблизи состояний статического равновесия (см. рис. 25). Максимальная несущая способность может быть определена как значение F, при котором амплитуда изгиба достигает s. Для совершенной системы эта нагрузка находится из выражения

$$\boldsymbol{\Delta E} = \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{4}}\left(\frac{\boldsymbol{\pi}}{\boldsymbol{l}}\right)^{\mathbf{2}} (\mathbf{F_1} - \boldsymbol{Fs})\mathbf{s}^{\mathbf{2}} + \frac{\mathbf{3}\boldsymbol{Fsl}}{\mathbf{2^6}}\left(\frac{\boldsymbol{\pi}}{\boldsymbol{l}}\right)^{\mathbf{4}} \boldsymbol{s}^{\mathbf{4}} \quad (49)$$

что в свою очередь приводит к следующему линейному соотношению между кинетической энергией $\boldsymbol{\Delta E}$ и максимальной безопасной нагрузкой:

$$\boldsymbol{Fs}=\frac{\boldsymbol{F_1}-(\Delta E/l)(2l/\pi s)^2}{1-3(\pi s/4l)^2} \tag{50}$$

Для выпучивающихся стержней и других систем, разрушение которых происходит по схеме катастроф типа A_{+3}, чувствительность безопасной нагрузки как к несовершенству, так и к динамическим воздействиям будет весьма умеренной.

Работающие на сжатие балки — отнюдь не единственные элементы конструкций. Для перекрытий мостовых пролетов чрезвычайно эффективным является использование пологой арки (рис. 27). Если малые вертикальные нагрузки не вызывают деформации арки, то большие нагрузки приводят к ее разрушению. Попытаемся установить, что будет происходить с аркой при промежуточных нагрузках, и, в частности, определим критическую нагрузку, а также чувствительность арки как к несовершенству, так и к динамическому воздействию.

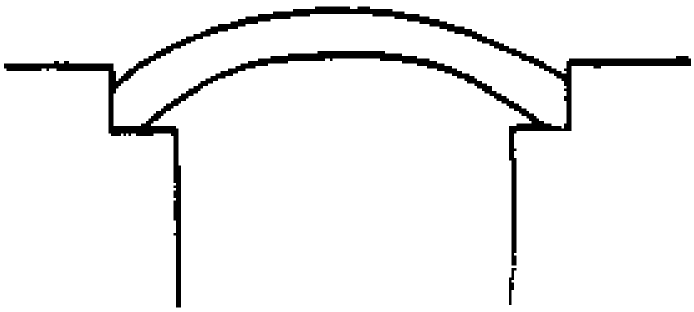


Рис. 27. Пологая арка

Удобно предположить, что пологая арка есть не что иное, как несжимаемая балка, к которой приложена вертикальная сила (рис. 23). Тогда равновесная форма такой балки при отсутствии нагружающих сил и начальных дефектов определяется как

$$y(x) = \alpha_1^0 \sin\frac{\pi x}{l} \tag{51}$$

Состояние (или форма) арки под нагрузкой может быть аналитически определено с помощью анализа ряда Фурье. Вычисления могут быть выполнены в бесконечномерном пространстве состояний, в котором переменными состояния являются коэффициенты ряда Фурье a_j. В случае прощелкивания пологой арки бесконечномерное пространство состояний может быть заменено конечномерным пространством. Для этого достаточно ограничиться двумя первыми коэффициентами Фурье:

$$y(x) = a_1 \sin\frac{\pi x}{l} + a_2 \sin\frac{2\pi x}{l}.$$

Эти два коэффициента не являются независимыми и связаны условием постоянства длины арки:

$$L = l + \frac{l}{4}\left[\left(\frac{\pi\alpha_1}{l}\right)^2 + \left(\frac{2\pi\alpha_2}{l}\right)^2\right] -$$
$$-\frac{l}{8}\left[\frac{3}{8}\left(\frac{\pi\alpha_1}{l}\right)^4 + \frac{3}{2}\left(\frac{\pi\alpha_1}{l}\right)^2\left(\frac{2\pi\alpha_2}{l}\right)^2 + \frac{3}{2}\left(\frac{2\pi\alpha_2}{l}\right)^4\right]. \quad (52)$$

Соотношение между $L,\ l и \alpha_1^0$ получается из (52), если $a_1 \rightarrow \alpha_1^{(0)}$, $a_2 \rightarrow 0$. Не имеет смысла оставлять в разложении члены степени выше четвертой, так как единственный управляющий параметр $\boldsymbol{F}$ может быть использован для исключения лишь одного коэффициента ряда Тейлора. (После интегрирования ряд Фурье от x становится рядом Тейлора с коэффициентами Фурье.)

Энергия, накопленная в пологой арке, такая же, что и в изогнутом стержне, и ее величина дается формулой (41). Работа, совершенная внешней нагрузкой $F,$ равна $\mathrm{F}(\alpha_1^0 - \alpha_1)$. Потенциальная функция, описывающая статическую идеальную пологую арку, имеет вид

$$V_p(a_1, a_2, F) = \frac{\boldsymbol{Bl}}{\boldsymbol{4}}\left[\left(\frac{\pi}{l}\right)^4 \boldsymbol{\alpha}_1^2 + \left(\frac{2\pi}{l}\right)^4 \boldsymbol{\alpha}_2^2\right] - \boldsymbol{F}(\boldsymbol{\alpha}_1^0 - \boldsymbol{\alpha}_1). \quad (53)$$

Эта задача с ограничением и двумя переменными a_1 и a_2 может быть преобразована в задачу без ограничений с единственной переменной посредством использования условия, согласно которому переменная a_1 может быть выражена через a_2, или наоборот. Отметим, что это условие инвариантно относительно замены $a_1 \to \pm\alpha_1$, $a_2 \to \pm\alpha_2$. Переменная α_1 может быть представлена как функция от $\boldsymbol{a_2}$ следующим образом:

$$a_1 = \pm f_1(\alpha_2) \tag{54}$$

где $\alpha_1^0 = f_1(0)$.

Знаки перед функцией соответствуют двум совершенно различным физическим ситуациям: положительный знак — нормальной конфигурации арки (которая является типичным элементом конструкции); отрицательный знак — опрокинутой арке (которая практически не используется). Если вместо α_1 исключить a_2, то следует выбрать определенный знак, так как в (53) входит линейный член.

Положительное и отрицательное значения амплитуды второй гармоники a_2 характеризуют различные физические ситуации (рис. 28). При фиксированном α_1 потенциальная функция $V_P(a_1, a_2; F)$, очевидно, инвариантна относительно замены $a_2 \to -\alpha_2$. Следовательно, полезно исключать $a_1 (\alpha_1 > 0)$, а не a_2. Тогда потенциальная функция имеет вид

$$V_P(a_2; F) = A_0 + \frac{1}{2}A_2\alpha_2^2 + \frac{1}{4}A_4\alpha_2^4 \tag{55}$$

$$A_0 = \frac{\mathrm{B}l}{4}\left(\frac{\pi}{l}\right)^4 (\alpha_1^0)^2,$$

$$\frac{1}{2}A_2 = 3Bl\left(\frac{\pi}{l}\right)^4 - \frac{2F}{\alpha_1^0}, \tag{56}$$

$$\frac{1}{4}A_4 < 0$$

(постоянный член не играет существенной роли). Линейный и другие нечетные члены отсутствуют в силу соотношений инвариантности. Квадратичный член показывает, что арка сохраняет свою форму при $F < F_p = \frac{3}{2}Bl\alpha_1^0(\pi/l)^4$. Член четвертой степени показывает, что совершенная арка разрушается ($a_1 > 0 \to \alpha_1 < 0$) при $F > F_P$, так как нет близкого устойчивого состояния равновесия. Потенциальная функция $V_P(\boldsymbol{\alpha_2}; F)$ проявляет катастрофу A_3 при $F = F_p$.

Математически разрушающаяся арка описывается с помощью катастрофы двойной сборки. Первоначально имеются два неустойчивых состояния равновесия с $\alpha_2 \neq 0$ вблизи устойчивого состояния равновесия $\alpha_2 = 0$. Эти два неустойчивых состояния равновесия соответствуют положениям «прощелкивания». При возрастании нагрузки F прощелкивание арки наблюдается при меньших значениях $|a_2|$. При приближении к критической нагрузке прощелкивание может иметь место уже при $|a_2| \to 0$, и небольшое возмущение может оказаться причиной разрушения арки.

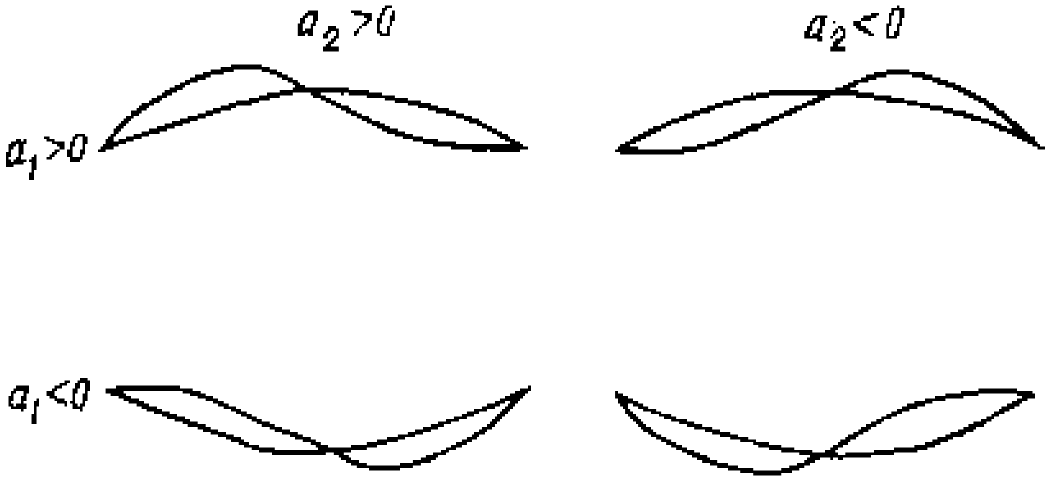


Рис. 28. Два разных знака перед $\boldsymbol{\alpha_1}$ от вечают совершенно различным физическим сит уациям. Два разных знака перед а2 символизируют различные, но эквивалент ные разрушающие моды

Физически прощелкивание происходит следующим образом. Вертикальная сила, приложенная к центру арки, стремится сместить ее центр тяжести вниз. Для того чтобы центр тяжести арки сместился вниз, необходимо добавить к ее форме высшие гармоники, что возможно только при увеличении энергии прогиба. Иными словами, смещение центра тяжести может произойти только тогда, когда приращение энергии за счет работы, описываемой выражением $[\mathrm{F}(\alpha_1^0 - \alpha_1)]$, превысит приращение энергии деформации арки. При этом как только арка начнет двигаться вниз, ничто не может удержать ее от прощелкивания за неустойчивое положение в опрокинутое. Следовательно, можно считать, что совершенная пологая арка разрушается вследствие превышения критической нагрузки F_p.

Несовершенства пологой арки могут быть обусловлены неоднородностью строительных материалов, перемещением точки нагружения и тысячью других причин. Наиболее общий вид деформации ростка катастрофы сборки $\pm x^4$ таков: $\frac{1}{2}\varepsilon_2 x^2 + \varepsilon_1 x$.

Следовательно, потенциальная функция, описывающая состояние (или форму) несовершенной пологой арки, имеет вид

$$Vi(x;\ F,\ \varepsilon_1, \varepsilon_2) = \varepsilon_1 x + \frac{1}{2}(F_p - F + \varepsilon_2)x^2 - \frac{1}{4}x^4 \tag{57}$$

При возрастании внешней нагрузки управляющие параметры следуют линейной траектории сборки в пространстве управляющих параметров. Система будет оставаться в локально устойчивом состоянии, соответствующем среднему листу многообразия катастрофы двойной сборки до тех пор, пока не достигнет бифуркационного множества. Таким образом, чувствительность к несовершенству у пологой арки будет иметь следующий вид:

$$F_c - F_p + \varepsilon_2 = -k|\varepsilon_1|^{2/3},$$

или

$$F_c = F_p - \varepsilon_2 - k|\varepsilon_1|^{2/3}. \tag{58}$$

Пологая арка значительно более чувствительна к несовершенству, нарушающему симметрию ($\varepsilon_1 \neq 0$), чем к несовершенству, ее сохраняющему. Поэтому можно ограничиться рассмотрением только дефектов, нарушающих симметрию. Наиболее общее нарушающее симметрию несовершенство эквивалентно перемещению прилагаемой силы на расстояние ε_1 от плоскости симметрии.

Тот факт, что в законе зависимости разрушающей нагрузки от параметра несовершенства е надо взять степень 2/3, был показан в серии экспериментов, проведенных Рурдой [37]. В этих экспериментах параметром несовершенства было относительное смещение f/L прилагаемой силы от плоскости симметрии пологой арки. Данные экспериментов показаны на рис. 29.

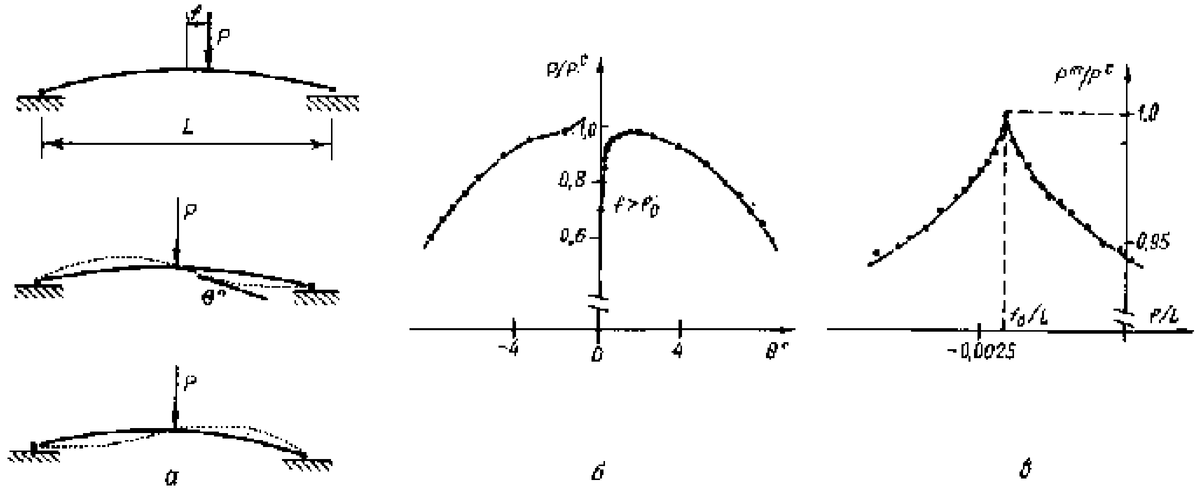


Рис. 29.

а — экспериментально реализуемое расположение силы (относительное смещение f/Lприлагаемой силы P от центральной линии рассматривается как параметр несовершенства пологой арки); *б* — графическое представление устойчивых и неустойчивых равновесных конфигураций пологой арки в зависимости от прилагаемой нагрузки при фиксированных значениях $\varepsilon = f/l$ [3]. Устойчивые состояния равновесия имеют место лишь на центральной ветви и исчезают в точке p^M/p^C горизонтального касания. Последняя определяет разрушающую нагрузку, при которой наблюдается прощелкивание; *в* — приведенная разрушающая нагрузка как функция приведенного параметра несовершенства. Сборка является откликом на несовершенства, внутренне присущие модели. Заметим, что при значении параметра несовершенства ¼ % несущая способность арки снижается на 6%. Отметим также, что модель может быть усилена посредством какого-либо несовершенства, сдвигающего сборку назад вправо.

Теперь рассмотрим уменьшение несущей способности арки вследствие динамического нагружения. Для совершенной системы, подвергаемой колебаниям в моде разрушения с кинетической энергией ΔE, критическая нагрузка определяется из выражения

$$\Delta E = \frac{1}{2}(F_0 - F)x^2 - \frac{1}{4}x^4 \tag{59}$$

Следовательно,

$$F_c = F_p - 2|\Delta E|^{1/2}. \tag{60}$$

Уменьшение несущей способности несовершенной системы может быть определено из масштабных соображений. Например,

$$x \to \lambda x,$$
$$|F_c - F_p| \to \lambda^2 |F_c - F_p| \Rightarrow \Delta E \to \lambda^4 \Delta E, \tag{61}$$
$$|\varepsilon_1| \to \lambda^3 |\varepsilon_1|.$$

Такая поверхность может быть построена исходя из канонических свойств катастрофы сборки. Поверхность разрушения в пространстве $F - \Delta E - \varepsilon_1$ изображена на рис. 30. Вся поверхность может быть восстановлена на основе масштабных соотношений (61) и какого-либо произвольного поперечного сечения. Ясно, что пологая арка более чувствительна к динамическим несовершенствам, чем к несовершенствам, нарушающим симметрию.

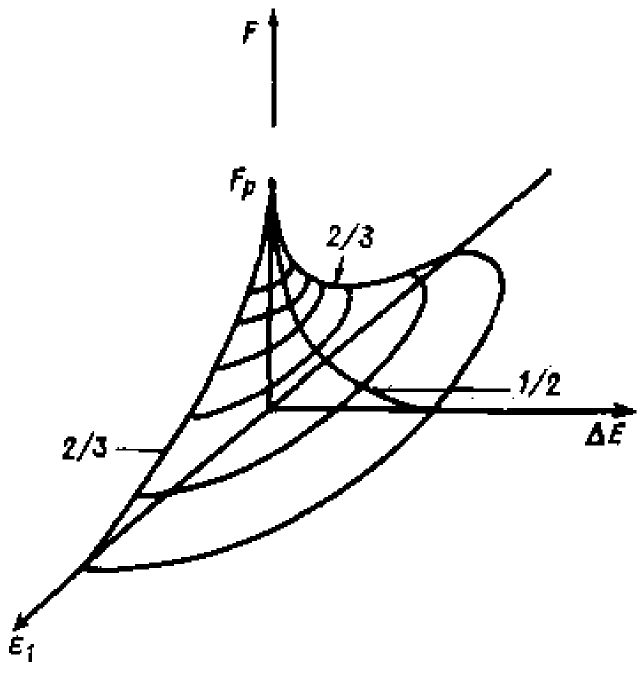


Рис. 30. Форма критической поверхности пологой арки в пространстве $F - \Delta E - \varepsilon_1$. Высокая чувствительность к статическому несовершенству перекрывается еще большей чувствительностью к динамическому несовершенству

Если математически различие между ростками катастроф сборки и двойной сборки выражается лишь в смене знака, то физически это различие существенно. Катастрофа сборки является глобально устойчивой, в то время как двойная сборка глобально неустойчива. У первой всегда имеется некоторое устойчивое состояние; для последней устойчивые состояния существуют лишь в пределах области, имеющей форму сборки в плоскости управляющих параметров. В случае систем, описываемых катастрофой сборки, необходима субъективная оценка критерия безопасной нагрузки; так, при рассмотрении эйлерова стержня требуется, чтобы параметр порядка $\boldsymbol{\alpha_1}$ оставался по величине меньшим, чем некоторое максимальное безопасное отклонение $\boldsymbol{s}$. Для систем, описываемых посредством двойной сборки, подобных субъективных критериев не требуется, поскольку существует объективный критерий: система разрушается при превышении предела критической нагрузки.

В двух предыдущих примерах потенциальная функция, описывающая совершенную систему, была инвариантна относительно преобразования симметрии $x \to -x$, где x — параметр порядка системы (т.е. первый или второй коэффициент Фурье). Это, строго говоря, верно только тогда, когда мы не ограничиваемся разложениями (40), содержащими лишь первые два коэффициента Фурье. В данном случае мы можем сделать такое предположение, основываясь на том, что энергия прогиба быстро возрастает при переходе к последовательно более высоким модам прогиба.

Так как совершенная система была описана при помощи четной потенциальной функции $V_p(x;F)$, зависящей от единственного управляющего параметра F, то можно было бы потребовать обращения в нуль всего лишь одного коэффициента ряда Тейлора $[\sim (F_p - F)x^2]$, что неминуемо приводило бы к рассмотрению катастрофы сборки $(\sim x^4)$ либо двойной сборки $(\sim -x^4)$.

При отсутствии симметрии разложение в ряд Тейлора потенциальной функции $V_p(x;F)$, описывающей некоторую совершенную систему, будет иметь вид

$$V_p(x;\ F) = V_0 + V_1x + \frac{1}{2}V_2x^2 + \frac{1}{3!}V_3x^3 + \ldots \qquad (62)$$

В общем случае выберем параметр порядка $\boldsymbol{x}$ так, чтобы совершенная система имела состояние равновесия в $\boldsymbol{x} = 0$. Тогда $\boldsymbol{V_1} = 0$ (Постоянный член не имеет существенного значения и может быть исключен путем переноса начала координат.) Квадратичные, кубические и члены более высокой степени в общем случае отличны от нуля. Если рассматривать изменение системы в зависимости от возрастающей прилагаемой силы F в точке $F = F_p$, то потенциальная функция может быть записана в виде

$$V_p(x;\ F) = \frac{1}{2}(F_p - F)x^2 + \frac{1}{3}x^3 + \ldots \qquad (63)$$

посредством замены масштабов по осям x и F. Членами четвертой и более высокой степени можно пренебречь. Две совершенные системы, описываемые потенциальной функцией, эквивалентной (63), изображены на рис. 31.

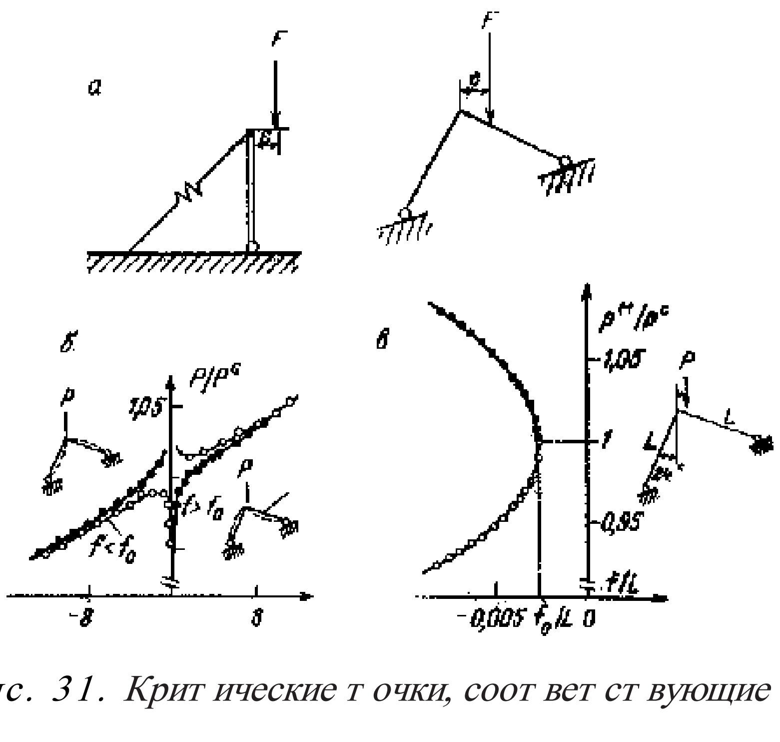


Рис. 31. Критические точки, соответствующие V_p

а — поддерживающий кронштейн и жестко сочлененная рама — две совершенные системы, в которых наблюдается смена типа устойчивости. Несовершенство моделируется с помощью смещения нагрузки; *б* — экспериментально определенные устойчивые и неустойчивые состояния равновесия совершенной жестко сочлененной рамы; *в* — экспериментально найденная чувствительность к несовершенству подчиняется степенной (с показателем степени 1/2) зависимости. Заметим, что при значении параметра несовершенства 1/4% величина разрушающей нагрузки снижается на 5 %. Отметим также, что точка (место) разрушения не находится на касательной к оси $f/L=0$, так как несовершенство внутренне присуще модели.

определяются, как обычно, из соотношения

$$\frac{d}{dx}V_p = 0 = x\{(F_p - F) + x\}. \tag{64}$$

Положение критических точек и тип их устойчивости показаны на рис. 32. Смена типа устойчивости происходит в момент, когда две критические точки $x_1(F) = 0$, $x_2(F) = F - F_p$ проходят одна через другую.

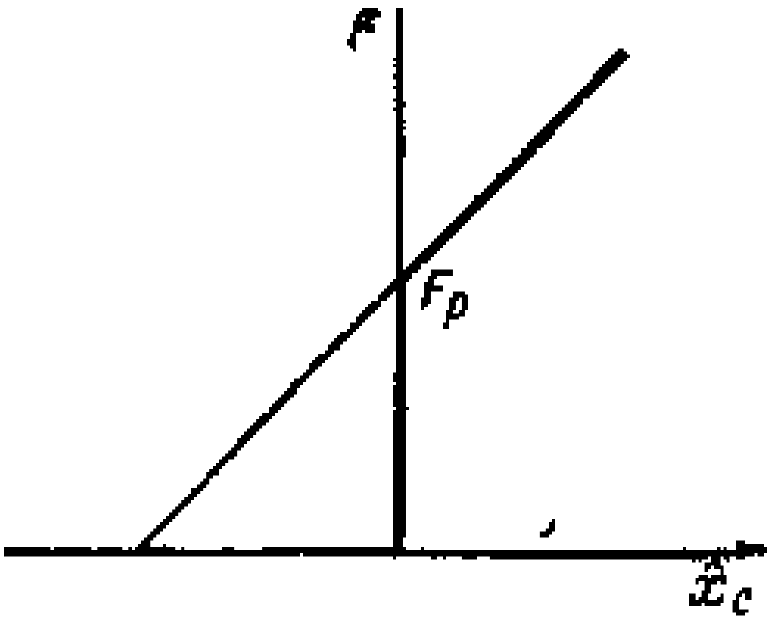


Рис. 32. Положения критических точек в зависимости от прилагаемой нагрузки.

Потенциальная функция, описывающая соответствующую несовершенную систему, имеет вид

$$V_i(x;\ F,\ \varepsilon_1,\ \varepsilon_2, \ldots) = V_p(x;\ F) + p(x),$$

$$p(x) = \varepsilon_1 x + \frac{1}{2}\varepsilon_2 x^2 + \frac{1}{3}\varepsilon_3 x^3 + \ldots . \tag{65}$$

Формула (65) может быть преобразована в каноническую форму посредством соответствующей нелинейной замены. Это полностью справедливо с математической точки зрения, но совершенно не удовлетворительно с точки зрения физики явления; такое нелинейное преобразование может привести к возникновению сложной нелинейной связи между физическим параметром (нагрузкой) $\boldsymbol{F}$и параметрами несовершенства ε_1, ε_2, ... Тогда потенциальная функция, описывающая несовершенную систему, примет вид

$$V_i(x; F, \varepsilon_1) = \varepsilon_1 x + \frac{1}{2}(F_p' - \mathrm{F})x^2 + \frac{1}{3}x^3 \qquad (66)$$

где $F_p' = F_p + \varepsilon_2$. Критические точки определяются соотношением

$$\frac{dV_i}{dx} = \varepsilon_1 + (F'_p - F)x + x^2 = 0. \qquad (67)$$

Уравнение (67) представляет двумерное многообразие, вложенное в пространство R^3 с координатными осями $x - F - \varepsilon_1$ (рис. 33,а).

В этом случае состояниями равновесия несовершенной системы являются сечения этого многообразия плоскостями ε_1 = const (рис. 33,б).

Свойства устойчивости критических точек легко определяются: все точки на верхнем листе критического многообразия представляют собой локально устойчивые критические точки V_i. *В*се точки на нижнем листе — неустойчивые критические точки.

Поведение несовершенной системы в зависимости от нагрузки Fкритически зависит от знака параметра несовершенства ε_1:при $\varepsilon_1 < 0$ для каждого значения Fсуществуют две критические точки; при $\varepsilon_1 > 0$ имеется область, в которой V_i вообще не имеет критических точек. Последняя существует при

$$-\varepsilon_1 + \left(\frac{F_p' - F}{2}\right)^2 < 0. \qquad (68)$$

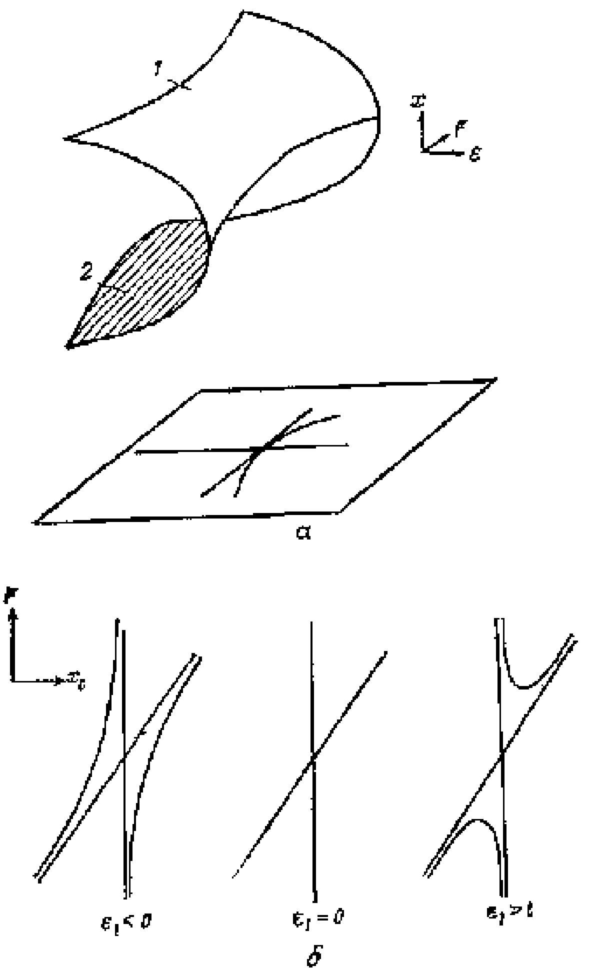


Рис. 33

а — форма многообразия состояний равновесия в пространстве переменных состояния и управляющих параметров $x - F - \varepsilon_1$ для несовершенного поддерживающего кронштейна. Все точки на верхней части этой поверхности представляют локально устойчивые состояния, а точки на нижнем листе — локально неустойчивые состояния. Верхняя н нижняя ветви имеют сепаратрису, которая проектируется на параболу $\varepsilon_1 = (F - F'_p/2)^2$; *б* — траектории до и после выпучивания как сечения многообразия состояний равновесия плоскостью ε_1 = const. Свойства устойчивости вдоль этих траекторий определяются непосредственно из рассмотрения многообразии достояний, равновесий.

Чувствительность системы к несовершенству выражается формулой

$$F_c = F_p + \varepsilon_2 - 2(\varepsilon_1)^{1/2},\ \varepsilon_1 > 0, \tag{69а}$$

$$F_c = \text{“}\infty\text{“},\ \varepsilon_1 < 0. \tag{69б}$$

При $\varepsilon_1 \leq 0$ локально устойчивое состояние равновесия существует при всех значениях внешней силы $\boldsymbol{F}$ (ситуация, аналогичная выпучиванию эйлерова стержня) и можно ввести субъективный критерий безопасности: *сист ема* безопасна, если силы критической нагрузки при значении переменной состояния x превышают некоторое предписанное безопасное значение $s: |x| > s$.

При $\varepsilon_1 > 0$ необходимость в субъективном критерии отпадает. Локально устойчивое состояние равновесия перестает существовать при критической нагрузке F_c, определяемой формулой (69а). Очевидно, что чувствительность к несовершенству очень слабо зависит от ε_2, но сильно зависит от ε_1. Следовательно, параметр ε_1 более важен, чем ε_2, а ε_2 более важен, чем ε_3, и т. д. Именно это обстоятельство и позволяет исключить все возмущения, кроме линейного.

Степенная зависимость разрушающей нагрузки (с показателем степени 1/2) от параметра несовершенства была обоснована Рурдой для систем, которые претерпевают смену типа устойчивости в отсутствие несовершенства. Устойчивые и неустойчивые критические точки для системы, изображенной на рис. 31,а, показаны на рис. 31,б, а чувствительность к несовершенству — на рис. 31,в.

Когда потенциал (66) имеет две точки равновесия, неустойчивое равновесие действует как сепаратриса между областью притяжения локально устойчивого состояния и первичным хаосом. Разность энергий ΔE в локальном максимуме и локальном минимуме равна

$$\boldsymbol{\Delta E = \frac{1}{6}\left[\left(F - F_p\right)^2 - 4\varepsilon_1\right]^{3/2}}. \tag{70}$$

Если система подвергается динамическому нагружению ΔE, которое можно трактовать как динамическое несовершенство, то соотношение между разрушающей нагрузкой F_c, параметром несовершенства ε_1 и фактором динамического нагружения ΔE выражается формулой

$$F_c = F_p - \left[4\varepsilon_1 + (6\Delta E)^{2/3}\right]^{1/2}. \tag{71}$$

При отсутствии динамического нагружения чувствительность к разрушающей нагрузке сводится к зависимости по степенному закону с показателем степени 1/2 (69а). Однако при отсутствии несовершенств чувствительность к динамическому нагружению оказывается более жесткой (рис. 34).

Для несовершенных систем с конечной критической нагрузкой, даваемой формулой (69а), естественно ожидать динамические флуктуации, снижающие несущую способность. Кроме того, возможна очень жесткая чувствительность совершенной системы к динамическим факторам. Потенциальная функция, описывающая совершенную систему, является чрезвычайно плоской и глобально неустойчивой вблизи $\boldsymbol{F} \cong \boldsymbol{F_P},$ так что даже очень слабые флуктуации могут вызвать переход системы через потенциальный барьер. Может показаться неожиданным, что динамические колебания могут перевести «устойчивый» случай $\varepsilon_1 < 0$ в неустойчивый. Флуктуации, превышающие разность критических значений, способны вытолкнуть систему из ее очень устойчивого состояния через потенциальный барьер в бездонные потенциальные ямы. Эти переходы из устойчивого состояния в неустойчивое в результате динамических процессов вызывают обычно беспокойство и служат источником дальнейших размышлений.

Рассмотрим системы, сконструированные из двух компонент. Предположим, что эти две компоненты с параметрами порядка x и y являются совершенными, а также инвариантными относительно замен $x \to \pm x$, $y \to \pm y$. Предположим также, что составная система конструируется совершенно, т.е.

$$V_p(x,\ y;\ F) = V_p(\pm x,\ \pm y;\ F). \tag{72}$$

В этом случае главные члены разложения в ряд Тейлора потенциальной функции, описывающей такую совершенную систему,

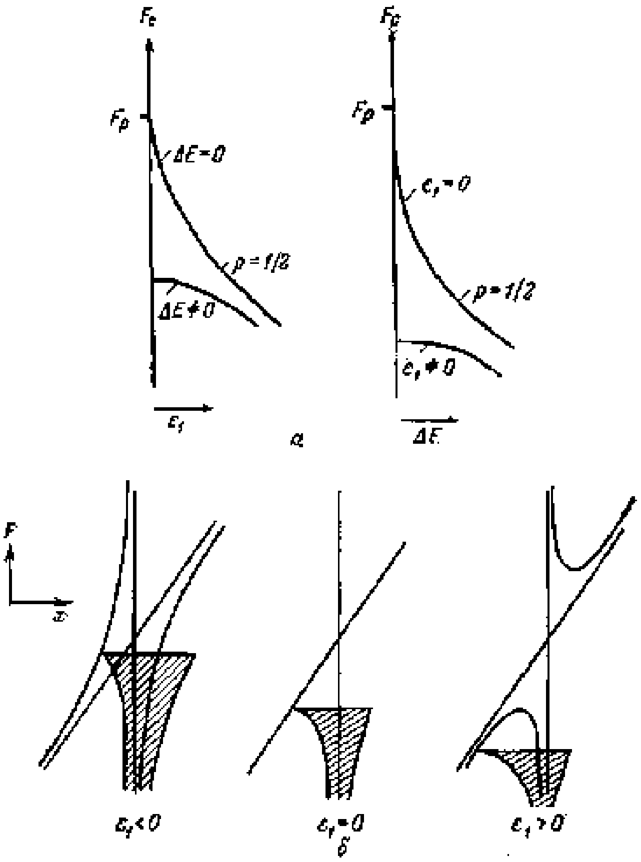


Рис. 34

а — чувствительность к несовершенству систем, проявляющих смену типа устойчивости, крайне жестка. Чисто статические и чисто динамические несовершенства описываются степенными законами с показателями степени 1/2 и 1/3 соответственно; б — динамические несовершенства не только могут уменьшать несущую способность несовершенной системы, проявляющей смену типа устойчивости (при скачке $\varepsilon_1 \geq 0$), но могут также привести к скачку устойчивой системы через потенциальный барьер в хаос ($\varepsilon_1 < 0$). Заштрихованные области указывают пределы колебаний около устойчивого состояния равновесия. Система теряет устойчивость, когда колебания пересекают неустойчивый локальный максимум.

имеют вид

$$V_p(x,\ y;\ F) = \frac{1}{2}(F_1 - F)x^2 + \frac{1}{2}(F_2 - F)y^2 +$$
$$+\ \frac{1}{4}\sigma_1 x^4 + \frac{1}{4}\sigma_2 y^4 + \frac{1}{2}cx^2y^2 +$$
$$+ \text{Члены более высокой степени}; \qquad (73)$$

при этом исключим из рассмотрения члены шестой и более высокой степени. Символы $\sigma_1 = \pm 1$, $\sigma_2 = \pm 1$ введены для учета возможности того, что две индивидуальные компоненты разрушаются в результате катастроф типа $A_{\pm 3}$.

Прежде чем перейти к детальному анализу критических точек данной потенциальной функции, полезно сначала качественно определить ее свойства глобальной устойчивости. Это может быть сделано путем исключения квадратичных членов как несущественных по сравнению с членами четвертой степени при больших значениях $r^2 = x^2 + y^2$ (предполагается, что члены степени выше четвертой равны нулю). Например, если вклад членов четвертой степени в потенциальную функцию V_p равен

$$V_p \xrightarrow{r\ \text{большое}} \frac{1}{4}x^4 + \frac{1}{4}y^4 - \frac{1}{2}\ \mathbf{3}\ x^2y^2,$$

$$= \frac{1}{4}(x^2 - y^2)^2 - x^2y^2, \qquad (74)$$

то V_p устойчива в «направлении» $x^2 - y^2$ и неустойчива в «направлении» $x^2 = y^2$ (т.е. при $x^2 - y^2 = 0$) (табл.1).

Таблица 1. Свойства глобальной устойчивости потенциальной функции вида $V(x, y) = \frac{1}{4}\sigma_1 x^4 + \frac{1}{4}\sigma_2 y^4 + \frac{1}{2}cx^2y^2$

σ_1	σ_2	Условие	$x^2 - y^2$	x^2y^2	«Морсовсий тип»
+1	+1	–1 < c c < –1	+ +	+ –	M_0^2 M_1^2
+1 –1	–1 +1	Произвольное			M_1^2
–1	–1	+1 < c c < +1	– –	+ –	M_2^2 M_2^2

Теперь свойства локальной устойчивости потенциальной функции (73) могут быть определены обычным способом. Условие равенства нулю градиента ведет к паре сцепленных нелинейных уравнений

$$\frac{dV}{dx} = x\{(F_1 - F) + \sigma_1 x^2 + cy^2\} = 0, \qquad (75а)$$

$$\frac{dV}{dy} = y\{(F_2 - F) + \sigma_2 y^2 + cx^2\} = 0. \qquad (75б)$$

Матрица устойчивости имеет вид

$$V_{ij} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{F_1 - F + 3\sigma_1 x^2 c y^2} & \boldsymbol{2cxy} \\ \boldsymbol{2cxy F_2 - F + 3\sigma_2 y^2 + cx^2} & \end{bmatrix} \tag{76}$$

Система уравнений (75) может иметь до девяти решений, перечисленных ниже:

1. $x = 0,$ $\quad V_{ij} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{F_1 - F} & \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{F_2 - F} \end{bmatrix}$

$y = 0,$

2, 3. $\boldsymbol{F_1 - F + \sigma_1 x^2 = 0},$ $\quad V_{ij} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{-2(F_1 - F)} & \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{F_2 - F + cx^2} \end{bmatrix}$

y=0,

4, 5. $x = 0,$ $\quad V_{ij} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{F_1 - F + cy^2} & \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{-2(F_2 - F)} \end{bmatrix}$

$\boldsymbol{F_2 - F + \sigma_2 y^2 = 0}$

6—9. $\boldsymbol{F_1 - F + \sigma_1 x^2 + cy^2 = 0},$ $\quad V_{ij} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{2\sigma_1 x^2} & \boldsymbol{2cxy} \\ \boldsymbol{2cxy} & \boldsymbol{2\sigma_2 y^2} \end{bmatrix}$

$\boldsymbol{F + \sigma_2 y^2 + cx = 0}$

Последнее множество решений существует, если квадратные уравнения соответствуют вещественным кривым второго порядка (эллипсам и/или гиперболам) и эти кривые пересекаются.

Множество решений $(x, y) = (0, 0)$ будем называть *нулевой вет вью,* или *ст волом.* Это решение в силу симметрии существует при всех значениях параметра нагрузки. Множества решений, которые находятся в (x, F)-плоскости $y = 0$ ($\neq 2, 3$) и в (y, F)-плоскости $x = 0$ ($\neq 4, 5$), будем называть (если они существуют) *первичными вет вями,* а остальные четыре симметрических решения ($x \to \pm x$, $y \to \pm y$) — *вт оричными вет вями.* Первичные ветви ответвляются от нулевой ветви, вторичные — от первичных.

Определим свойства локальной устойчивости потенциальной функции V_p, выполняя элементарный анализ бифуркации. Предположим, что $F_2 > F_1 > 0$. При $F = 0$ решение $(x, y) = (0, 0)$ устойчиво, и оно остается утойчивым до тех пор, пока F не возрастет до $F = F_1$.В этой точке первичная ветвь $(x, y) = (\pm\sqrt{\boldsymbol{\sigma_1(F - F_1)}}, 0)$ ответвляется от нулевой и существует только тогда, когда $F \geq F_1$ или $F \leq F_1$ в зависимости от типа катастрофы $A_{\pm 3}$. Другая первичная ветвь ответвляется от нулевой ветви в точке $F = F_2$ и на ней $(x, y) = (0, (\pm\sqrt{\boldsymbol{\sigma_2(F - F_2)}}\,)$.

Вдоль нулевой ветви оси x и y являются главными, а одно собственное значение V_{ij} изменяет знак при каждой бифуркации. Вдоль первичных ветвей оси x и y также являются главными. Первая первичная ветвь ($x \neq 0$, $y = 0$) представляет устойчивые морсовские критические точки M_0^2, если $\sigma_1 = +1$, или неустойчивые морсовские седла M_1^2,если $\sigma_1 = -1$. Вторая первичная ветвь ($x = 0$, $y \neq 0$) представляет неустойчивые морсовские седла M_1^2,если $\sigma_2 = +1$, или M_2^2, если $\sigma_2 = -1$.

Если вторичные ветви существуют, то они должны ответвляться от первичных ветвей, это следует из некоторых соображений, связанных с коническими сечениями. Наиболее простой способ нахождения положения этих бифуркаций состоит в изучении возможности обращения в нуль собственных значений матрицы устойчивости вдоль первичных ветвей. Бифуркация на первой первичной ветви может произойти в точке

$$F = \frac{F_2 - c\sigma_1 F_1}{1 - c\sigma_1} \tag{77a}$$

если указанное значение F лежит на этой ветви.

Аналогично бифуркация на второй первичной ветви может произойти в точке

$$F = \frac{F_1 - c\sigma_2 F_2}{1 - c\sigma_2},$$

если это значение F лежит на ветви ($x = 0$, $y \neq 0$).

Две интересные бифуркационные диаграммы потенциальной функции (73) приведены на рис. 35. На первой из них вторичная ветвь «испускается» одной из первичных ветвей и «поглощается» другой. На второй диаграмме две первичные ветви обращены вверх, а вторичные ветви обращены вниз и неустойчивы. Нисходящие неустойчивые (M_1^2) вторичные ветви являются потенциальными барьерами, отделяющими устойчивую (M_0^2) критическую точку ($x = 0$, $y = 0$) от глобальной неустойчивости (c < -1). При $F_2 \gg F_1$ или $F_1 \gg F_2$ эти седла далеко отстоят от нулевой ветви, и высота потенциального барьера значительна; при $\mathrm{F}_2 - F_1 \cong 0$ и малом $\mathrm{F}_1 - \mathrm{F}$ это уже не имеет места.

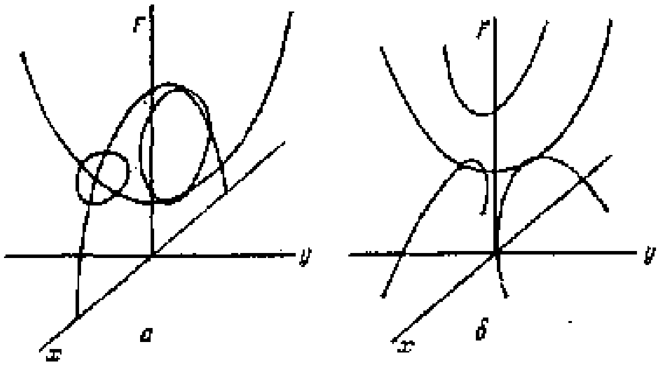


Рис. 35. Зависящие от коэффициент ов квадрат ичных членов бифуркационные диаграммы для пот енциальной функции

а — вторичные ветви, «испускаемые» одной из первичных ветвей, «поглощаются» другой первичной ветвью; б — вторичные ветви являются морсовскими седлами M_1^2.

Анализ несовершенства может быть проведен для совершенных систем, описываемых потенциальной функцией (73); при $\mathrm{F}_2 - F_1 \gg 0$ он сводится к анализу катастроф сборки. Ситуация становится более сложной, когда $\mathrm{F}_2 \cong F_1$. В этом случае, хотя обе бифуркации и являются «мягкими» (A_{+3}), вторичные ветви обращены вниз при c < -1, и, следовательно, может иметь место не только чрезвычайная, но, что хуже, непрогнозируемая чувствительность к несовершенству. Эта неожиданная чувствительность к несовершенству возникает из-за тесной взаимосвязи подобранных нагрузок разрушающих мод обеих компонент подсистемы.

Тот факт, что «опасная» система может получиться в результате объединения двух «безопасных» систем, является поводом для серьезных размышлений.

Многокомпонентные системы часто используются в конструкциях моста или здания. Например, несжимаемая балка и пологая арка могут быть объединены в конструкции моста (рис. 36). Если мост должен выдерживать максимальную нагрузку F_M, то балка не должна выпучиваться, а арка не должна прощелкивать при $F < F_M$.

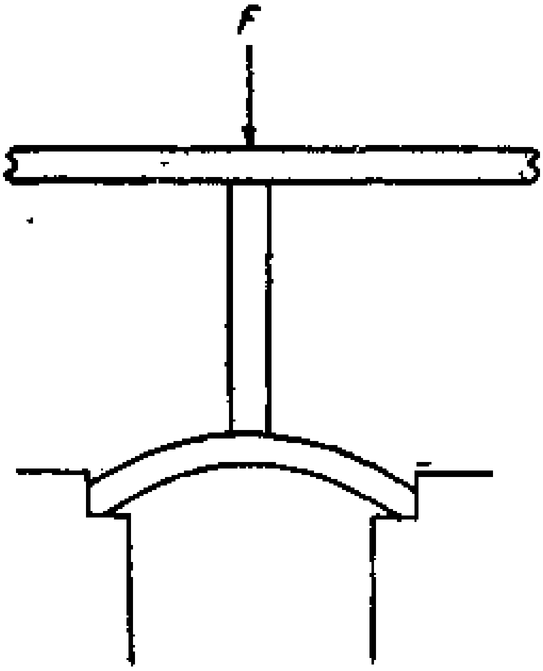


Рис. 36. Распространенные в технике конструкции обычно собирают из нескольких «неприводимых» структурных строительных блоков. Моды разрушения составной системы могут быть значительно более резкими, чем разрушающие моды составляющих ее элементов

Кроме того, согласно философии оптимального конструирования, целесообразно использовать структурные элементы, разрушающиеся при одной и той же нагрузке. В конце концов, как показывает практика, нет никакого смысла использовать тяжелую балку, которая может выдержать нагрузку $3F_M$ до выпучивания, если арка разрушается уже при $1{,}5F_M$.

Кроме того, тяжелые балки дорого стоят, так что и с экономической точки зрения более целесообразно использовать балку, которая выпучивается также при $1{,}5F_M$.

Инженерные оптимизационные процедуры иногда могут привести к крайне нежелательным (и даже опасным) последствиям [38]. Предположим, например, что составная система конструируется из n «неприводимых» компонент, каждая из которых разрушается вследствие катастрофы сборки $A_{\pm 3}$. Тогда потенциальная функция, описывающая совершенную систему, имеет вид

$$V(x_1, x_2, \dots x_n; F) = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{2}(F - F_i)x_i^2 + \sum_{i=1}^{n} \pm \frac{1}{4}x_i^4. \qquad (78)$$

Если нижняя критическая нагрузка достигается при $F = F_1$ и этой нагрузке отвечает лишь одна разрушающая мода, то будет иметь место катастрофа типа $A_{\pm 3}$, а чувствительность к несовершенству будет такой, как описано выше.

В оптимизируемой системе $F_1 = F_2 = \dots = F_n = (F_p)$. При таком идеальном критическом нагружении все элементы разрушаются одновременно. Росток потенциальной функции имеет вид $\pm x_1^4 \pm x_2^4 \pm \dots \pm x_n^4$. Универсальной деформацией этого ростка является

$$P(X) = \sum P_{i_1, i_2, \dots, i_n} x_1^{i_1} x_2^{i_2} \dots x_n^{i_n} \qquad (79)$$

где показатели i_j не выше второй степени. В этом случае несовершенная система $V_P(x; p) + P(x)$ может иметь до 3^n критических точек при разных значениях нагрузки F и параметрах возмущения $P_{i_1, i_2, \dots, i_n}$. Даже если каждая отдельная компонента имеет только одну устойчивую критическую точку при $F < F_p$, то составная система может иметь множество критических точек при $F < F_p$ при условии, что отдельные компоненты сильно взаимосвязаны. Жесткая чувствительность к несовершенству составной системы обусловлена нарушающими симметрию дефектами, связывающими локально устойчивую ветвь в точке $(x_1, \dots, x_n) = (0, \dots, 0)$ с неустойчивой ветвью, которая может существовать вблизи локально устойчивой ветви при $F < F_p$ вследствие наличия сильной связи между модами.

Более подробно применение методов теории катастроф в физике, механике, термодинамике и аэродинамике рассмотрено в [39]. Перспективные направления развития теории катастроф и распространение ее результатов на более широкий класс динамических систем представлены в [40].

Заключение

В итоговом документе организации ООН по вопросам образования, науки и культуры (ЮНЕСКО) «Наука в XXI веке: новое видение» представлены основные положения общественного договора в отношении науки:

более тесное взаимодействие между научными дисциплинами и активизация междисциплинарных исследований;

более активное участие социальных и гуманитарных наук в междисциплинарных исследованиях. Подходы, пренебрегающие гуманитарным измерением некой сложной проблемы, продуцируют ответы, не имеющие отношения к ее разрешению;

проведение проблемно-ориентированных вместо дисциплинарно ориентированных исследований;

более тесная международная кооперация для решения глобальных проблем безопасности и развития;

для решения глобальных проблем необходимо создать новые международные исследовательские сети и укрепить существующие научные организации.

Таким образом, только системное понимание всей совокупности результатов, достигнутых в междисциплинарных исследованиях, позволит на первом этапе реализовать междисциплинарный подход к решению комплексных проблем безопасности [41], а в дальнейшем – построить общую теорию безопасности [42].

В данной монографии изложены первые результаты междисциплинарных исследований современных проблем безопасности жизнедеятельности, в том числе, сделана попытка математического описания катастроф и стихийных бедствий методами нелинейной науки [43].

Литература

1. *Харари Ю.* Homo Deus. Краткая история будущего. – М.: Синдбад, 2018. – 496 с.
2. Сендайская рамочная программа по снижению риска бедствий на 2015—2030 годы. – ООН, 2015. – 40 с.
3. *Лебедев С.А.* Общенаучная картина мира и ее методологические функции // Вестник РАН. 2017. № 2. С. 130—135.
4. *Грушевицкая Т.Г., Садохин А.П.* Концепции современного естествознания: Учебное пособие. – М.: Высшая школа, 1998. – 383 с.
5. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. – М.: МГОФ «Знание», 1998–2015, тт. 1–50.
6. Безопасность России. Правовые, социально-экономический и научно-технические аспекты. Фундаментальные и прикладные проблемы комплексной безопасности. – М.: МГОФ «Знание», 2017. – 992 с.
7. *Акимов В.А., Владимиров В.А., Измалков В.И.* Катастрофы и безопасность. – М.: МЧС России, 2006. – 392 с.
8. *Акимов В.А.* Междисциплинарные исследования проблем безопасности. – М.: ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2017. – 136 с.
9. *Урсул А.Д.* Синергетический подход к исследованию безопасности // Вопросы безопасности. – 2012. – № 2. С. 1–47.
10. *Князева Е.Н., Курдюмов С.П.* Синергетика: нелинейность времени и ландшафты коэволюции. – М., 2007.
11. *Ярочкин В.И.* Секьюритология: наука о безопасности жизнедеятельности. – М.: Ось-89, 2000. – 400 с.
12. *Пригожин И., Стенгерс И.* Время. Хаос. Квант: К решению парадокса времени. Изд. 8-е. – М.: Едиториал УРСС, 2014. – 240 с.

13. *Пригожин И., Стенгерс И.* Порядок из хаоса: Новый диалог человека с природой. Изд. 7-е. – М.: Едиториал УРСС, 2014. – 304 с.
14. *Хакен Г.* Синергетика: Принципы и основы. Изд. 2-е. – М.: УРСС: ЛЕНАНД, 2015. – 448 с.
15. *Хакен Г.* Синергетика: Перспективы и приложения. Изд. 2-е. – М.: УРСС: ЛЕНАНД, 2015.
16. *Том Р.* Особенности дифференцируемых отображений. – М.: Мир, 1968. – 268 с.
17. *Арнольд В.И.* Теория катастроф. Изд. 7-е. – М.: ЛЕНАНД, 2016. – 136 с.
18. *Моисеев В.И.* Философия науки. Философские проблемы биологии и медицины. – М.: ГЭОТАР-Медиа, 2015. – 584 с.
19. *Малинецкий Г.Г.* Пространство синергетики: Взгляд с высоты. – М.: ЛИБРОКОМ, 2017. – 248 с.
20. *Малинецкий Г.Г., Потапов А.Б.* Нелинейная динамика и хаос: Основные понятия. – М.: ЛИБРОКОМ, 2018. – 240 с.
21. *Малинецкий Г.Г.* Нелинейность в современном естествознании. – М.: ЛКИ, 2016. – 424 с.
22. *Назаретян А.П.* Нелинейное будущее. Мегаистория, синергетика, культурная антропология и психология в глобальном прогнозировании. – М.: АРГАМАК-МЕДИА, 2017. – 512 с.
23. *Малинецкий Г.Г.* Математические основы синергетики. Изд. 8-е. – М.: ЛЕНАНД, 2017. – 312 с.
24. *Уитни Х.* Геометрическая теория интегрирования. – М.: Иностранная литература, 1960. – 536 с.
25. *Федер Е.* Фракталы. Изд. 2-е – М.: Едиториал УРСС, 2014. – 264 с.
26. *Пенроуз Р.* Новый ум короля: О компьютерах, мышлении и законах физики. Изд. 5-е. М.: УРСС: ЛЕНАНД, 2015. – 416 с.

27. *Урсул А.Д.* Проблемы безопасности и устойчивого развития: эволюционный подход и междисциплинарные перспективы. //Вопросы безопасности, 2015. – № 1.

28. *Сапронов В.В.* Идеи к общей теории безопасности // ОБЖ. Основы безопасности жизни, 2007. – №№ 1–3.

29. *Арсеньев С.А.* Фрикционная теория землетрясений // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2014. № 4 (63). Часть II. С. 300–309.

30. *Арсеньев С.А.* Взрывная неустойчивость сейсмических волн // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2015. № 12 (83). Часть VII. С. 141–149.

31. *Арсеньев С.А.* Возникновение землетрясений в активных разломах // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2017. № 4 (99). Часть II. С. 145–158.

32. *Крагельский И.В., Щедров В.С.* Развитие науки о сухом трении. М.: АН СССР.1956. – 237 с.

33. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Гидродинамика. М.: Наука. 1986. – 736 с.

34. *Scholz C.H.* The mechanics of Earthquake and Faulting. Cambridge. University press, 2002. – 471 p.

35. *Арсеньев С.А.* Землетрясения с точки зрения теории катастроф // Триггерные эффекты в геосистемах. 2017. С. 52–59.

36. *Euler L.*, Methodes Inveniendi Lineas Curvas Maximi Minimive Proprietate Gaudentes (Appendix, De Curvis Elasticis), Lausanne and Geneva: Marcum Michaelum Bousquet, 1744.

37. *Roorda J.*, Stability of Structures with Small Imperfections, J. Eng. Mech. Div. Am. Soc. Civil Eng., 91, 87 (1965).

38. *Thompson J. M. T., Hunt G W.*, Dangers of Structural Optimization, Eng. Optimization, 1, 99—110 (1974).

39. *Гилмор Р.* Прикладная теория катастроф. – М.: Мир, 1984. – 286 с.

40. *Постон Т., Стюарт И.* Теория катастроф и ее приложения. – М.: Мир, 1980. – 608 с.

41. *Акимов В.А.* Оценка состояния науки в Российской Федерации по вопросам исследования техногенных угроз // Технологии гражданской безопасности, Том 15, 2018, № 1 (55). – с. 4–10.

42. *Акимов В.А.* Научные основы общей теории безопасности // Технологии гражданской безопасности, Том 14, 2017, № 4 (54). – с. 4–10.

43. *Акимов В.А.* Проблемы безопасности жизнедеятельности в современной научной картине мира // Технологии гражданской безопасности, Том 18, 2018, № 4 (58). – с. 4–12.

Приложение 1. Термины и определения

В настоящем издании применяют следующие термины с соответствующими и определениями.

АТТРАКТОР, (англ. *attract* — привлекать, притягивать) — компактное подмножество фазового пространства динамической системы, все траектории из некоторой окрестности которого стремятся к нему при времени, стремящемся к бесконечности. Аттрактором может являться притягивающая неподвижная точка, периодическая траектория или некоторая ограниченная область с неустойчивыми траекториями внутри.

БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ — область научных знаний, изучающая опасности, угрожающие человеку, обществу и государству, и разрабатывающая соответствующие меры безопасности.

БИФУРКАЦИЯ, (лат. bifurcus – раздвоенный) — разделение, разветвление чего-либо на два потока, направления; приобретение нового качества в движениях динамической системы при малом изменении ее параметров.

ДИНАМИЧЕСКАЯ СИСТЕМА — множество элементов, для которого задана функциональная зависимость между временем и положением в фазовом пространстве каждого элемента системы. Данная математическая абстракция позволяет изучать и описывать эволюцию систем во времени.

ДИНАМИЧЕСКИЙ (ДЕТЕРМИНИРОВАННЫЙ) ХАОС — явление в теории динамических систем, при котором поведение нелинейной системы выглядит случайным, несмотря на то, что оно определяется детерминистическими законами. Хаос порождается собственной динамикой нелинейной системы – ее свойством экспоненциально быстро разводить сколь угодно близкие траектории.

ДИССИПАТИВНЫЕ СТРУКТУРЫ, (лат. dissipatio – рассеиваю, разрушаю) — устойчивые пространственно неоднородные структуры, связанные с рассеиванием энергии. Такие структуры могут существовать лишь в том случае, если объект обменивается с окружающей средой достаточно мощными потоками вещества, энергии или информации.

ДРОБНАЯ (ФРАКТАЛЬНАЯ) РАЗМЕРНОСТЬ — один из способов определения размерности множества в метрическом пространстве. Фрактальная размерность может принимать не целое числовое значение.

ЖЕСТКАЯ БИФУРКАЦИЯ (КАТАСТРОФА) — это бифуркация, в результате которой система приобретает качественно новое устойчивое состояние, не похожее на исходное. Именно жесткие бифуркации легли в основу теории катастроф.

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ТЕОРИИ — относительно устойчивые и регулярные взаимосвязи между явлениями и объектами реальности, изучаемые данной теорией.

ИСХОДНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕОРИИ — объект, предмет, принципы и закономерности теории.

КАТАСТРОФА — скачкообразное изменение, возникающее в виде внезапного отклика системы на плавное изменение внешних условий, то есть резкое качественное изменение объекта при плавном количественном изменении параметров, от которых он зависит.

КЛАССИЧЕСКИЙ ПОДХОД К СОЗДАНИЮ ТЕОРИИ — подход к созданию теории, включающий следующие этапы: получение набора экспериментальных данных; определение закономерностей между этими данными; формулирование эмпирического закона; построение системы гипотез и новой теории.

МАШИНА КАТАСТРОФЗИМАНА — механизм, демонстрирующий скачкообразный переход количества в качество, при котором непрерывно меняющиеся причины приводят к резким, прерывно меняющимся следствиям.

МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОБЛЕМ БЕЗОПАСНОСТИ — современные исследования проблем безопасности методами различных наук; способ организации исследовательской деятельности современных проблем безопасности представителями различных научных дисциплин.

НЕРАВНОВЕСНАЯ ТЕРМОДИНАМИКА — раздел термодинамики, изучающий системы вне состояния термодинамического равновесия и необратимые процессы. Возникновение этой области знания связано главным образом с тем, что подавляющее большинство встречающихся в природе систем находятся вдали от термодинамического равновесия.

ОБЩАЯ ТЕОРИЯ БЕЗОПАСНОСТИ — область знаний, интегрирующая прикладные аспекты различных наук и ориентированная на исследование сущности, содержания, методов, форм, органов, сил и средств обеспечения безопасности личности, общества и государства в условиях комплексного воздействия внешних и внутренних факторов различного характера.

ОБЩАЯ ТЕОРИЯ СИСТЕМ — научная и методологическая концепция исследования объектов, представляющих собой системы. Она тесно связана с системным подходом и является конкретизацией его принципов и методов.

ОПАСНОСТЬ – потенциально пагубное физическое явление, событие или деятельность человека, которые могут приводить к гибели людей или нанесению им телесных повреждений, причинению ущерба имуществу, нарушению функционирования социальных и экономических систем или ухудшению состояния окружающей среды. Опасности могут включать скрытые условия, несущие в себе будущие угрозы, и могут обусловливаться различными причинами: природными (геологическими, гидрометеорологическими и биологическими) или вызванными процессами жизнедеятельности человека (ухудшение состояния окружающей среды и техногенные опасности).

ОСОБЕННОСТЬ — точка, в которой математический объект (обычно функция) не определён или имеет нерегулярное поведение (например, точка, в которой функция имеет разрыв или недифференцируема).

ОТКРЫТАЯ СИСТЕМА — система, которая непрерывно взаимодействует со своей средой. Взаимодействие может принимать форму информации, энергии или материальных преобразований на границе с системой. Открытая система противопоставляется изолированной, которая не обменивается энергией, веществом или информацией с окружающей средой.

ПОСТНЕКЛАССИЧЕСКАЯ НАУКА — современный этап становления науки, начавшийся в 1970-х годах XXвека. Одной из черт нового этапа становится междисциплинарность, дальнейшее внедрение принципа эволюционизма. Характерным примером постнеклассической науки является синергетика, изучающая процессы самоорганизации.

ПОТЕНЦИАЛ ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ – способность системы, подверженной угрозам, противостоять последствиям угрозы, переносить их, приспосабливаться к ним и восстанавливаться своевременно и эффективно, в том числе посредством сохранения и восстановления своих основополагающих структур и функций.

ПРОИЗВОДСТВО (ПРОДУКЦИЯ) ЭНТРОПИИ — прирост энтропии в физической системе за единицу времени в результате протекающих в ней неравновесных процессов.

ПРОСТРАНСТВО СОСТОЯНИЙ — это пространство, в котором каждой точке соответствует определенное состояние системы, а положение этой точки определяется значениями переменных состояния.

РЕЖИМ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ —множество элементов, для которого задана функциональная зависимость между временем и положением в фазовом пространстве каждого элемента системы. Данная математическая абстракция позволяет изучать и описывать эволюцию систем во времени. Состояние динамической системы в любой момент времени описывается множеством вещественных чисел (или векторов), соответствующим определённой точке в пространстве состояний.

САМООРГАНИЗАЦИЯ — процесс упорядочения элементов одного уровня в системе за счёт внутренних факторов, без внешнего специфического воздействия (изменение внешних условий может также быть стимулирующим либо подавляющим воздействием).

СИНЕРГЕТИКА — междисциплинарное направление науки, объясняющее образование и самоорганизацию моделей и структур в открытых системах, далеких от термодинамического равновесия.

СИНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ПАРАДИГМА — это общепризнанный эталон, это модель деятельности, принятые в обществе, в научном сообществе на сегодняшний день (включает законы, теорию, их практическое применение, метод, правила и стандарты и т.п.). Суть этой новой научной парадигмы в том, что акцент переносится со статического положения равновесия на изучение состояний неустойчивости, механизмов возникновения и перестройки структур.

СИСТЕМА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ — совокупность уравнений, в каждое из которых входят независимая переменная, искомые функции и их производные. Всегда предполагается, что число уравнений равно числу неизвестных функций.

СОВРЕМЕННАЯ ОБЩЕНАУЧНАЯ КАРТИНА МИРА — целостная система обобщённых представлений о свойствах и закономерностях действительности (вселенной, живой природе, обществе и человеке), построенная в результате обобщения и синтеза фундаментальных знаний, полученных в различных науках на соответствующих стадиях их исторического развития. В этом смысле понятие научной картины мира используется для обозначения горизонта систематизации знаний, полученных в различных научных дисциплинах.

СТЕПЕНЬ СВОБОДЫ — характеристики движения механической системы. Число степеней свободы определяет минимальное количество независимых переменных (обобщённых координат), необходимых для полного описания движения механической системы.

СТРАННЫЙ АТТРАКТОР — это притягивающее множество неустойчивых траекторий в фазовом пространстве диссипативной динамической системы. В отличие от аттрактора, не является многообразием, то есть не является кривой или поверхностью. Структура странного аттрактора фрактальна. Траектория такого аттрактора непериодическая (она не замыкается) и режим функционирования неустойчив (малые отклонения от режима нарастают). Основным критерием хаотичности аттрактора является экспоненциальное нарастание во времени малых возмущений.

ТЕОРИЯ БИФУРКАЦИЙ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ — теория, которая изучает изменения качественной картины разбиения фазового пространства в зависимости от изменения параметра (или нескольких параметров).

ТЕОРИЯ КАТАСТРОФ — раздел математики, включающий в себя теорию бифуркаций динамических систем и теорию особенностей гладких отображений.

ТЕОРИЯ ОСОБЕННОСТЕЙ ГЛАДКИХ ОТОБРАЖЕНИЙ — раздел топологии, изучающий сингулярности, то есть точки, в которых математический объект (функция) не определен или имеет нерегулярное поведение (например, точка, в которой функция имеет разрыв или недифференцируема).

ТЕРМОДИНАМИКА — раздел физики, изучающий наиболее общие свойства макроскопических систем и способы передачи и превращения энергии в таких системах. В термодинамике изучаются состояния и процессы, для описания которых можно ввести понятие температуры.

ТОЧКА БИФУРКАЦИИ — смена установившегося режима работы системы. Точка бифуркации — критическое состояние системы, при котором система становится неустойчивой относительно флуктуаций и возникает неопределённость: станет ли состояние системы хаотическим или она перейдёт на новый, более дифференцированный и высокий уровень упорядоченности.

УЯЗВИМОСТЬ – условия, определяемые физическими, социальными, экономическими и экологическими факторами или процессами, которые усиливают подверженность того или иного сообщества воздействию опасностей.

ФАЗОВАЯ ТРАЕКТОРИЯ — кривая в фазовом пространстве, составленная из точек, представляющих состояние динамической системы в последовательные моменты времени.

ФАЗОВОЕ ПРОСТРАНСТВО — пространство, на котором множество всех состояний системы представлено так, что каждому возможному состоянию системы соответствует одна и только одна точка этого пространства и, наоборот, каждой точке этого пространства соответствует одно и только одно состояние системы.

ФАЗОВЫЙ ПОРТРЕТ — это совокупность фазовых траекторий для всевозможных начальных условий. Его можно рассматривать как интегральное многообразие.

ФЛУКТУАЦИЯ — любое случайное отклонение какой-либо величины. В квантовой механике — отклонение от среднего значения случайной величины, характеризующей систему из большого числа хаотично взаимодействующих частиц.

ФРАКТАЛ — множество, обладающее свойством самоподобия (объект, в точности или приближённо совпадающий с частью себя самого, то есть целое имеет ту же форму, что и одна или более частей). В математике под фракталами понимают множества точек в евклидовом пространстве, имеющие дробную метрическую размерность, либо метрическую размерность, отличную от топологической, поэтому их следует отличать от прочих геометрических фигур, ограниченных конечным числом звеньев.

ЭНТРОПИЯ — мера неупорядоченности системы, состоящей из большого количества элементов.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Презентационные материалы к монографии:

«ОБЩАЯ ТЕОРИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ В СОВРЕМЕННОЙ НАУЧНОЙ КАРТИНЕ МИРА»

Автор: АКИМОВ Валерий Александрович,

Д.т.н., профессор, засл. деятель науки РФ

Москва, 2018 г.

УГРОЗЫ И ВЫЗОВЫ ЧЕЛОВЕЧЕСТВУ

ВЧЕРА	СЕГОДНЯ	ЗАВТРА
ГОЛОД	ОЖИРЕНИЕ (оно убивает больше людей, чем голод)	СТИХИЙНЫЕ БЕДСТВИЯ (уровень подверженности бедствиям повышается быстрее, чем снижается уязвимость)
ЭПИДЕМИИ	СТАРОСТЬ (от нее умирают чаще, чем от эпидемий)	ЭКОНОМИЧЕСКАЯ МОЩЬ (нарушается экологическое равновесие на планете)
ВОЙНЫ	САМОУБИЙСТВА (превышают число насильственных смертей)	ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ (человечество может оказаться во власти всемогущих алгоритмов)

2

РАДИКАЛЬНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ XXI ВЕКА

В области ***демографии*** (увеличение численности населения до 10-12 млрд., изменение соотношения молодых и старых, богатых и бедных, горожан и сельских жителей)

В области ***экономики*** (рост объемов мирового производства в рамках ограниченной экосистемы)

В области ***взаимодействия с окружающей средой*** (гармония с окружающим миром или гибель человечества)

Происходящие радикальные изменения позволяют сделать вывод о недопустимости пренебрежения вопросами безопасности.

ЭТАПЫ РАЗВИТИЯ НАУКИ
(ОБЩЕНАУЧНЫЕ КАРТИНЫ МИРА)

1. АНТИЧНЫЙ
(VII век до н.э. – III век н.э.)

- натурфилософия Аристотеля;
- геометрия Евклида, физика Аристотеля, астрономия Птолемея;
- светский характер греко-римской цивилизации.

2. СРЕДНЕВЕКОВЫЙ
(IV – XVII вв.)

- формальная логика;
- религиозный (христианский) тип цивилизации.

3. КЛАССИЧЕСКИЙ
(XVII – XIX вв.)

- механика Галилея-Ньютона, астрономия Коперника-Кеплера, электромагнетизм Фарадея-Максвелла, термодинамика Джоуля-Томпсона, геометрия Декарта, математический анализ Ньютона-Лейбница, химия Гей-Люссака;
- индустриальный тип цивилизации.

4. НЕКЛАССИЧЕСКИЙ
(XX век)

- теория относительности , квантовая механика, теория элементарных частиц, генетика, информатика, вычислительная математика;
- постиндустриальный тип цивилизации.

5. ПОСТНЕКЛАССИЧЕСКИЙ
(конец XX – начало XXI вв.)

- Теория самоорганизации, синергетика, теория катастроф;
- междисциплинарность.

4

ПРИНЦИПЫ СОВРЕМЕННОЙ ОБЩЕНАУЧНОЙ КАРТИНЫ МИРА

1. Все реальные системы являются открытыми, т.е. обмениваются веществом, энергией и информацией.

2. Изменения всех систем носят эволюционный (направленный) характер .

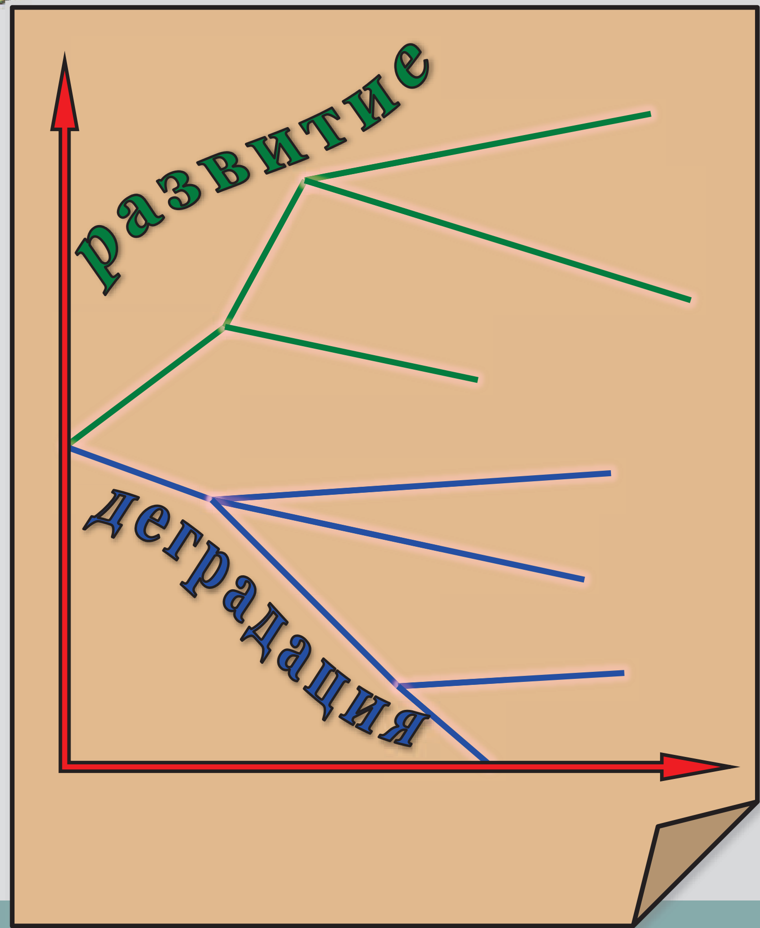
3. Однозначный (линейный) характер поведения наблюдается только у устойчивых систем.

4. Любая система со временем становится неустойчивой.

5. Поведение всех сложных систем имеет нелинейный характер.

6. Прогрессивное развитие возможно только для открытых систем.

7. Все сложные системы подчиняются законам функционирования открытых, диссипативных (неравновесных) и нелинейных систем.



ОСНОВА СОВРЕМЕННОЙ ОБЩЕНАУЧНОЙ КАРТИНЫ МИРА

СИНЕРГЕТИКА – междисциплинарное направление научных исследований, в рамках которого изучаются общие закономерности процессов перехода от хаоса к порядку и обратно в открытых нелинейных системах.

СООТНОШЕНИЕ СИНЕРГЕТИКИ И СИСТЕМНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Системные исследования	Синергетика
1. Акцент на морфологическом (структурном), реже – на функциональном описании систем	1. Акцент на процессах создания, развития и разрушения систем
2. Большее значение на упорядоченности и равновесии систем	2. В процессах движения систем важную роль играет хаос, причем не только деструктивную
3. Изучаются процессы организации систем	3. Изучаются процессы самоорганизации систем
4. Абстрагируются от кооперативных систем	4. Подчеркивается кооперативность процессов развития систем
5. В основе – принцип системности	5. В основе – принцип развития систем

ОСНОВНЫЕ ТЕОРИИ СИНЕРГЕТИКИ:

- *теория динамического хаоса* – исследует сверхсложную, скрытую упорядоченность поведения изучаемой системы;
- *теория фракталов* – занимается изучением сложных самоподобных структур, возникающих в процессе самоорганизации;
- *теория катастроф* – исследует поведение самоорганизующихся систем в терминах бифуркация (от лат. *bifurcus* - раздвоенный), аттрактор (от англ. *attract* - притягивать), неустойчивость.

СОСТАВНЫЕ ЧАСТИ СОВРЕМЕННОЙ СИНЕРГЕТИКИ

1. **Статистическая физика** в приложении к описанию существенно неравновесных процессов.

2. **Неравновесная термодинамика** в приложении к изучению стационарных состояний.

3. **Теория динамического хаоса**, исследующая сверхсложную, скрытую упорядоченность поведения наблюдаемой системы.

4. **Теория катастроф**, базирующаяся на нелинейных дифференциальных уравнениях, определяющих состояния, далекие от равновесия и зависящие от входящих параметров.

5. **Теория фракталов**, изучающая сложные самоподобные структуры, возникающие в результате самоорганизации.

При рассмотрении перспектив развития синергетики можно ожидать, что эта наука окажется полезной при дальнейшем развитии концепции устойчивого развития и создании общей теории безопасности.


ПОДХОДЫ К ПОСТРОЕНИЮ
ОБЩЕЙ ТЕОРИИ БЕЗОПАСНОСТИ
1. Классический подход:
Набор экспериментальных данных
Определение закономерностей между этими данными
Формулирование эмпирического закона
Построение системы гипотез
Построение новой теории
2. Междисциплинарный подход:
СИСТЕМА НАУК
Естественные науки
Общественные науки
Гуманитарные науки
Технические науки
Приложения естественных, общественных, гуманитарных и технических наук к проблемам безопасности
Общая теория безопасности


БЕЗОПАСНОСТЬ
КАК МЕЖДИСЦИПЛИНАРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
НАУКИ О ЗЕМЛЕ И АТМОСФЕРЕ
ФИЗИКА И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ
БИОЛОГИЧЕСКИЕ, ХИМИЧЕСКИЕ, МЕДИЦИНСКИЕ НАУКИ
СОЦИАЛЬНЫЕ И ГУМАНИТАРНЫЕ НАУКИ
ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ
НАУКИ ОБ ЭКОЛОГИИ И ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ НАУКИ

БЕЗОПАСНОСТЬ КАК ОБЪЕКТ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

ОБЪЕКТ И ПРЕДМЕТ ОБЩЕЙ ТЕОРИИ БЕЗОПАСНОСТИ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Объект ОБЖ – это то, что изучает наука, в нашем случае – безопасность.

Предмет ОБЖ - закономерности, свойства и связи объекта, то есть предметом является одна из сторон, с которых можно подойти к объекту.

Категория «безопасность» представлена как объект междисциплинарного исследования, предметом которой являются приложения отдельных наук к проблемам безопасности.

В данном случае объекты всех наук совпадают, но каждая из них изучает свои явления, процессы, законы и закономерности безопасности, то есть свой предмет.

СХЕМА МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОБЛЕМ БЕЗОПАСНОСТИ

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ И ЗАКОНОМЕРНОСТИ ОБЩЕЙ ТЕОРИИ БЕЗОПАСНОСТИ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Безопасность обеспечивается защитой от непосредственных угроз и предотвращением потенциальных опасностей с помощью преобразования окружающей среды.

Результативность предотвращения определяет уровень безопасности общества.

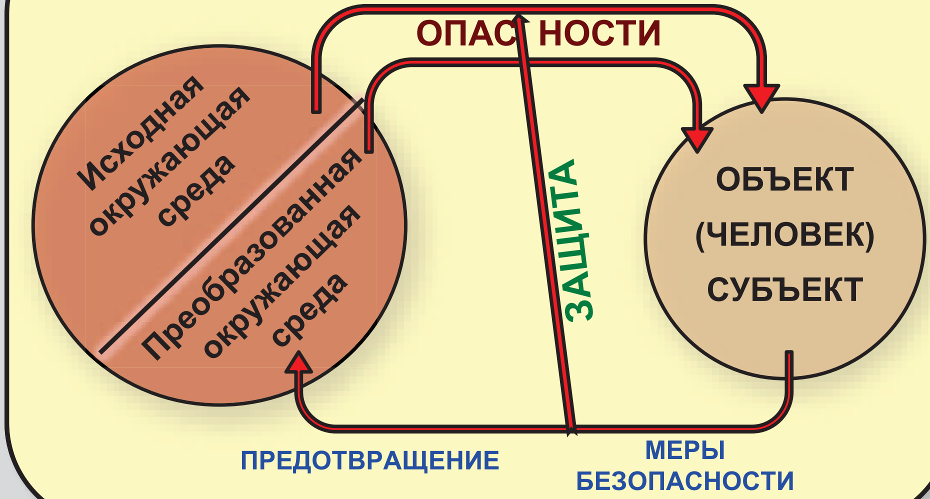
Результативность защиты позволяет реализовать достигнутый обществом уровень безопасности.

При этом, под *защитой будем понимать меру безопасности, заключающуюся в парировании проявившихся угроз, а под предотвращением - меру безопасности, заключающуюся в ликвидации причин возникновения опасностей.*

КЛАССИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ПОСТРОЕНИЮ ОБЩЕЙ ТЕОРИИ БЕЗОПАСНОСТИ

Основное содержание научной теории:
- исходные принципы и формулировки законов;
- основные системообразующие категории и понятия;
- схема (модель) основных связей изучаемой реальности;
- правила вывода новых знаний.

КАНОНИЧЕСКАЯ СХЕМА ОБЩЕЙ ТЕОРИИ БЕЗОПАСНОСТИ*



Защита – мера безопасности, заключающаяся в парировании проявившихся угроз.

Предотвращение – мера безопасности, заключающаяся в ликвидации причин возникновения опасностей.

Взаимосвязи между человеком и окружающей средой формируют **2** контура обеспечения безопасности. Первым является ***контур защиты***, в котором только реализуется достигнутый уровень безопасности. Достигается же этот уровень в ***контуре предотвращения***, отражающем преобразовательную деятельность человека.

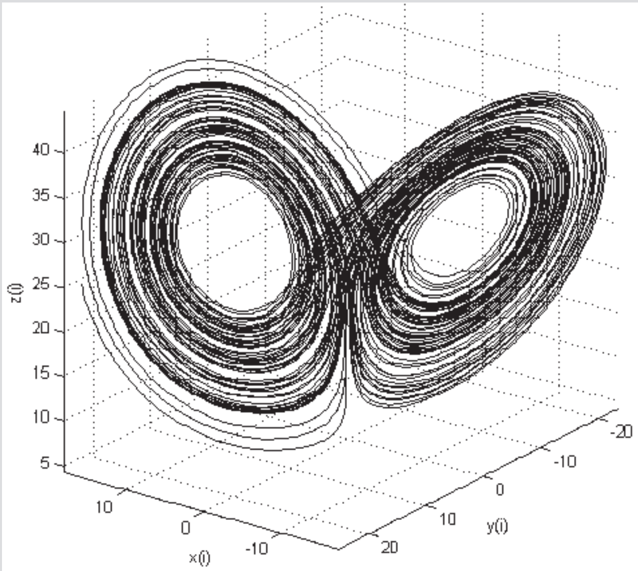
* *Сапронов В.В. Идеи к общей теории безопасности // ОБЖ. Основы безопасности жизни. 2007. - №№ 1-3.*

ФОРМАЛИЗАЦИЯ КАТАСТРОФ И КРИЗИСОВ

№	Реальные процессы и системы	Теории и модели исследований	Возможности прогнозирования	Горизонт прогноза
1.	Динамические	Теория динамических систем; непрерывные модели	Будущее однозначно определяется прошлым; процессы детерминированы и полностью предсказуемы	Неограничен
2.	Стохастические	Теория вероятностей и математическая статистика; вероятностно-статистические модели	Будущее никак не зависит от прошлого; процессы полностью непредсказуемы	Отсутствует
3.	«Динамический хаос»	Теория сложности и самоорганизованной критичности; модели иерархических систем и нелинейной динамики	Поведение может быть предсказано только на небольшой промежуток времени	Ограничен

ДИНАМИЧЕСКИЙ ХАОС

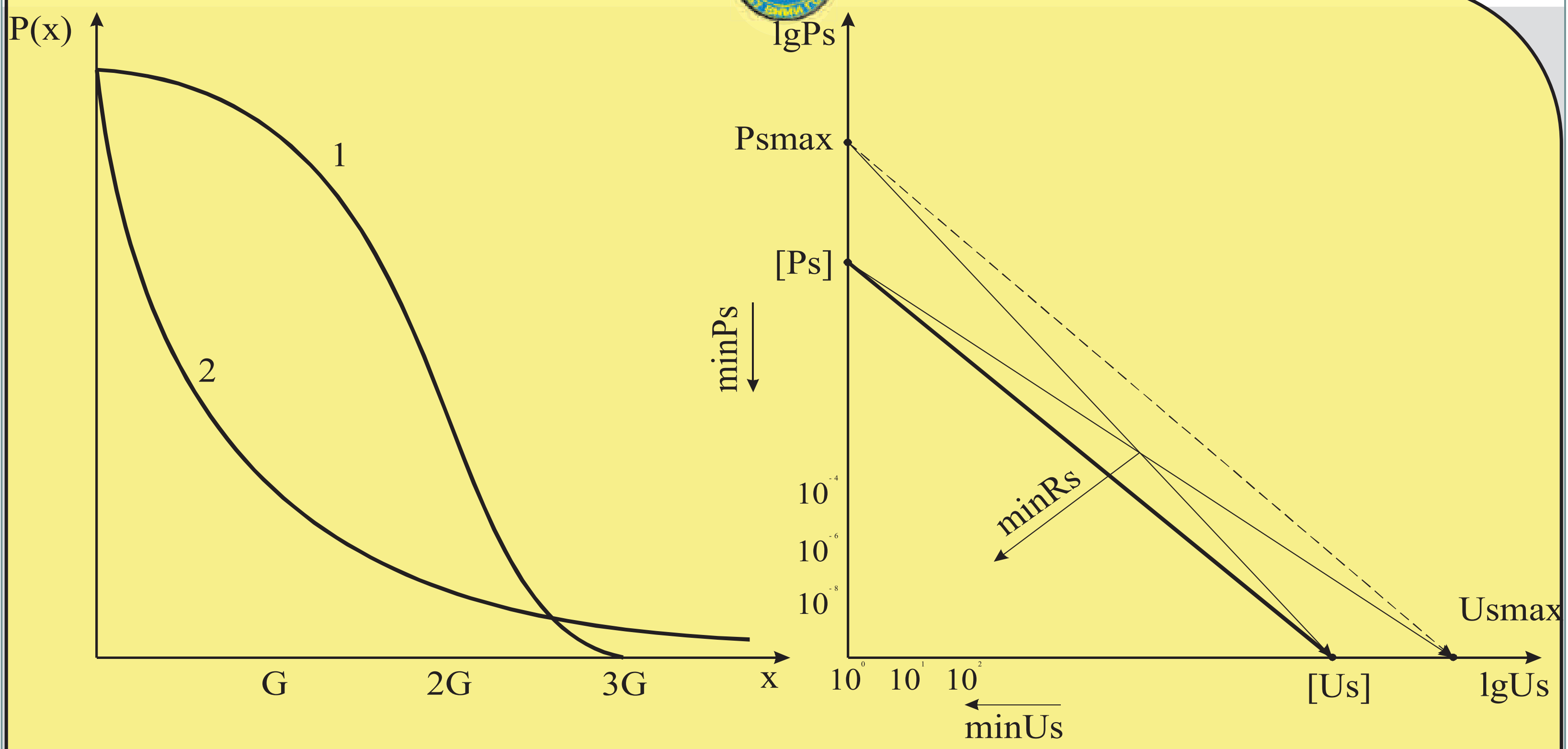
Аттрактор Лоренца



Атмосферная модель Лоренца

$$\begin{cases} \dfrac{dx}{dt} = a(y - x) \\ \dfrac{dy}{dt} = x(b - z) - y \\ \dfrac{dz}{dt} = xy - cz \end{cases}$$

ЗАКОНЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КАТАСТРОФ И КРИЗИСОВ



1 — нормальное (гауссово) распределение
2 — степенное распределение (с «тяжелыми хвостами»)

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ СОВРЕМЕННОЙ ТЕОРИИ КАТАСТРОФ

Теория катастроф - часть качественной теории сложных нелинейных систем. Её основой является теория особенностей гладких (дифференцируемых) отображений, сформировавшаяся на стыке топологии и математического анализа, и являющаяся обобщением задач на экстремум.

Теория катастроф сводит огромное многообразие ситуаций к небольшому числу стандартных схем, которые можно детально исследовать. Анализ качественного поведения нелинейных динамических систем при изменении описывающих их параметров, позволяет описывать состояния, далёкие от равновесия, а также предсказывать резкую смену этих состояний.

ТЕОРИЯ КАТАСТРОФ

«КАТАСТРОФА» – резкое качественное изменение объекта при плавном количественном изменении его параметров.

Теория катастроф анализирует критические точки потенциальной функции, то есть точки, где не только первая производная функции равна нулю, но равны нулю и производные более высокого порядка. Динамика развития таких точек может быть изучена при помощи разложения потенциальной функции в рядах Тейлора.

ТИПЫ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ КАТАСТРОФ

№ п/п	Потенциальная функция	Название катастрофы
1.	с одной активной переменной: $x^3 + \alpha x$	«складка»
2.	$x^4 + \alpha_1 x^2 + \alpha_2 x$	«сборка»
3.	$x^5 + \alpha_1 x^3 + \alpha_2 x^2 + \alpha_3 x$	«ласточкин хвост»
4.	$x^6 + \alpha_1 x^4 + \alpha_2 x^3 + \alpha_3 x^2 + \alpha_4 x$	«бабочка»
5.	с двумя активными переменными: $x_1^2 + x_2^2 + \alpha_1 x_1 x_2 - \alpha_2 x_2 - \alpha_3 x_1$	«гиперболическая омбилика»
6.	$x_2^2 - 3x_2^2 x_1^2 + \alpha_1 (x_1^2 + x_2^2) - \alpha_2 x_2 - \alpha_3 x_1$	«эллиптическая омбилика»
7.	$x_2^2 x_1 + x_1^2 + \alpha_1 x_2^2 + \alpha_2 x_1^2 - \alpha_3 x_2 - \alpha_4 x_1$	«параболическая омбилика»

СКЛАДКА УИТНИ

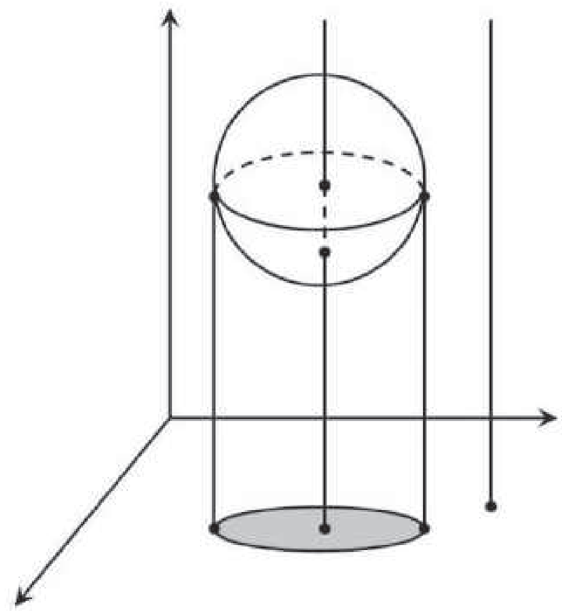


Рис. 4

СБОРКА УИТНИ

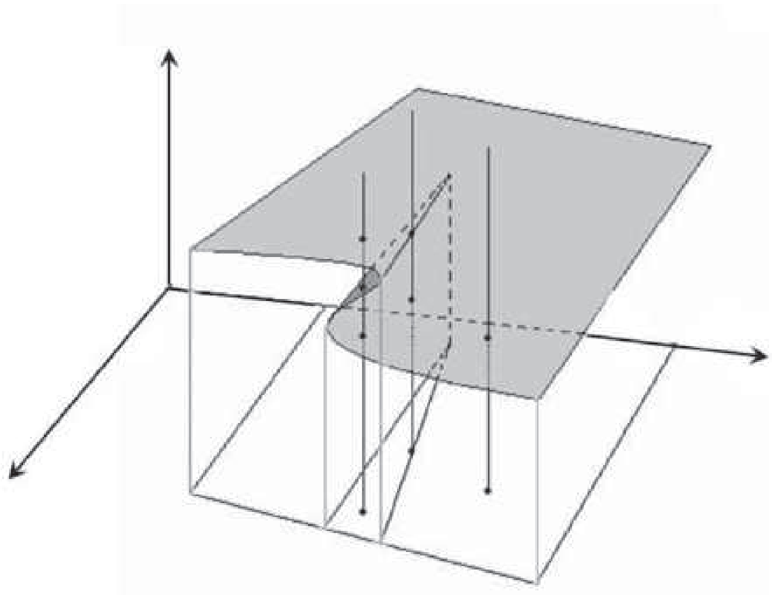


рис.5

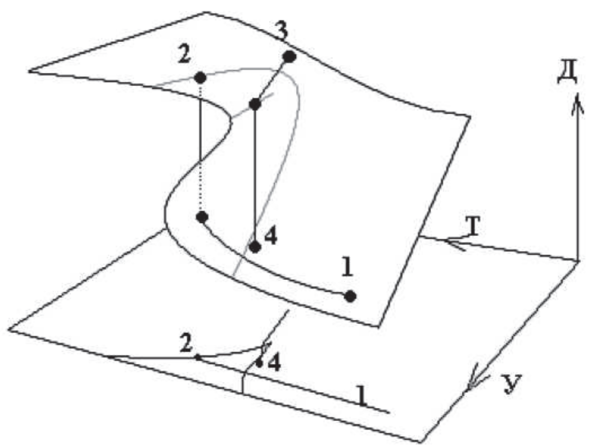
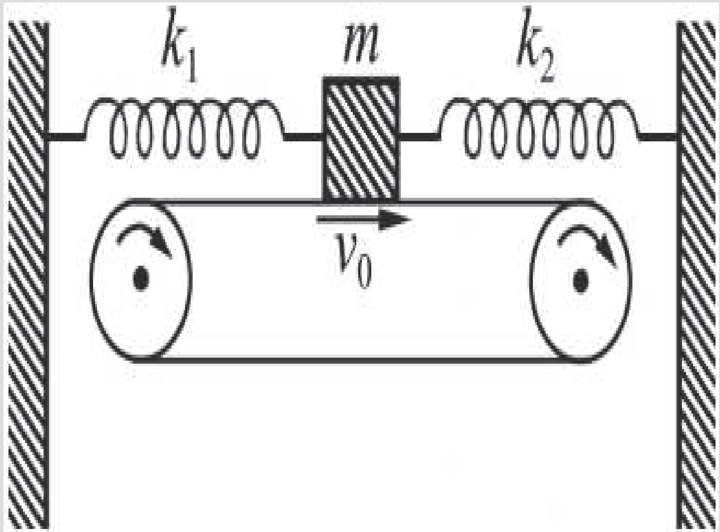


рис.10

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ ПРИРОДНОГО ХАРАКТЕРА МЕТОДАМИ ТЕОРИИ КАТАСТРОФ

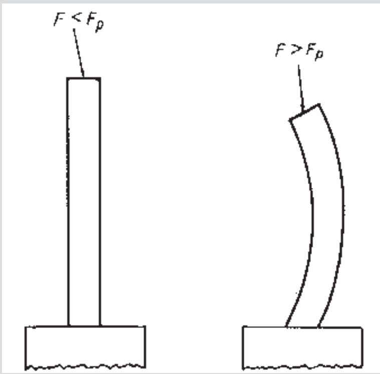
Рассмотрен сейсмически активный разлом, один из берегов которого движется относительно другого со скоростью vo.

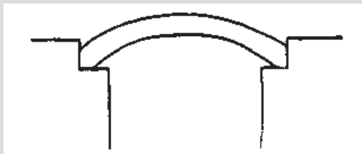


ИССЛЕДОВАНИЕ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ ТЕХНОГЕННОГО ХАРАКТЕРА МЕТОДАМИ ТЕОРИИ КАТАСТРОФ

Рассмотрено исследование чрезвычайных ситуаций техногенного характера на примере разрушений различных механических конструкций (мост, здание и т.п.).

Методы теории катастроф позволяют определить чувствительность критической нагрузки как к несовершенству самой конструкции, так и к динамическому воздействию. Кроме того, они оказываются эффективными при изучении составных систем, для которых возможны различные формы разрушения.





Научное издание

В. А. Акимов

Общая теория безопасности жизнедеятельности в современной научной картине мира

Подписано в печать 29.11.2018 . Формат 60×90 $^{1}/_{16}$.
Объем 8,5 у.п.л.. Тираж 300 экз.
Печать цифровая.

Отпечатано в ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ).
г. Москва, ул. Давыдковская, д. 7.
Завод № 1. Тираж 20 экз. Зак. №