

## ТЕХНОГЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ НА ОСНОВЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ НАЧАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ СЛОЖНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Берман А. Ф.

*Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН,  
Россия, 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д.134  
idstu.irk.ru, bafbam@mail.ru*

*Аннотация: осуществлено обоснование возможности использования синергетического принципа чувствительности начальных условий для повышения техногенной безопасности обеспечиваемой прочностной надежностью механических систем. Анализ причин отказов механических систем и катастрофических событий в синергетике позволил выявить признаки их подобия и сформулировать задачи, необходимые для разработки метода и моделей учитывающих начальные условия.*

Ключевые слова: динамический хаос, самоорганизованная критичность, флуктуации, бифуркации, катастрофа.

### Введение

Структурное резервирование труб, сосудов, ёмкостей, а также крупногабаритных сварных, литых, кованных или клепаных элементов, не обеспечивает техногенную безопасность сложных механических систем (СМС) из-за последствий, обуславливаемых их разрушением, выбросом или утечкой опасных веществ, либо экономически нецелесообразно. Техногенная безопасность таких СМС обеспечивается прочностной надежностью (далее, ПН), под которой понимается системное свойство объекта (элемента, компонента, СМС) сохранять во времени в допустимых пределах значения показателей структурной надежности, обеспечиваемых запасами конструктивной прочности, несущей способности и технического ресурса (далее, прочности и ресурса).

Неконтролируемая деградация технического состояния СМС может быть обусловлена неформализованными многофакторными многостадийными деградационными процессами такими как коррозионное растрескивание, коррозионная усталость, водородное охрупчивание, межкристаллитная коррозия, межкристаллитное растрескивание, коррозионно-механическое изнашивание, кавитация и других, протекающих в широком диапазоне факторов. В результате имеет место недостаточно контролируемое изменение некоторых свойств (параметров) прочности и ресурса, что является причиной нарушения техногенной безопасности, а следовательно, требует совершенствования методов и моделей для решения рассматриваемой проблемы.

Одним из возможных подходов для решения проблемы является использование принципа синергетики о «чувствительности начальных условий», который отражает одну из причин формирования физических, химических, биологических, социальных и других катастрофических событий. В данной работе сделано предположение о том, что чувствительность начальных условий может быть причиной нарушения ПН, значит и техногенной безопасности. Осуществлена попытка использовать этот принцип в качестве технической аналогии для исследования и обеспечения ПН.

Сформулированы необходимые условия и задачи, решение которых может обеспечить разработку метода и моделей для выявления механо-физико-химических причин отказов, снижения уровня неопределенности деградационных процессов и их влияния на параметры прочности, ресурса, показатели ПН, а значит техногенную безопасность.

### 1 Причины катастрофических отказов

Сложная Механическая Система (СМС) – динамический объект, изменяющий во времени техническое состояние под действием функциональных и природных механо-физико-химических факторов, а также под действием операторов. При этом показатели надежности одних объектов могут иметь значительное превышение требуемого запаса, другие объекты практически запаса не имеют и могут приводить к отказам. Этот вывод подтверждается тем, что в некоторых случаях, имеет место многократное продление ресурса элементов, компонентов и СМС.

Существующие методы оценки и обеспечения ПН СМС не всегда удовлетворяет как социально-экономическим, так и нормативным требованиям [1-3]. Катастрофические отказы СМС представлены в соответствующих работах [4-7]. Имеющиеся аналитические и эмпирические модели не отражают в достаточной степени закономерности изменения технического состояния при совместном воздействии нагрузок и сред в широком диапазоне их изменения. В результате не обеспечивается надежный прогноз изменения параметров технического состояния и обуславливаемых ими свойств прочности и ресурса.

Особенно это проявляется при сложной конструкции объектов, структурной чувствительности материалов, недостаточно оцениваемой металлургической и технологической наследственности.

Таким образом, если причиной отказов являются процессы, явления, события и состояния обусловившие отказ. То причиной проявления не допускаемых явлений, процессов, событий и состояний являются несовершенства и нарушения методов и средств создания и применения (далее, несовершенства и нарушения) технических и механических систем [8-11].

## 2 Синергетика и Чувствительность начальных условий

Как известно [12-19], синергетика - наука о самоорганизации в сложных открытых системах, а самоорганизация - процесс формирования в системе все более сложных подсистем без специализированного воздействия. В широком понимании — это присущая природным системам способность к усложнению элементов и созданию все более упорядоченных структур в ходе своего развития; в узком понимании — это скачок, фазовый переход системы из менее в более упорядоченное состояние. Самоорганизация в классическом кибернетическом смысле слова – это процесс структурирования системы средствами самой системы.

Новая структура всегда является результатом раскрытия неустойчивости из-за флуктуаций. В зависимости от величины колебаний, флуктуации, реализуемые в системе, могут привести к различным вариантам дальнейшего существования системы. Выбор вариантов происходит в точке бифуркации. Точка бифуркации представляет собой переломный, критический момент в изменении состояния системы, в котором она осуществляет выбор пути, т.е. это точка ветвления вариантов развития, точка, в которой происходит катастрофическое событие (рис.1).

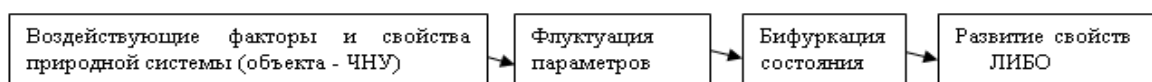


Рис.1. Процесс формирования катастрофического события в природном объекте

В соответствии с Теорией динамического хаоса [20-22], даже незначительные отклонения от начальных условий, характеризующих свойства и условия взаимодействия объекта с окружающей средой (воздействующие факторы), могут приводит к существенным отклонениям в состоянии объекта в будущем. Из-за этого долгосрочное прогнозирование поведения нелинейных систем в целом является невозможным. Этот феномен называют "сильной зависимостью от начальных условий или чувствительностью начальных условий". Теория хаоса изучает динамические системы, чьи явно случайные состояния беспорядка и нерегулярности на самом деле управляются лежащими в основе детерминированными законами, которые чувствительны к начальным условиям. То есть, детерминированный характер этих систем не делает их предсказуемыми. Такое поведение известно как детерминированный хаос или просто хаос. Эдвард Лоренц [22] резюмировал теорию следующим образом: «Хаос: когда настоящее определяет будущее, но приблизительное настоящее не определяет будущее приблизительно».

В соответствии с Теорией самоорганизованной критичности [23], незначительные воздействия на объект в момент его неустойчивого состояния могут приводить к катастрофическому изменению этого состояния вследствие процесса самоорганизации. Система с большим числом взаимодействующих элементов естественным образом эволюционирует к критическому состоянию, в котором малое событие может привести к катастрофе.

На основе принципов и теорий синергетики полагаем, что ЧНУ природных объектов — это такое возможное соотношение их свойств и воздействующих факторов, которое приводит к различному качественному и количественному изменению свойств и состояний (структуры) объекта даже при незначительном отличии их начальных значений (начальных условий).

При достижении состояния бифуркации (неустойчивого состояния):

- процесс самоорганизации приводит к усложнению систем и созданию все более упорядоченных структур с уменьшением энтропии. Переход к новой структуре происходит скачкообразно в точке катастрофы (*точка бифуркации*). В результате самоорганизации эволюция природных объектов (систем) чередуется этапами развития и деградации, которые зависят от свойств объекта адаптироваться к воздействующим факторам;
- в сложной природной (физической, химической, биологической и т.п.) системе с многочисленными связями элементов *включается новый фактор – динамика системы*, которая

способна порождать сложные зависимости конечного состояния системы от ее начального состояния. В этом случае близость исходных состояний системы (систем) может не означать схожести поведения в будущем. То есть траектория изменения состояния системы (объекта) может сильно отличаться даже при *незначительных отклонениях свойств и воздействующих факторов*. В этом и состоит понятие нелинейности в синергетике.

Изложенное понимание последовательности и причин формирования катастрофических событий в природных объектах (системах) вследствие ЧНУ, используется для обоснования причин *отказов СМС*.

### 3 Чувствительные начальные условия механических объектов

В технических объектах, как и в природных, протекают механо-физико-химические процессы, которые приводят к изменению технического состояния элементов, компонентов и СМС в целом. Постепенно, параметры технического состояния объекта, вследствие сочетания воздействующих факторов и свойств, характеризуемых флуктуацией, приближаются к точке бифуркации, характеризующей неустойчивое состояние. Возникает опасность перехода объекта в хаотическое состояние под действием незначительных факторов. В результате объект может перейти в состояние с непредсказуемым, в том числе катастрофическим изменением параметров (рис.2).

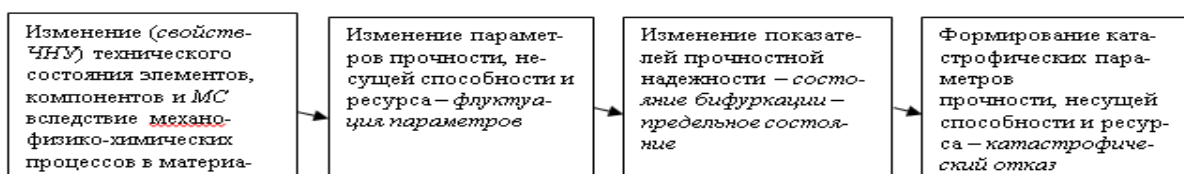


Рис.2. Процесс формирования катастрофического отказа в механическом объекте

При изменении технического состояния за точку бифуркации может быть принято предельное состояние, характеризующее соответствующими критериями прочности и ресурса. Задача состоит в том, чтобы определить признаки изменения технического состояния и приближения его к предельному состоянию. Это позволит обосновать методы выявления признаков и меры, позволяющие исключить катастрофу и обеспечить переход объекта из неадекватного или неконтролируемого предельного состояния (точки бифуркации) в состояние, характеризующееся хотя бы временным сохранением существующего уровня прочности и ресурса (живучести) объекта.

За начальные условия для механических объектов принимаем воздействующие факторы (далее, факторы) и соответствующие им проектные свойства, изложенные в технических требованиях (технических условиях).

Трансформация Чувствительных Начальных Условий (ЧНУ) СМС представлена на рис.2.

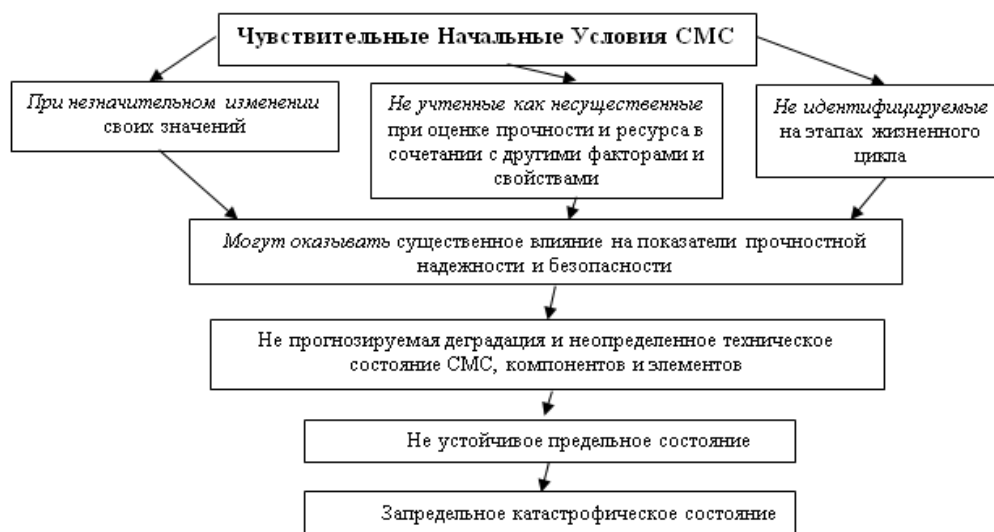


Рис.3. Трансформация Чувствительных Начальных Условий СМС

Если ЧНУ, формируемые несовершенствами и нарушениями при конструировании, изготовлении и эксплуатации, не учитываются, то параметры прочности и ресурса могут не обеспечивать показатели

ПН уже на этапе конструирования. В этом случае ЧНУ могут обуславливать не прогнозируемую деградацию и неопределенное техническое состояние СМС, компонентов и элементов, которые могут стать причиной перехода объекта сначала в неустойчивое предельное состояние, а затем в запредельное катастрофическое состояние.

В таблице 1 приведена классификация причин отказов, представленная в предлагаемом аспекте ЧНУ. Несовершенства и нарушения методов обуславливают ЧНУ которые, в свою очередь, порождают неопределённость некоторых свойств объекта и воздействующих факторов, так и их сочетаний, что и является причиной отказов и техногенных катастроф. В таблице 2 представлены результаты анализа причин отказов в соответствие с предложенной классификацией.

Необходимо отметить, что примеры несовершенства и тем более нарушения методов и средств создания и применения опасных объектов, не отраженные в широкой печати, редко описываются в научно-технической литературе в достаточном объеме для однозначного понимания причин.

Несовершенства и нарушения методов и средств создания и применения СМС порождают ЧНУ, когда даже незначительные отклонения свойств и внешних факторов обуславливают некоторую неопределенность информации (знаний) о начальных условиях, которая может быть причиной того, что фактические запасы прочности, несущей способности и технического ресурса, будут ниже требуемых.

Таким образом, под Чувствительными Начальными Условиями (чувствительностью к начальным условиям) механических объектов на данном этапе исследования мы понимаем определенные и неопределенные свойства СМС, компонентов и элементов и воздействующие факторы даже незначительное изменение которых может обусловить существенное изменение параметров конструктивной прочности, несущей способности и ресурса и обуславливаемых ими показателей ПН. Следствием ЧНУ могут быть как избыточные коэффициенты запаса и безопасности, так и катастрофические отказы.

В неустойчивом состоянии незначительное изменение воздействий и неучтенные свойства объекта могут как привести к отказу, так и обеспечить условия стабильности или живучести объекта. Основной задачей и является разработка метода, моделей и инструментальных средств обеспечивающих управление такими воздействиями и свойствами.

В данном разделе осуществлена классификация и выполнен анализ последствий несовершенства и нарушения методов и моделей обеспечения прочности и ресурса обеспечивающие обоснование технической аналогии, характеризуемой признаками подобия катастрофических событий, сопровождающих природные объекты и *отказы СМС*.

#### **4 Аналогия причин катастрофических событий и отказов и возможность ее использования для обеспечения техногенной безопасности**

Для обоснования аналогии, в качестве признаков подобия принимаем некоторые свойств и характеризующие ими состояния природных и технических объектов (табл.3).

Несмотря на объективное ограничение знаний, обусловленное несовершенством и нарушением методов и средств создания и применения технических объектов, на некотором промежутке времени обеспечивается их устойчивость в аспекте прочностной надежности и безопасности.

Сопоставляя состояния устойчивости, флуктуаций, бифуркаций и катастрофические события природных объектов с устойчивостью, нечувствительностью и чувствительностью, предельными и катастрофическими отказами технических объектов, приходим к выводам:

- состояние устойчивости свойств и воздействующих факторов природных объектов *соответствует* уровню совершенства методов и средств обеспечения прочностной надежности и безопасности технического объекта на некотором промежутке времени;
- состояние допустимых или недопустимых флуктуаций свойств и воздействующих факторов природного объекта, *определяют* нечувствительные или чувствительные начальные условия технического объекта, соответственно;
- состояние бифуркации природного объекта и предельное состояние технического объекта *эквивалентны*, если флуктуации приобретают недопустимые значения и возникает неопределенность свойств и воздействующих факторов, обуславливающая неустойчивость состояния;
- состояние развития свойств или катастрофическое состояние природного объекта *соответствует* (эквивалентно) допустимому состоянию технического объекта ограниченному

временем при наличии свойств живучести либо катастрофическому отказу технического объекта.

Таблица 1. Классификация причин катастрофических отказов

Причины отказа	Несовершенства и нарушения методов, моделей и средств	Чувствительные начальные условия	Неопределенность воздействующих факторов и свойств
Конструкционная (этап жизненного цикла – конструирование, отказ конструкционный)	Несовершенства и нарушения методов и моделей: <ul style="list-style-type: none"> <li>• оценки напряженно-деформированного состояния;</li> <li>• обоснования свойств материала;</li> <li>• оценки прочности и ресурса;</li> <li>• оценки коэффициентов запаса и безопасности;</li> <li>• обоснования состава и объемов мониторинга параметров;</li> <li>• обоснования состава и объемов диагностирования.</li> </ul>	Воздействующие факторы и свойства, незначительные изменения которых оказывают существенные воздействия на параметры прочности, ресурса и показатели <i>ПНБ</i> на стадии эксплуатации: <ul style="list-style-type: none"> <li>• расчетные;</li> <li>• неучитываемые;</li> <li>• неидентифицируемые.</li> </ul>	Неопределенность: <ul style="list-style-type: none"> <li>• напряженно-деформированного состояния;</li> <li>• конструктивных свойств материала;</li> <li>• деградиационных процессов, видов и типов повреждений;</li> <li>• прочности и ресурса (детерминированные значения);</li> <li>• прочностной надежности и безопасности (вероятностные значения).</li> </ul>
Производственная (этап жизненного цикла – изготовление и испытания, производственный отказ)	Несовершенства и нарушения методов и средств: <ul style="list-style-type: none"> <li>• обеспечения качества изготовления и сборки;</li> <li>• контроля и диагностирования металлургических и технологических дефектов;</li> <li>• испытаний.</li> </ul>	Свойства (размеры, качество поверхностей, дефекты и т.п.), незначительные изменения которых могут оказывать существенное воздействие на параметры прочности, ресурса и показатели <i>ПНБ</i> : <ul style="list-style-type: none"> <li>• расчетные;</li> <li>• неучитываемые;</li> <li>• неидентифицируемые.</li> </ul>	Неопределенность: <ul style="list-style-type: none"> <li>• механических свойств материала;</li> <li>• размеров и свойств поверхностей;</li> <li>• дефектности;</li> <li>• свойств конструктивной прочности и ресурса;</li> <li>• технологической наследственности.</li> </ul>
Эксплуатационная (этап жизненного цикла – эксплуатация, техническое обслуживание и ремонт, эксплуатационный отказ)	Несовершенства и нарушения методов и средств: <ul style="list-style-type: none"> <li>• обеспечения режимов эксплуатации (АСУ ТП);</li> <li>• контроля и диагностирования (SCADA);</li> <li>• интерпретации причин изменения состояния (САНИ);</li> <li>• техобслуживания и ремонта.</li> </ul>	Факторы и управляющие воздействия, незначительные изменения которых оказывают существенное влияние на параметры прочности, ресурса и <i>ПНБ</i> на стадии эксплуатации: <ul style="list-style-type: none"> <li>• воздействующие факторы, не учитываемые системой управления;</li> <li>• неточность контроля параметров технологического процесса и тех. состояния;</li> <li>• игнорирование незначительных несоответствий технического состояния проектному после ремонта.</li> </ul>	Неопределенность: <ul style="list-style-type: none"> <li>• технологических параметров процессов;</li> <li>• параметров технического состояния элементов и компонентов;</li> <li>• интерпретации преждевременных причин повреждений;</li> <li>• качества техобслуживания и ремонта.</li> </ul>

Таблица 2. Анализ катастрофических отказов в соответствии с предложенной классификацией

№	Катастрофический отказ	Несовершенства и нарушения методов, моделей и средств	Чувствительные начальные условия	Неопределенность воздействующих факторов и свойств
1	<i>Разрушение грузовых сварных кораблей «Либерти», США, 1941-1945 гг. Разрушилось 145 корабля из 2700. 1045 имели трещины. Последствия – экономические потери в военное время [24].</i>	<i>Конструирование – отсутствие адекватных моделей для оценки напряженно-деформированного состояния и прочности с учетом совокупности начальных свойств и воздействующих факторов, включающих концентрацию напряжений в отверстиях люков, остаточных напряжений и пониженных температур; Изготовление – неконтролируемые остаточные макронапряжения после сварки.</i>	Неучитываемые свойства: <ul style="list-style-type: none"> <li>• концентрация напряжений,</li> <li>• остаточные макронапряжения,</li> <li>• неустойчивое ТС*.</li> </ul> Неучитываемые воздействующие факторы: <ul style="list-style-type: none"> <li>• пониженная температура,</li> <li>• превышение несущей способности.</li> </ul>	Неопределенность: <ul style="list-style-type: none"> <li>• напряженно-деформированного состояния;</li> <li>• механических свойств материала в условиях фактических ВФ*;</li> <li>• параметров прочности и ресурса.</li> </ul>
2	<i>Сквозное повреждение технологического трубопровода. Утечка газа, взрыв и пожар вблизи железной дороги. Башкирия, 1989 г. 600 погибших [25].</i>	<i>Конструирование – отсутствие средств мониторинга загазованности; Эксплуатация – нарушение правил контроля за техническим состоянием; мер по обеспечению технической безопасности; использование не по функциональному назначению.</i>	Неучитываемые свойства: <ul style="list-style-type: none"> <li>• неустойчивое ТС.</li> </ul> Отсутствие контроля: <ul style="list-style-type: none"> <li>• не контролируемое накопление повреждений.</li> </ul> Неучитываемые воздействующие факторы: <ul style="list-style-type: none"> <li>• искра,</li> <li>• превышение несущей способности.</li> </ul>	Неопределенность: <ul style="list-style-type: none"> <li>• локальных деградационных процессов;</li> <li>• параметров ТС, прочности и ресурса.</li> </ul>
3	<i>Разрушение шпилек крепления крышки корпуса гидротурбины. Разрушение здания ГЭС и турбин. Саяно-Шушенская ГЭС, 2011 г. 75 погибших, экономические потери (40 млрд. руб.), экологические [26].</i>	<i>Конструирование – не предусмотрены средства мониторинга ТС всех силовых опасных элементов агрегатов в условиях вибрации; Изготовление и монтаж – некачественное изготовление элементов и сборка ротора гидротурбины; Эксплуатация – нарушение правил контроля за ТС, режимов эксплуатации и мер по обеспечению прочности и ресурса.</i>	Неучитываемые свойства: <ul style="list-style-type: none"> <li>• отклонения начальных свойств от проектных,</li> <li>• неустойчивое ТС.</li> </ul> Отсутствие контроля: <ul style="list-style-type: none"> <li>• не контролируемое накопление усталостных повреждений.</li> </ul> Неучитываемые воздействующие факторы: <ul style="list-style-type: none"> <li>• недопустимая вибрация,</li> <li>• нарушение усталостной прочности,</li> <li>• превышение несущей способности.</li> </ul>	Неопределенность: <ul style="list-style-type: none"> <li>• локальных деградационных процессов;</li> <li>• параметров предельного ТС, прочности и ресурса.</li> </ul>
5	<i>Разрушение Атриума отеля Hyatt Regency, Канзас-Сити, 1981 г. 113 погибших, 186 ранены, экономические потери (\$300 млн. [5].</i>	<i>Конструирование – использованы несовершенные методы оценки несущей способности опорных балок и ПНБ.</i>	Неучитываемые свойства: <ul style="list-style-type: none"> <li>• отклонения начальных свойств от проектных.</li> </ul> Неучитываемые воздействующие факторы: <ul style="list-style-type: none"> <li>• превышение несущей способности.</li> </ul>	Неопределенность: <ul style="list-style-type: none"> <li>• несущей способности.</li> </ul>
6	<i>Разрушения ребристой трубы подогревателя газа. Производство аммиака. Ангарск, 1980-1992 гг.</i>	<i>Конструирование – отсутствие методов оценки прочности при дефектах в ненагруженных сварных швах приварки теплообменных</i>	Неучитываемые свойства: <ul style="list-style-type: none"> <li>• отклонения начальных свойств от проектных в виде наличия микротрещин.</li> </ul>	Неопределенность: <ul style="list-style-type: none"> <li>• локальных деградационных процессов (водородное растрескивание),</li> </ul>

№	Катастрофический отказ	Несовершенства и нарушения методов, моделей и средств	Чувствительные начальные условия	Неопределенность воздействующих факторов и свойств
	экономические потери [27].	рёбер к наружной поверхности трубы. Отсутствие моделей учета совокупности ВФ. <i>Изготовление</i> – несовершенство технологии приварки ребер и контроля дефектов.	Неучитываемые воздействующие факторы: • наличие водорода, • превышение несущей способности.	• параметров прочности и ресурса.
7	Разрушение <i>Трубопровода</i> подачи газа в колонну по сварном шву. Производство аммиака. Пожар. Повреждение колонны и оборудования. Грузия, Рустави, 1984 г. Значительные эконом. потери [10].	<i>Конструирование</i> – в НТД не предусмотрен 100% эффективный контроль опасных сварных швов. <i>Изготовление</i> – <i>недопустимый</i> не выявленный дефект в сварном шве трубопровода подачи газа в колонну. <i>Эксплуатация</i> – непредвиденная вибрация трубопровода в момент пуска компрессора вследствие некачественного ремонта.	Неучитываемые свойства: • отклонения начальных свойств от проектных в виде недопустимого дефекта изготовления. Неучитываемые воздействующие факторы: • превышение несущей способности.	Неопределенность: • локальных деградационных процессов, • параметров прочности и ресурса.
8	Образование сквозных трещин в гнутых трубах (калачах) трубчатого реактора. Истечение взрывопожароопасного газа. Производство полиэтилена, ПЭВД-250*. г. Новополоцк, 1981 г. значительные экономические потери [10].	Конструирование – отсутствие методов оценки прочности и ресурса с учетом технологической наследственности и совокупности воздействующих факторов, включающих активную технологическую среду. Изготовление – несовершенный технологический процесс гнутья труб в холодном состоянии. Неконтролируемая технологическая наследственность. Эксплуатация – отсутствие достаточного контроля за качеством используемых технологических сред.	Неучитываемые свойства: • отклонения начальных свойств от проектных в виде наличия остаточных макронапряжений.	Неопределенность: • локальных деградационных процессов (коррозионное растрескивание), • параметров прочности и ресурса.
9	<i>Образование сквозных трещин</i> в элементах трубопроводов. Истечение взрывопожароопас. газа. ПЭВД-160.г.Уфа, 1975г. Эконом. потери [28].	<i>Эксплуатация</i> – отсутствие контроля за проектными требованиями к составу смазки компрессоров высокого давления. Недопустимое загрязнение технологической среды.	Неучитываемые свойства: • отклонения начальных свойств от проектных в виде наличия агрессивной технологической среды.	Неопределенность: • локальных деградационных процессов (коррозионная усталость), • параметров прочности и ресурса.

\*ТС – техническое состояние.

Таблица 3. Признаки подобия природных и технических объектов

Стадии состояния	Понятия синергетики	Природный объект	Технический объект
		Признаки подобия	
1	Устойчивость свойств и воздействующих факторов	Устойчивость свойств - катастрофические состояния объекта не наблюдаются на некотором промежутке времени.	Устойчивость свойств - катастрофические отказы объекта не наблюдаются на некотором промежутке времени.
2	Флуктуации и чувствительность начальных условий	Допустимые колебания свойств и ВФ* около средних значений - допустимые флуктуации. Чувствительные начальные условия не проявляются.	Допустимые колебания свойств и ВФ* около средних значений – допустимый разброс свойств. Чувствительные начальные условия не проявляются.
		Недопустимые колебания свойств и ВФ* около средних значений - недопустимые флуктуации. ЧНУ определяют траекторию состояния	Недопустимые колебания свойств и ВФ* около средних значений - недопустимый разброс свойств. ЧНУ определяют траекторию состояния
3	Бифуркация	Бифуркация - неопределенность свойств.	Предельное состояние – неопределенность свойств.
	Хаотичность свойств	Зона неустойчивого состояния	Зона неустойчивого состояния
4	Развитие свойств	Развития свойств объекта	Реализация свойства живучести объекта
	ЛИБО	ЛИБО	ЛИБО
	Катастрофическое состояние	Катастрофическое состояние	Катастрофический отказ

ВФ\* - воздействующие факторы

## Заключение

Причиной катастрофических отказов СМС являются некоторые свойства и воздействующие факторы, влияние которых на прочность и ресурс объекта не рассмотрены с достаточной степенью точности. Причиной этого являются как несовершенства соответствующих методов, моделей и средств проектирования, конструирования, изготовления и контроля, так и их нарушения. Не обеспечивается в полной мере требуемый состав и уровень свойств для нейтрализации отрицательного воздействия как всех известных, так и неизвестных воздействующих факторов.

К неизвестным факторам можно отнести и ЧНУ, характеризующие не учитываемые или не выявленные колебания и сочетания свойств и воздействующих факторов. ЧНУ могут привести к неконтролируемым самоорганизующимся деградиционным процессам, характеризующимся флуктуациями параметров и состоянием бифуркации, обуславливающих внезапные катастрофические отказы. То есть, ЧНУ могут быть причиной некоторой неопределенности свойств, характеризующих конструктивную прочность и ресурс. В результате значения показателей ПНБ не всегда отражают действительные и соответствуют требуемым.

Введение понятий ЧНУ обуславливает необходимость углубленного физико-химического исследования процессов формирования катастрофических отказов, а значит может быть использовано для совершенствования методов и средств обеспечения ПН.

Классификация причин отказов и выполненный на ее основе анализ катастрофических отказов позволяет заключить, что объект, обладающий не выявленными ЧНУ, может характеризоваться неопределенностью процессов дегградации технического состояния, а значит свойств прочности, ресурса и ПН.

Обоснована возможность использования принципа чувствительности начальных условий (ЧНУ) для разработки метода и моделей исследования и обеспечения ПН на основе рассмотрения причин формирования катастрофических отказов СМС как технической аналогии формирования катастрофических событий в синергетике. Это позволит в какой-то степени применить физические



представления и математический аппарат синергетики для описания механо-физико-химического процесса формирования катастрофических отказов.

Сопоставление состояний технических объектов и соответствующих им понятий синергетики позволяет заключить о наличии признаков подобия в последовательности и причинах возникновения катастрофических событий природных и технических объектов. Это допускает рассмотрение состояний как аналогичных в отношении к чувствительности начальных условий.

Выявленное подобие в поведении технических и природных объектов позволяет сформулировать условия обеспечения аналогии причин отказов и катастрофических событий:

- динамика технического состояния технического объекта должна рассматриваться в зависимости от чувствительности начальных условий;
- чувствительные начальные условия порождают уникальность процессов деградации каждого объекта и неопределенность прочностной надежности и безопасности.
- Для определения возможности и эффективности использования чувствительности начальных условий (ЧНУ), необходимо решить следующие задачи:
- сформулировать обобщенные причины катастрофических отказов и признаки их существования, отражающие рассматриваемую проблему и обеспечивающие научно-техническую основу для совершенствования метода обеспечения ПН;
- обосновать метод исследования и обеспечения прочностной надежности (ПН), базирующийся на принципе чувствительности начальных условий;
- сформулировать концепцию моделирования, обосновать содержательную структуру необходимых моделей и алгоритм для выявления и оценки чувствительности начальных условий.

В результате, разрабатываемый метод и модели должны обеспечить использование большего объема информации и существенно более высокий уровень согласования знаний различных научных дисциплин и выполнение междисциплинарных исследований для обеспечения прочностной надежности и техногенной безопасности, в том числе, в автоматизированном/автоматическом режиме.

Разрабатываемый метод и модели должны соответствовать принципам и моделям самоорганизации и трансдисциплинарности [29-32], что обеспечит применение методов и средств искусственного интеллекта с наибольшей эффективностью [33, 34].

## Литература

1. Прочность материалов и элементов конструкций в экстремальных условиях // Под ред. Писаренко Г.С. Киев: Наукова думка. 1980. Т.1. 585 с.
2. Махутов Н. А., Матвиенко Ю. Г., Романов А. Н. Проблемы прочности, техногенной безопасности и конструкционного материаловедения. 2018. Издательство Editorial URSS, 720 с.
3. Москвичев В.В., Махутов Н.А. и др. Под ред. Махутова Н.А. Прикладные задачи конструкционной прочности и механика разрушения технических систем. Новосибирск: Наука, 2021. 796 с.
4. Предупреждение крупных аварий: Практическое руководство: пер. с англ. Женева: Международное бюро труда. 1992. 256 с.
5. Мак-Ивили А.Дж. Анализ аварийных разрушений: Пер. с англ. М: Техносфера. 2010. 416 с.
6. Енджиевский Л.В., Терешкова А.В. История аварий и катастроф. Красноярск: СФУ. 2013. 438 с.
7. Арутюнян Р. В. Ядерная рулетка: В 2 т. Т. 1 : Чернобыль — Фукусима : Путевые заметки ликвидатора. Ин-т проблем безопасного развития атомной энергетики РАН. М. 2019. 387 с.
8. Надежность в технике. Термины и определения. ГОСТы 27.002— 83; 27.002-89, 27.002-2015. Москва.
9. Надежность и эффективность в технике: Справочник: в 10т. /Ред. Совет: В.С. Авдуевский и др. - М.: Машиностроение, 1986. Т.1: Методология. Организация. Терминология. 224 с.
10. Берман А.Ф. Деградация механических систем. Новосибирск: Наука. Сиб.Предприятие РАН. 1998. 320 с.
11. Махутов Н.А., Резников Д.О. Комплексный анализ прочности и безопасности потенциально опасных объектов с учетом неопределённостей //Надежность. 2020. №1. С.47-56.
12. Хакен Г. Синергетика. Информация и самоорганизация: Макроскопический подход к сложным системам. Пер. с англ. Изд. 3-е. М.: УРСС: ЛЕНАНД. 2014. 320 с.
13. Пригожин И., Стенгерс И. Порядок из хаоса: Новый диалог человека с природой. Пер. с англ. Изд.6-е. М.: Изд. ЛКИ. 2008. 296 с.
14. Князева Е.Н., Курдюмов С.П. Основания синергетики: Человек, конструирующий себя и свое будущее. М.: Книжный дом Либроком, 2014. - 264 с.
15. Чернавский Д. С. Синергетика и информация. Динамическая теория хаоса. М.:2-е изд.УРСС. 2004. 288 с.
16. Кузнецова В.Л., Раков М.А. Самоорганизация в технических системах. Киев: Наукова думка. 1987. 200 с.
17. Малинецкий Г.Г. Теория самоорганизации. На пороге IV парадигмы // Компьютерные исследования и моделирование. 2013. Т. 5. No 3. С. 315–366.

18. *Bernon C.* Tools for Self-Organizing Applications Engineering/C. Bernon [et al.] // Series Lecture Notes in Artificial Intelligence. V. 2977 / Eds G. Di Marzo Serugendo. Springer. - 2004. P. 283–298.
19. *Малинецкий Г. Г.* Математические основы синергетики: Хаос. Структуры. Вычислительный эксперимент. 8-е изд. М.: УРСС, 2017. 312 с.
20. *Малинецкий Г. Г., Потапов А. Б.* Нелинейная динамика и хаос: Основные понятия. М.: УРСС. 2018. 240 с.
21. *Гринченко В. Т., Мацыпура В. Т., Снарский А. А.* Введение в нелинейную динамику. Хаос и фракталы. М.: Ленанд, 2016. 280 с.
22. *Глик Д.* Хаос. Создание новой науки. Пер. с англ. М. Нахмансона и Е. Барашковой. Москва : Издательство АСТ : CORPUS, 2021. 416 с.
23. *Бак П.* Как работает природа: Теория самоорганизованной критичности. Пер. с англ. М.: УРСС: Книжный дом Либроком, 2014. 276 с.
24. *Либовиц Г. Н.* Разрушение в 7 томах. Том 5. Расчет конструкций на хрупкую прочность. М.: Машиностроение, 1977. 452 с.
25. Авария Башкирия [https://ru.wikipedia.org/wiki/Железнодорожная\\_катастрофа\\_под\\_Уфой](https://ru.wikipedia.org/wiki/Железнодорожная_катастрофа_под_Уфой) Обновлено 7 февраля 2022. Прочитировано 2 мая 2022.
26. Авария Саяно-Шушенская [https://ru.wikipedia.org/wiki/Авария\\_на\\_Саяно-Шушенской\\_ГЭС](https://ru.wikipedia.org/wiki/Авария_на_Саяно-Шушенской_ГЭС) Обновлено 12 марта 2022. Прочитировано 2 мая 2022.
27. *Берман А. Ф., Мороз В. Г.* Хрупкое разрушение труб под влиянием внешних воздействий // Проблемы прочности. 1993. N 2. С. 40-46.
28. *Берман А. Ф., Е. Р. Хисматуллин, Б. Я. Нейман.* Надежность трубопроводов и трубчатых аппаратов установок производства полиэтилена // Химическое и нефтяное машиностроение. 1983. № 2. С. 22-24.
29. *Берман А. Ф.* Информатика катастроф // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2012. № 3. С. 17.
30. *Берман А. Ф., Николайчук О. А.* Модель трансдисциплинарной задачи обоснования свойств техногенной безопасности // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2018. № 6. С. 21-34.
31. *Берман А. Ф.* Искусственная самоорганизация и эвристический подход для обоснования свойств надежности, живучести и безопасности сложных технических систем // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2020. № 4. С. 5-21.
32. *Berman A.F., Nikolaychuk O.A., Yurin A.Y., Pavlov A.I.* A METHODOLOGY FOR THE INVESTIGATION OF THE RELIABILITY AND SAFETY OF UNIQUE TECHNICAL SYSTEMS // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability. 2014. T. 228. № 1. С. 29-38.
33. *Дородных Н. О., Юрин А. Ю.* Технология создания производственных экспертных систем на основе модельных трансформаций / Под. ред. О. А. Николайчук. – Новосибирск: СО РАН. - 2019. 144 с. ISBN 978-5-7692-1646-6. DOI: 10.15372/TECHNOLOGY2019DNO
34. *Nikolaychuk O.A., Pavlov A.I., Stolbov A.B.* THE IDENTIFICATION OF UNIQUE MECHANICAL SYSTEMS STATE BASED ON AGENT-BASED SIMULATION MODELLING // В сборнике: Journal of Physics: Conference Series. Сер. "International Scientific Conference Artificial Intelligence and Digital Technologies in Technical Systems 2020, AIDTTS 2020" 2021. С. 012001.