

ЖИВУЧЕСТЬ И РАЗРУШЕНИЕ МНОГОЭЛЕМЕНТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

А.П. Иванова, Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет», Украина

Статья посвящена комплексному исследованию повреждающих воздействий на технические системы и процессу их разрушения. Особое внимание уделяется живучести многоэлементных конструкций с уже накопленными повреждениями и проявлению масштабного эффекта, который связан с увеличением их высоты и размеров. Рассмотрена перспектива совместного использования современных программных комплексов и нейросетевых технологий для описания и моделирования многопараметрических систем с учетом внешних негативных факторов.

Деятельность человеческого общества неразрывно связана с созданием разного рода технических систем – машин и механизмов, зданий и сооружений. Объединенные назначением и организационной структурой они образуют так называемые организационно - технические системы, например, геотехнические, экологические, экономические и т. п.

Технические системы характеризуются качественными и количественными признаками. К количественным относятся такие признаки, как «малые», «средние», «большие», к качественным – «простые», «сложные», «суперсложные» (рис.1).

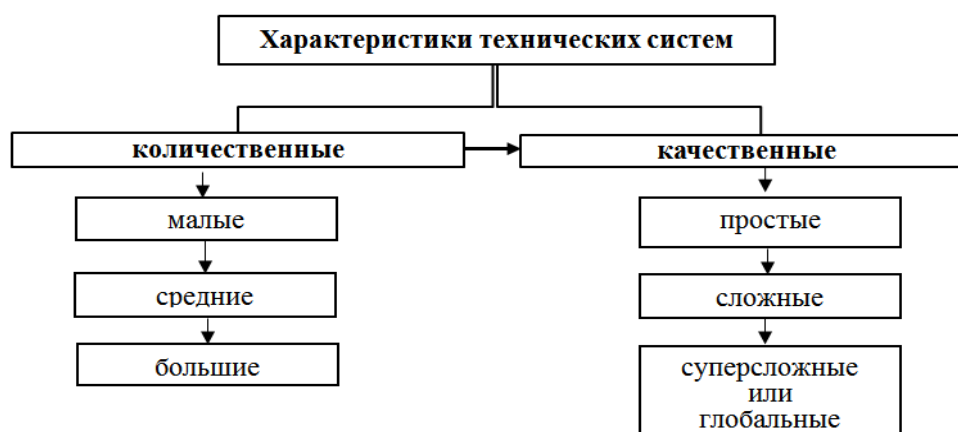


Рис. 1. Характеристики технических систем.

Между количественными и качественными характеристиками существует тесная взаимосвязь.

Количественные характеристики в большей степени связаны с геометрическими размерами систем и количеством входящих в них элементов, структура которых сравнительно однородна, их можно разделить на:

- малые $a \cdot 10^0$;
- средние $a \cdot 10^1$;
- большие $a \cdot 10^2$,

где a - максимально неделимый элемент системы наименьших размеров.

Качественные характеристики в большей мере связаны со структурой системы в целом, количеством ее уровней и сложными, чаще всего нелинейными, зависимостями между ними.

В зависимости от сложности технические системы можно разделить на простые, сложные и суперсложные (или глобальные).

Простые - это одноуровневые системы, с минимальным количеством компонентов и связей между ними, для которых известны исходные параметры. Исследование и описание таких систем не вызывает затруднений из-за малого числа переменных, а, следовательно, и

возможных состояний этих систем.

Сложные системы состоят из нескольких уровней, отличаются повышенным количеством компонентов и связей между ними, возможной неполнотой исходной информации. Исследование и описание таких систем вызывает определенные трудности из-за большого числа переменных, также накладываются дополнительные внешние воздействия, а это приводит к увеличению возможных состояний этих систем.

Суперсложные или глобальные – это многоуровневые и многокомпонентные системы с большим количеством связей и сложной разнородной структурой. Такие системы, как правило, являются многопараметрическими. Исходная информация о них часто бывает неполной. Их исследование и описание вызывает серьезные трудности из-за большого разнообразия внешних воздействий и их вероятностного характера, а, следовательно, из-за дополнительно возникающих внутренних факторов, что приводит к многократному увеличению возможных состояний этих систем. Они имеют развитые коммуникации, насыщены средствами автоматизации. По мере развития возрастает их чувствительность к различного рода внешним повреждающим воздействиям.

Аварии и катастрофы технических систем, к которым привели природные и техногенные катаклизмы можно проиллюстрировать следующими примерами: катастрофы на Чернобыльской АЭС (1986), на АЭС Фукусима (2011), гибель экипажей астронавтов «Челленджера» (1986) и «Колумбии» (2003), аварии на Саяно-Шушенской ГЭС (2009), на нефтяных платформах в Мексиканском заливе (2010), ее еще называют «нефтяной Чернобыль», разрывы нефте- и газопроводов, падение воздушных судов, катастрофы подводных лодок, аварии на шахтах и многие другие события с человеческими жертвами и заражением окружающей среды.

Повреждающие воздействия могут быть аварийными и катастрофическими, разница между ними лишь в масштабах и последствиях этих повреждений.

Катастрофическими следует называть явления, возникающие в многопараметрических динамических, нелинейно развивающихся системах (природных, технических, гуманитарных), когда под воздействием медленно накапливающихся количественных изменений в управляющих параметрах они внезапно теряют устойчивость и переходят в иное качественное состояние. Это состояние характеризуется новым информационным полем. Под управляющими параметрами в случае сложных конструкций подразумеваются изменяющиеся во времени внешние воздействия (силовые, химические, радиационные и т. п.) на систему и ее внутренние (физические) свойства.

Не всякая авария приводит к катастрофе, но причиной практически всех катастроф являются аварии.

Условная классификация катастроф по финансовым затратам на ликвидацию, длительности негативного воздействия, площади поражения, и самое главное, по числу жертв и отдаленным последствиям, представлена на рис. 2.



Рис. 2. Классификация катастроф.

Выход из строя (разрушение) одного или нескольких элементов системы еще не означает прекращение ее функционирования. В этом смысле «живучесть» - это свойство поврежденной системы полностью или частично выполнять свое назначение. Вопрос живучести актуален для различных областей человеческой жизнедеятельности:

- для биологических систем «живучесть» проявляется в способности адаптироваться и эволюционировать;
- в психологической сфере «живучесть» - это стрессоустойчивость;
- для экономической и финансовой сферы «живучесть» отождествляется с конкурентоспособностью;
- для военной сферы характерно такое понятие, как «боевая живучесть» [10];
- в машиностроении под «живучестью» часто понимают трещиностойкость;
- для электроники и радиосвязи существуют «структурная и функциональная живучесть» [9].

Проблема живучести сложных динамических систем может быть рассмотрена с позиций фундаментальных наук. Поведение таких систем описывается дифференциальными уравнениями высокого порядка, а исчерпание ими живучести – потерей устойчивости решения таких уравнений. Живучесть рассматривается в рамках обобщенной проблемы устойчивости – математической теории катастроф. Ее основы были заложены Ньютоном, Эйлером, Лагранжем и Гамильтоном еще в XVII и XVIII вв., продолжили развивать эту теорию Ляпунов и Пуанкаре (XIX и начало XX в.) [22], но основные положения математической теории катастроф были сформулированы в начале XX века в работах Тома Р., Гилмора Р., Арнольда В. [3].

Одним из первых затронул проблему живучести в строительстве Н.С. Стрелецкий [28]. В дальнейшем понятие живучесть в свои работы вводит В.В. Болотин [6] и Г.А. Гениев [7]. В настоящее время вопросы живучести строительных конструкций затрагиваются в работах А.В. Перельмутера [23, 24], Кулябко В.В. [17], Ю.И. Кудишина, Д.Ю. Дробота [15, 16] и др. В 2009 г. понятие «живучесть» введено в нормы Украины (ДБН В.1.2-14:2009).

В то же время общепринятого термина «живучесть конструкции» не существует. Под «живучестью конструкции» предлагается подразумевать ее свойство сохранять общую несущую способность при локальных разрушениях, вызванных природными или техногенными воздействиями в течение некоторого времени. С этой проблемой непосредственно связано обеспечение устойчивости конструкций к «прогрессирующему» разрушению при запроектных нагрузках, аварийных повреждениях и локальных разрушениях.

Обрушение части фасада здания в Англии в 1968 г., послужило толчком к возникновению термина «прогрессирующее обрушение», что в свою очередь привело к внесению изменений в строительные нормы различных стран (рис. 3).

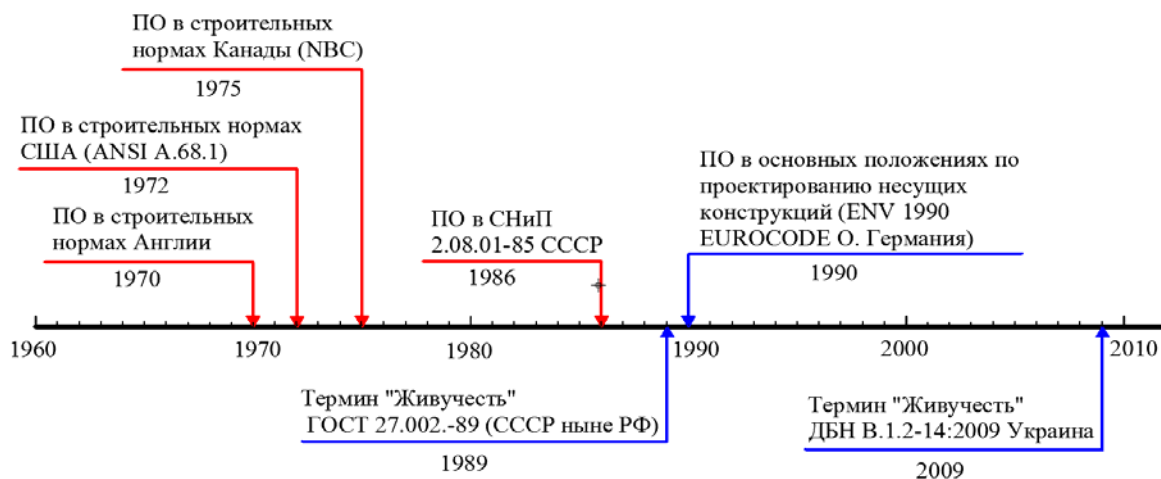


Рис.3. Хронология внесения в нормы различных стран термина «прогрессирующее обрушение» или «живучесть».

Под «прогрессирующим» (или «лавинообразным») разрушением понимается «последовательное разрушение несущих строительных конструкций и основания, приводящее к обрушению всего сооружения или его частей».

В настоящее время ряд экспертов, отмечая лингвистическую основу термина «прогрессирующее обрушение» (англ. progressive collapse), склоняется к использованию термина «живучесть» при запроектных нагрузках [18].

Нагрузки, действующие на строительные конструкции, схематично можно представить так, как это показано на рис. 4.



Рис. 4. Нагрузки на строительные конструкции.

При этом следует различать проектные, максимальные проектные и запроектные нагрузки.

Проектные нагрузки – это воздействия, которые устанавливаются действующей нормативно - технической документацией.

Максимальные проектные нагрузки – это воздействия, для которых определены исходные события и конечные состояния, предусмотрены системы безопасности, их последствия могут быть максимально возможными, но в рамках установленных проектом.

Запроектные нагрузки – это воздействия, вызванные неучитываемыми исходными событиями, ошибочными решениями персонала, которые приводят к дополнительным, по сравнению с проектными, отказам элементов системы.

Решение проблемы безопасности любой системы сводится к обеспечению ее главных свойств: надежности и живучести. Условно период эксплуатации конструкции до ее разрушения (катастрофы) можно представить тремя фазами:

- первая фаза соответствует штатному режиму работы конструкции, наиболее продолжительна по времени;
- вторая фаза соответствует ограниченной работоспособности конструкции с накопившимися, с течением времени, дефектами, повреждениями, отказами некоторых элементов, то есть «живучести»;
- третья фаза соответствует полному разрушению (аварии, катастрофе) конструкции, которая происходит внезапно за короткий промежуток времени (рис.5).

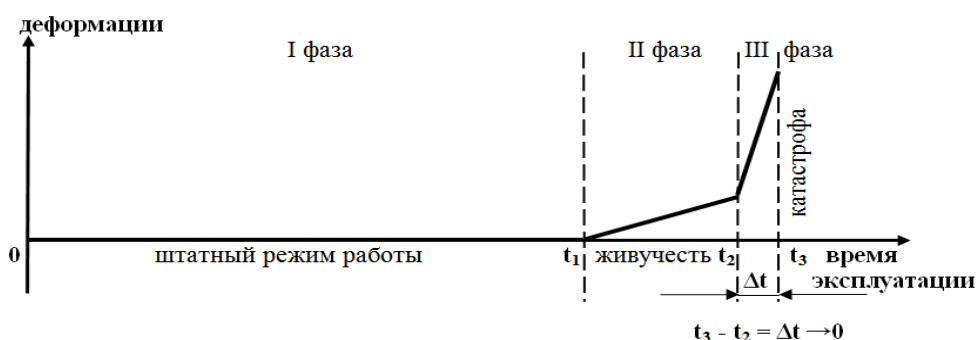


Рис. 5. Период эксплуатации конструкции.

Объектом исследования механики разрушения, а именно разрушение приводит к катастрофам, являются конструкционные материалы систем, подверженных постоянным внешним воздействиям.

Особое место в механике разрушения занимает изучение процесса закритического поведения элементов конструкций, которое и приводит к авариям и катастрофам. Элементы систем в закритической области работы последовательно выходят из строя, перераспределяя нагрузки на другие элементы, и порождают тем самым внутренние для самой системы негативные воздействия [2]. Внешние и внутренние воздействия приводят к дальнейшему отказу элементов, и система переходит в аварийное состояние. Насколько быстро наступит аварийное состояние системы, в значительной степени зависит от степени ее статической неопределимости (рис. 6). Статически неопределимые конструкции (именно в силу своей неопределимости) оказывают большее сопротивление разрушению, то есть более «живучи», по сравнению со статически определимыми.

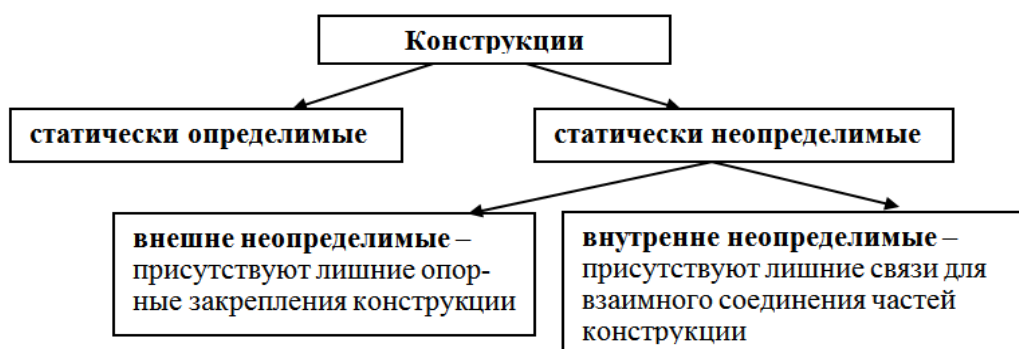


Рис. 6. Классификация конструкций по степени статической неопределимости.

Также, следует учесть, что на множестве отказов, с точки зрения надежности, состояний конструкции могут быть выделены состояния стойкости, при которых возможна ее дальнейшая эксплуатация с достаточной эффективностью (рис. 7).

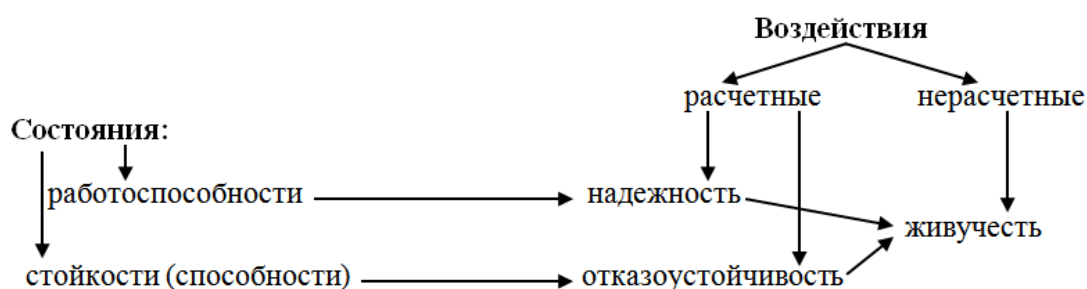


Рис. 7. Разграничение свойств надежности и живучести в зависимости от состояния системы.

Отказоустойчивость - проявление свойства живучести в режиме нормальной эксплуатации. Стойкость, включающая понятие отказоустойчивости, это живучесть системы в докритической области функционирования, под влиянием внешних ненормативных воздействий [19].

Изучение, описание и моделирование живучести конструкций возможно с помощью вероятностных моделей, в рамках современной математической теории надежности, и в рамках теории катастроф.

Распространенные в Украине конечно - элементные программные комплексы Лира, Scad, ориентированные на строительные конструкции, пока не имеют развитых модулей, позволяющих рассматривать отказы несущих элементов в динамической постановке с учетом геометрических и физических нелинейностей. Однако такими возможностями обладает целый

ряд других конечно – элементных комплексов, в частности: Ansys, Abaqus, Nisa II, Robot Millenium, Nastran. Например программный комплекс Usfos, специально разработан для расчета строительных конструкций в стадии разрушения, этот комплекс также учитывает их коррозионные повреждения, однако, как отмечают в своих исследованиях Абовский Н.П., Максимова О.М., Светашков П.А. [1], и они пока далеки от совершенства.

Отдельно хотелось бы отметить исследования, посвященные разработке нейронных сетей для решения различных задач [8]. Нейронные сети – один из эффективных современных инструментов анализа данных. Нейросетевые подходы открывают ряд новых качественных возможностей, особенно в отношении создания имитационных моделей, наиболее полно учитывающих реальные свойства системы, в том числе нелинейности, и обеспечения быстрого действия для получения конечного результата. Особенно эффективно использование нейросетевого прогнозирования в случае нелинейного поведения конструкции для многомерных, многопараметрических задач.

Синтез существующих программных комплексов, реализующих процедуру МКЭ и нейросетевых технологий, позволит преодолеть несовершенства первых и вывести на новый качественный уровень проектирование, прогнозирование поведения конструкций и управление ими.

По мере развития технических систем все большее значение приобретает оценка масштабного эффекта - еще одного опасного и непредсказуемого фактора, приводящего к авариям и катастрофам.

Именно масштабный эффект, по мнению некоторых исследователей [5, 20, 26], вызвал ряд необъяснимых аварий морских судов, авиалайнеров, обрушение горных выработок и разрушения других технических систем. Единственным общим признаком этих аварий является то, что они происходили со сложными объектами больших размеров [30].

Еще в 1938 г. Вейбулл предположил, на основании статистических данных, что причиной масштабного эффекта являются внутренние дефекты критического размера, которые становятся более вероятными в образцах больших размеров.

Применительно к техническим системам можно выделить следующие виды масштабного эффекта: объемный, площадной и линейный.

Проявления объемного масштабного эффекта, в большей степени, характерны для геомеханических систем. В этом направлении существуют многочисленные исследования Протодьяконова М. М., Чиркова С. Е., [25], Койфмана М. И. [13], Шашенко А. Н. [33] и других ученых. Анализируя результаты собственных опытов и известных в литературе, Койфман М. И. предложил при определении прочности горных пород, различать масштабные эффекты:

- первого рода или объемный, связанный со структурной неоднородностью испытанного материала и наличием случайно распределенных по объему дефектов;
- второго рода или поверхностный, обусловленный качеством обработки образцов и степенью разрушения поверхностного слоя.

При переходе от образца к массиву объемный масштабный эффект, по мнению Койфмана М. И. [14], является главным.

Для машиностроения и металлургии, авиа- и судостроения характерно проявление площадного масштабного эффекта, связанного с поперечными размерами образцов. Обширные исследования о связи прочностных характеристик металлов с размерами испытываемых образцов содержатся в работе Чечулина Б. Б. [32]. С. В. Серенсен и В. П. Когаев, используя теорию «наиболее слабого звена» и функцию распределения Вейбулла, описали масштабный эффект с учетом неравномерности распределения напряжений в поперечном сечении тела [27].

Применительно к действию переменных нагрузок было установлено, что снижение предела усталости образцов и деталей с увеличением их размеров имеет два аспекта: металлургический и механический. В первом случае масштабный эффект обусловлен сравнительно высокой степенью несовершенства структуры материала в больших отливках

или поковках, идущих на изготовление крупногабаритных деталей. Во втором случае масштабный эффект проявляется в снижении прочности геометрически подобных образцов при увеличении их абсолютных размеров и тогда, когда эти образцы вырезаны из одного и того же тела [31].

В современном строительстве многие конструкции состоят из стержневых элементов у которых длина гораздо больше поперечных размеров, поэтому именно для стержневых конструкций характерно проявление линейного масштабного эффекта. Линейный масштабный эффект наименее изучен, хотя его можно наблюдать в стержневых конструкциях: мостах, эстакадах, копрах, мачтах, фермах, вантово - стержневых и смешанных системах, большепролетных конструкциях стадионов. Существует ряд работ, в которых он косвенно присутствует [12, 21, 29]. Однако этих исследований явно недостаточно.

Особенно актуальна проблема живучести и проявление линейного масштабного эффекта для многоэлементных стальных конструкций. Сталь является хорошим конструкционным материалом, кроме того, в инженерной практике накоплен большой опыт проектирования и эксплуатации металлических конструкций. Тем не менее, аварии случаются и с ними, так как у металлоконструкций, в отличие от железобетонных и каменных, сравнительно небольшой резерв в перераспределении усилий, например, локальные повреждения (выход из строя одного из элементов или одной связи) иногда влекут за собой потерю несущей способности всей конструкции, а если элемент является основным и несущим, то может разрушиться весь объект.

Фундаментальные аспекты разрушения материалов за последние десятилетия в достаточной степени исследованы для простых идеализированных силовых схем, но процесс хрупкого разрушения реальных конструкций является более сложным, требует исследования напряженно - деформированного состояния в вершине трещины в конкретных эксплуатационных условиях с учетом всех факторов формирующих механизмы разрушения.

Анализ случаев катастрофического разрушения крупногабаритных металлоконструкций при напряжениях значительно ниже предела текучести показывает, что методы расчета, основанные на классических подходах механики сплошной среды, часто являются недостаточными [4].

В металлоконструкциях всегда присутствуют дефекты различного происхождения - металлургического, технологического, эксплуатационного, которые при определенных условиях приводят к появлению трещин и хрупкому разрушению конструкции. Скорость зарождения и распространения трещин определяется особенностями структуры, параметрами конструкции, характером нагрузок, агрессивностью и температурой эксплуатационной среды.

Основные причины, приводящие к разрушению металлоконструкций, это дефекты монтажа или изготовления, использование металла с характеристиками ниже проектных значений, ошибки проекта и, главным образом, неполный учет возможных нагрузок и недостаточная система конструктивных связей. Примерно 60% аварий происходит во время строительства, когда не все элементы конструкции собраны и замкнуты в стыках и узлах (рис. 8).



Рис. 8. Некоторые статистические результаты эксплуатации стержневых металлоконструкций.

Анализ отказов в работе стальных конструкций с хрупким и квазихрупким разрушением их элементов свидетельствует о влиянии длительности эксплуатации конструкций на вероятность зарождения и развития хрупких трещин. Так, 50% всех отказов в работе происходит в первую зиму эксплуатации, 14% - во вторую, 8% - в третью зиму и т.д.

До 80% всех отказов происходит за первые пять лет эксплуатации. Длительная эксплуатация приводит к тому, что отказы происходят при более низких температурах (рис. 9) и при более высоких номинальных разрушающих напряжениях.

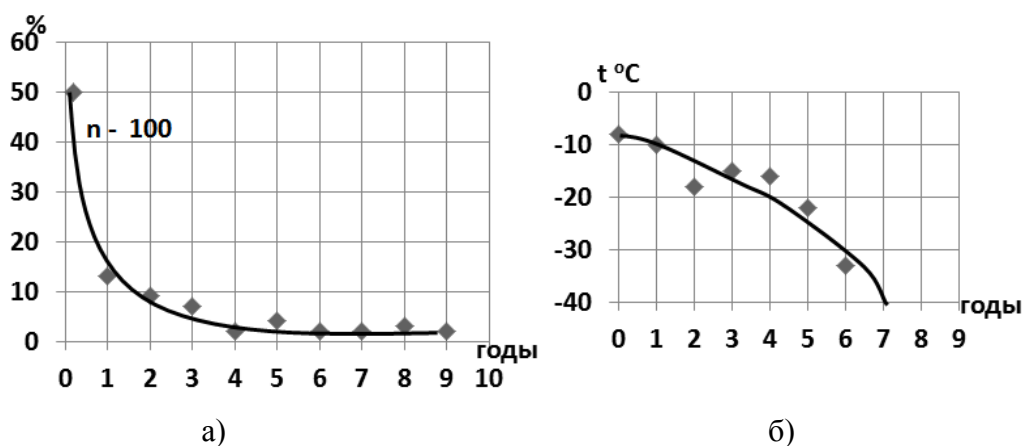


Рис. 9. Зависимость относительного числа отказов в работе (а) и температур, соответствующих хрупкому разрушению (б), от длительности эксплуатации; n - отношение числа отказов за данный год к общему числу отказов

Таким образом, в стальных сварных конструкциях, усилия в элементах которых не изменяются по знаку, происходит приспособляемость к воздействию низких температур, в результате чего их фактическая хладостойкость оказывается выше.

Специальными исследованиями [11] установлены физические причины приспособляемости конструкций в условиях их статического нагружения.

Приспособляемость активно проявляется в конструкциях, не испытывающих мало- и многоцикловых нагружений, то есть находящихся в оптимальном режиме работы. Физические причины приспособляемости металлоконструкций следующие:

- развитие пластических деформаций в зонах концентрации напряжений, сглаживающее уровень концентрации напряжений (такие пластические деформации возникают под воздействием эксплуатационной нагрузки в теплое время года);
- снижение уровня остаточных растягивающих напряжений в зонах их концентрации.

Выводы. 1. Анализ публикаций показывает, что на сегодняшний день ещё не достигнуто достаточно согласованное толкование свойств строительных объектов, характеризующих их эксплуатационную работоспособность.

Одни ученые основываются на анализе источников нарушений работоспособности, другие – на анализе их последствий. Это объясняется тем, что теория живучести систем находится на стадии становления и оформления в самостоятельную научную дисциплину.

2. Несмотря на развитие аналитического аппарата, компьютерной техники, методов моделирования поведение сложных конструкций пока трудно поддается математическому описанию, поэтому возможно применение нейросетевых технологий в синтезе с уже существующими программными комплексами.

Нейросетевая обработка результатов обследования конструкций для диагностики и прогнозирования их разрушения – актуальная задача, еще ждущая своего решения. Нейросетевые подходы к задачам строительной механики, теории упругости и теории оболочек, а, следовательно, и к проектированию строительных конструкций еще практически не применялись. Не выявлены и не исследованы рациональные постановки таких задач и области эффективного применения нейросетевых подходов. Требуется изучения возможности и особен-

ности применения существующих компьютерных нейроимитационных программ к решению вышеперечисленных задач.

3. Применительно к стальным конструкциям, следует принять во внимание, что при оценке их эксплуатационной надежности необходимо учитывать фактическую длительность безотказной эксплуатации конструкций и отсутствие хрупких трещин и разрушений их элементов. Необходимо также помнить и о невысоком нормативном «коэффициенте запаса» в современных металлоконструкциях, который принят таким из-за довольно высокой однородности этого строительного материала, а также для уменьшения стоимости конструкции.

Также необходимо учитывать время года для ввода конструкции в эксплуатацию. Если конструкция введена в эксплуатацию в теплое время года, то ее приспособляемость идет весьма активно. Это частично объясняет повышенную аварийность конструкций с хрупким разрушением их элементов, введенных в эксплуатацию зимой.

Список литературы

1. Абовский Н. П. Нейроуправляемые конструкции и системы / Н. П. Абовский, А. П. Деруга, О. М. Максимова, П. А. Светашков; под ред. Н. П. Абовского. Учеб. пособие для вузов. – М.: Радиотехника, 2003. – 368 с.
2. Александров А. В. Роль отдельных элементов стержневой системы при потере устойчивости // Вестн. МИИТа. – 2001. - №5. - С.46-50.
3. Арнольд В.И. Теория катастроф. 3-е изд., доп. и перераб. – М.: Наука. – 1990. – 128 с.
4. Аугусти Я. Аварии стальных конструкций / Я. Аугустин, Е. Шледзевский. М.: Стройиздат, 1978. - 180 с.
5. Бойд Дж. М. Практические примеры проектирования конструкции судов // Разрушение: В 7 т. — М.: Metallurgizdat, 1977. Т. 5. С. 343–420.
6. Болотин В.В. Методы теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1981. – 351 с.
7. Гениев Г.А. Об оценке динамических эффектов в стержневых системах из хрупких материалов / Г.А. Гениев // Бетон и железобетон. – 1992. – № 9. – С. 25 - 27.
8. Горбань А. Н. Нейронные сети на персональном компьютере //Новосибирск: РАН, 1996. – 276 с.
9. Додонов А.Г. Введение в теорию живучести вычислительных систем. – Киев: Наукова думка. – 1990. – 184 с.
10. Забиров Т.А. Живучесть надводного корабля. – М.: Воениздат. – 1994. – 360 с.
11. Исследование хрупкой прочности строительных металлических конструкций. Труды ЦНИИПроектстальконструкции под ред. Н.П. Мельникова. - М.: ЦНИИПроектстальконструкция. Госстрой СССР, 1982.
12. Кезин А.С. Численное моделирование в задачах надежности и устойчивости стержневых систем при воздействиях в виде случайных процессов, дис. к.т.н. – М., 2003 - 212 с.
13. Койфман М.М. О влиянии размеров на прочность образцов горных пород // Исследования физико-механических свойств горных пород применительно к задачам управления горным давлением. – М: АН СССР, 1962. - С. 6-14.
14. Койфман М.И. Главный масштабный эффект в горных породах и углях// Проблемы механизации горных работ.- М: АН СССР, 1963.- С. 39-56.
15. Кудишин Ю.И., Дробот Д.Ю. Живучесть конструкций в аварийных ситуациях // Металлические здания. Часть 1, – 2008. – № 4 (8). – С. 20 - 22. Часть 2, – 2008. – № 5 (9). – С. 21 - 33.
16. Кудишин Ю.И., Дробот Д.Ю. Живучесть строительных конструкций – важный фактор снижения потерь в условиях аварий // Металлические конструкции. – Макеево: ДонНАСА. – 2009. – № 1. – С. 61 - 72.
17. Кулябко В.В. Моделирование динамических процессов прогрессирующего разрушения сооружений // Особенности проектирования и расчета пространственных конструкций

на прочность устойчивость и прогрессирующее обрушение. Тезисы докладов. – М. – 2009. – С. 50 - 51.

18. Кущенко **В.** Основные принципы обеспечения безопасности строительных конструкций ситуаций // Металлические конструкции. – Макеевка: ДонНАСА. – 2009. – № 2. – С. 147 - 155.

19. Никитин А.И. Отказоустойчивость распределенных систем // Управляющие системы и машины. – 1987. – № 5. – С. 25 - 30.

20. Оберт Л Хрупкое разрушение горных пород // Разрушение: В 7 т. — М.: Металлургиздат, 1976. - Т. 7. - Ч. 1. - 59–126 с.

21. Одинг И. А. Теория дислокации в металлах и ее применение. - М.; Изд – во АН СССР, 1959. – 84 с.

22. Острейковский В.А. Анализ устойчивости и управляемости систем методами теории катастроф. – М.: Высшая школа. – 2005. – 326 с.

23. Перельмутер А.В. Об оценке живучести несущих конструкций // Металлические конструкции. Работы школы профессора Н.С. Стрелецкого. – М: МГСУ. – 1995. – С. 62 - 68.

24. Перельмутер АВ. Избранные проблемы надежности и безопасности строительных конструкций. – М.: АСВ, 2007. – 256 с.

25. Протодяконов М.М., Чирков С.Е. Трещиноватость горных пород в массиве. – М.: Недра, 1964.- 67 с.

26. Розен Б. У., Дау Н. Ф. Механика разрушения волокнистых композитов // Разрушение: В 7 т. — М.: Металлургиздат, 1976. - Т. 7. - Ч. 1. - С. 308.

27. С.В.Серенсен, В.П.Когаев, Р.М.Шнейдерович. Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность. Руководство и справочное пособие. М.: Машиностроение, 1975. - 488 с.

28. Стрелецкий Н.С. Анализ процесса разрушения упругопластической системы // Сборник трудов № 5. – М.: МИСИ. – 1947.

29. Струнин Б.М. К теории масштабного эффекта при растяжении // Заводская лаборатория. – 1960. - №9. – С. 1123 – 1128.

30. Сухонос С.И. Масштабная гармония Вселенной. — М.: София, 2000.

31. Ужик Г.В. Методы испытания металлов и деталей машин на выносливость. - М.-Л.: Изд. АН СССР, 1948. - 264 с.

32. Чечулин Б.Б. Масштабный фактор и статистическая природа прочности металлов. М.: Металлургиздат, 1963. - 120 с.

33. Шашенко А.Н., Сдвижкова Е.А., Гапеев С.Н. Деформируемость и прочность массивов горных пород. Монография. – Д.: НГУ, 2008. – 224 с.