

УДК 519.2.003.12 + 331.461.2

*А. Я. Калиновский<sup>1</sup>, к.т.н., доцент, нач. каф. (ORCID 0000-0002-1021-5799)*  
*И. К. Кириченко<sup>1</sup>, д.т.н., профессор, проф. каф. (ORCID 0000-0001-7375-8275)*  
*А. В. Малезжик<sup>2</sup>, нач. отдела (ORCID 0000-0001-5382-0537)*  
*А. Г. Поливанов<sup>1</sup>, ад'юнкт ад'юнктуры (ORCID 0000-0002-6396-1680)*

<sup>1</sup>Национальный университет гражданской защиты Украины, Харьков, Украина

<sup>2</sup>Главное управление ГСЧС Украины в Харьковской области, Харьков, Украина

## ВЛИЯНИЯ ФАКТОРОВ НА РИСКИ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ НЕФТЕГАЗОКОНДЕНСАТНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Выполнен анализ состояния проблемы оценки рисков возникновения аварийных ситуаций на различных технических объектах. Отмечено, что в существующих отечественных и зарубежных разработках сегодня практически отсутствуют необходимые инструменты для исследования (оценки состояния системы в целом, прогнозирования поведения системы под влиянием поражающих факторов, методов повышения или сохранения сопротивляемости систем, функционирующих в условиях поражающих воздействий, и т.д.) качества функционирования сложных систем в «зоне форс-мажорных обстоятельств». На основе выполненного обзора литературных источников сформулированы новые задачи исследования, направленные на создание эффективных методов прогнозирования рисков возникновения чрезвычайных ситуаций на технологических установках нефтегазоконденсатных месторождений под воздействием внешних поражающих факторов, базирующихся на теории самоорганизующихся систем и теории управления рисками. Как показывает практика, графы являются удобным, и поэтому широко используемым инструментом в математическом моделировании. Несмотря на то, что графы являются универсальным инструментом, они еще не нашли должного применения в синергетике. Предложенная в настоящей работе математическая модель распространения внешних воздействий по системе позволяет объяснить ряд явлений, наблюдаемых в сложных технических системах при попадании их в условия внешних воздействий (форс-мажорные обстоятельства). В частности, становится ясно, каким образом при внешних воздействиях выходят из строя (достигают предельного состояния) элементы, не получавшие импульсного воздействия непосредственно. Показано, что причиной выхода из строя элементов системы вне зоны форс-мажорных обстоятельств (после окончания влияния внешних воздействий) являются внутренние источники возмущений. Существенной особенностью построенной модели является возможность выхода из строя при распространении импульсных воздействий по системе наиболее надежных элементов. Этот факт красноречиво подчеркивает прямую зависимость надежности элемента от его положения в структуре, а также зависимость стойкости всей системы от выбранной при проектировании структуры. Найденные в ходе исследования модели явления относятся к классу синергетических эффектов, прогнозирование которых на начальных этапах исследования не тривиально. Руководствуясь предложенной моделью, можно говорить о стойкости системе по отношению к конкретным воздействиям. В случае, когда класс воздействий за время их распространения по структуре системы не переводит ее в предельное состояние, система считается абсолютно стойкой к этому классу воздействий. Что позволит исследовать структурные параметры стойкости системы.

**Ключевые слова:** Комбинаторный анализ, теория графов, стойкость системы, импульсное воздействие

### 1. Введение

Для сложных технических систем, к которым относятся и объекты химической промышленности, в частности технологические установки нефтегазоконденсатных месторождений, актуальной проблемой является достоверное и своевременное предвидение, прогнозирование и предотвращение чрезвычайных и других нежелательных ситуаций и воздействий которые могут привести к нештатному режиму, аварии, катастрофе или существенно повлиять на работоспособность, живучесть, безопасность, эффективность и другие свойства таких объектов. Возможность появления и результаты действий таких ситуаций, условий и факторов

определяется случайными и хаотическими процессами, которые по механизмам воздействия характеризуются как риски.

Одно из центральных мест в исследованиях по управлению рисками занимает анализ кризисов, то есть ситуаций, когда система оказывается не в состоянии в полном объеме выполнять возложенные на нее функции. При воздействии на систему внешних поражающих факторов, которые нередко являются внезапными и интенсивными, система не всегда может «противостоять» этим поражающим факторам, что в свою очередь приводит к ухудшению ее функционирования, а порой и к кризисам.

Объекты химической промышленности относятся к сложным техническим системам, которые прибывают в такой зоне, поэтому актуальным является разработка адекватных математических моделей, которые позволяют оценивать систему в целом, прогнозировать поведение системы под влиянием поражающих факторов. Также актуальными является разработка методов повышения или сохранения сопротивляемости систем, функционирующих в условиях поражающих воздействий.

Моделирование сложных систем позволяет исследовать особенности их функционирования в различных условиях, наделять их требуемыми характеристиками и снижать риск возникновения чрезвычайных ситуаций (ЧС). Важнейшую роль в формальном представлении сложных систем играет структура – порядок межэлементных связей системы. В работах научной школы профессора В. В. Кульбы для моделирования систем со сложной структурой используются методы теории взвешенных графов. Такой подход уже позволил обнаружить ряд синергетических эффектов в поведении систем со сложной структурой. Таким образом, необходимо отметить, что от структуры системы зависит ее стойкость. Важно также прогнозировать какие изменения в структуре приведут к улучшению или ухудшению функционирования рассматриваемого объекта.

## **2. Анализ литературных данных и постановка проблемы**

В [1] проанализированы многочисленные данные по аварийности и травматизму, для выявления условий и обстоятельств возникновения происшествий. При этом оказалось, что главную опасность в настоящее время представляют все виды энергии техногенного происхождения, а основные закономерности в появлении соответствующих происшествий характеризуются следующими основными признаками:

- а) аварийность и травматизм можно интерпретировать потоками случайных событий с экспоненциальным распределением времени между их появлением;
- б) возникновение каждого конкретного происшествия является, как правило, следствием не отдельно взятой причины, а – цепи соответствующих предпосылок;
- в) инициаторами и звеньями такой цепи служат ошибки людей, отказы техники и/или нерасчетные (неожиданные для людей либо превышающие нормативные значения для техники) воздействия на них извне.

В [2] указано, что типичной причинной цепью техногенных происшествий оказалась такая последовательность событий-предпосылок:

- ошибка человека, отказ техники и/или неблагоприятное для них внешнее воздействие;
- появление опасного фактора (потока энергии или вещества) в неожиданном месте и/или не вовремя;
- отсутствие либо неисправность предусмотренных на эти случаи средств защиты и/или неточные действия людей в такой ситуации;
- распространение и воздействие опасных факторов на незащищенные эле-

менты техники, людей и/или окружающей их среды;

– причинение ущерба людским, материальным и природным ресурсам вследствие ухудшения их свойств и/или целостности.

Основными факторами, способствующими аварийности и травматизму, явились слабые навыки действий работающих в нестандартных ситуациях, их неумение правильно оценивать информацию и недостаточная технологическая дисциплинированность, низкое качество конструкции рабочих мест, а дополнительными – невысокие надежность и эргономичность оборудования, несовершенство отбора и подготовки эксплуатирующего его персонала, некачественная организация труда и дискомфортность рабочей среды. Большинство из последних факторов непосредственно не приводили к возникновению происшествий, а лишь усложняли условия работ строгой регламентацией технологии и необходимостью соблюдения многочисленных мер безопасности, способствуя тем самым росту напряженности труда и связанных с этим ошибок работающих.

Установлены и более общие факторы рассматриваемой проблемы – объективно существующее противоречие между непрерывно увеличивающимися потребностями человечества и возможностями биосферы по их удовлетворению и, как следствие – между быстро растущим числом новых для человека вредных факторов антропогенно-природного характера и эволюционно сформировавшимися у него и общества защитными механизмами.

Следует отметить и недоработки науки в разрешении данного противоречия: отсутствие общей теории безопасности и незавершенность создания таких ее разделов (сфер), как теории национальной и производственно-экологической безопасности. Последнее усложнило обучение специалистов и привело к тому, что в настоящее время главным методом обеспечения безопасности все еще фактически является «метод проб и ошибок».

Выявленные выше факторы происшествий положены в основу при формулировании представлений о природе объективно существующих опасностей. Такой подход позволил обеспечить истинность исходных предпосылок и плодотворность основанных на них последующих построений, позволяя верно обосновать выбор объекта, предмета и соответствующих им методов исследования и совершенствования безопасности.

В [3] сформулирована энергоэнтропийная концепция аварийности и травматизма, сущность которой сводится к следующему:

1. Производственная деятельность потенциально опасна, так как связана с проведением технологических процессов, а последние – с энергопотреблением (выработкой, хранением, преобразованием механической, электрической, химической, ядерной и другой энергии).

2. Опасность проявляется в результате несанкционированного либо неуправляемого выхода энергии, накопленной в оборудовании и/или вредных веществах, непосредственно в самих работающих, во внешней относительно людей и техники среде.

3. Такой внезапный выход энергии может сопровождаться происшествиями с гибелью или травмированием людей, повреждениями оборудования или объектов окружающей их природной среды.

4. Происшествиям предшествуют цепи предпосылок, приводящие к потере управления технологическим процессом, нежелательному выбросу используемых в нем энергии или вредных веществ, их воздействию на людей, оборудование и окружающую среду.

5. Звеньями причинной цепи происшествия являются ошибочные и несанкционированные действия персонала, неисправности и отказы техники, а также нерасчетные воздействия на них извне.

Правомерность данной концепции обусловлена ее эмпирическим характером и непротиворечивостью фундаментальным законам энтропии, в частности – объективному стремлению последней к росту. Согласно II началу термодинамики, производственная деятельность, связанная, как правило, с противодействием такому росту, приводит соответствующие системы в неустойчивое, а стало быть – потенциально опасное состояние. Это же справедливо и для интеллектуальной работы человека, требующей усилий по уменьшению энтропии (на сей раз – в информационном, а не термодинамическом смысле), которые способны причинять вред его здоровью.

При выборе признаков классификации подразумевалось следующее:

а) «опасность» – рассматривалась как возможность причинения ущерба людским, материальным и природным ресурсам;

б) говоря о «безопасности», имелась ввиду система, обычно включающая человека – потенциальную жертву и угрозу – носителя актуализированной опасности;

в) предполагалось, что безопасность достигалась лишь при уклонении, уничтожении или защите человека от всех угроз;

г) угрозами считалось все, препятствующее удовлетворению важных для него индивидуальных, социальных и духовных потребностей;

д) средства удовлетворения этих потребностей интерпретировались адекватными (эволюционно апробированными для людей) потоками энергии, вещества и информации.

Принятые предположения, а также деление на три группы угроз, вызванных неудовлетворением жизненно важных потребностей человека в энергии, веществе и информации, указали на возможность использования данных признаков для классификации многочисленных опасностей и способов их парирования.

Так, следуя генезису опасностей (неадекватности потоков только что упомянутых форм материи), все опасности разделены на три базовых класса [4]:

1) природно-экологические, вызванные вредным воздействием на людей стихийных бедствий или антропогенным нарушением естественных геобиохимических циклов миграции вещества;

2) техногенно-производственные, связанные с возможностью нежелательных выбросов энергии, накопленной в созданных человеком технологических объектах;

3) антропогенно-социальные, обусловленные умышленным сокрытием или искажением информации, а также спецификой ее восприятия людьми.

Исходя из причинно-следственной обусловленности ущерба, выделены две группы объективно существующих опасностей:

а) представляющие непосредственную угрозу для жизнедеятельности человека;

б) причиняющие подобный ущерб косвенно, например, в результате ухудшения условий его жизни (утраты материальных ценностей, загрязнения окружающей природной среды и т.п.).

Если же говорить о нации, то опасности можно классифицировать по возможности причинения ущерба как непосредственно образующим ее этносам, так и средствам удовлетворения их коллективных потребностей: опасности для а) территории, б) людей, в) уклада их жизни.

Классифицировать безопасность можно лишь по отношению к конкретным жертвам и путям снижения соответствующих угроз. В большинстве случаев ниже

подразумеваются производственно-экологическая безопасность – та сфера национальной безопасности, которая обеспечивается одновременным парированием техногенно-производственных и природно-экологических опасностей, игнорируя – антропогенно-социальные. Подтверждениями правомерности использования именно такого термина служат тесная причинно-следственная связь между антропогенными и природными факторами, а также условность деления материи на энергию и вещество, являющихся источниками учитываемых нами опасностей.

Эксплуатация объектов газодобывающей и газотранспортной системы характеризуется риском возникновения аварийных ситуаций, сопровождающихся возгораниями, взрывами и аварийными выбросами загрязняющих веществ. Для минимизации негативного воздействия производственной деятельности на газодобывающих предприятиях и предприятиях газопроводного транспорта разрабатываются специальные меры и программы, приоритетной целью которых, как правило, является предотвращение возникновения аварийных ситуаций на компрессорных станциях и линейных участках магистральных трубопроводов, которые направлены на снижение рисков возникновения аварий.

Разработка системы управления рисками процесса добычи и перекачки газа включает не только анализ и оценку технологических и прочих рисков, чему посвящено большинство научных трудов по данной тематике.

По мнению многих экспертов, в настоящее время не существует общепринятого метода оценки рисков промышленных объектов, а те, что сегодня применяются на практике, направлены на оценку отказов в работе технологического оборудования, используемого в производственном процессе. Что касается рисков, связанных с отказами работы технологического оборудования, исследования нацелены на оценку масштабов и характера распространения выбросов в окружающую среду. При этом недостаточное внимание уделяется вопросу управления процессом для снижения вероятности и возникающего ущерба в случае наступления нештатных ситуаций, то есть отсутствует система, позволяющая реализовывать эффективные мероприятия, предупреждающие различного рода аварийные ситуации.

Управление рисками – это совокупность методов анализа и нейтрализации факторов рисков, объединенных в систему планирования, мониторинга и корректирующих действий. В то же время это является дополнительным инструментом постоянного совершенствования системы управления предприятия, направленным на повышение качества выполняемых работ, а также повышения удовлетворенности заинтересованных сторон (потребителей, персонала, населения, инвесторов, акционеров и т.д.). Основными элементами системы управления рисками являются:

- выявление потенциальных рисков событий, оказывающих влияние на эффективность деятельности в рамках системы управления качеством окружающей среды и в области профессиональной безопасности и охраны труда;
- оценка уровня их влияния;
- изменение характеристик риска в соответствии с обозначенным уровнем допустимости соответствующих типов (видов) рисков;
- разработка решений по управлению рисками.

Первым этапом для создания комплексной системы управления рисками процесса добычи и перекачки газа на станциях является определение области применения системы, которая включает разработку целей и задач анализа, оценки и управления рисками данного процесса. При разработке целей и задач должны учитываться стратегические направления в области обеспечения качества данного процесса, экологической безопасности, а также обязательства компании по сни-

жению негативного воздействия процесса на окружающую природную среду и здоровье персонала.

Следующий этап – оценка рисков в соответствии с целями и задачами разработки системы. Оценка риска – это количественное описание выявленных рисков, в ходе которого определяются такие их характеристики, как вероятность и размер возможного ущерба.

Проведенный анализ показывает, что классическая теория надежности не предоставляет необходимых инструментов для исследования (оценки состояния системы в целом, прогнозирования поведения системы под влиянием поражающих факторов, методов повышения или сохранения сопротивляемости систем, функционирующих в условиях поражающих воздействий, и т.д.) качества функционирования сложных систем в «зоне форс-мажорных обстоятельств». Пребывание систем именно в этой зоне приводит к необходимости разработки соответствующих математических моделей.

Следует отметить, что исследование систем со сложной структурой в классической теории надежности сводится во многом к изучению систем со структурами в виде последовательно-параллельных схем, что также сказывается отрицательным образом на качестве проводимого исследования.

Живучесть системы, ее способность функционировать в условиях внешних поражающих воздействий будем называть стойкостью системы. С введением этого понятия очерчивается новая задача в рамках теории управления рисками – обеспечение стойкости сложных систем.

Важнейшую роль в формальном представлении сложных систем играет ее структура – порядок межэлементных связей системы.

Поэтому не решенной частью проблемы прогнозирования техногенных аварий на объектах химической промышленности, является разработка метода моделирования поведения систем со сложной структурой на основе теории взвешенных ориентированных графов.

### **3. Цель и задачи исследования**

Целью работы является разработка метода исследования поведения элементов технологических установках нефтегазоконденсатных месторождениях под воздействием внешних поражающих факторов, базирующегося на теории самоорганизующихся систем, теории управления рисками и теории графов.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

- выполнить исследование влияния внешних факторов на сложные технические системы;
- выполнить моделирование распространения внешних импульсных воздействий по системе;
- определить элементы системы для резервирования при воздействии внешнего влияния.

### **4. Исследование влияния внешних факторов на сложные технические системы**

Современные технические объекты представляют собой сложные системы, состоящие из множества взаимодействующих друг с другом разнородных элементов, число которых может достигать десятков тысяч. Вместе с тем требования по эффективности функционирования и качеству производимых изделий ужесточаются. Во многом это связано с риском возникновения опасностей, аварий и ка-

тастроф при експлуатації технічних систем.

Моделювання складних систем дозволяє досліджувати особливості їх функціонування в різних умовах, наділяти їх необхідними характеристиками і знижувати ризик виникнення надзвичайних ситуацій (НС). Закономерен питання – можливо чи в побудованій математичній моделі складної системи урахувати кожен з її багаточисельних елементів.

Розглянемо проблему з точки зору теорії самоорганізації – синергетики [5], і теорії управління ризиками. В математичній моделі досліджуваної системи повинні бути представлені основні елементи, по поведінці, по якості, по ефективності функціонування яких можна достовірно судити про всю систему. В термінах синергетики це параметри порядку моделюваного об'єкта. Такий підхід в дослідженнях, без детального представлення складних систем, процесів і явищ в них протікаючих, прийнято називати системним синтезом.

В нинішній роботі цей підхід пропонується реалізувати в формі ймовірно-детерміністическої моделі, описуючої поширення зовнішніх впливів (різноманітного характеру) серед елементів досліджуваної системи. В основі моделі лежать формалізації структури системи в формі графа і зовнішнього негативного впливу на систему в формі імпульсного впливу. Таке представлення системи, що знаходиться в умовах зовнішніх впливів, дозволяє побудувати ієрархію упрощених моделей, т.е. розглянути різні види зовнішніх впливів на систему при різних критеріях її непрацоспособності (вихід з ряду елементів системи, досягнення елементами системи граничного стану і т.д.).

Для кожної моделі з ієрархії упрощених моделей конкретного складного явища (в тому числі і системи, що знаходиться під впливом зовнішніх впливів) чітко визначається область її застосовності, там, де модель найбільш ефективна і корисна. Зауважливим рисом ієрархії упрощених моделей є наявність базових математических моделей, т.е. таких математических об'єктів, дослідження яких дозволяє ефективно будувати і вивчати великі класи моделей різних по своїй природі явищ. Відзначимо, що такий підхід особливо корисний, а, відповідно, і переважний при побудові моделей складних систем.

Під системою в кібернетіці [6] прийнято розуміти об'єднання будь-яких елементів, розглянутих як зв'язне ціле. Кожен елемент системи виконує певні дії, що дозволяє всій системі виконувати покладені на неї функції. Особливе значення для системи має порядок зв'язей її елементів, т.е. порядок взаємодії елементів системи при її функціонуванні. Факт безпосереднього (без посередників) взаємодії між двома елементами системи визначає наявність зв'язей між ними. Загальну картину зв'язей між усіма елементами системи відображає структура системи. Досвід дослідження багатьох складних систем показує, що на початковій стадії аналізу елементи системи цілком природно представляти в формі вершин графа, наділених певними властивостями, а взаємодію описувати з допомогою ребер.

З точки зору концепції безпеки [7], будь-яку складну технічну систему слід вивчати з трьох основних позицій: надійності системи, живучості системи, і її безпеки. Кожна з цих позицій по-різному описує зв'язь і взаємодію системи з оточуючою її середовищем. Дослідження перелічених властивостей системи дозволяє знизити ризик виникнення надзвичайних ситуацій (НС), що виникають в результаті нещасливих випадків, аварій і катастроф.

З позиції класических моделей теорії надійності система вивчається з

лированно от окружающей среды: ни система не подвергается воздействиям внешней среды, ни сама окружающая среда не испытывает на себе воздействий со стороны системы.

Надежность [8] – свойство системы сохранять в течение определенного промежутка времени значение параметров, характеризующих функционирование системы. Надежность – это комплексное свойство системы, зависящее от ее безотказности, ремонтпригодности, долговечности и т.д.

Теория надежности использует аппарат теории вероятностей и математической статистики. Как правило, для оценки возможности возникновения опасного для окружающей среды состояния системы используется дерево событий (отказов). Дерево событий (отказов) – это диаграммное представление всех событий (отказов), последовательное и/или совместное появление которых в системе приводит к некоторому главному событию (возможно, потенциально опасному происшествию). Зная вероятности появления тех или иных событий (отказов), можно подсчитать возможность возникновения главного события (опасного происшествия). В зависимости от задачи и традиций той или иной области, главным событием называют либо отказ системы (выход из строя), либо адекватную реакцию на воздействие.

В сложных многоэлементных системах к потенциально опасному происшествию могут привести последовательные и/или совместные отказы различных элементов системы. Поэтому для повышения надежности элементов (вероятности безотказной работы) системы, и как следствие, надежности самой системы, используются различные методы резервирования [8]. На рис. 1, изображенная в виде графа  $G$ , показана коммуникационная сеть некоторой системы управления.

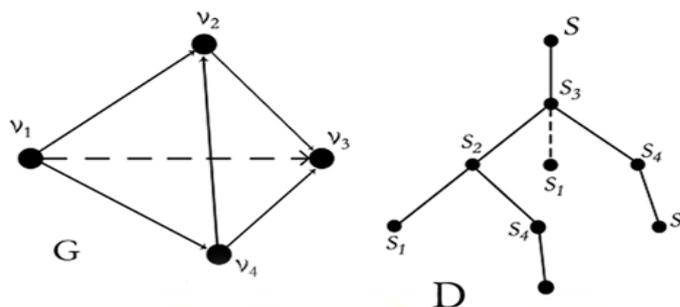


Рис. 1. Двухполюсный граф  $G$  и дерево отказов  $D$

Сеть должна обеспечивать прохождение информационного сигнала от элемента  $v_1$  системы до элемента  $v_3$ . Вершины  $v_1$  и  $v_3$  – полюсные вершины. На вершину  $v_1$  подается сигнал, который должен достичь вершины  $v_3$ . Главное событие  $S$  – непрохождение сигнала от вершины  $v_1$  до вершины  $v_3$ . Промежуточные события  $S_i$ ,  $i=\{1,2,3,4\}$ , – непрохождение сигнала до вершины  $v_i$ . Пунктиром изображены резервное соединение (на графе  $G$ ) и соответствующее ему событие (на дереве  $D$ ). Считая надежность (вероятность безотказной работы в течение некоторого промежутка времени) для всех вершин графа равными 0,9 получаем, что надежность функционирования коммуникационной сети в виде графа  $G$  без резервного соединения равна:

$$P(\bar{S}) = 1 - (1 - P(S_3 S_4 S_1))(1 - P(S_3 S_2 S_1))(1 - P(S_3 S_2 S_4 S_1)) = \\ = 1 - (1 - 0,93)(1 - 0,93)(1 - 0,94) \approx 0,975,$$

с резервным:

$$P(\bar{S}) = 1 - (1 - P(S_3 S_4 S_1))(1 - P(S_3 S_2 S_1))(1 - P(S_3 S_2 S_4 S_1))(1 - P(S_3 S_1)) = \\ = 1 - (1 - 0,93)(1 - 0,93)(1 - 0,94)(1 - 0,92) \approx 0,995$$

Событие  $\bar{S}$  – событие противоположное событию  $S$ , т.е.  $\bar{S}$  – функционирование коммуникационной сети  $G$ .

Событие обратное этому является главным для построенного на рис. 1 дерева отказов  $D$ . Использование резервного соединения (см. рис. 1) в коммуникационной сети увеличивает надежность функционирования всей системы.

Для коммуникационной сети (как и для других сложных систем, представляемых в виде графов) численный расчет ее надежности может оказаться задачей, требующей значительных временных ресурсов. По сути, построение дерева отказов для коммуникационной сети сводится к простому перебору всех возможных вариантов недостижения информационного сигнала от одной полюсной вершины до другой. Если  $n$ -вершинный граф коммуникационной сети является полным (когда существует двусторонняя связь между любой парой вершин графа), то число только  $n$ -вершинных путей между полюсными вершинами будет равно  $n!$ . Поэтому временная трудоемкость перебора всевозможных отказов системы, а значит и построения дерева отказов, будет зависит экспоненциально  $O(2^n)$  от числа  $n$  элементов системы. То есть при  $n = 1000$ , операций потребуется больше, чем атомов во вселенной. Это недостижимо в компьютерных расчетах. В то же время в современном автомобиле более 10 тыс. деталей, каждая из которых имеет свою вероятность отказа, а в самолете более 100 тыс. деталей. Все это является весомым доводом в пользу применения методов системного синтеза.

Увеличение надежности функционирования систем ведет к снижению риска возникновения ЧС (т.е. опасного для окружающей среды состояния системы).

Живучесть – свойство системы, характеризующее ее способность функционировать под влиянием внешних воздействий (нагрузок), возбуждаемых в окружающей систему среде.

Изучение живучести систем возможно при помощи вероятностных моделей, в рамках современной математической теории надежности [8], и детерминистическими, в рамках механики катастроф.

Вероятностную модель описывающую живучесть системы называют «нагрузка – прочность» («нагрузка – несущая способность», «нагрузка – сопротивляемость», прочностная модель). Под действием внешней нагрузки прочность системы постепенно уменьшается до тех пор, пока система не выйдет из строя. Внешние нагрузки описываются случайной величиной (функцией), и как правило, не приводят к скачкообразному изменению прочности системы.

Детерминистическая модель живучести системы лежит в основе механики катастроф. Объектом исследования механики катастроф являются системы, испытывающие постоянные внешние воздействия (нагрузки). Простым примером таких систем служат инженерные конструкции. В рамках механики катастроф исследуются процессы накопления повреждений, достижения предельного (критического) состояния, реакции элементов конструкций на внешние воздействия и т.д.

Особое место в механике катастроф занимает изучение процесса закритического поведения элементов конструкций (систем), которое и приводит к тем или иным нежелательным событиям (авариям, катастрофам и т.д.). Элементы конструкций (систем) в своей закритической области выходят из строя, оказывают влияние на другие элементы системы, порождая тем самым внутренние для самой

конструкции (системы) негативные воздействия. Внешние и внутренние воздействия приводят к последовательности отказов элементов системы, инициирующей переход системы в аварийное состояние (ЧС).

Понятие живучести широко используется и при исследовании систем со сложной структурой, таких как коммуникационные сети систем управления и систем энергетики [9]. Нарушение функционирования этих систем возможно при нарушении связности их структур. Система не может выполнять свои функции, когда не существует взаимодействия между всеми или, по крайней мере, жизненно важными элементами. «Мерой живучести» в этом случае служит минимальное число элементов системы (вершинная связность [9]) или связей (реберная связность [9]), выход из строя которых под влиянием внешних воздействий приводит к нарушению связности структуры системы. Для коммуникационной сети (графа  $G$ ) на рис. 1 без резервного соединения реберная связность равна 2, вершинная — 1. При использовании резервного соединения реберная связность возрастает до 3, а вершинная остается равной 1.

Внешние воздействия делят на воздействия природного и техногенного характера. Ко вторым относятся и воздействия, вызываемые умышленными действиями человека. Во многих случаях, при создании сложных технических систем, сейчас приходится принимать во внимание и возможность террористических актов. В зависимости от интенсивности и мощности оказываемых на систему воздействий рассматриваются нормативные (проектные) и экстремальные (сверхнормативные) нагрузки. В первом случае изучается живучесть системы в штатных (нормальных) условиях функционирования, когда переход в аварийное состояние возможен при длительном накоплении системой повреждений и достижения предельного (критического) состояния (подобное поведение систем описывается и методами самоорганизованной критичности). Во втором случае изучается живучесть системы, когда возможен относительно быстрый переход в аварийное состояние – форс-мажорные обстоятельства.

Механика катастроф занимается не столько изучением воздействий различного рода, сколько созданием аппарата перехода от воздействий к расчетным действующим нагрузкам.

Живучесть и надежность систем являются теми характеристиками, которые позволяют оценить риск возникновения чрезвычайных ситуаций при эксплуатации сложных технических систем. Используя эти критерии, возможно обеспечение безопасности систем при чрезвычайных ситуациях, или наделение системы необходимыми качественными характеристиками, недопускающими возникновения чрезвычайных ситуаций.

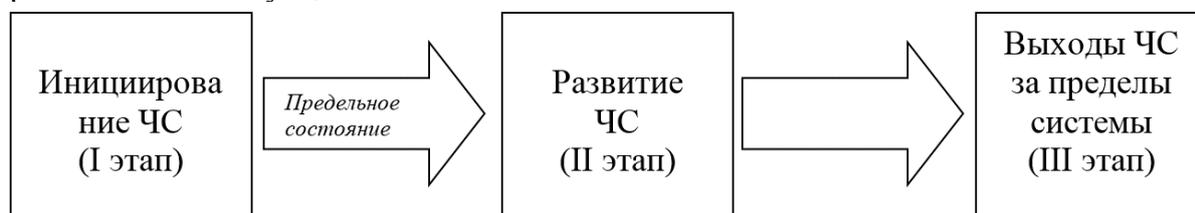


Рис. 2. Схема развития чрезвычайных ситуаций

В схеме на рис. 2 надежность и живучесть описывают переход от первого этапа ко второму. Живучесть системы предполагает тщательное описание поведения систем (в отличие от надежности), при имеющихся внешних воздействиях на систему как в докритической области (до ЧС), так и в закритической (при раз-

витии ЧС), когда система функционирует, достигнув предельного состояния. Третий этап предполагает изучение возможных последствий ЧС на окружающую систему среду и лежит в области обеспечения безопасности систем [9].

Согласно схеме, представленной на рис. 2, безопасность системы можно обеспечить различными способами: не допустить развитие ЧС в системе, не допустить выхода ЧС за пределы системы, и свести к возможному минимуму влияния аварий на окружающую систему среду.

Напомним, структура системы [10] отражает общую картину причинно-следственных взаимодействий элементов системы. Во многих случаях сложность системы определяется сложностью ее структуры. Для подобных технических систем исследование инициирования ЧС (I этап схемы, представленной на рис. 2) внешними воздействиями имеет особое значение. Важно представлять, как от структуры системы зависит достижение системой предельного состояния (критического уровня), за чертой которого риск возникновения ЧС резко возрастает.

В рамках модели, предлагаемой в настоящей работе, сложная техническая система считается подвергнутой влиянию внешних воздействий. Это соответствует попаданию системы в зону «форс-мажорных обстоятельств», т.е. под влияние ненормативных, непредусмотренных при проектировании системы, экстремальных нагрузок, имеющих также внезапный характер. В основе модели лежит формально представленная структура системы, что позволяет детально воспроизвести все возможные варианты распространения внешних воздействий по элементам системы. Модель при заданных нагрузках на некоторое множество элементов системы, вызываемых различными внешними воздействиями, определяет темп и сроки достижения системой предельного состояния.

Под стойкостью [11] системы будем понимать ее способность противостоять внешним воздействиям и функционировать в штатном режиме на этапе инициирования ЧС, т.е. в докритической области функционирования системы. Другими словами, стойкость – это живучесть системы в докритической области функционирования, под влиянием внешних ненормативных воздействий (нагрузок). Поэтому основной характеристикой стойкости системы будет служить время достижения системой предельного состояния. Увеличение этого промежутка времени будет способствовать уменьшению риска развития ЧС в системе и обеспечению ее безопасности.

## 5. Моделирование распространения внешних импульсных воздействий по системе

Существуют различные виды внешних воздействий, оказывающих влияние на систему. Воздействия могут быть механические, термические, электромагнитные, биохимические, радиационные, гидродинамические и т.д. (Как правило, основными считают первые три из перечисленных.) Всякое воздействие вызывает повышение нагрузки на те или иные элементы системы. Повышение нагрузки на отдельно взятый элемент системы отражается на возможности этого элемента выполнять свои функции.

Установление связи между нагрузками  $d_{i_1}, d_{i_2}, \dots, d_{i_n}$  вызываемыми воздействиями различного рода, как уже отмечалось, является одной из важных задач механики катастроф. Установление такой связи позволяет ввести функционал:

$$x = \Phi(d_{i_1}(t), d_{i_2}(t), \dots, d_{i_n}(t)), \quad (1)$$

мента системы от нагрузок  $d_{i_1}, d_{i_2}, \dots, d_{i_n}$ , вызванных внешними воздействиями в момент времени  $t$ .

Для механических систем, все элементы которых являются механическими, функционал (1) имеет вид:

$$x_M = \Phi(d_D(t), d_N(t))$$

где как показатель качественного состояния  $x_M$  элементов системы выступают повреждения, накопленные элементом к моменту времени  $t$ . Деформация  $d_D$  и напряжение  $d_N$ , возникающие у элемента системы, служат количественными представлениями полученных при внешних воздействиях нагрузок и поражений.

Как показывает практика, сложные системы состоят из взаимодействующих элементов различной природы (механической, радиоэлектронной и т.д.). Поэтому не для всех сложных систем удастся точно воспроизвести функционал (1), в левой части которого как показатель качественного состояния элемента системы выступают накопленные за время внешнего поражающего воздействия повреждения. В такой ситуации как показатель качественного состояния элемента разумно использовать его надежность. Количественной мерой надежности может служить вероятность  $p$  выхода элемента из строя за единицу времени или, что тоже самое, время  $\bar{T}$ , за которое с заданной вероятностью  $\bar{p}$  элемент также выйдет из строя. Надежность элемента уменьшается при получении им повреждений, вызванных внешними воздействиями.

Функционирование системы предполагает постоянное взаимодействие образующих его элементов. Поэтому внешние воздействия, причинив повреждения одним элементам системы, окажут влияние на показатели качественного состояния (надежности) и элементов, не подвергнутых влиянию этого воздействия непосредственно. То есть повышение нагрузки будет наблюдаться не только у тех элементов системы, которые оказались под влиянием внешних воздействий, но и у элементов, взаимодействующих (связанных) с ними. Это приведет к понижению надежности у последних. Надо отметить, что речь идет только о нагрузках, которые не являются нормативными, т.е. учитываемыми при проектировании и эксплуатации системы. Нормативные нагрузки не должны приводить к повреждениям, резко ухудшающим надежность элементов системы. Кратковременные и мощные внешние (далее – импульсные) воздействия мгновенно и в значительной степени могут уменьшать показатели надежности отдельных элементов и всей системы в целом, при этом система в состоянии сохранить свою работоспособность.

Надо отметить, что для одних систем, таких как системы вооружений и военная техника, форс-мажорные обстоятельства, формализуемые в настоящей работе в виде импульсных воздействий, являются «нормальными» условиями эксплуатации. Подобные системы должны быть подготовлены для пребывания в условиях форс-мажорных обстоятельств длительное (или достаточное для достижения поставленных целей) время. Для других систем, таких как социально-экономические, биологические и т.п., несмотря на то, что времена их пребывания в условиях форс-мажорных обстоятельств очень малы, важно знать их реакцию на импульсные воздействия, поскольку они могут оказаться губительными для систем.

Как показывает практика, внешнее поражающее воздействие на один из элементов системы обязательно отразится некоторым образом на показателях надежности элементов и всей системы. Это происходит даже в том случае, когда ни

элемент, непосредственно получивший поражающий импульс воздействия, ни сама система не потеряли работоспособности. Возможны случаи, когда, с течением времени, помимо элемента получившего воздействия «напрямую», из строя выходят и элементы системы, не получавшие непосредственного воздействия. Структура многих технических систем, в том числе и военных, представляет собой «жесткую» конструкцию, что позволяет внешнему воздействию, в виде импульса, распространяться по структуре системы. При этом импульс воздействия, уменьшает как показатели надежности отдельных элементов системы, так и всей системы в целом. Для формального отражения этой ситуации можно использовать аппарат дискретной математики и теорию графов, в частности.

### **6. Определение элементов системы для резервирования при воздействии внешнего влияния**

Следуя известным подходам к повышению надежности систем и их элементов, не представляется возможным продублировать все элементы системы, предполагающей попадание под внешнее влияние. Поэтому требуется изучить реакцию системы на «стороннее» влияние, найти наиболее уязвимые «места» системы и рекомендовать их к резервированию. Для достижения этой цели важно подобрать точный метод формального представления системы, внешнего воздействия и определить динамику распространения внешнего влияния по системе.

Будем считать тождественными следующие понятия: граф системы и структура системы, вершина графа и элемент системы, ребро графа и связь между элементами системы [11].

Обозначим всякий конечный граф:

$$G = (V, E),$$

где  $V = \{v_i\}$ ,  $i = 1, n$  – множество вершин,  $E = \{e = (v, u)\}$  множество его ребер.

Распространение воздействия от одного элемента системы к другому, на графе системы будем задавать ориентированным ребром – ребром с определенными началом и концом. Ориентированное ребро часто называют дугой, а граф с дугами – орграфом. Орграф структуры моделируемой системы не будет иметь петель (т.е. дуг, конец и начало которых совпадает).

Надежностью элемента системы будем считать вероятность  $P(t < T)$  того, что элемент будет работоспособен в течение времени  $T$  с момента начала эксплуатации. Но надежности элементов, приписываемые соответствующим вершинам графа системы, не достаточно для полного формального представления системы. Воздействие при прохождении от одного элемента к другому теряет свою «силу». Надежность элемента системы и долю уменьшения воздействия при переходе от одного элемента к другому можно получить экспериментально или при экспертном анализе.

Таким образом, на орграфе  $G = (V, E)$  системы для вершины  $v_i \in V$ ,  $i \in \{1, 2, \dots, n\}$  весом:

$$w_i(t) = P_{v_i}(t < T) \quad (2)$$

Является величина надежности элемента системы, соответствующего вершине  $v_i$ . А весом  $w(v_i, v_j) = e_{ij}$ ,  $j \in \{1, 2, \dots, n\}$ ,  $i \in \{1, 2, \dots, n\}$ , дуги  $(v_i, v_j) \in E$ , причем со зна-

ком «+», является число  $0 < e_{ij}$ , равное сохранившейся доле передаваемого воздействия, при переходе от вершины  $v_i$  к вершине  $v_j$ .

Процесс изменения весов вершин графа системы можно отразить следующим правилом, называемым импульсным воздействием. Импульсное воздействие определяется импульсом  $\text{imp}_j(t), j \in \{1, 2, \dots, n\}$  в дискретном времени  $t = 0, 1, 2, 3, \dots$ , который задается отношением:

$$\text{imp}_j(t) = w_j(t) / w_j(t-1) \text{ при } t > 0 \quad (3)$$

Тогда для  $i$ -ой вершины графа  $G$  определим импульсное воздействие:

$$w_i(t+1) = w_i(t) \prod_{j=1}^{\text{dug}_i} e_{ji} \text{imp}_j(t) \quad (4)$$

$$w_i(t+1) = w_i(t) \prod_{j=1}^{\text{dug}_i} (1 - e_{ji} \text{imp}_j(t)) \quad (5)$$

где  $\text{dug}_i$  – число входящих в вершину  $v_i$  дуг.

Формулы (3), (4) и (5) задают изменения весов вершин графа  $G = (V, E)$ , тем самым определяя динамику распространения внешних воздействий по системе. Формула (4) соответствует возрастающим импульсным воздействиям, которые увеличиваются при переходе от одной вершины к другой. Формула (5) соответствует затухающим импульсным воздействиям, которые уменьшаются при переходе от одной вершины к другой.

Автономное импульсное воздействие на взвешенном орграфе  $G$  определим по правилу (3) с вектором начальных значений  $W(0) = (w_1(0), w_2(0), \dots, w_n(0))$  и вектором импульсов:

$$\text{Imp}(0) = (\text{imp}_1(0), \text{imp}_2(0), \dots, \text{imp}_n(0)), \quad (6)$$

который задает импульс  $\text{imp}_j(0)$  в каждой вершине  $v_j$  в момент времени  $t=0$ .

Автономное импульсное воздействие в паре с вектором начальных значений описывает состояние системы в начальный момент времени, когда под влияние внешних поражающих воздействий попадают все или часть элементов системы.

Автономное импульсное воздействие, в котором вектор  $\text{Imp}(0) = (1, \text{imp}_1(0), \dots, 1)$ ,  $\text{imp}_i(0) > 0$ , имеет только  $i$ -ую отличную от единицы компоненту, назовем простым воздействием с начальной вершиной  $v_i \in V$ . Простое импульсное воздействие описывает состояние системы в начальный момент времени, когда внешнее воздействие поражает один из элементов системы. А именно тот, который соответствует  $i$ -ой вершине графа системы.

В соответствии с описанным импульсным воздействием на орграфе, можно ввести различные критерии (признаки) достижения системой предельного состояния. К примеру, можно считать, что система находится в предельном состоянии, если надежность одного или нескольких наиболее значимых элементов системы ниже некоторого допустимого уровня. Этот уровень будем называть критическим уровнем надежности элемента. Введенный критерий четко разделяет док-

ритическое и закритическое состояние элемента системы. Если надежность элемента ниже критического уровня, то элемент не в состоянии выполнять возложенных на него функций, или функционировать требуемое время.

Представление исследуемой системы в виде взвешенного по правилу (2) графа  $G = (V, E)$  и формализация внешнего влияния на систему как автономного импульсного воздействия (3)–(6) определяет модель распространения поражающих воздействий по системе.

Исследование построенной модели необходимо для решения важной задачи – выяснить, как внешнее воздействие распространяется по структуре системы, и влияет на качественное состояние ее элементов.

Распространение поражающих воздействий по системе в модели (3)–(6) во многом зависит от структуры системы. Поэтому, целесообразно, подвергнуть тщательному анализу граф системы  $G = (V, E)$ , который в полной мере отражает структуру системы.

Во-первых, необходимо выяснить какую часть элементов системы может поразить внешнее воздействие, т.е. как глубоко может распространиться импульсное воздействие по структуре системы. При этом важно найти какая часть весов вершин графа будет уменьшена при таком воздействии. Задача усложняется тем, что глубина распространения импульса зависит непосредственно от его «точки приложения», от тех вершин, к которым будет приложен начальный импульс. В связи с этим разумно ввести ряд показателей и параметров, которые будут описывать возможную «поражаемость» элементов системы при различных внешних воздействиях.

Во-вторых, у графа системы возможно наличие контуров, т.е. конечной последовательности дуг графа, начало каждой из которых обязательно совпадает с концом другой из контура. Любой контур в нашей модели является контуром положительной обратной связи [12]. Уменьшение веса любой вершины контура графа системы из модели (2)–(6) приведет к уменьшению надежности всех элементов контура, а в конечном счете и к уменьшению надежности вершины первой получившей воздействие. Такое «зацикливание» импульсного воздействия может привести к потере работоспособности (переходу в предельное состояние) какого-либо элемента из контура. Более того, при подобном распространении импульса по графу системы возможен отказ элемента системы, не получавшего импульс воздействия непосредственно. То, как это происходит, и как производить в структуре системы поиск контуров, являющихся «наименее стойкими» или «наиболее поражаемыми» местами в системе, будет показано ниже.

Нельзя обойти стороной вопрос о сложности системы. Сложность системы можно понимать двояко: сложность в структуре (compound) системы, и сложность в поведении (complexity) системы. Последнее иногда называют динамической сложностью. Оба понятия сложности не эквивалентны, и не исключено их совместное проявление у одной и той же системы.

Динамической сложности посвящено множество работ, что позволяет говорить о некоторых общепринятых представлениях [13]. Но нельзя этого же сказать касательно определения сложности структуры системы.

В рамках настоящего исследования вполне достаточно утверждать, что сложность структуры системы заключается в наличии большого числа элементов, составляющих систему, и отсутствия тривиальных связей между ними. Очевидно, чем запутанней и трудней для восприятия связи между элементами системы, тем сложнее проследить распространение импульсного воздействия по системе.

Процесс изменения весов вершин графа системы во время импульсного воздействия можно в полной мере считать динамическим. Но длительность этих изменений зависит непосредственно от структуры системы. Только от положения элемента в структуре системы зависит то, как будет меняться его надежность в период распространения возмущений по системе. Надежность элемента может измениться один раз за время импульсного воздействия, а может меняться периодически довольно длительное время. Во многом в предложенной модели (2)-(6), «сложное» поведение надежностей элементов системы в период распространения возмущений – есть следствие структурной сложности системы.

Рассмотрим примеры простых структур. Простым структурам, в нашем понимании, соответствуют регулярные, периодические, симметричные и автоморфные графы. Распространение импульсных воздействий по таким графам происходит одинаково, по одним и тем же принципам, независимо от точки приложения импульсного воздействия.

Для модели (2)–(6), в рамках концепции иерархии упрощенных моделей, имеет смысл заострить внимание на одном возможном усложнении. Каждому ребру в графе системы можно придать тип (цвет) для того, чтобы оно могло переносить возмущение только заранее определенных типов (цветов). Такое усложнение модели приведет к необходимости более тщательного и детального анализа исследуемой модели, хотя по сути и не повлияет на адекватность модели. Поэтому в дальнейшем будем считать ребра графа из модели (2)–(6) и переносимые ими возмущения однотипными, «окрашенными в один цвет».

Как показывает практика, графы являются удобным, и поэтому широко используемым инструментом в математическом моделировании. Заслуженно популярны графы в физике, химии, биологии, технике, экономике, географии и т.д.

## **7. Обсуждение результатов исследования поведения элементов технологических установок под внешним воздействием**

Проблема минимизации рисков при аварийных ситуациях на объектах газотранспортной системы требует разработки мер, направленных на обеспечение безаварийности работы технологических объектов. К решению проблемы обеспечения безаварийности работы и снижения негативного воздействия на окружающую среду необходимо подходить комплексно, через разработку и внедрение системы управления рисками процесса перекачки газа на компрессорных станциях. Внедрение такой системы позволит обеспечить не только снижение технологических и экологических рисков, но и приведет к сокращению экономических потерь, средств, направленных на ликвидацию последствий аварийных ситуаций.

В рамках модели, предлагаемой в настоящей работе, сложная техническая система считается подвергнутой влиянию внешних воздействий. Это соответствует попаданию системы в зону «форс-мажорных обстоятельств», т.е. под влияние ненормативных, непредусмотренных при проектировании системы, экстремальных нагрузок, имеющих также внезапный характер. В основе модели лежит формально представленная структура системы, что позволяет детально воспроизвести все возможные варианты распространения внешних воздействий по элементам системы. Модель при заданных нагрузках на некоторое множество элементов системы, вызываемых различными внешними воздействиями, определяет темп и сроки достижения системой предельного состояния.

Основной характеристикой стойкости системы будет служить время дости-

жения системой предельного состояния. Увеличение этого промежутка времени будет способствовать уменьшению риска развития ЧС в системе и обеспечению ее безопасности.

Внешнее поражающее воздействие на один из элементов системы обязательно отразится некоторым образом на показателях надежности элементов и всей системы. Это происходит даже в том случае, когда ни элемент, непосредственно получивший поражающий импульс воздействия, ни сама система не потеряли работоспособности. Возможны случаи, когда, с течением времени, помимо элемента получившего воздействия «напрямую», из строя выходят и элементы системы, не получавшие непосредственного воздействия. Структура многих технических систем, в том числе и военных, представляет собой «жесткую» конструкцию, что позволяет внешнему воздействию, в виде импульса, распространяться по структуре системы. При этом импульс воздействия, уменьшает как показатели надежности отдельных элементов системы, так и всей системы в целом. Для формального отражения этой ситуации можно использовать аппарат дискретной математики и теорию графов, в частности.

В данной работе вполне достаточно утверждать, что сложность структуры системы заключается в наличии большого числа элементов, составляющих систему, и отсутствия тривиальных связей между ними. Очевидно, чем запутанней и трудней для восприятия связи между элементами системы, тем сложнее проследить распространение импульсного воздействия по системе.

## 8. Выводы

1. Проведено исследование влияния внешних факторов на сложные технические системы. Предложенная в настоящей работе математическая модель распространения внешних воздействий по системе позволяет объяснить ряд явлений, наблюдаемых в сложных технических системах при попадании их в условия внешних воздействий (форс-мажорные обстоятельства). В частности, становится ясно, каким образом при внешних воздействиях выходят из строя (достигают предельного состояния) элементы, не получавшие импульсного воздействия непосредственно. Показано, что причиной выхода из строя элементов системы вне зоны форс-мажорных обстоятельств (после окончания влияния внешних воздействий) являются внутренние источники возмущений.

2. Выполнено моделирование распространения внешних импульсных воздействий по системе. Существенной особенностью построенной модели является возможность выхода из строя при распространении импульсных воздействий по системе наиболее надежных элементов. Этот факт красноречиво подчеркивает прямую зависимость надежности элемента от его положения в структуре, а также зависимость стойкости всей системы от выбранной при проектировании структуры. Найденные в ходе исследования модели явления относятся к классу синергетических эффектов, прогнозирование которых на начальных этапах исследования не тривиально.

3. Определены элементы системы для резервирования при воздействии внешнего влияния. Руководствуясь предложенной моделью, можно говорить о стойкости системе по отношению к конкретным воздействиям. В случае, когда класс воздействий за время их распространения по структуре системы не переводит ее в предельное состояние, система считается абсолютно стойкой к этому классу воздействий. Что позволит исследовать структурные параметры стойкости системы.

**Литература**

1. Dodson D. Fire department incident safety officer. Cengage Learning. 2007.
2. Mohaghegh Z., Kazemi R., Mosleh A. Incorporating organizational factors into Probabilistic Risk Assessment (PRA) of complex socio-technical systems: A hybrid technique formalization // Reliability Engineering & System Safety. 2009. Т. 94. № 5. С. 1000–1018.
3. Koltsov V. B. et al. Thermodynamic approach to hazard and risk assessment on the basis of energotropic concept of environmental protection //2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). IEEE. С. 1897–1901.
4. Zsombok C. E. Naturalistic decision making: where are we now? // Naturalistic decision making. Psychology Press. 2014. С. 23–36.
5. Guinee J. B. et al. Life cycle assessment: past, present, and future. 2011.
6. O'sullivan T. L. et al. Unraveling the complexities of disaster management: A framework for critical social infrastructure to promote population health and resilience // Social Science Medicine. 2013. Т. 93. С. 238–246.
7. Eigen M., Schuster P. The hypercycle: a principle of natural self-organization. Springer Science Business Media. 2012.
8. Сапожников С. В. Створення та вдосконалення технічних систем. 2019.
9. Додонов О. Г., Горбачик О. С., Кузнєцова М. Г. Системні дослідження живучості та безпеки складних технічних систем // Реєстрація, зберігання і обробка даних. 2010.
10. Kakkar S., Kamal T. S., Singh A. P. On the Design and Analysis of I-Shaped Fractal Antenna for Emergency Management // IETE Journal of Research. 2019. Т. 65. № 1. С. 104–113.
11. Trush O. O. et al. The institutional system of the European Union in the field of struggle against disasters (part 2) // Visnyk of National University of Civil Protection of Ukraine. Public Administration series. 2016. Т. 4. № 1. С. 236–249.
12. Scheinerman E. R., Ullman D. H. Fractional graph theory: a rational approach to the theory of graphs. Courier Corporation, 2011.
13. Malhotra R. Empirical research in software engineering: concepts, analysis, and applications. CRC Press. 2016.

*А. Я. Калиновський<sup>1</sup>, к.т.н., доцент, нач. каф.*

*І. К. Кіриченко<sup>1</sup>, д.т.н., професор, проф. каф.*

*О. В. Малезик<sup>2</sup>, нач. відділу*

*О. Г. Поліванов<sup>1</sup>, ад'юнкт ад'юнктури*

<sup>1</sup>Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна

<sup>2</sup>Головне управління ДСНС України в Харківській області, Харків, Україна

### **ВПЛИВ ФАКТОРІВ НА РИЗИКИ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ НАФТОГАЗОКОНДЕНСАТНИХ РОДОВИЩ**

Виконано аналіз стану проблеми оцінки ризиків виникнення аварійних ситуацій на різних технічних об'єктах. Відзначено, що в існуючих вітчизняних і зарубіжних розробках сьогодні практично відсутні необхідні інструменти для дослідження (оцінки стану системи в цілому, прогнозування поведінки системи під впливом вражаючих факторів, методів підвищення або збереження опірності систем, що функціонують в умовах вражаючих впливів, і т.д.) якості функціонування складних систем в «зоні форс-мажорних обставин». На основі виконаного огляду літературних джерел сформульовані нові завдання дослідження, спрямовані на створення ефективних методів прогнозування ризиків виникнення надзвичайних ситуацій на технологічних установках нафтогазоконденсатних родовищ під впливом зовнішніх вражаючих факторів, які базуються на теорії сис-

тем, що самоорганізуються і теорії управління ризиками. Як показує практика, графі є зручним, і тому широко використовуваним інструментом в математичному моделюванні. Незважаючи на те, що графі є універсальним інструментом, вони ще не знайшли належного застосування в синергетиці. Запропонована в даній роботі математична модель поширення зовнішніх впливів по системі дозволяє пояснити ряд явищ, які спостерігаються в складних технічних системах при попаданні їх в умови зовнішніх впливів (форс-мажорні обставини). В зокрема, стає ясно, яким чином при зовнішніх впливах виходять з ладу (досягають граничного стану) елементи, які не отримували імпульсного впливу безпосередньо. Показано, що причиною виходу з ладу елементів системи поза зоною форс-мажорних обставин (після закінчення впливу зовнішніх впливів) є внутрішні джерела збурень. Суттєвою особливістю побудованої моделі є можливість виходу з ладу при поширенні імпульсних впливів по системі найбільш надійних елементів. Цей факт красномовно підкреслює пряму залежність надійності елемента від його положення в структурі, а також залежність стійкості всієї системи від обраної при проектуванні структури. Знайдені в ході дослідження моделі явище відносяться до класу синергетичних ефектів, прогнозування яких на початкових етапах дослідження не тривіально. Керуючись запропонованою моделлю, можна говорити о стійкості системи по відношенню до конкретних дій. В разі, коли клас впливів за час їх поширення по структурі системи не переводить її в граничний стан, система вважається абсолютно стійкою до цього класу впливів. Щоб дозволити дослідити структурні параметри стійкості системи.

**Ключові слова:** комбінаторний аналіз, теорія графів, стійкість системи, імпульсний вплив

*A. Kalinovskiy<sup>1</sup>, PhD, Associate Professor, Head of Department*

*I. Kirichenko<sup>1</sup>, DSc, Professor, Professor of the Department*

*A. Malezhik<sup>2</sup>, Head of Department*

*O. Polivanov<sup>1</sup>, Associate Adjunct*

<sup>1</sup>*National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine*

<sup>2</sup>*Main Directorate of the Civil Service of Ukraine for Emergency Situations in Kharkiv Region, Kharkiv, Ukraine*

## INFLUENCE OF FACTORS ON RISKS OF EMERGENCY SITUATIONS OF OIL AND GAS CONDENSATE DEPOSITS

The analysis of the state of the problem of assessing the risks of emergencies at various technical facilities. It is noted that in existing domestic and foreign developments today there are practically no necessary tools for research (assessing the state of the system as a whole, predicting the behavior of the system under the influence of damaging factors, methods of increasing or maintaining the resistance of systems operating under conditions of damaging effects, etc.) the quality of functioning of complex systems in the “zone of force majeure circumstances”. Based on a review of literature, new research objectives are formulated aimed at creating effective methods for predicting the risks of emergencies in technological installations of oil and gas condensate fields under the influence of external damaging factors based on the theory of self-organizing systems and risk management theory. As practice shows, graphs are a convenient and therefore widely used tool in mathematical modeling. Despite the fact that graphs are a universal tool, they have not yet found proper application in synergetics. The mathematical model proposed in this paper for the distribution of external influences through the system allows us to explain a number of phenomena observed in complex technical systems when they fall into external influences (force majeure circumstances). In particular, it becomes clear how, under external influences, elements that do not receive an impulse effect directly fail (reach the ultimate state). It is shown that the cause of the failure of the system elements outside the zone of force majeure circumstances (after the end of the influence of external influences) is the internal sources of disturbances. An essential feature of the constructed model is the possibility of failure during the propagation of pulsed actions through the system of the most reliable elements. This fact eloquently emphasizes the direct dependence of the reliability of the element on its position in the structure, as well as the dependence of the stability of the entire system on the structure selected during design. The phenomenon found during the study of the model belongs to the class of synergetic effects, the prediction of which at the initial stages of the study is not trivial. Guided by the proposed model, we can talk about the stability of the system in relation to specific influences. In the case when the class of influences during the time of their distribution along the structure of the system does not translate it into a limiting state, the system is considered absolutely resistant to this class of influences. That will allow us to study the structural parameters of the stability of the system.

**Keywords:** combinatorial analysis, graph theory, system stability, impulse action

## References

1. Dodson, D. (2007). Fire department incident safety officer. Cengage Learning.
2. Mohaghegh, Z., Kazemi, R., Mosleh, A. (2009). Incorporating organizational factors into Probabilistic Risk Assessment (PRA) of complex socio-technical systems: A hybrid technique formalization. *Reliability Engineering System Safety*, 94(5), 1000–1018.
3. Koltsov, V. B., Sevryukova, E. A., Astapovich, A. V., Yakovenko, D. V., Kondrutieva, O. V. Thermodynamic approach to hazard and risk assessment on the basis of energotropic concept of environmental protection. In 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), 1897–1901.
4. Zsombok, C. E. (2014). Naturalistic decision making: where are we now? In *Naturalistic decision making*, 23–36, Psychology Press.
5. Guinee, J. B., Heijungs, R., Huppes, G., Zamagni, A., Masoni, P., Buonamici, R., ... & Rydberg, T. (2011). Life cycle assessment: past, present, and future.
6. O'sullivan, T. L., Kuziemy, C. E., Toal-Sullivan, D., Corneil, W. (2013). Unraveling the complexities of disaster management: A framework for critical social infrastructure to promote population health and resilience. *Social Science Medicine*, 93, 238–246.
7. Eigen, M., Schuster, P. (2012). The hypercycle: a principle of natural self-organization. Springer Science Business Media.
8. Sapozhnikov, S.V. (2019). Creation and improvement of technical systems.
9. Dodonov, O. G, Gorbachik, O. S, Kuznetsova, M. G. (2010). System studies of survivability and safety of complex technical systems. Registration, storage and data processing.
10. Kakkar, S., Kamal, T. S., Singh, A. P. (2019). On the Design and Analysis of I-Shaped Fractal Antenna for Emergency Management. *IETE Journal of Research*, 65(1), 104–113.
11. Trush, O. O., Lermontova, Y. O. (2016). The institutional system of the European Union in the field of struggle against disasters (part 2). *Visnyk of National University of Civil Protection of Ukraine. Public Administration series.*, 4(1), 236–249.
12. Scheinerman, E. R., Ullman, D. H. (2011). Fractional graph theory: a rational approach to the theory of graphs. Courier Corporation.
13. Malhotra, R. (2016). Empirical research in software engineering: concepts, analysis, and applications. CRC Press.

Надійшла до редколегії: 06.02.2020

Прийнята до друку: 21.02.2020