

Особенности развития и характеристики смешанного повреждения сетевых структур систем трубопроводного транспорта

Игорь А. Тарарычкин, Луганский национальный университет им. В.Даля, Украина, Луганск
donbass_8888@mail.ru



Игорь А.
Тарарычкин

Резюме. Введение. Трубопроводные транспортные системы применяются в различных отраслях промышленного производства при доставке потребителям разнообразных веществ и материалов. Если при развитии аварийной ситуации происходит последовательный переход в состояние неработоспособности случайным образом некоторого количества линейных элементов (трубопроводов), то такой сценарий развития событий называется прогрессирующим повреждением. Если в состояние неработоспособности переходят сразу несколько сходящихся в узел трубопроводов, то такой точечный элемент системы оказывается блокированным. Последовательный переход узлов системы в случайном порядке в состояние блокировки называется прогрессирующей блокировкой. Одновременное развитие в системе процессов прогрессирующего повреждения линейных элементов и блокировки транспортных узлов представляет собой смешанное повреждение. Смешанное повреждение является опасным вариантом аварийной ситуации, а его развитие приводит к быстрой деградации транспортных возможностей системы. **Целью работы** является изучение особенностей и закономерностей процесса смешанного повреждения сетевых структур трубопроводных систем, а также оценка способности таких структур противостоять его развитию. **Методы исследования.** Определение характеристик стойкости сетевых объектов к развитию процесса смешанного повреждения выполнялось с использованием метода имитационного компьютерного моделирования. При этом характер воздействия на систему задавался при помощи циклограммы, целочисленные параметры которой указывают на чередование процессов последовательного повреждения линейных элементов и узлов сетевой структуры. **Результаты.** Установлено, что корректное сравнение стойкости различных сетевых структур к смешанному повреждению возможно только в отношении сопоставимых объектов. Для этого анализируемые системы должны иметь в своем составе одинаковое количество узлов, линейных элементов и потребителей целевого продукта. Кроме того, указанные системы должны быть подвергнуты воздействиям с одинаковой циклограммой. Показано, что соотношение стойкости сопоставимых сетевых структур не зависит от конкретного вида циклограммы смешанного повреждения, а определяется характером действующих внутрисистемных связей. **Выводы.** Смешанное повреждение представляет собой опасный сценарий развития аварийной ситуации и сопровождается быстрой деградацией транспортных возможностей трубопроводных систем. Способность сетевых структур трубопроводных систем противостоять развитию процесса смешанного повреждения оценивается при помощи показателей, которые устанавливаются с использованием метода имитационного моделирования. Корректное сравнение стойкости к смешанному повреждению различных структур возможно только в случае их сопоставимости. Для этого они должны иметь в своем составе одинаковое количество узлов, линейных элементов и потребителей продукта. Кроме того, такие системы должны быть подвергнуты процедуре повреждения с одинаковой циклограммой. Соотношение стойкости сетевых структур удовлетворяющих условиям сопоставимости не зависит от принятой циклограммы повреждения, а определяется имеющимся набором внутрисистемных связей.

Ключевые слова: система, трубопровод, структура, смешанное повреждение, стойкость.

Для цитирования: Тарарычкин И.А. Особенности развития и характеристики смешанного повреждения сетевых структур систем трубопроводного транспорта // Надежность. 2020. №1. С. 4-11. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2020-20-1-4-11>

Поступила 22.10.2019 г. / После доработки 20.12.2019 г. / К печати 20.03.2020 г.

Трубопроводные транспортные системы применяют в различных отраслях промышленного производства при доставке потребителям разнообразных веществ, продуктов и материалов [1-4]. Как правило, такие инженерные объекты характеризуются сложной сетевой структурой, наличием большого числа возможных состояний и функциональных элементов [5]. Переход в состояние неработоспособности отдельных структурных элементов представляет потенциальную опасность, как для потребителей целевого продукта, так и для окружающей среды [6-9]. Если в результате процессов, протекающих в системе или окружающей среде, происходит последовательный переход в состояние неработоспособности случайным образом некоторого количества линейных элементов (трубопроводов), то такой сценарий развития событий называется прогрессирующим повреждением [10].

В том случае, если в состояние неработоспособности переходят сразу несколько сходящихся в узел трубопроводов, то такой точечный элемент системы оказывается блокированным. Очевидно, что прохождение транспортных потоков через блокированный узел становится невозможным, а процесс блокировки способен нанести серьезный ущерб транспортным возможностям системы. Последовательный переход узлов системы в случайном порядке в состояние блокировки называется прогрессирующей блокировкой [11, 12].

В реальных условиях эксплуатации негативное воздействие на систему может быть связано с одновременным развитием как процессов прогрессирующего повреждения линейных элементов, так и блокировки транспортных узлов. Однако способность сетевых структур противостоять развитию смешанного повреждения, протекающего в соответствии с указанным механизмом, не изучена, а в технической литературе систематизированные данные относительно динамики этого процесса отсутствуют.

Целью настоящей работы является изучение особенностей и закономерностей процесса смешанного повреждения сетевых структур трубопроводных систем, а также оценка способности таких структур противостоять его развитию.

Будем считать, что процесс смешанного повреждения является стационарным, т.е. скорости повреждения различных структурных элементов известны (или заданы) и не меняются с течением времени.

Тогда процедуру повреждения сетевого объекта можно описать при помощи элементарного цикла T , который при развитии аварии воспроизводится многократно, до полного разрыва связей источника со всеми потребителями целевого продукта. В этих условиях для любого момента системного времени несложно установить общее количество поврежденных линейных элементов и блокированных транспортных узлов.

Так, если динамика процесса характеризуется повреждением сначала α линейных элементов, а затем блокировкой β транспортных узлов, то циклограмма процесса смешанного повреждения $T(\alpha, \beta)$ позволяет со-

ставить полное представление о процедуре воздействия на анализируемую систему.

Таким образом, для характеристики стационарного случайного процесса смешанного повреждения сетевой структуры с использованием циклограммы достаточно указать ее целочисленные параметры α и β . В частности, если повреждение происходит по механизму блокировки транспортных узлов, то такая схема воздействия характеризуется циклограммой $T(0, 1)$. Если же реализуется сценарий прогрессирующего повреждения линейных элементов, то указанный механизм воздействия на систему характеризуется циклограммой $T(1, 0)$.

Оценка способности трубопроводной системы противостоять развитию процесса смешанного повреждения выполнялась при помощи компьютерной программы имитационного моделирования, аналогично тому, как это делалось в работах [13, 14].

При этом для заданной сетевой структуры и принятой циклограммы повреждения устанавливались следующие статистические характеристики:

1. Средняя доля линейных элементов системы ϕ_{EL} , повреждение которых приводит к разрыву связей с источником всех потребителей целевого продукта.
2. Средняя доля транспортных узлов ϕ_{UZ} , при блокировке которых в условиях смешанного повреждения происходит разрыв связей с источником всех потребителей целевого продукта.

Парные значения ϕ_{EL} и ϕ_{UZ} представляют собой проекции на координатные оси вектора Φ^* , характеризующего способность анализируемой системы противостоять развитию процесса смешанного повреждения. При этом большим значениям модуля Φ^* соответствует и большая способность системы противостоять развитию этого процесса.

Компьютерное имитационное моделирование [15-17] смешанного повреждения выполнялось при помощи вычислительной системы MathCAD [18] в соответствии со следующей схемой:

1. Исходная сетевая структура трубопроводной системы задается квадратной матрицей смежности, аналогично тому, как это делается в работах [19, 20].
2. Если в рассматриваемый момент системного времени происходит повреждение одного линейного элемента, то в соответствующей бинарной матрице смежности обнуляются все элементы, расположенные в случайно выбранной i -й строке. Если же в заданный момент системного времени блокируется транспортный узел, то производится обнуление всех элементов случайно выбранной i -ой строки и i -го столбца соответствующей матрицы смежности.

3. Для каждого момента системного времени строятся соответствующие матрицы достижимости, необходимые для определения наличия связи узла-источника с каждым из потребителей целевого продукта. Процедура повреждения сетевого объекта завершается после того, как все потребители утрачивают связь с узлом-источником.

4. Поскольку процедура смешанного повреждения задается циклограммой с известными значениями параметров α и β , то определение момента системного времени, при котором наступает разрыв связи с источником всех потребителей продукта, позволяет установить общее количество как поврежденных линейных элементов, так и заблокированных транспортных узлов.

Их соответствующие доли представляют собой случайные величины, полученные в ходе реализации одного акта воздействия на систему по механизму смешанного повреждения. Для определения статистических характеристик процесса повреждения указанную процедуру воздействия необходимо повторять многократно, в соответствии с принятой циклограммой.

При выполнении расчетов для выборок объемом 10^4 элементов устанавливались средние значения φ_{EL} и φ_{UZ} , а также характеристики их рассеяния. Принятый объем выборки позволяет оценивать полученные характеристики стойкости как имеющие 2 значащие цифры после запятой, что оказывается достаточным для сравнения свойств анализируемых в работе сетевых структур [21].

Отметим, что возможность сравнения стойкости к смешанному повреждению существует только в отношении сопоставимых сетевых структур.

Требования по сопоставимости структур связаны с необходимостью выполнения следующих условий:

1. Сетевые объекты должны иметь в своем составе одинаковое количество узлов, линейных элементов, а также потребителей целевого продукта.
2. Сравниваемые объекты должны быть подвергнуты смешанному повреждению подобным способом, т.е. иметь одну и ту же циклограмму повреждения.

Рассмотрим в этой связи особенности смешанного повреждения некоторой совокупности сопоставимых сетевых структур.

Так, на рис. 1 показаны структурные схемы трубопроводных систем SMA, ..., SMF с источником целевого продукта A и потребителями B, \dots, I обладающие разной стойкостью к смешанному повреждению.

Все они имеют в своем составе одинаковое количество узлов R , ребер Z и потребителей целевого продукта U . Для корректного сравнения характеристик стойкости этих систем требуется обеспечить одинаковые условия их повреждения.

Установленные в этом случае значения φ_{EL} и φ_{UZ} позволяют составить представление о способности анализируемых систем противостоять развитию процесса смешанного повреждения. Характеристики стойкости, полученные для различных условий повреждения, приведены на рис. 2.

Сравнение стойкости структур к смешанному повреждению возможно только при движении вдоль направлений, указанных на графике стрелками, поскольку именно в этом случае параметры соответствующих циклограмм α и β остаются неизменными. Видно, что по мере перехода от SMA к SMB и далее к SMF стойкость анализируемых структур непрерывно снижается, независимо от характеристик используемой циклограммы повреждения.

Это означает, что для произвольной совокупности сопоставимых сетевых структур соотношение их стойкости не зависит от конкретных условий смешанного повреждения. Вследствие этого можно утверждать, что любые структурные вариации, направленные на повышение стойкости систем к смешанному повреждению,

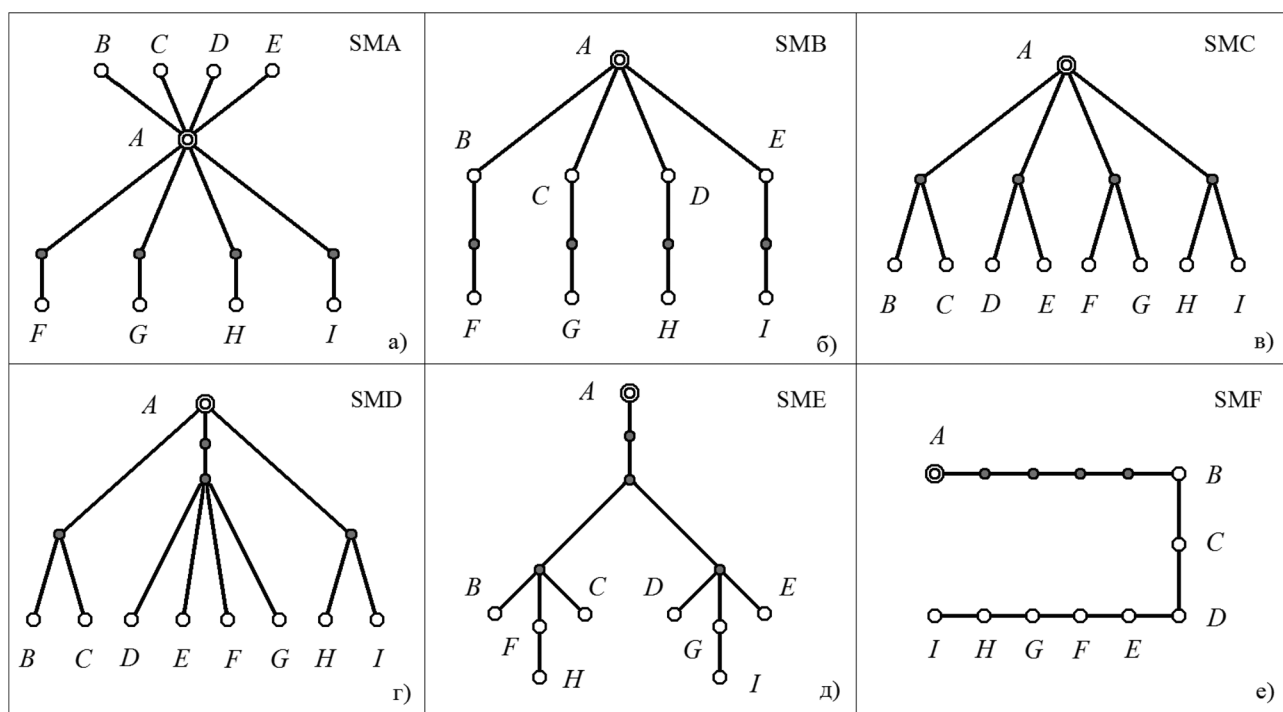


Рисунок 1. Структурные схемы SMA (a), ... SMF (e) систем трубопроводного транспорта

дению, положительно влияют на ее поведение при возникновении аварии, независимо от конкретного вида реализуемой на практике циклограммы. Кроме того, представленные на рис. 2 данные позволяют заключить, что блокировка транспортных узлов является наиболее опасным сценарием повреждения сетевого объекта.

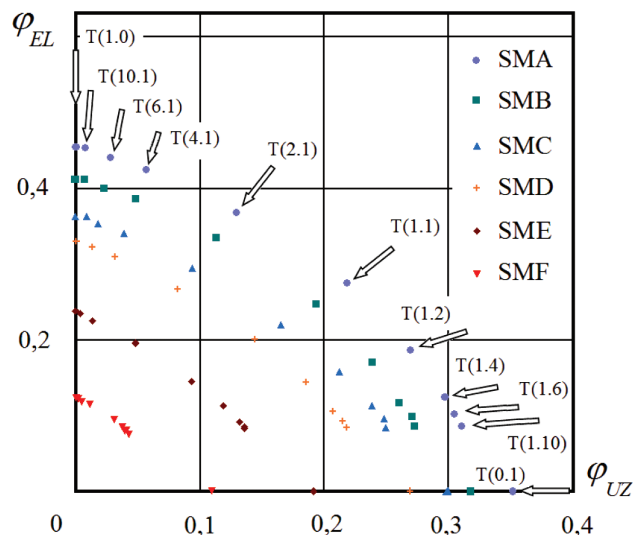


Рисунок 2. Значения φ_{EL} и φ_{UZ} , установленные для совокупности структур SMA, ..., SMF

В этой связи представляет интерес оценка изменения значений φ_{EL} и φ_{UZ} у совокупности сопоставимых сетевых структур с различной стойкостью к смешанному повреждению, например, по мере перехода от SMA к SMF.

Для того чтобы проследить такую динамику, необходимо для структуры SMA, обладающей наибольшей стойкостью, подобрать такую циклограмму повреждения, при реализации которой соблюдается условие $\varphi_{EL} = \varphi_{UZ}$. В этом случае снижение характеристик стойкости систем по мере перехода от SMA к SMF будет происходить с одинаковых стартовых позиций. Выполнение указанного условия позволяет составить представление о том, как структурные вариации влияют на изменение вклада отдельных составляющих в итоговую стойкость сетевых структур к смешанному повреждению.

В результате серии поисковых вычислительных экспериментов, выполненных в отношении структуры SMA, установлено, что примерное равенство $\varphi_{EL} \approx \varphi_{UZ}$ достигается в случае использования циклограммы T(3.8). Изменение положения на плоскости вектора $\vec{\Phi}^*$ при реализации процедуры смешанного повреждения T(3.8) в отношении совокупности сопоставимых сетевых структур SMA, ..., SMF показано на рис. 3. При этом величина модуля вектора $\vec{\Phi}^*$ определяется так:

$$|\vec{\Phi}^*| = \sqrt{\varphi_{EL}^2 + \varphi_{UZ}^2}.$$

Снижение значений отдельных составляющих (осевых проекций вектора $\vec{\Phi}^*$) φ_{EL} и φ_{UZ} по мере перехода от SMA к менее стойким сетевым структурам показано

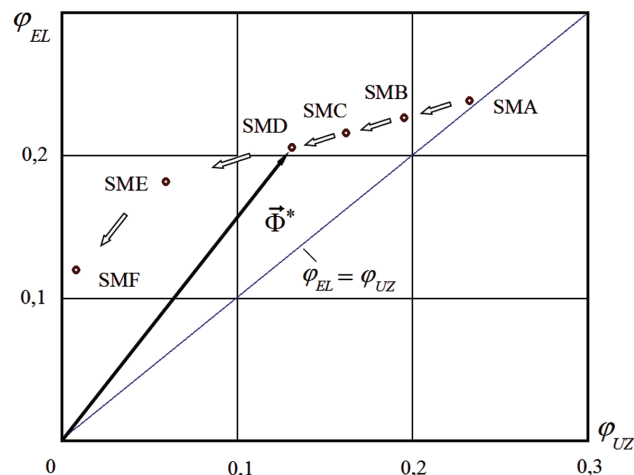


Рисунок 3. Характеристика стойкости к смешанному повреждению сетевых структур при помощи вектора $\vec{\Phi}^*$

на рис. 4. Поскольку для структуры SMA выполняется условие $\varphi_{EL} \approx \varphi_{UZ}$, то высота соответствующих столбцов на диаграмме оказывается примерно одинаковой.

Кроме того видно, что при последовательном переходе от SMA к менее стойким сетевым структурам наблюдается сравнительно медленное снижение значений φ_{EL} . При этом снижение значений φ_{UZ} происходит резко, что в значительной мере и обуславливает наблюдаемый эффект понижения стойкости.

Таким образом, полученный результат позволяет заключить, что обеспечивать стойкость систем к смешанному повреждению целесообразно, прежде всего, за счет реализации мероприятий, направленных на повышение их стойкости к прогрессирующей блокировке транспортных узлов.

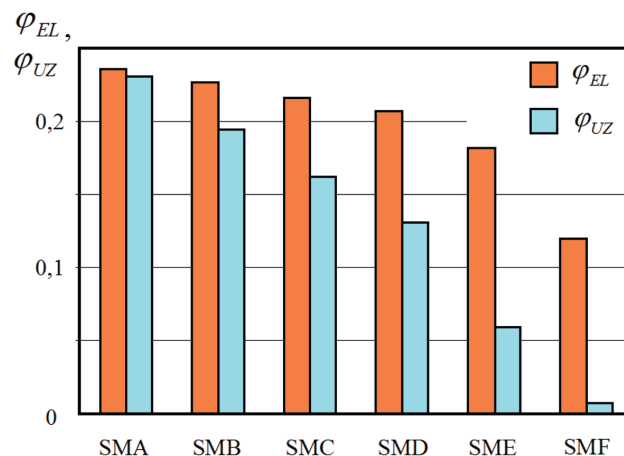


Рисунок 4. Диаграммы изменения значений φ_{EL} и φ_{UZ} по мере перехода от SMA к SMF

Укажем также и на следующую особенность, установленную по результатам анализа данных рис. 2. Если смешанное повреждение некоторой совокупности сетевых структур оказывается близким к процедуре прогрессирующей блокировки транспортных узлов ($\beta \gg \alpha$) или к процессу повреждения линейных элементов ($\alpha \gg \beta$),

то соответствующие точки на графике располагаются слишком близко, что затрудняет оценку полученного результата.

По этой причине определение способности системы противостоять развитию смешанного повреждения следует осуществлять, используя в качестве тестовой нагрузки с циклограммой типа $T(1.1)$. Такое воздействие представляет собой последовательное чередование случайных повреждений линейных и точечных элементов системы и в этом смысле является сбалансированным. Тогда сравнение стойкости сопоставимых сетевых структур целесообразно производить для условий их повреждения с циклограммой $T(1.1)$.

Предположим, требуется оценить способность противостоять развитию процесса смешанного повреждения трубопроводных систем, структурные схемы которых показаны на рис. 5. Указанные системы характеризуются наличием источника A , одинакового количества транспортных узлов, линейных элементов, а также потребителей целевого продукта (B, \dots, G). Оценим их стойкость для различных условий смешанного повреждения.

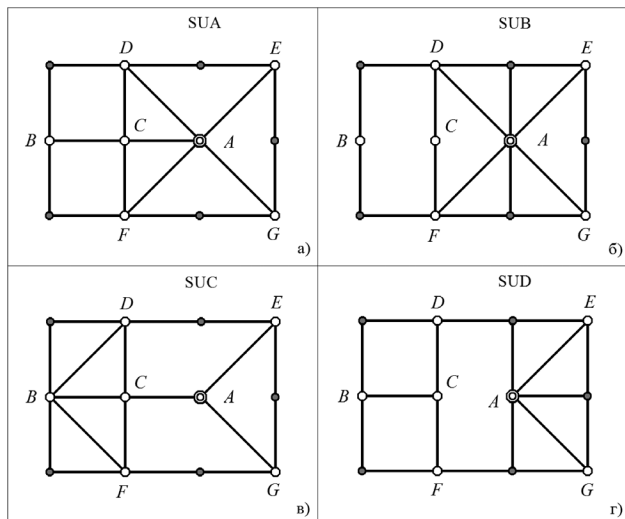


Рисунок 5. Структурные схемы SUA (а), ..., SUD (г) систем трубопроводного транспорта

Результаты проведенных расчетов приведены на рис. 6 и позволяют заключить, что стойкость к повреждению непрерывно снижается по мере перехода от системы с условным обозначением SUA к системе SUB и далее от SUC к SUD.

Кроме того, на плоскости можно указать условную границу областей различными механизмами повреждения сетевых структур. Так, для области Ω_E значений φ_{EL} и φ_{UZ} повреждение происходит в основном за счет перехода в состояние неработоспособности линейных элементов, а для области Ω_U блокируются в основном транспортные узлы.

Если для циклограммы $T(\alpha, \beta)$ выполняется условие $\alpha \gg \beta$, то такой характер воздействия на сетевой объект связан с повреждением преимущественно линейных

элементов. Тогда требования к сопоставимости можно несколько ослабить и считать такими системы, у которых совпадает только общее число линейных элементов и потребителей целевого продукта. Если указанные системы подвергаются повреждению с одинаковой циклограммой, то расчетные значения φ_{EL} следует использовать как критерии, позволяющие оценить их стойкость к смешанному повреждению.

Если же циклограмма характеризуется соотношением параметров $\beta \gg \alpha$, то такое воздействие на систему связано с повреждением преимущественно транспортных узлов.

В этих условиях сопоставимыми будут системы с совпадающим количеством узлов и потребителей целевого продукта.

Если такие объекты подвергаются повреждению с одинаковой циклограммой, то установленные значения φ_{UZ} представляют собой критерии, характеризующие их стойкость к смешанному повреждению.

Таким образом, снятие некоторых ограничений при определении сопоставимости сетевых объектов для специфических условий смешанного повреждения позволяет выполнять анализ и решать более широкий круг задач прикладного характера.

Предположим, требуется оценить стойкость и принять проектное решение в отношении практического использования одной из альтернативных сетевых структур, показанных на рис. 7, при наличии угрозы смешанного повреждения.

Все эти объекты имеют одинаковое количество узлов, линейных элементов и потребителей целевого продукта (B, \dots, G). При смешанном повреждении указанных структур с циклограммой $T(1.1)$ сравнение значений $|\Phi^*|$ позволяет оценить соотношение их стойкости. Именно эту особенность и следует использовать при обосновании и принятии проектного решения.

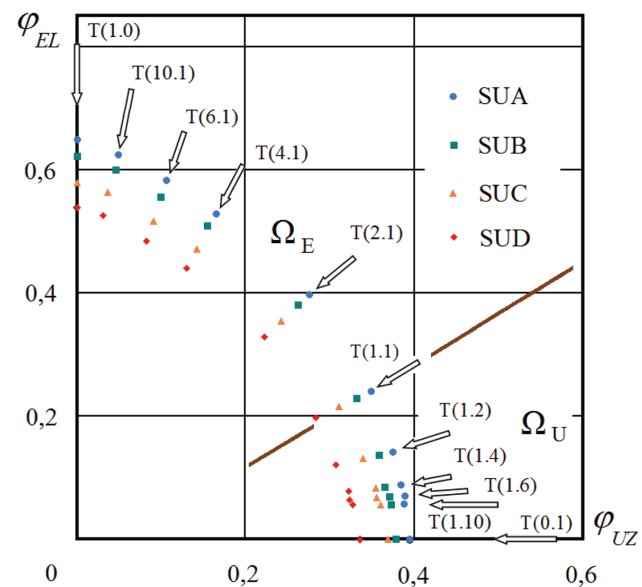


Рисунок 6. Характеристики стойкости, установленные для сетевых структур SUA, ..., SUD

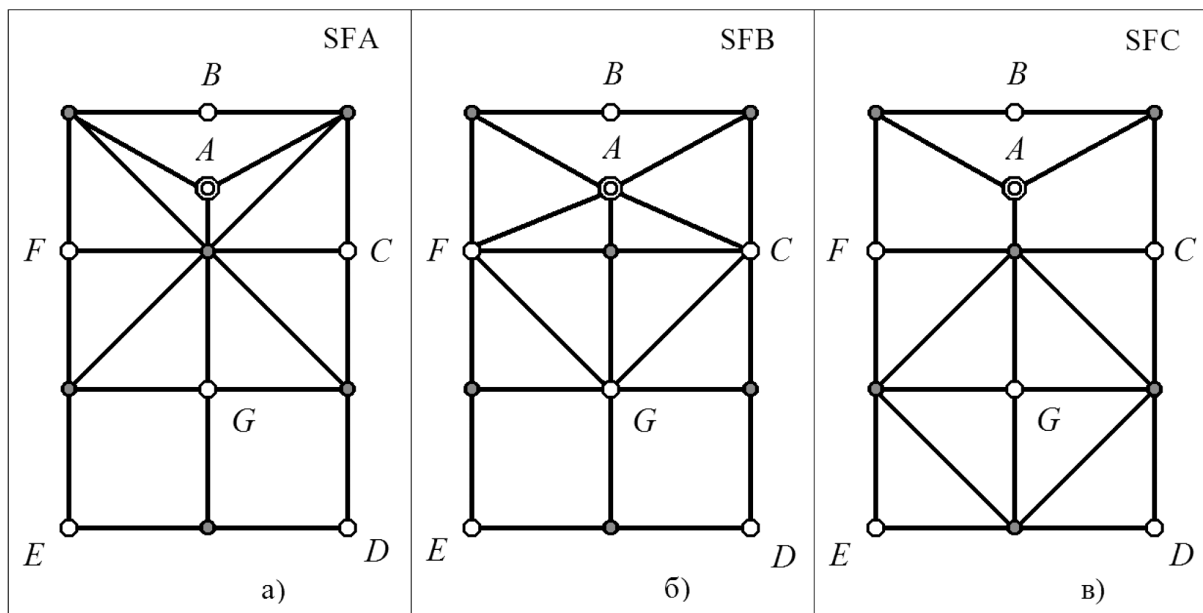


Рисунок 7. Структурные схемы SFA (а), ..., SFC (в) систем трубопроводного транспорта

Так, в табл. 1 приведены соответствующие расчетные значения, позволяющие заключить, что при смешанном повреждении (независимо от конкретных условий воздействия) наибольшей стойкостью характеризуется структура с условным обозначением SFB, которую и следует рассматривать как результат решения поставленной задачи.

Таблица 1. Характеристики стойкости сопоставимых сетевых структур для принятых условий смешанного повреждения

Обозначение структуры	Обозначение циклограммы смешанного повреждения	Расчетные характеристики стойкости		
		Φ_{EL}	Φ_{UZ}	$ \vec{\Phi}^* $
SFA	T(1.1)	0,168	0,288	0,333
SFB		0,187	0,323	0,373
SFC		0,167	0,286	0,331

При этом сетевые структуры SFA и SFC имеют примерно одинаковую стойкость, поскольку у них практически совпадают соответствующие значения модуля вектора $\vec{\Phi}^*$.

Предположим теперь, что выбранная сетевая структура SFB находится под угрозой внешнего воздействия, связанного с повреждением преимущественно транспортных узлов. Оценим возможность повышения ее стойкости за счет изменения структурного состава и использования дополнительных линейных элементов. Такая производная структура с условным обозначением SFW, показана на рис. 8 (а).

Сопоставление характеристик стойкости систем SFB и SFW для принятых условий повреждения возможно, поскольку у них совпадает общее число узлов, а также потребителей целевого продукта. Применим в отноше-

нии этих систем процедуру смешанного повреждения, например, с циклограммой T(1.3). Значения, установленные по результатам имитационного моделирования, приведены в табл. 2.

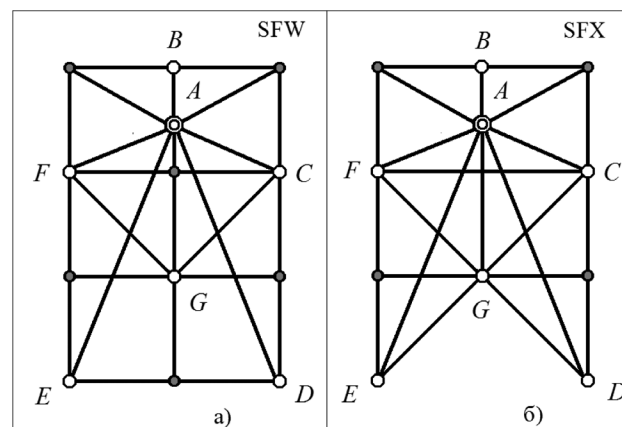


Рисунок 8. Структурные схемы систем, полученные при включении в состав SFB дополнительных линейных элементов (а) и исключения из ее состава узлов (б)

Видно, что включение в состав системы SFB дополнительных трубопроводов позволяет повысить ее стойкость при повреждении преимущественно точечных элементов.

Если же в процессе эксплуатации система SFB находится под угрозой повреждения преимущественно линейных элементов, то представляет интерес поиск решений, позволяющих положительным образом повлиять на ее стойкость для указанных условий воздействия.

Уменьшим число узлов в системе SFB до уровня $R = 11$, сохранив при этом общее количество линейных элементов ($Z = 23$) и потребителей продукта ($U = 6$).

Таблица 2. Расчетные характеристики стойкости сетевых структур

Обозначение структуры	Состав структурных элементов	Обозначение циклограммы повреждения	Характеристики стойкости	
			Φ_{UZ}	Φ_{EL}
SFB	$R=13, Z=23, U=6$	$T(1.3)$	0,349	-
		$T(3.1)$	-	0,413
SFW	$R=13, Z=26, U=6$	$T(1.3)$	0,391	-
SFX	$R=11, Z=23, U=6$	$T(3.1)$	-	0,454

Таблица 3. Условия сопоставимости и критерии оценки стойкости сетевых структур

Особенности повреждения	Параметры циклограммы	Условия сопоставимости сетевых структур	Критерии оценки стойкости систем
Сбалансированное повреждение структурных элементов	$\alpha = \beta = 1$	Одинаковое количество линейных элементов, узлов и потребителей продукта	$ \vec{\Phi}^* = \sqrt{\Phi_{EL}^2 + \Phi_{UZ}^2}$
Повреждение преимущественно линейных элементов	$\alpha \gg \beta$	Одинаковое количество линейных элементов и потребителей продукта	$0 < \Phi_{EL} < 1$
Преимущественная блокировка транспортных узлов	$\beta \gg \alpha$	Одинаковое количество узлов и потребителей продукта	$0 < \Phi_{UZ} < 1$

Структура такой трубопроводной системы с условным обозначением SFX показана на рис. 8 (б). Сравнение стойкости систем SFB и SFX возможно после определения соответствующих значений для принятых условий повреждения преимущественно линейных элементов. Так, полученные в результате имитационного моделирования значения для каждой из анализируемых сетевых структур, повреждаемых в соответствии с принятой циклограммой $T(3.1)$, приведены в табл. 2. Видно, что структурные изменения, реализуемые при переходе к схеме SFX, положительным образом влияют на стойкость системы и рекомендуются к практическому применению.

Таким образом, при оценке стойкости к смешанному повреждению некоторой совокупности сопоставимых сетевых структур необходимо в условиях тестового воздействия с характеристиками $\alpha = \beta = 1$ установить соответствующие значения $|\vec{\Phi}^*|$. Тогда упорядочение рассматриваемых систем с точки зрения их стойкости к смешанному повреждению выполняется с учетом того, что более стойким системам соответствуют и большие значения $|\vec{\Phi}^*|$. Именно этот критерий и следует использовать на практике при решении проектных задач.

Однако в некоторых случаях специфика повреждающего воздействия позволяет несколько ослабить установленный перечень требований и расширить тем самым возможности сравнительной оценки свойств анализируемых систем.

Так, в табл. 3 представлены рекомендации по условиям сопоставимости и выбору критериев оценки стойкости систем для различных вариантов реализации процедуры смешанного повреждения. Их практическое значение связано с возможностью расширения области

применения установленных закономерностей и полученных теоретических результатов.

Выводы

1. Смешанное повреждение представляет собой опасный сценарий развития аварийной ситуации и сопровождается быстрой деградацией транспортных возможностей трубопроводных систем.

2. Способность сетевых структур трубопроводных систем противостоять развитию процесса смешанного повреждения оценивается при помощи показателей Φ_{EL} , Φ_{UZ} и $|\vec{\Phi}^*|$, которые устанавливаются с использованием метода имитационного моделирования.

3. Корректное сравнение стойкости к смешанному повреждению различных структур возможно только в случае их сопоставимости. Для этого они должны иметь в своем составе одинаковое количество узлов, линейных элементов и потребителей продукта. Кроме того, такие системы должны быть подвергнуты процедуре повреждения с одинаковой циклограммой.

4. Соотношение стойкости сетевых структур, удовлетворяющих условиям сопоставимости, не зависит от принятой циклограммы повреждения, а определяется имеющимся набором внутрисистемных связей.

Библиографический список

1. **Barker, Geoff.** The Engineer's Guide to Plant Layout and Piping Design for the Oil and Gas Industries [Text] / G. Barker. – Gulf Professional Publishing, 2018. – 532p.
2. **Bahadori, Alireza.** Hazardous Area Classification in Petroleum and Chemical Plants. A Guide to Mitigating Risk [Text] / A. Bahadori. – CRC Press, 2017. – 564 p.

3. **Toghraei, Moe.** Piping and Instrumentation Diagram Development [Текст] / M. Toghraei. – John Wiley & Sons, Inc, 2019. – 461 p.

4. **Wilson, Bob.** Detail Engineering and Layout of Piping Systems [Текст] / B. Wilson. – Titles on Demand, 2015. – 464 p.

5. **Бочков, А.В.** Научно-методические основы мониторинга и прогнозирования состояния производственной безопасности ПАО «Газпром» [Текст] / А.В. Бочков, Д.В. Пономаренко // Газовая промышленность. – 2017. – № 3 (749). – С. 20–30.

6. **Critical Infrastructure Security. Assessment, Prevention, Detection, Response** [Текст] / Edited by Francesco Flammini. – WIT Press, UK, 2012. – 326 p.

7. **Рябинин, И.А.** Надежность и безопасность структурно-сложных систем [Текст] / И.А. Рябинин. – СПб.: Политехника, 2000. – 248 с.

8. **Иванцов, О.М.** Безопасность трубопроводных систем [Текст] / О.М. Иванцов, И.И. Мазур. – М.: Елима, 2004. – 1104 с.

9. **Бочков, А.В.** Проблемы оценки опасностей и управления рисками объектов критически важной инфраструктуры Группы «Газпром» [Текст]: аналитический обзор / А.В. Бочков // Вести газовой науки. – 2018. – № 2 (34). – С. 51–87.

10. **Тарарычкин, И.А.** Обеспечение стойкости трубопроводных систем к повреждениям элементов сетевой структуры [Текст] / И.А. Тарарычкин // Надежность. – 2018. – Т 18. – № 1. – С. 26–31.

11. **Тарарычкин, И.А.** Развитие аварий и защита от повреждений структурных элементов систем трубопроводного транспорта [Текст] / И.А. Тарарычкин // Безопасность труда в промышленности. – 2018. – № 12. – С. 65–70.

12. **Тарарычкин, И.А.** Характеристика и сравнительный анализ стратегий защиты трубопроводных систем от повреждения транспортных узлов [Текст] / И.А. Тарарычкин // Газовая промышленность. – 2019. – № 2. – С. 72–77.

13. **Тарарычкин, И.А.** Компьютерное моделирование развития аварий и повреждения структурных элементов систем трубопроводного транспорта [Текст] / И.А. Тарарычкин // Технологии нефти и газа. – 2019. – № 2. – С. 53–59.

14. **Тарарычкин, И.А.** Имитационное моделирование процесса повреждения сетевых трубопроводных структур [Текст] / И.А. Тарарычкин, С.П. Блинов // Мир транспорта. – 2017. – Том 15. – № 2. – С. 6–19.

15. **Зарубин, В.С.** Математическое моделирование в технике [Текст]: Учеб. для вузов / В.С. Зарубин: под

ред. В.С. Зарубина, А.П. Крищенко: 2-е изд. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. – 496 с.

16. **Куприяшкин, А.Г.** Основы моделирования систем [Текст]: учебное пособие / А.Г. Куприяшкин. – Норильск: Норильский индустр. ин-т, 2015. – 135 с.

17. **Строгалева, В.П.** Имитационное моделирование [Текст]: Учебное пособие / В.П. Строгалева, И.О. Толкачева. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 280 с.

18. **Охорзин, В.А.** Компьютерное моделирование в системе Mathcad [Текст] / В.А. Охорзин. – М.: Финансы и статистика, 2006. – 144 с.

19. **Тарарычкин, И.А.** Моделирование процесса прогрессирующего повреждения трубопроводных транспортных систем с защищенными линейными элементами [Текст] / И.А. Тарарычкин, С.П. Блинов // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2018. – Вып. 1 (111). – С. 75–85.

20. **Тарарычкин, И.А.** Особенности повреждения сетевых структур и развития аварийных ситуаций на объектах трубопроводного транспорта [Текст] / И.А. Тарарычкин, С.П. Блинов // Безопасность труда в промышленности. – 2018. – № 3. – С. 35–39.

21. **Худсон, Д.** Статистика для физиков. Лекции по теории вероятностей и элементарной статистике [Текст]. / Д. Худсон: пер. с англ. – М.: Мир, 1970. – 295 с.

Сведения об авторе

Игорь А. Тарарычкин – доктор технических наук, профессор, Луганский национальный университет им. В.Даля, Украина, Луганск, e-mail: donbass_8888@mail.ru

Вклад автора в статью

Автором выполнен анализ стойкости систем трубопроводного транспорта в условиях развития процесса смешанного повреждения структурных элементов. Определены статистические характеристики процесса и условия сопоставимости систем при случайном повреждении линейных и точечных элементов.

Проведено имитационное компьютерное моделирование процесса смешанного повреждения и установлены характеристики, позволяющие оценить способность различных систем противостоять развитию этого процесса. Предложен метод сравнительной оценки стойкости сопоставимых сетевых структур при возможном развитии аварийной ситуации по механизму смешанного повреждения.