

Особенности развития процесса повреждения сетевых структур систем трубопроводного транспорта

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



Игорь А.
Тарарычкин

Резюме. Введение. Системы промышленного трубопроводного транспорта представляют собой сложные потенциально опасные инженерные объекты, обеспечивающие доставку потребителям заданных объемов целевого продукта. Развитие нештатных ситуаций, связанных с переходом в состояние неработоспособности некоторого количества трубопроводов, может привести к отключению от источника части или всех потребителей продукта. Если переход в состояние неработоспособности линейных элементов системы происходит в случайном порядке, то такой процесс изменения структуры сети называется прогрессирующим повреждением. Особую опасность прогрессирующее повреждение представляет в том случае, если при выполнении ремонтных работ отключается фрагмент системы или некоторая совокупность технологических трубопроводов. **Целью работы** является выявление закономерностей изменения стойкости трубопроводных систем при развитии процесса прогрессирующего повреждения и разработка практических рекомендаций по обеспечению стойкости таких систем в условиях эксплуатации и выполнения ремонтных операций. **Методы исследования.** Стойкость систем как способность противостоять развитию процесса прогрессирующего повреждения оценивалась при помощи показателя, представляющего собой среднюю долю трубопроводов, случайный переход которых в состояние неработоспособности приводит к отключению от источника всех потребителей продукта. Значения показателя стойкости устанавливались с использованием метода имитационного компьютерного моделирования. Структура сети и характер действующих внутрисистемных связей задавались при помощи матрицы смежности. **Результаты.** Повреждение структуры транспортной сети рассматривается как результат развития двухэтапного процесса. На этапе целевой трансформации из состава структуры, построенной на основе полного графа, целенаправленно исключаются линейные элементы с приведением сети к некоторому исходному состоянию. На втором этапе происходит трансформация исходной структуры в соответствии с механизмом прогрессирующего повреждения. Такой подход позволяет корректно оценивать изменение стойкости сложных сетевых структур и их способность противостоять развитию деструктивных процессов повреждения. Предложены расчетные характеристики, позволяющие прогнозировать поведение трубопроводных сетей в условиях возможного развития нештатных ситуаций. Показано существование предельных сетевых структур, которые называются весьма уязвимыми к возможному развитию прогрессирующего повреждения. **Выводы.** По мере развития процесса целевой трансформации способность вновь образованных сетевых структур противостоять развитию процесса прогрессирующего повреждения непрерывно снижается. Минимальный уровень стойкости трубопроводной системы к развитию процесса прогрессирующего повреждения наблюдается в случае приближения структуры сети к предельному состоянию. При подготовке ремонтных работ и плановом исключении из состава действующей трубопроводной системы некоторого количества линейных элементов следует оценивать близость структуры вновь образованного сетевого объекта к предельному состоянию, а также стойкость восстанавливаемой системы к возможному развитию процесса прогрессирующего повреждения.

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

Для цитирования: Тарарычкин И.А. Особенности развития процесса повреждения сетевых структур систем трубопроводного транспорта // Надежность. 2021. №2. С. 9-16.
<https://doi.org/10.21683/1729-2646-2021-21-2-9-16>

Поступила 14.03.2021 г. / После доработки 30.04.2021 г. / К печати 21.06.2021 г.

Эксплуатация систем промышленного трубопроводного транспорта в условиях номинального функционирования связана с доставкой требуемых объемов целевого продукта от источника отдельным потребителям. Возможность эффективного управления транспортными потоками и достижение заданных технологических режимов обеспечивается за счет сложной сетевой структуры и наличия избыточных внутренних связей [1-4]. При этом указанные системы представляют собой инженерные объекты, состояние которых необходимо оценивать и выполнять соответствующие ремонтные операции [5-7].

Эксплуатация трубопроводных систем различного назначения [8-10] сопровождается развитием деградиционных процессов, которые определяют вероятность отказа отдельных структурных элементов [11]. Взаимодействие с окружающей средой реализуется в различных формах [12, 13] и создает риски, которые также необходимо учитывать и уметь оценивать [14].

В общем случае протекающие в системах процессы являются многофакторными, а их анализ и определение текущего состояния сетевых объектов представляет собой сложную инженерную задачу [15]. Возникновение нештатных ситуаций в этих условиях сопровождается выводом из эксплуатационного режима отдельных трубопроводов (линейных элементов) и внутрисистемным перераспределением транспортных потоков.

Если последовательный переход в состояние неработоспособности линейных элементов системы происходит в случайном порядке, то такой процесс изменения структуры сети называется прогрессирующим повреждением [16].

Прогрессирующее повреждение представляет собой опасный сценарий развития событий, при завершении которого от исходной транспортной сети остается набор не связанным между собой точечных элементов. Подобное состояние сетевого объекта характеризуется нуль-графом, т.е. графом с отсутствующими ребрами.

Достижение указанного состояния системы на практике по понятным причинам невозможно. Тем не менее, изучение свойств сетевых объектов в условиях последовательного разрыва системообразующих связей и уменьшения числа линейных элементов представляет практический интерес, а установленные закономерности процесса необходимо учитывать при планировании ремонта и обеспечении стойкости восстанавливаемых трубопроводных транспортных систем.

Очевидно, что стойкость как способность системы противостоять развитию процесса прогрессирующего повреждения зависит от количества потребителей, узлов, линейных элементов и характера действующих между ними связей. Сравнение стойкости различных сетевых объектов возможно только при условии их сопоставимости, т.е. в случае, если имеет место совпадение числа:

- потребителей продукта;
- транспортных узлов;
- линейных элементов.

Это означает, что переход в состояние неработоспособности даже одного трубопровода не позволяет корректно сравнивать свойства исходной и вновь образованной системы из-за отличий в количественном составе линейных элементов.

Указанная особенность затрудняет анализ и оценку влияния структурных изменений на способность систем противостоять развитию процесса прогрессирующего повреждения. В этой связи возникает необходимость разработки новых методов оценки свойств и поведения транспортных систем в условиях развития прогрессирующего повреждения.

Имеющиеся в технической литературе данные о поведении трубопроводных систем при развитии аварийных ситуаций во многих случаях не достаточны для оценки ожидаемых последствий принятых проектных решений, что требует проведения дополнительных исследований.

Целью настоящей работы является выявление закономерностей изменения стойкости трубопроводных систем при развитии процесса прогрессирующего повреждения и разработка практических рекомендаций по обеспечению стойкости таких систем в условиях эксплуатации и выполнения ремонтных работ.

Структурные изменения транспортной сети как результат развития двухэтапного процесса

Предположим, что решение некоторой проектной задачи связано с необходимостью оценки стойкости к прогрессирующему повреждению сетевых структур, показанных на рис. 1. В составе каждой из них имеется источник продукта A , а также потребители B и C . При этом первая содержит 8, а вторая – 7 линейных элементов.

Если при развитии прогрессирующего повреждения в каждый момент системного времени в состояние неработоспособности переходит один линейный элемент, то сравнивать стойкость рассматриваемых объектов не корректно, поскольку диапазон возможного изменения значений системного времени у них не совпадает. По этой причине изучение связи между количеством линейных элементов в составе сети и стойкостью системы к прогрессирующему повреждению следует осуществлять на основе иного концептуального подхода.

Рассмотрим этот вопрос подробнее. Показанная на рис. 1б структура может быть представлена как результат некоторой трансформации, связанной с исключением одного линейного элемента из состава более сложной структуры, изображенной на рис. 1а.

Если рассматривать процесс прогрессирующего повреждения каждой из этих структур, то он будет происходить с разных стартовых позиций и характеризоваться различными значениями показателя стойкости.

При этом под показателем стойкости $0 \leq F_{пр} \leq 1$ понимается средняя доля трубопроводов, случайный переход

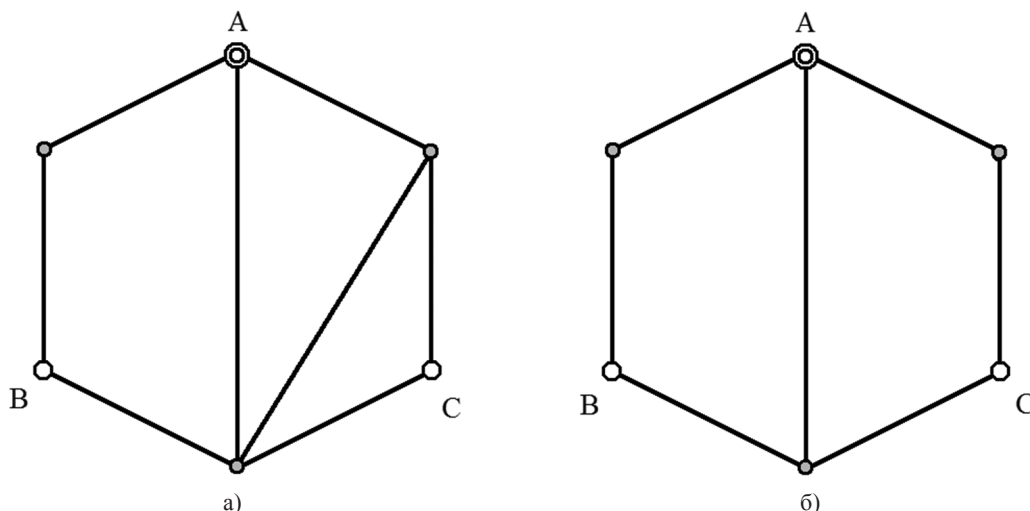


Рис. 1. Сетевые структуры трубопроводных систем с одинаковым количеством узлов и потребителей содержащие 8 (а) и 7 (б) линейных элементов

которых в состоянии неработоспособности приводит к отключению от источника всех потребителей целевого продукта [17].

В этой связи следует предположить, что большей стойкостью будет характеризоваться первая из указанных структур из-за наличия в ее составе большего числа линейных элементов.

С другой стороны, можно считать, что структура, показанная на рис. 1а представляет собой результат некоторого преобразования, связанного с трансформацией более сложной структуры, схема которой показана на рис. 2. Кроме того, возможно и дальнейшее усложнение структуры сетевого объекта, показанного на рис. 2, за счет образования новых связей. Если процедуру добавления связей продолжить, то полученный таким способом полный граф [18], у которого каждая вершина связана ребрами со всеми остальными, показан на рис. 3. Такая структура, построенная на основе полного графа, в дальнейшем называется базовой, а любой из рассмотренных вариантов сети представляет собой результат трансформации одной и той же базовой структуры.

С учетом отмеченной особенности, процесс повреждения произвольной сетевой структуры удобно рассматривать как протекающий в два этапа. На первом этапе исследователь выполняет целенаправленное исключение из состава сети, построенной на основе полного графа, некоторой части линейных элементов, осуществляя тем самым приведение базовой структуры к исходной. Поскольку именно исходная структура и является целью выполняемых преобразований, то с ее формированием завершается этап целевой трансформации.

На втором этапе трансформации разрыв связей между отдельными узлами полученной исходной структуры осуществляется в случайном порядке по механизму прогрессирующего повреждения.

Поскольку у структур с одинаковым числом узлов полный граф один и тот же, то и диапазон изменения значений системного времени при реализации двухэтап-

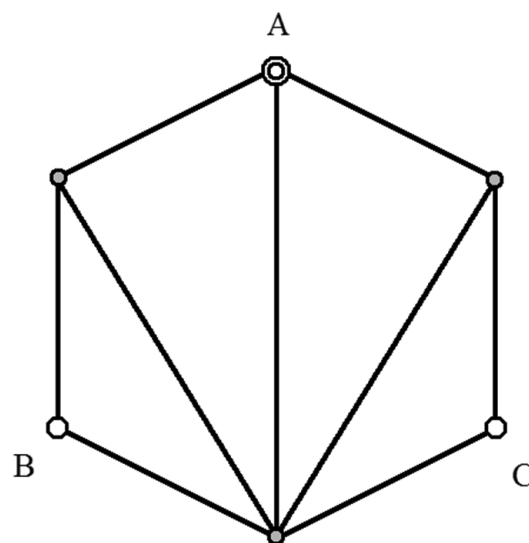


Рис. 2. Структурная схема трубопроводной системы

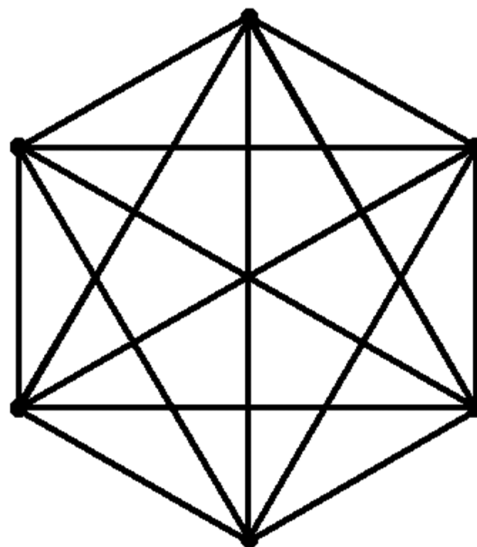


Рис. 3. Полный граф с 6-ю вершинами и 15-ю ребрами

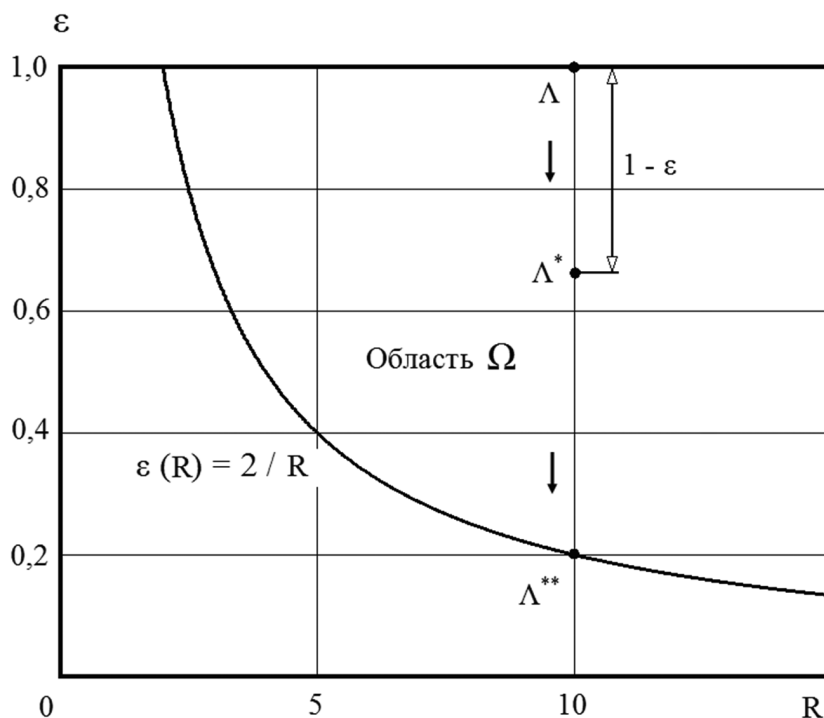


Рис. 4. Изменение положения точки Λ , характеризующей состояние сетевого объекта при развитии процесса целевой трансформации

ного процесса повреждения оказывается одинаковым. Наличие указанной особенности у сетевых структур с равным количеством узлов позволяет оценивать динамику процесса повреждения с единых стартовых позиций. Особое внимание здесь следует обратить на то обстоятельство, что корректное сравнение стойкости сетевых объектов в рамках реализации разработанной концепции двухэтапного повреждения возможно только для одинаковых значений системного времени.

Поскольку каждый из перечисленных этапов повреждения имеет свои специфические особенности, то их следует рассмотреть и проанализировать отдельно.

Характеристики и особенности развития процесса целевой трансформации

При целевой трансформации реализуется процедура последовательного исключения из состава базовой сети, построенной на основе полного графа, некоторой совокупности связей с постепенным переходом к исходной (целевой) структуре.

Порядок разрыва системообразующих связей на этапе целевой трансформации задается исследователем или может быть произвольным. Для характеристики динамики этого процесса используется системное время t . По мере исключения из состава базовой структуры, построенной на основе полного графа, отдельных линейных элементов, системное время принимает целочисленные значения и представляет собой счетчик событий. Таким образом, перед началом развития процесса прогрессирующего повреждения исходная сетевая структура рассматривается как результат предварительно реализуемой

целевой трансформации базового объекта построенного на основе полного графа.

Известно, что полный граф при заданном числе вершин R имеет наибольшее количество ребер [19]:

$$Z_m = \frac{R \cdot (R-1)}{2}.$$

Тогда состояние исходной структуры, полученной в результате целенаправленного удаления из состава полного графа некоторого количества ребер, будет характеризоваться коэффициентом полноты связей ϵ . Коэффициент ϵ представляет собой отношение числа связей Z между вершинами графа исходной структуры к числу связей у полного графа с тем же количеством вершин:

$$\epsilon = \frac{Z}{Z_m} = \frac{2Z}{R \cdot (R-1)} \leq 1.$$

Таким образом, коэффициент ϵ представляет собой долю от общего количества связей в составе полного графа, которые необходимо разорвать, чтобы привести его к состоянию, соответствующему исходной сетевой структуре. Очевидно, что для любого полного графа, независимо от количества вершин в его составе $\epsilon = 1$.

В системе координат ϵOR процессу целевой трансформации полного графа и его переходу к исходной структуре будет соответствовать перемещение точки Λ через ряд промежуточных шагов в положение Λ^* (рис. 4).

Отметим также, что условие сохранения целостности сети при развитии целевой трансформации приводит к возникновению ограничений на нижний порог значений ϵ . Так, связь между числом линейных элементов Z и количеством узлов R для предельных структур с

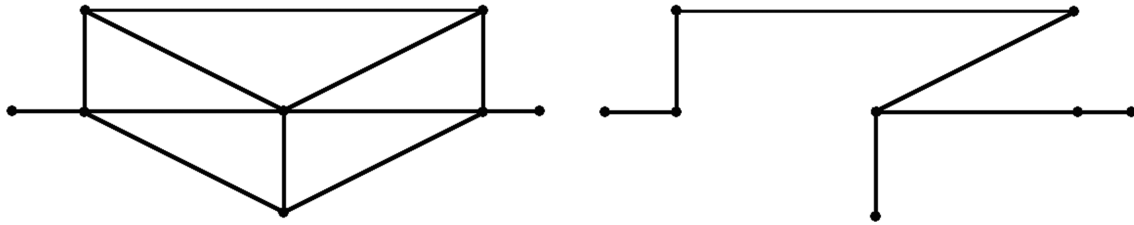


Рис. 5. Графы, характеризующие целостные сетевые структуры до (а) и после (б) целенаправленного исключения 5-ти линейных элементов

топологией «линия» имеет вид:

$$Z = R - 1. \tag{1}$$

Дальнейший разрыв связей между узлами такого объекта будет сопровождаться разделением его на части, что является недопустимым. Тогда условие сохранения целостности сети с учетом зависимости (1) приводит к ограничению вида:

$$\varepsilon(R) \geq \frac{2}{R}.$$

Соответственно интервал возможного изменения значений коэффициента ε определяется так:

$$\frac{2}{R} \leq \varepsilon(R) \leq 1.$$

Область Ω , для которой сочетание параметров ε и R соответствует указанным ограничениям и возможному существованию целостных структур после реализации процедуры целевой трансформации, показана на рис. 4.

Рассмотрим в этой связи следующий пример. Предположим, исходная структура сети характеризуется графом, показанным на рис. 5а. Он содержит 12 ребер и 8 вершин, являясь при этом результатом целевой трансформации полного графа, в составе которого имеется 8 вершин и 28 ребер.

В системе координат $\varepsilon \in R$ (рис. 6) такому полному графу соответствует точка Λ , а процесс целевой трансформации, завершающийся образованием исходной сетевой структуры, связан переходом этой точки в положение Λ^* к моменту системного времени $t = 16$.

Если полученная таким образом исходная структура с коэффициентом $\varepsilon = 0,43$ подвергается в дальнейшем прогрессирующему повреждению, то очевидно, что она будет характеризоваться и некоторой стойкостью к развитию этого процесса. Если же этап целевой трансформации продолжить до момента времени $t = 21$ с переходом в состояние, показанное на рис. 5б, то возможности такого процесса будут полностью исчерпаны.

Возникающая при этом предельная структура характеризуется точкой Λ^{**} , расположенной на границе области Ω (рис. 6). Дальнейшее исключение из состава такой структуры линейных элементов сопровождается разделением сетевого объекта на части или отделением узлов.

Таким образом, нижнее пороговое значение коэффициента $\varepsilon = \frac{2}{R} = 0,25$ является предельным, а его достижение в реальных условиях необходимо рассматривать как крайне нежелательное. Именно такое состояние сетевого объекта соответствует границе области Ω и является предельно допустимым с точки зрения его целостности.

Для определения близости текущего состояния сети к предельному, следует использовать соотношение:

$$\eta = \frac{R(R-1) - 2Z}{(R-1) \cdot (R-2)}.$$

Коэффициент η изменяется в интервале значений $0 \leq \eta \leq 1$. Для структуры, построенной на основе полного

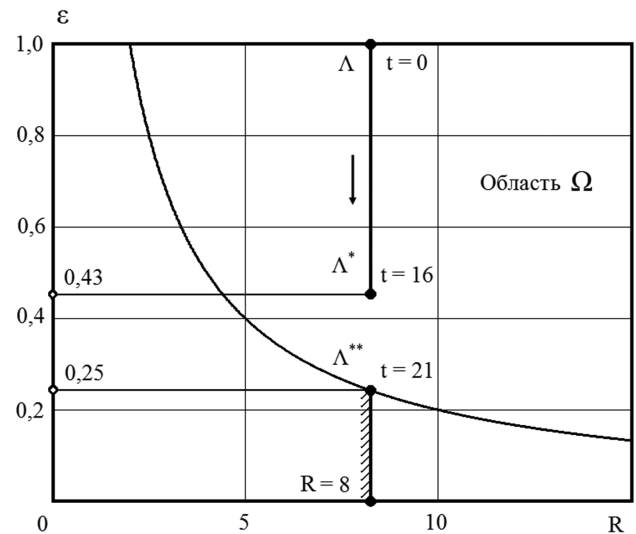


Рис. 6. Графическое представление развития процесса целевой трансформации

Табл. 1. Вербальная шкала свойств сетевой структуры

Интервал значений коэффициента η	$0 \leq \eta < 0,5$	$0,5 \leq \eta < 0,75$	$0,75 \leq \eta \leq 1$
Вербальная шкала свойств сетевой структуры	Стойкость к прогрессирующему повреждению обеспечивается на высоком уровне	Возможность обеспечения стойкости к прогрессирующему повреждению не высокая	Возможность обеспечения стойкости к прогрессирующему повреждению ограничена или весьма низкая

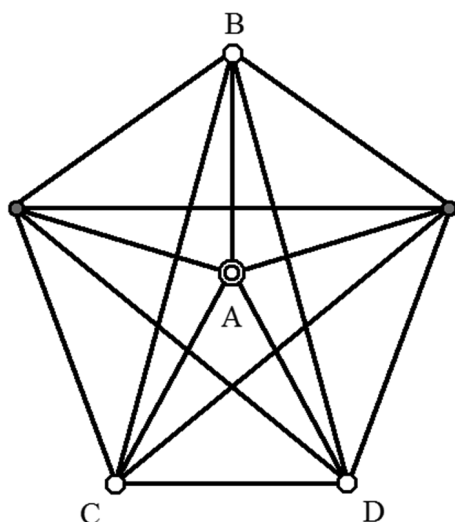


Рис. 7. Структура ST0 с источником A и потребителями B, C, D построенная на основе полного графа

графа, $\eta=0$, а на границе области Ω значение $\eta=1$. Диапазон возможного применения η целесообразно разбить на 3 интервала значений, в соответствии с данными табл. 1.

Таким образом, расчетное определение значений η для анализируемой сетевой структуры позволяет составить общее представление о ее способности противостоять развитию процесса прогрессирующего повреждения.

Характеристики и особенности развития процесса прогрессирующего повреждения

Рассматривая процедуру трансформации сети как развитие двухэтапного процесса, следует отметить, что наибольшей стойкостью к прогрессирующему повреждению обладает структура, построенная на основе полного графа. По мере того, как из состава такой базовой структуры постепенно исключаются линейные элементы, а процесс целевой трансформации развивается, способность возникающих при этом новых структурных объектов противостоять развитию прогрессирующего повреждения снижается.

Рассмотрим в этой связи, как происходит изменение стойкости сетевой структуры ST0, построенной на основе полного графа с источником продукта A и потребителями B, C, D (рис. 7) в условиях последовательного перехода к предельному состоянию с топологией «линия».

Исключив из состава системы 5 линейных элементов, получим новую структуру ST1, схематично показанную на рис. 8а. Для структуры с обозначением ST1 расчетное значение показателя стойкости $F_w = 0,769$. Если процесс целевой трансформации продолжить и исключить из состава системы еще 4 линейных элемента, то после

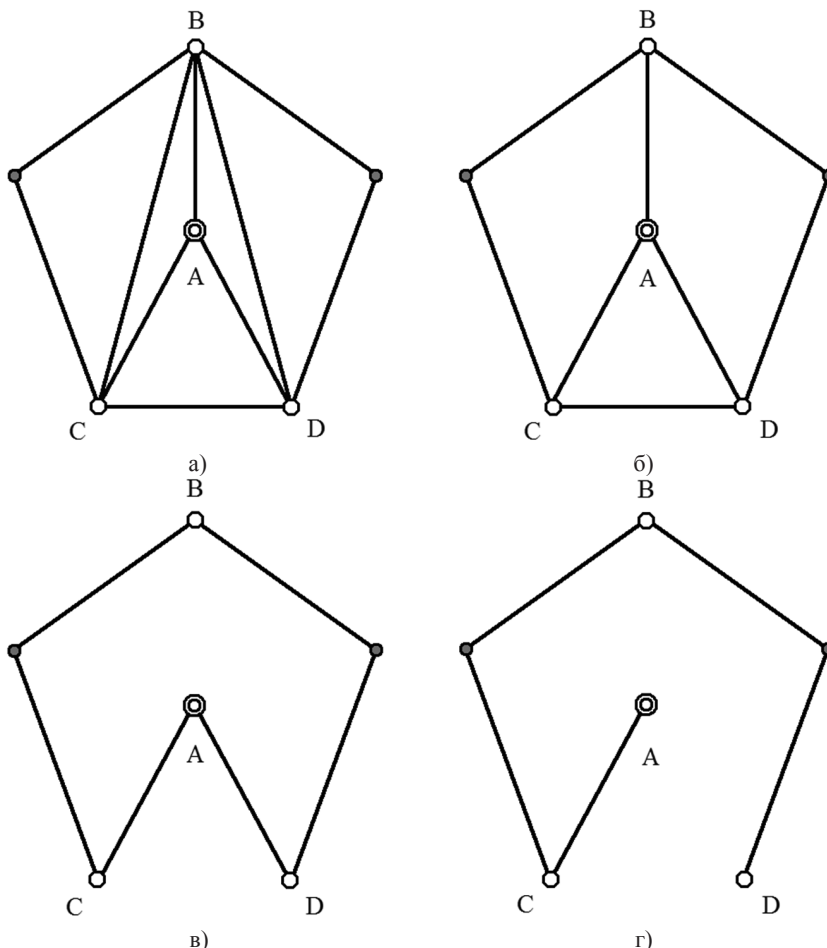


Рис. 8. Сетевые структуры с условным обозначением ST1 (а), ST2 (б), ST3 (в), ST4 (г)

Табл. 2. Характеристики сетевых структур

Условное обозначение сетевой структуры	Характеристики структур и процесса целевой трансформации						Примечание
	t	R	Z	ϵ	η	F_w	
ST0	0	6	15	1,0	0	0,800	Структура построена на основе полного графа
ST1	5	6	10	0,667	0,5	0,769	
ST2	7	6	8	0,533	0,7	0,720	
ST3	9	6	6	0,4	0,9	0,581	
ST4	10	6	5	0,333	1	0,377	Предельная сетевая структура

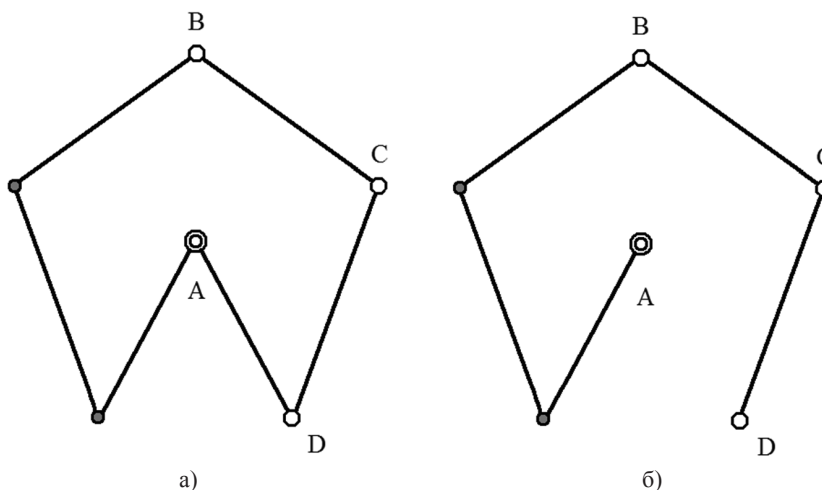


Рис. 9. Вариация структур ST3 (а) и ST4 (б) связанная с изменением положения узла – потребителя C

таких преобразований получится структура с условным обозначением ST2, которая представлена на рис. 8б, а ее расчетные характеристики приведены в табл. 2.

Дальнейшее исключение из состава системы еще двух линейных элементов приводит к образованию структуры ST3 с топологией «кольцо» (рис. 8в), после чего на этапе целевой трансформации можно удалить только один линейный элемент (рис. 8г).

В результате происходит образование предельной структуры ST4 с топологией «линия». Расчетные характеристики перечисленных сетевых структур также приведены в табл. 2. Видно, что наиболее существенное снижение значений показателя стойкости при реализации процесса целевой трансформации происходит в диапазоне значений $\eta = 0,7 \dots 1$, т.е. по мере приближения сетевой структуры к предельному состоянию.

Здесь необходимо отметить и следующую особенность. Для каждой из рассматриваемых структур существуют некоторые вариации, обусловленные возможными изменениями взаимного расположения узлов-потребителей, при соблюдении условия $\eta = \text{const}$.

Например, вариация структур ST3 и ST4 может быть связана с изменением положения узла-потребителя C (рис. 9) при неизменном значении коэффициента η . Представленные на рис. 10 интервальные оценки значений показателя стойкости получены с учетом погрешности вычислений, а также наличия некоторых

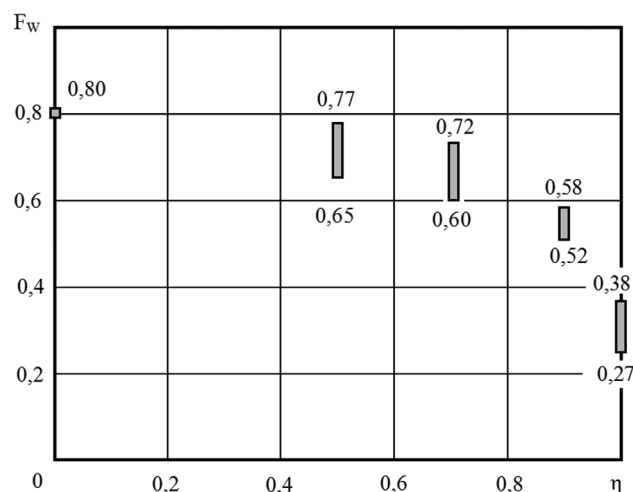


Рис. 10. Интервальные оценки значений показателя F_w для совокупности сопоставимых структур с фиксированными значениями коэффициента η

структурных вариаций для фиксированных значений коэффициента η .

Полученные результаты позволяют заключить, что избыточные внутрисистемные связи оказывают положительное влияние на стойкость трубопроводных систем к прогрессирующему повреждению, при этом характер такого влияния оказывается нелинейным. Наибольший положительный эффект от включения в состав системы

дополнительных связей наблюдается в том случае, если структура сети близка к предельной.

Выводы

1. По мере развития процесса целевой трансформации способность вновь образованных сетевых структур противостоять развитию процесса прогрессирующего повреждения непрерывно снижается.

2. Минимальный уровень стойкости трубопроводной системы к развитию процесса прогрессирующего повреждения наблюдается в случае приближения структуры сети к предельному состоянию.

3. При проведении ремонтных работ и связанном с этим исключением из состава действующей трубопроводной системы некоторого количества линейных элементов, следует оценивать близость структуры вновь образованного сетевого объекта к предельному состоянию, а также стойкость восстанавливаемой системы к возможному развитию процесса прогрессирующего повреждения.

Библиографический список

1. Murali Sambasivan, Sekar Gopal. Handbook of Oil and Gas Piping. A Practical and Comprehensive Guide. 2019, Taylor & Francis Group. 147 p.
2. Geoff Barker. The Engineer's Guide to Plant Layout and Piping Design for the Oil and Gas Industries. 2018, Elsevier Inc. 510 p.
3. Oil and Gas Pipelines. Integrity and Safety Handbook. Edited by R. Winston. 2015, John Wiley & Sons, Inc. 816 p.
4. Brian Silowash. Piping Systems Manual. 2010 by The McGraw-Hill Companies, Inc. 416 p.
5. Dennis P. Nolan. Handbook of Fire and Explosion Protection Engineering Principles for Oil, Gas, Chemical, and Related Facilities. Fourth Edition. Gulf Professional Publishing. Elsevier Inc., 2019. 500 p.
6. Evgeny N. Barkanov, Andrei Dumitrescu, Ivan A. Parinov. Non-destructive Testing and Repair of Pipelines. Springer International Publishing AG, 2018. 451 p.
7. Bijan Kermani, Thierry Chevrot. Recommended practice for corrosion management of pipelines in oil and gas production and transportation. European Federation of Corrosion Publications. CRC Press. 2017. 110 p.
8. Alireza Bahadori. Oil and Gas Pipelines and Piping Systems. Design, Construction, Management, and Inspection. Elsevier Inc. 2017. 627 p.
9. Qiang Bai, Yong Bai, Weidong Ruan. Advances in Pipes and Pipelines. Flexible Pipes. Scrivener Publishing LLC. Published by John Wiley & Sons, Inc. 2017. 589 p.
10. Mojtaba Mahmoodian. Reliability and Maintainability of In-Service Pipelines. Gulf Professional Publishing publications. Elsevier Inc. 2018. 176 p.

11. Gabriella Bolzon, Giovanna Gabetta, Hryhoriy Nykyforchyn. Lecture Notes in Civil Engineering. Degradation Assessment and Failure Prevention of Pipeline Systems. Springer Nature Switzerland AG, 2021. 252 p.

12. A. Antoniou, A. Dimou, A. Markogiannakis, P. Karvelis. Design of Tanks Foundation and Onshore Pipeline Against Earthquakerelated Geohazards in a Coastal Area in Northern Greece. // Pipeline Technology Journal. 2020. № 3. P. 40-46.

13. D. Finley, S. Daniels, K. Kole, M. Roeleveld, P. Ogden. Trial of a Process for the Identification of Reduced Depth of Cover on Buried Pipelines // Pipeline Technology Journal. 2018. № 3. P. 42-47.

14. Ramesh Singh. Pipeline Integrity Handbook. Risk Management and Evaluation. Gulf Professional Publishing. Elsevier Inc, 2014. 308 p.

15. R. Ilkaev, V. Seleznev, V. Aleshin, G. Klishin. Numerical Simulation of Gas Pipeline Networks. Theory, Computational Implementation and Industrial Applications / Ed. by V.E. Seleznev. Moscow, KowKniga, 2005. 720 p.

16. Тарарычкин И.А., Блинов С.П. Имитационное моделирование процесса повреждения сетевых трубопроводных структур // Мир транспорта. 2017. Т. 15. № 2. С. 6-19.

17. Тарарычкин И.А. Стойкость ремонтируемых систем трубопроводного транспорта к повреждениям элементов сетевой структуры // Технологии нефти и газа. 2021. № 1. С. 41-47.

18. Омельченко А.В. Теория графов. М.: МЦНМО, 2018. 416 с.

19. Wilson R.J. Introduction to Graph Theory. Pearson Education Limited, 2010. 184 p.

Сведения об авторе

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

Вклад автора в статью

Автором предложена концепция двухэтапного повреждения сетевой структуры трубопроводной транспортной системы, позволяющая оценивать изменение стойкости ремонтируемых систем и возможные последствия структурных изменений при выполнении ремонтных работ. Получены необходимые расчетные зависимости, позволяющие прогнозировать поведение таких систем в случае возникновения нештатных ситуаций.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.