

Прогрессирующее повреждение структурных элементов трубопроводных систем и оценка эффективности мероприятий по их защите

Игорь А. Тарарычкин, Луганский национальный университет им. В.Даля, Украина, Луганск



Игорь А.
Тарарычкин

Резюме. Целью работы является оценка влияния защиты транспортных узлов на стойкость трубопроводных систем к развитию повреждений по механизму прогрессирующей блокировки узлов, а также анализ эффективности используемых защитных мероприятий. Повреждение точечного элемента системы, связанное с одновременным переходом в состояние неработоспособности всех сходящихся в него трубопроводов называется блокировкой. Процесс последовательной блокировки узлов транспортной системы в случайном порядке рассматривается как прогрессирующее повреждение сетевой структуры. Развитие прогрессирующего повреждения является опасным сценарием развития аварии и сопровождается отключением от источника сначала некоторых, а затем и всех потребителей целевого продукта. Способность системы противостоять развитию прогрессирующих повреждений оценивается при помощи показателя стойкости, представляющего собой среднюю долю повреждаемых узлов, блокировка которых в случайном порядке приводит к отключению от источника всех потребителей целевого продукта. **Методы исследований.** Показатель стойкости системы к развитию процесса прогрессирующей блокировки узлов устанавливался с использованием метода имитационного компьютерного моделирования. Использование показателя стойкости при сравнительном анализе свойств сетевых структур возможно только в том случае, если анализируемые системы являются сопоставимыми. Условием сопоставимости систем с защищенными точечными элементами является наличие одинакового числа отключаемых узлов-потребителей и повреждаемых узлов. Если в составе анализируемых систем присутствуют защитные периферийные кластеры, представляющие собой взаимосвязанную совокупность защищенных точечных элементов, то для сопоставимости таких систем необходимо совпадение: – количества периферийных кластеров с двумя и более узлами-потребителями, при равном числе таких узлов в составе каждой из систем; – наиболее вероятной последовательности отключения от источника, как отдельных потребителей, так и периферийных кластеров с равным количеством потребителей продукта.

Результаты. Повысить стойкость системы к развитию прогрессирующей блокировки можно с использованием организационно-технических мероприятий по защите транспортных узлов. Установлено, что наибольшая эффективность защиты отдельных точечных элементов достигается при защите узла-потребителя расположенного на минимальном удалении от источника целевого продукта. Показано, что синтез периферийного кластера для защиты транспортной системы следует производить путем включения в его состав потребителей, расположенных на минимальном удалении от узла-источника.

Выводы. Развитие аварийной ситуации по механизму прогрессирующей блокировки узлов является опасным сценарием повреждения трубопроводной системы. Повысить стойкость к повреждениям сетевой структуры можно с использованием мероприятий по защите узлов транспортной системы. Наибольшая эффективность защиты отдельных точечных элементов достигается при защите узла-потребителя расположенного на минимальном удалении от источника целевого продукта. Синтез периферийного кластера для защиты транспортной системы от прогрессирующего повреждения следует осуществлять путем включения в его состав потребителей, расположенных на минимальном удалении от узла-источника продукта.

Ключевые слова: система, трубопровод, узел, повреждение, защита, стойкость.

Формат цитирования: Тарарычкин И.А. Прогрессирующее повреждение структурных элементов трубопроводных систем и оценка эффективности мероприятий по их защите // Надежность. 2019. №3. С. 34-39. DOI: 10.21683/1729-2646-2019-19-3-34-39

Системы трубопроводного транспорта находят применение в различных сферах деятельности и отраслях промышленного производства при доставке потребителям энергоносителей, сырья, материалов, готовой продукции. В своем составе такие сложные инженерные объекты могут иметь большее число структурных элементов, взаимодействующих между собой и обеспечивающих воспроизведение функционального эффекта, в том числе и при наличии повреждающих воздействий [1-3]. Эксплуатация таких потенциально опасных технических систем связана с возможностью перехода в состояние неработоспособности отдельных структурных элементов как под воздействием внутренних процессов, так и в результате взаимодействия с внешней средой [4-7].

Из-за наличия избыточных связей в сети переход одного или нескольких структурных элементов в состояние неработоспособности обычно удается компенсировать за счет оперативного перераспределения транспортных потоков.

Если же при развитии аварийной ситуации процесс повреждения сети будет продолжен, то это приведет сначала к отключению от источника некоторых, а затем и всех потребителей целевого продукта.

В этих условиях за короткий промежуток времени в состояние неработоспособности может перейти некоторое количество линейных, и точечных элементов [8–11]. Повреждение линейного элемента (трубопровода) означает невозможность дальнейшего прохождения через него транспортных потоков. Если же происходит повреждение точечного элемента структуры, то прохождение через соответствующий узел любых транспортных потоков также будет прекращено.

Тогда блокировка отдельного узла системы может рассматриваться как результат одновременного перехода в состояние неработоспособности всех сходящихся в него трубопроводов.

Если повреждение сетевой структуры происходит путем последовательной блокировки отдельных узлов системы в случайном порядке, то такой сценарий развития аварийной ситуации называется прогрессирующей блокировкой.

Прогрессирующая блокировка сопровождается быстрой деградацией транспортных возможностей системы и может привести к отключению от источника всех потребителей целевого продукта.

Повысить способность системы противостоять развитию аварии по механизму прогрессирующей блокировки можно путем защиты отдельных точечных элементов. При этом под защитой транспортного узла понимается комплекс мероприятий, обеспечивающих невозможность перехода в состояние неработоспособности всех сходящихся в него трубопроводов.

Очевидно, что защита узлов является эффективным инструментом повышения стойкости всей системы к развитию процесса прогрессирующей блокировки, однако в литературных источниках отсутствуют рекомендации по реализации защитных мероприятий и выбору оптимальных схем защиты.

Целью настоящей работы является оценка влияния защиты транспортных узлов на стойкость трубопроводных систем к развитию повреждений по механизму прогрессирующей блокировки узлов, а также анализ эффективности используемых защитных мероприятий.

Влияние защиты отдельных узлов системы на ее стойкость к развитию прогрессирующих повреждений

Рассмотрим структурную схему трубопроводной системы, показанную на рисунке 1. В ее составе имеется узел-источник А, а также потребители В, С, D, E, F.

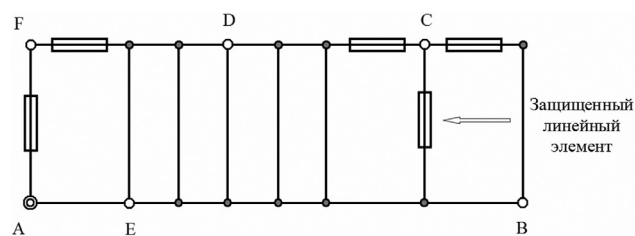


Рис. 1 – Структурная схема трубопроводной системы с защищенными транспортными узлами

Узлы-потребители С и F являются защищенными, поскольку в каждый из них сходятся только защищенные линейные элементы. Узел F соединен с источником, защищенным транспортным путем AF и по этой причине не может быть от него отключен, т.е. является неотключаемым. Защищенный узел С считается отключаемым, несмотря на наличие защиты, поскольку при развитии процесса прогрессирующей блокировки он может быть отключен от источника.

При изучении процесса прогрессирующей блокировки узлов используются следующие обозначения:

U_0 – общее количество потребителей продукта, отключение которых от источника возможно при развитии прогрессирующей блокировки;

Q_0 – доля от общего числа отключаемых потребителей, отключенных от источника продукта в данный момент системного времени;

R_y – общее количество повреждаемых, то есть не защищенных транспортных узлов, блокировка которых оказывается возможной;

r_x – текущее количество заблокированных узлов, при развитии процесса прогрессирующего повреждения;

Y – степень повреждения незащищенной части сетевой структуры, наблюдаемая в текущий момент системного времени ($Y = r_x / R_y$).

Зависимость $Q_0(Y)$ представляет собой диаграмму повреждения структуры и имеет вид ступенчатой функции. Так, для сетевого объекта, показанного на рисунке 1 диаграмма повреждения представлена на рисунке 2.

Значения $M[Y_B], \dots, M[Y_E]$ представляют собой математические ожидания степеней повреждения, при достижении которых происходит последовательное отключение от источника потребителей В, ... Е [12].

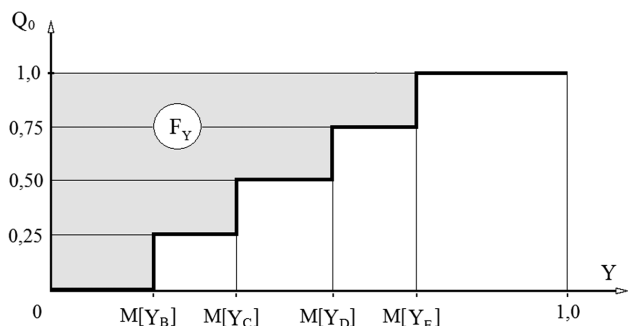


Рис. 2 – Диаграмма повреждения сетевой структуры

Показателем стойкости системы к развитию процесса прогрессирующей блокировки узлов является площадь F_Y ступенчатой фигуры, показанной на рисунке 2:

$$F_Y = \{M[Y_B] + M[Y_C] + M[Y_D] + M[Y_E]\} / U_0$$

Таким образом, показатель стойкости представляет собой среднюю долю повреждаемых узлов системы, блокировка которых в случайном порядке приводит к отключению от источника всех отключаемых потребителей целевого продукта.

Поскольку трубопроводные транспортные системы могут быть различного уровня сложности и содержать разное количество структурных элементов, то корректное сравнение значений их показателей стойкости возможно только в том случае, если соответствующие зависимости $Q_0(Y)$ имеют подобный вид.

Обеспечить совмещение диаграмм повреждения систем с защищенными точечными элементами принципиально возможно только при соблюдении определенных условий. Предположим, анализируемые сетевые структуры имеют одинаковое количество:

- узлов-потребителей, отключение которых от источника возможно в результате развития процесса блокировки;
- повреждаемых узлов, т.е. узлов способных перейти в состояние неработоспособности из-за отсутствия соответствующей защиты.

В этом случае рассматриваемые системы являются сопоставимыми, а сравнение значений их показателей стойкости оказывается корректным.

Если же совокупность защищенных узлов системы оказывается взаимосвязанной, то такой сетевой фрагмент рассматривается как защитный кластер [13]. Кластер называется центральным, если в его составе присутствует узел-источник, в противном случае он считается периферийным.

Наличие защитных кластеров оказывает существенное влияние на развитие процесса прогрессирующей блокировки. Например, если в составе периферийного кластера имеется несколько потребителей продукта, то в некоторый момент системного времени все они будут отключены от источника продукта совместно.

По этой причине кроме приведенного перечня необходимых условий сопоставимости, нужно указать и достаточные условия, выполнение которых позволяет

корректно сравнивать расчетные значения F_Y при наличии в системе защитных кластеров.

Итак, при наличии периферийных кластеров сетевые структуры оказываются сопоставимыми, если они удовлетворяют дополнительному перечню условий и характеризуются:

- одинаковым числом периферийных кластеров с двумя и более узлами-потребителями и совпадающим количеством таких узлов в каждом из них;
- одинаковой последовательностью отключения от источника, как отдельных потребителей, так и периферийных кластеров, с равным количеством потребителей продукта.

Таким образом, перечисленные необходимые и достаточные условия сопоставимости свойств различных сетевых структур позволяют установить возможность корректного сравнения значений их показателей стойкости.

Анализ эффективности защитных мероприятий, реализуемых в отношении отдельных узлов транспортных систем, выполнялся с учетом результатов имитационного компьютерного моделирования [14]. При этом оценивалось влияние на стойкость системы как удаленности защищаемого транспортного узла от источника, так и его функциональное назначение.

В общем случае, в составе транспортной системы возможно наличие следующих разновидностей точечных элементов:

- узел-источник целевого продукта;
- узлы-потребители;
- распределительные транспортные узлы.

Перечисленные элементы имеют разное функциональное назначение, и можно предположить, что их защита влияет на стойкость систем к прогрессирующим повреждениям в различной степени. Кроме того, стойкость сетевого объекта к повреждениям зависит и от удаленности защищаемого узла от источника целевого продукта. При этом удаленность от источника определяется как минимальное число переходов, которые необходимо совершить вдоль имеющейся сети, чтобы совместить анализируемый узел с действующим источником.

Изучение влияния перечисленных факторов на развитие процесса прогрессирующей блокировки узлов выполнялась с использованием системы, структурная схема которой показана на рисунке 3.

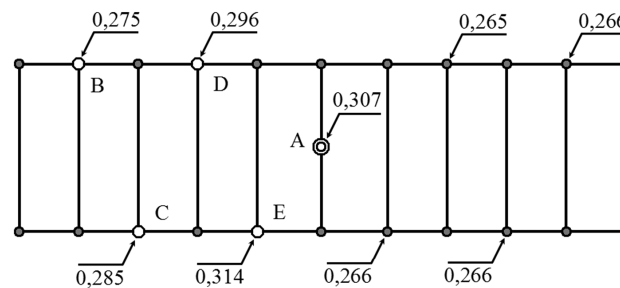


Рис. 3 – Структурная схема, используемая для оценки влияния защиты отдельных узлов транспортной системы на ее стойкость к развитию процесса прогрессирующей блокировки

Выбор указанной схемы связан с наличием у нее следующих структурных особенностей:

- узлы сетевого объекта слева и справа от источника продукта расположены симметрично;
- каждому узлу-потребителю, расположенному в левой части можно поставить в соответствие распределительный узел в правой части находящийся на том же удалении от источника продукта;
- все узлы-потребители расположены на разном удалении от источника целевого продукта.

При моделировании процесса прогрессирующего повреждения, в составе каждой из расчетных схем допускалось наличие только одного защищенного узла. Вследствие этого при реализации каждой вычислительной процедуры количество повреждаемых узлов в системе принималось 22, а количество отключаемых потребителей 4.

Расчетные значения F_{γ} в этих условиях являются сопоставимыми и позволяют оценить не только влияние принадлежности защищаемого узла к той или иной разновидности, но и удаленность этого узла от источника на стойкость сетевого объекта к прогрессирующим повреждениям.

Установленные значения F_{γ} для наглядности приведены на рисунке 3 рядом со стрелками, указывающими на защищаемый точечный элемент системы. Анализ полученных результатов позволяет заключить следующее:

- наибольший положительный эффект имеет место при защите узлов-потребителей расположенных на минимальном удалении от источника продукта;
- по мере удаления защищаемого потребителя от источника эффективность защитных мероприятий непрерывно снижается;
- эффективность защиты распределительных узлов ниже по сравнению с защитой узлов-потребителей расположенных на одинаковом удалении от источника продукта;
- защита удаленных от источника распределительных узлов практически не сопровождается изменением значений показателя стойкости.

Таким образом, оценивая результаты защиты отдельных точечных элементов транспортной системы необходимо отметить, что наиболее предпочтительным является вариант защиты узла-потребителя, расположенного на минимальном удалении от источника целевого продукта.

По мере удаления защищаемого потребителя от источника, эффективность защитных мероприятий снижается, что следует учитывать при разработке и принятии проектных решений. Кроме того, в качестве эффективной меры следует рекомендовать и защиту узла-источника целевого продукта, если выполнение такого рода процедуры возможно.

Защитный периферийный кластер и его влияние на стойкость сетевых структур к повреждениям

Наличие в составе транспортной системы периферийного кластера оказывает существенное влияние на её стойкость к развитию процесса прогрессирующей

блокировки узлов. В этой связи представляет интерес поиск такой конфигурации кластера, при которой возможно достижение наибольшего положительного эффекта с учетом существующих ресурсных ограничений. В первом приближении можно считать, что затраты связанные с защитой транспортных узлов пропорциональны количеству защищаемых линейных элементов. Тогда синтез защитного кластера следует рассматривать как оптимизационную процедуру, связанную с поиском решений обеспечивающих достижение требуемого уровня защиты при минимальном числе защищаемых линейных элементов [15].

Сложность поставленной задачи заключается в том, что для получения достоверной информации относительно свойств сетевых объектов с различными вариантами конфигурации периферийного кластера требуется выполнить предварительную оценку сопоставимости свойств этих структур.

Прежде всего, сравниваемые объекты должны иметь одинаковое число отключаемых потребителей, а также равное количество повреждаемых узлов. Кроме того периферийные кластеры систем должны содержать одинаковое количество потребителей целевого продукта.

Перечисленные условия являются необходимыми для корректного сравнения свойств сетевых структур. Условие же достаточности связано с достижением подобного вида диаграмм повреждения сопоставимых объектов. Для этого у сравниваемых структур должна совпадать наиболее вероятная последовательность отключения потребителей от источника.

Указанное достаточное условие при наличии в системе периферийных кластеров различной конфигурации обеспечить, как правило, не удастся. В этом случае вместо поиска конкретных значений F_{γ} основное внимание следует сосредоточить на анализе общих закономерностей и динамики развития повреждения при наличии в системе защитного кластера с несколькими потребителями целевого продукта. Отметим, что если в составе периферийного кластера имеется несколько потребителей, то все они отключаются от источника продукта одновременно.

Пусть в системе с 6-ю отключаемыми потребителями, имеется периферийный кластер, в состав которого входят 3 потребителя продукта. В зависимости от принятой конфигурации защитного кластера диаграммы повреждения могут быть разного вида. Предположим, кластер находится на небольшом удалении от источника, и совместное отключение 3-х потребителей из его состава происходит в последнюю очередь. Диаграмма повреждения такой системы будет иметь вид, показанный на рисунке 4а. Если же кластер с тремя потребителями отключается в первую очередь, то соответствующая диаграмма повреждения имеет вид, показанный на рисунке 4б.

Поскольку F_{γ} представляет собой площадь ступенчатой фигуры на диаграмме повреждения, то следует предположить, что вариант повреждения объекта в соответствии со схемой, показанной на рисунке 4а оказывается наиболее предпочтительным. Именно в этом случае создаются объективные условия для достижения наибольших значений F_{γ} .

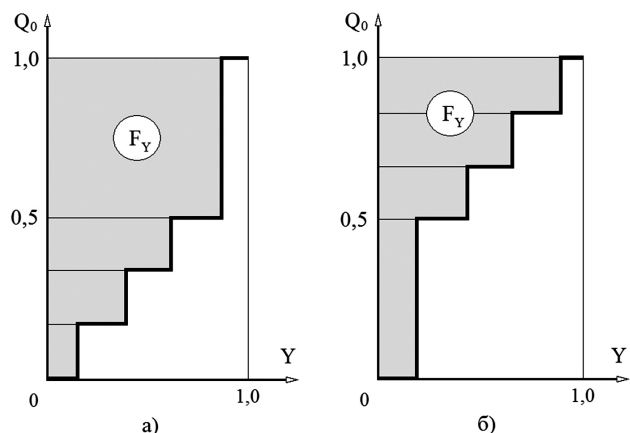


Рис. 4 – Диаграммы повреждения сетевых структур с совместным отключением от источника потребителей из состава периферийного кластера в последнюю (а) и в первую очередь (б)

Это означает, что при формировании периферийного кластера следует рекомендовать включение в его состав преимущественно тех потребителей, которые наименее удалены от источника целевого продукта.

Проверим это положение на конкретном примере. Рассмотрим структурную схему трубопроводной системы, показанную на рисунке 5а. В составе защитного кластера K1 имеется 4 потребителя, которые при развитии процесса прогрессирующей блокировки узлов будут отключены от источника совместно и в первую очередь.

Вид диаграммы повреждения для этого случая показан на рисунке 6а. Если же в состав периферийного кластера включить 4 потребителя, которые в меньшей степени удалены от источника продукта (рисунок 5б), то диаграмма повреждения такой системы будет иметь вид, показанный на рисунке 6б.

Необходимые условия сопоставимости структур SIT1 и SIT2 в этом случае выполняются. Установленные для них значения F_Y можно сравнивать с оговоркой о невозможности полного совмещения соответствующих диаграмм повреждения.

Результаты определения характеристик стойкости структур с условным обозначением SIT1 и SIT2 приведены в табл. 1.

Видно, что высказанное предположение относительно ожидаемых свойств объектов подтверждается в полной мере. Это означает, что при принятии проектных решений связанных с формированием периферийного кластера целесообразно включать в его состав, прежде всего наи-

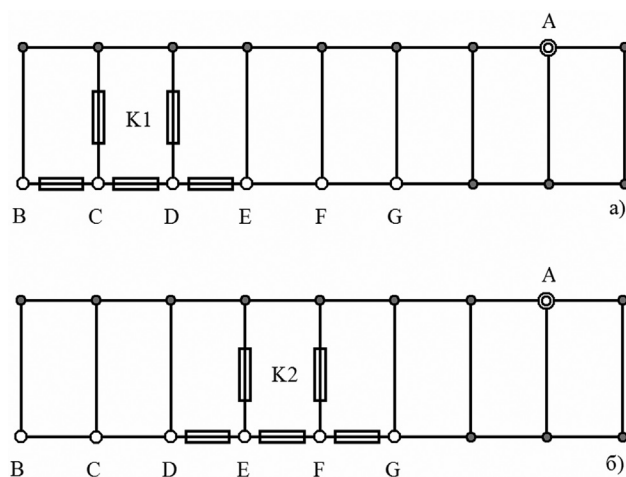


Рис. 5 – Структурные схемы SIT1 (а) и SIT2 (б) с периферийным кластером, расположенным на большем и меньшем удалении от источника целевого продукта А

более удаленные от источника потребители целевого продукта.

Вопрос о целесообразности включения в состав периферийного кластера распределительных узлов также имеет прикладное значение и должен быть подробно рассмотрен. Так, на рисунке 7 показаны структурные схемы SIT3 и SIT4, в составе которых имеются кластеры K3 и K4 отличающиеся от кластера K2 системы SIT2 наличием дополнительных распределительных узлов. Увеличение количества узлов в составе кластеров K3

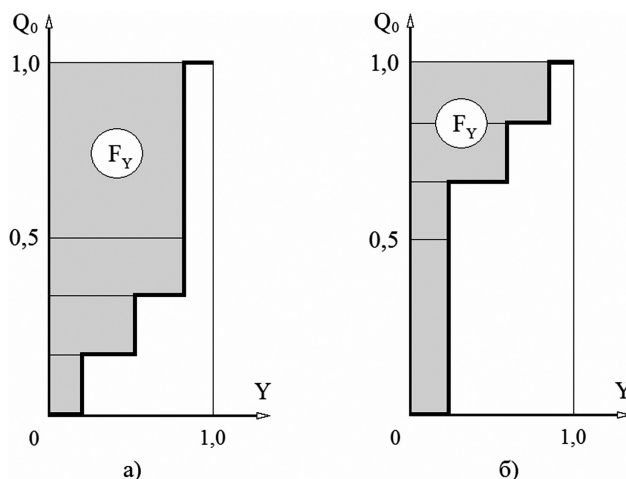


Рис. 6 – Вид диаграмм повреждения сетевых структур SIT1 (а) и SIT2 (б)

Таблица 1. Характеристики сетевых структур удовлетворяющих необходимым условиям сопоставимости

Обозначение сетевой структуры	Количество повреждаемых узлов	Количество отключаемых узлов-потребителей в составе		Расчетное значение F_Y
		системы	периферийного кластера	
SIT1	16	6	4	0,265
SIT2	16	6	4	0,296
SIT3	16	6	4	0,342
SIT4	16	6	4	0,401

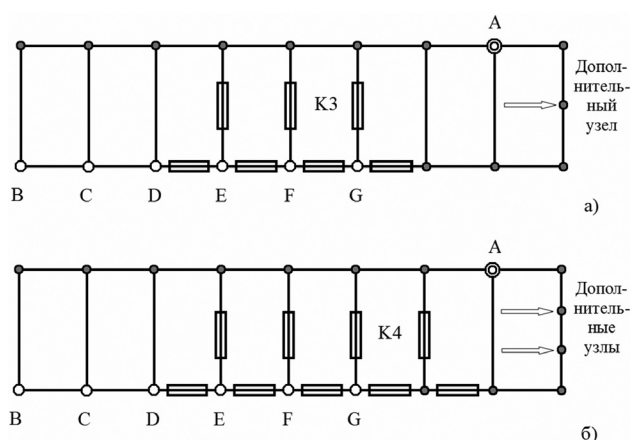


Рис. 7 – Структурные схемы SIT3 (а) и SIT4 (б) с дополнительными распределительными узлами и защитными кластерами К3 и К4

и К4 требует включения в состав системы новых повреждаемых точечных элементов для соблюдения необходимых условий сопоставимости.

По этой причине общее количество точечных элементов в составе структуры SIT3 составляет 19 (рисунок 7а), а в составе SIT4 таких элементов 20 (рисунок 7б).

Результаты определения значений F_y для перечисленных сетевых объектов приведены в табл. 1 и позволяют заключить, что включение в состав периферийного кластера дополнительных точечных элементов целесообразно только в том случае, если это сопровождается уменьшением его удаленности от источника целевого продукта.

Выводы

1. Развитие аварийной ситуации по механизму прогрессирующей блокировки узлов является опасным сценарием повреждения трубопроводной системы. Повысить стойкость к повреждениям сетевой структуры можно с использованием мероприятий по защите узлов транспортной системы. Наибольшая эффективность защиты отдельных точечных элементов достигается при защите узла-потребителя расположенного на минимальном удалении от источника целевого продукта.

2. Синтез периферийного кластера для защиты транспортной системы от прогрессирующего повреждения следует осуществлять путем включения в его состав потребителей, расположенных на минимальном удалении от узла-источника продукта.

Библиографический список

1. Черкесов Г.Н. Анализ функциональной живучести структурно-сложных технических систем [Текст] / Г.Н. Черкесов, А.О. Недосекин, В.В. Виноградов // Надежность. – 2018. – № 2 (65). – С. 17-24.
2. Черкесов Г.Н. Оценка живучести сложных структур при многообразных воздействиях высокой точности. Часть 1. Основы подхода [Текст] / Г.Н. Черкесов, А.О. Недосекин // Надежность. – 2016. – № 2 (57). – С. 3-15.

3. Черкесов Г.Н. Описание подхода к оценке живучести сложных структур при многообразных воздействиях высокой точности (часть 2) [Текст] / Г.Н. Черкесов, А.О. Недосекин // Надежность. – 2016. – № 3. – С. 26-34.

4. Shashi Menon E. Pipeline Planning and Construction Field Manual [Text] / E. Shashi Menon. – 2011, Gulf Professional Publishing, USA. – 552 p.

5. Oil and Gas Pipelines. Integrity and Safety Handbook [Text] / Edited by R. Winston. – 2015, John Wiley & Sons, Inc. – 816 p.

6. Silowash Brian. Piping Systems Manual [Text] / Brian Silowash. – 2010 by The McGraw-Hill Companies, Inc. – 416 p.

7. Keith Escoe A. Piping and Pipeline Assessment Guide [Text] / A. Keith Escoe. – 2006, Elsevier Inc. – 555 p.

8. Sabet 1, Seyyed Ali. Seismic Behavior Of Buried Pipelines Subjected To Normal Fault Motion [Text] / S.A. Sabet 1, S.M. Reza Nayyeri // Advances in Science and Technology Research Journal. – Vol. 10. – No. 30. – June 2016. – P. 84–88.

9. Vazouras P. Finite element analysis of buried steel pipelines under strike-slip fault displacement [Text] / P. Vazouras, S. Karamanson // Journal of Soil Dynamics and Earth-quake Engineering. – 2010. – № 30(11). – P. 1361–1376.

10. Lele S.P. Advanced continuum modeling to determine pipeline strain demand due to ice-gouging [Text] / S.P. Lele, J.M. Hamilton, M. Panico, H. Arslan // Journal of International Society of Offshore and Polar Engineers. – 2013. – № 23(1). – P. 22–28.

11. Ramesh Singh. Pipeline Integrity Handbook Risk Management and Evaluation [Text] / S. Ramesh. – 2014, Elsevier Inc., 308 p.

12. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика: Учеб. пособие для вузов [Текст] / В.Е. Гмурман. 10 изд. – М.: Высш. шк., 2004. – 479 с.

13. Снарский А.А. Моделирование сложных сетей: Учеб. Пособие [Текст] / А.А. Снарский, Д.В. Ландэ. – К.: Ижнинринг, 2015. – 212 с.

14. 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.

15. Тарарычкин И.А. Стратегии защиты объектов трубопроводного транспорта от структурных повреждений при развитии аварийных ситуаций [Текст] / И.А. Тарарычкин // Безопасность труда в промышленности, 2018. № 2. с. 52-57.

Сведения об авторе

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

Поступила 08.12.2018