

## Влияние структурного состава на стойкость трубопроводных систем к повреждениям узловых элементов

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



Игорь А.  
Тарарычкин

**Резюме.** Целью работы является изучение влияния структурных особенностей трубопроводных систем на развитие аварийной ситуации по механизму прогрессирующей блокировки транспортных узлов. Блокировка отдельного точечного элемента системы рассматривается как результат одновременного перехода в состояние неработоспособности всех сходящихся в узел трубопроводов. Процесс последовательного перехода в состояние блокировки некоторой совокупности узлов трубопроводной системы в случайном порядке называется прогрессирующей блокировкой. Развитие прогрессирующей блокировки сопровождается отключением от источника потребителей целевого продукта и представляет собой опасный сценарий развития аварийной ситуации. Стойкость системы к развитию прогрессирующей блокировки оценивается при помощи показателя стойкости  $F_x$  представляющего собой среднюю долю узлов системы, блокировка которых в случайном порядке приводит к отключению от источника всех потребителей целевого продукта. **Методы исследования.** Определение значений  $0 \leq F_x \leq 1$  выполнялось с использованием метода имитационного компьютерного моделирования. При этом после каждого акта повреждения связанного со случайной блокировкой отдельного узла устанавливалось наличие связи между источником и потребителями целевого продукта. Статистические характеристики процесса прогрессирующей блокировки оценивались по результатам многократного воспроизведения процедуры повреждения анализируемой сетевой структуры. В общем случае структура трубопроводной системы характеризуется графом, который описывает связи между точечными элементами. Валентностью отдельной вершины графа называется количество сходящихся в неё ребер. Аналогичным образом валентностью соответствующего узла называется количество сходящихся линейных элементов (трубопроводов). Кроме того, важной характеристикой отдельного узла является состав сходящихся линейных элементов. Так среди множества линейных элементов системы имеются следующие разновидности обеспечивающие связь между: источником и потребителем (подмножество  $G_1$ ), двумя потребителями (подмножество  $G_2$ ), потребителем и распределительным узлом (подмножество  $G_3$ ), двумя распределительными узлами (подмножество  $G_4$ ), источником и распределительным узлом (подмножество  $G_5$ ). **Результаты.** Выполнен анализ и изучено влияние структурных характеристик на способность трубопроводных систем противостоять развитию аварий по механизму прогрессирующей блокировки узлов. Установлено, что при решении задач структурной оптимизации наибольший положительный эффект связанный с повышением значений  $F_x$  наблюдается при увеличении валентности узла-источника и включении в состав системы дополнительных линейных элементов принадлежащих подмножеству  $G_1$ . **Выводы.** Процесс прогрессирующей блокировки узлов трубопроводных транспортных систем представляет собой опасный сценарий развития аварийной ситуации. Наиболее эффективным образом повысить стойкость трубопроводных систем к развитию процесса прогрессирующей блокировки можно за счет увеличения валентности узла-источника и включения в состав системы дополнительных линейных элементов принадлежащих подмножеству  $G_1$ . Структурную оптимизацию трубопроводных систем следует осуществлять путем определения значений  $F_x$  для каждого из альтернативных вариантов с последующим принятием обоснованного проектного решения.

**Ключевые слова:** трубопровод, система, стойкость, повреждение, узел, структура, блокировка, оптимизация.

**Формат цитирования:** Тарарычкин И.А. Влияние структурного состава на стойкость трубопроводных систем к повреждениям узловых элементов // Надежность. 2019. №1. С. 24-29. DOI: 10.21683/1729-2646-2019-19-1-24-29

**Введение.** Системы трубопроводного транспорта применяют в различных отраслях производства при доставке потребителям необходимых материалов, сырья, готовой продукции [1-3]. Наибольшую потенциальную опасность представляют процессы переработки и доставки токсичных, горючих, взрывоопасных веществ. Эффективное функционирование, надежность и эксплуатационные характеристики таких сложных технических систем зависят как от свойств отдельных структурных элементов, так и особенностей их взаимодействия [4-7].

Переход в состояние неработоспособности отдельных трубопроводов оказывает негативное влияние на технологические возможности транспортных систем и эффективность их функционирования [8]. При этом наибольшую опасность для действующей системы представляет процесс повреждения узловых элементов. Связано это с тем, что в отдельно взятый узел сходится, как правило, несколько линейных элементов. В этих условиях повреждение (блокировка) узла означает одновременный переход в состояние неработоспособности всех сходящихся в него трубопроводов.

Если в условиях аварийной ситуации происходит последовательная блокировка узлов системы в случайном порядке, то такой сценарий развития событий называется прогрессирующей блокировкой.

Развитие аварии по механизму прогрессирующей блокировки узлов сопровождается быстрой деградацией свойств системы и может привести к полному прекращению доставки целевого продукта всем потребителям.

Способность системы противостоять развитию процесса прогрессирующей блокировки узлов характеризуется показателем стойкости  $F_x$  [9]. Показатель стойкости  $0 \leq F_x \leq 1$  представляет собой среднюю долю узлов транспортной системы, блокировка которых в случайном порядке приводит к полному отключению от источника всех потребителей целевого продукта. Для заданной структуры транспортной системы значение  $F_x$  устанавливается на основе метода имитационного моделирования [10]. Чем ближе значение  $F_x$  к единице, тем более высокой стойкостью к развитию процесса прогрессирующей блокировки узлов характеризуется анализируемая система.

**Целью настоящей работы** является изучение влияния структурных особенностей трубопроводных систем на развитие аварийной ситуации по механизму прогрессирующей блокировки узловых элементов.

Компьютерное моделирование прогрессирующего повреждения различных сетевых структур позволяет установить наличие следующего ряда особенностей и закономерностей процесса.

1. Любые сетевые структуры систем трубопроводного транспорта с равным количеством узлов и одинаковым числом потребителей продукта являются сопоставимыми независимо от количества линейных элементов в их составе.

2. Увеличение числа линейных элементов в системе сопровождается ростом значений показателя стойкости  $F_x$ , однако указанный эффект проявляется в различной степени и зависит от структурных особенностей анализируемого объекта.

В общем случае структура системы трубопроводного транспорта описывается при помощи соответствующего размеченного графа, наглядно отображающего существующие связи между отдельными точечными элементами. Количество сходящихся в вершину графа ребер называется валентностью, которая является характеристикой каждой из вершин [11]. Аналогичным образом количество сходящихся в отдельный транспортный узел трубопроводов рассматривается в дальнейшем как его валентность. Кроме того, характеристикой системы является множество линейных элементов  $G$ , которое делится на 5 подмножеств, обозначения которых представлены в табл. 1 [12].

Поскольку блокировка отдельно взятого транспортного узла приводит к одномоментному переходу в состояние неработоспособности всех связанных с ним трубопроводов, то следует предположить, что количество входящих в узел линейных элементов является его характеристикой, оказывающей влияние на развитие процесса прогрессирующего повреждения.

**Таблица 1 – Характеристика и обозначения подмножеств линейных элементов транспортной системы**

Обозначение подмножества линейных элементов	Узлы транспортной системы, соединяемые линейными элементами из состава различных подмножеств
$G1$	источник продукта – потребитель
$G2$	потребитель – потребитель
$G3$	потребитель – распределительный узел
$G4$	распределительный узел – распределительный узел
$G5$	источник продукта – распределительный узел

Если при решении задачи синтеза в состав системы включить дополнительный линейный элемент, то такая структурная вариация сопровождается увеличением валентности сразу двух транспортных узлов. Таким образом, изменение валентности любого узла системы в процессе структурного синтеза следует рассматривать с учетом наблюдаемого изменения валентности другого связанного с ним узла.

Анализ влияния валентности транспортных узлов на стойкость сетевых структур к развитию процесса прогрессирующей блокировки представляет практический интерес и требует проведения дополнительных исследований. Выявление такого рода закономерностей связано с выбором подходящих сетевых структур и обоснованием соответствующих расчетных схем.

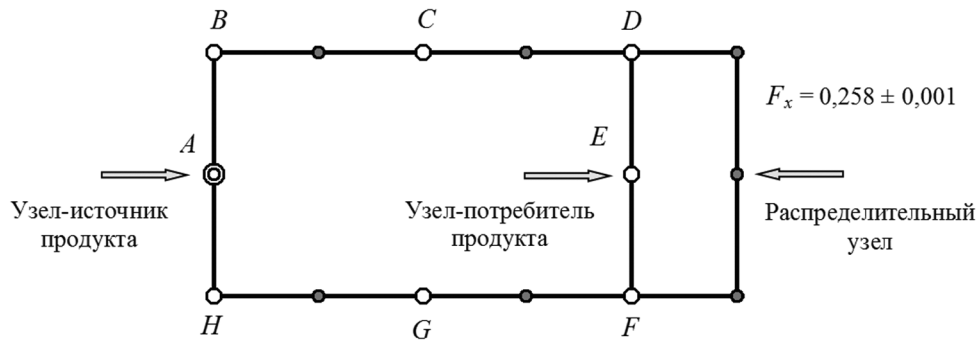


Рисунок 1 – Структурная схема трубопроводной транспортной системы.

Рассмотрим в этой связи базовую структурную схему трубопроводной системы, показанную на рис. 1. В составе анализируемого объекта имеется источник целевого продукта  $A$ , представляющий собой точечный элемент валентности 2, а также 7 потребителей целевого продукта  $B, C, \dots H$ .

Увеличим валентность узла-источника системы в 3 раза. Для этого введем дополнительно в состав базового объекта 4 линейных элемента. Указанные элементы могут принадлежать подмножествам  $G1$  или  $G5$ , а их включение в состав системы будет сопровождаться увеличением валентности не только узла-источника, но и других узлов.

Варианты структурных схем PIR1–PIR3 с увеличенной валентностью узла-источника  $A$  приведены на рис. 2. Все перечисленные объекты являются сопоставимыми, а их характеристики и результаты расчета значений  $F_x$  приведены в табл. 2. Видно, что наибольший положительный эффект, связанный с увеличением валентности узла-источника наблюдается при добавлении в систему линейных элементов, принадлежащих подмножеству  $G1$ . Если количество элементов из состава подмножества  $G1$  уменьшается за счет элементов подмножества  $G5$ , то снижается и значение показателя стойкости  $F_x$ .

Таким образом, увеличение валентности узла-источника следует производить, прежде всего, за счет включения в состав системы линейных элементов принадлежащих подмножеству  $G1$ . Именно в этом случае достигается наибольший положительный эффект.

Теперь, используя базовую структурную схему, увеличим в 3 раза валентность узла-потребителя  $E$  так, как это показано на рис. 3. Характеристики производных структурных схем с условным обозначением PIR4–PIR6, а также результаты моделирования процесса прогрессирующей блокировки узлов приведены в табл. 2. Видно, что наибольший положительный эффект, связанный с увеличением валентности узла-потребителя, наблюдается при включении в состав системы линейных элементов подмножества  $G2$ . По мере замены их элементами подмножества  $G3$  имеет место снижение стойкости системы к развитию процесса прогрессирующей блокировки узлов.

Рассмотрим теперь влияние валентности распределительного узла на стойкость сетевого объекта

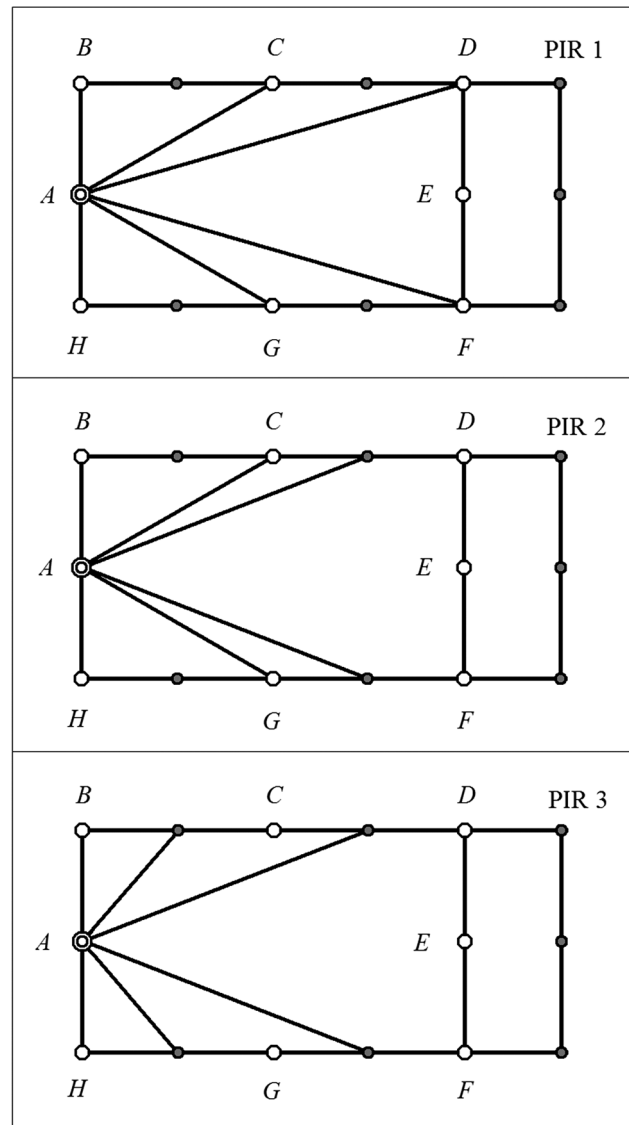


Рисунок 2 – Производные сетевые структуры с увеличенной валентностью узла-источника

к прогрессирующим повреждениям. С этой целью увеличим в 3 раза валентность распределительного узла при помощи элементов подмножеств  $G3$  и  $G4$ , так как это показано на рис. 4. Характеристики синтезированных таким способом структур также приведены в табл. 2. Видно, что минимальный при-

Таблица 2. Характеристики производных сетевых структур

Условное обозначение сетевой структуры	Количество линейных элементов принадлежащих различным подмножествам и сходящихся в узел валентности 6, шт.					Показатель стойкости $F_x$	Соотношение значений $F_x$ для производной и базовой структур
	G1	G2	G3	G4	G5		
PIR1	6	0	0	0	0	0,374±0,001	1,45
PIR2	4	0	0	0	2	0,348±0,001	1,35
PIR3	2	0	0	0	4	0,339±0,001	1,31
PIR4	0	6	0	0	0	0,320±0,001	1,24
PIR5	0	4	2	0	0	0,316±0,001	1,22
PIR6	0	2	4	0	0	0,302±0,001	1,17
PIR7	0	0	0	6	0	0,294±0,001	1,14
PIR8	0	0	2	4	0	0,304±0,001	1,18
PIR9	0	0	4	2	0	0,307±0,001	1,19

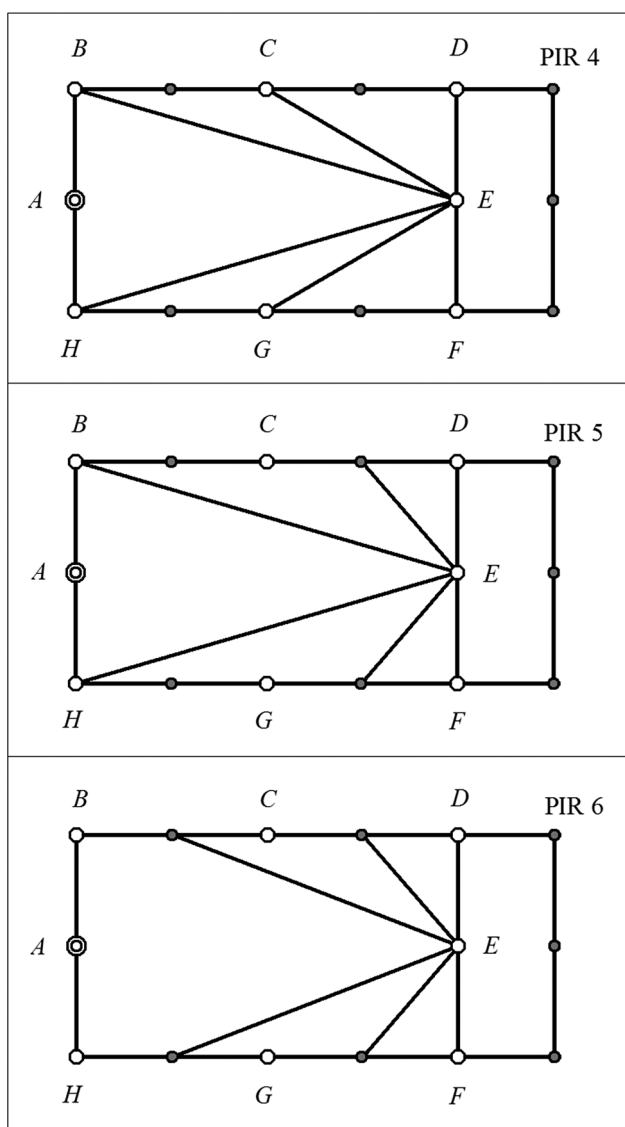


Рисунок 3 – Производные сетевые структуры с увеличенным значением валентности узла-потребителя

рост значений  $F_x$  наблюдается в том случае, если в распределительный узел сходятся только элементы подмножества G4.

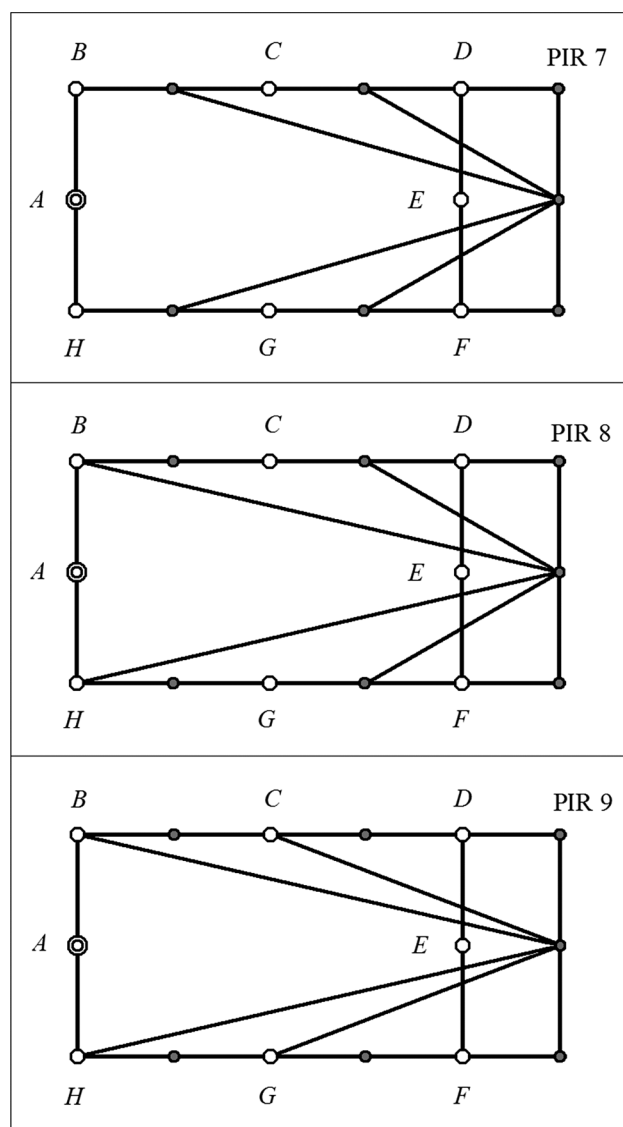


Рисунок 4 – Производные сетевые структуры с увеличенной валентностью распределительного узла

Таким образом, по результатам проведенного анализа установлено существование трех разновидностей точечных элементов системы, увеличение

валентности которых в различной степени влияет на рост значений  $F_x$ .

Так, наибольший положительный эффект связанный с увеличением валентности узла-источника наблюдается при включении в состав системы линейных элементов принадлежащих подмножеству  $G1$ .

Наименьший прирост значений  $F_x$  происходит при увеличении валентности распределительных узлов и добавлении в состав системы линейных элементов принадлежащих подмножеству  $G4$ .

Увеличение валентности узлов-потребителей оказывает промежуточное влияние на рост значений показателя стойкости сетевых структур к развитию процесса прогрессирующей блокировки.

Очевидно, что при решении задач структурного синтеза включение в состав системы дополнительных трубопроводов всегда является затратным мероприятием. Поэтому с практической точки зрения важно обеспечить достижение заданного уровня стойкости сетевых структур к развитию процессов прогрессирующей блокировки узлов за счет добавления в их состав минимально возможного числа линейных элементов.

Тогда наиболее эффективным вариантом повышения стойкости систем трубопроводного транспорта следует считать включение в их состав небольшого числа линейных элементов, принадлежащих подмножеству  $G1$ .

Рассмотрим в качестве примера структурную схему трубопроводной системы с условным обозначением TTR1 показанную на рис. 5а.

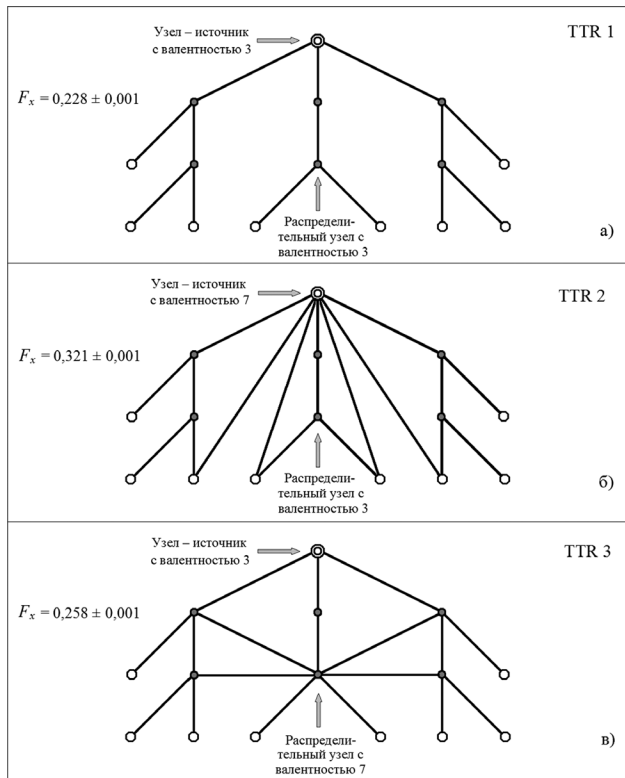


Рисунок 5 – Структурная схема базовой трубопроводной системы (а) и производные структуры с увеличенной валентностью узла-источника (б) и распределительного узла (в)

Предположим, решение задачи синтеза связано с планируемым включением в состав такого базового объекта 4-х линейных элементов. Если увеличить на 4 единицы валентность узла-источника за счет элементов подмножества  $G1$ , то синтезированная таким способом структурная схема TTR2 будет иметь вид, показанный на рис. 5б.

Увеличим теперь валентность распределительного узла структуры TTR1 путем добавления 4-х линейных элементов, принадлежащих подмножеству  $G4$ . Полученная таким образом производная структура TTR3 имеет вид, показанный на рис. 5в.

С учетом полученных ранее результатов следует предположить, что решение, представленное на рис. 5б, будет близким к наилучшему, а приведенное на рис. 5в – окажется одним из наихудших. Расчетные значения показателя стойкости для каждого из указанных вариантов производных сетевых структур приведены на рис. 5.

Видно, что величина  $F_x$ , установленная для варианта, представленного на рис. 5б, превышает значение показателя стойкости структуры, изображенной на рис. 5в, примерно в 1,24 раза.

Таким образом, результаты выполненных расчетов подтверждают сделанное ранее предположение относительно ожидаемых свойств синтезированных сетевых структур.

## Выводы

1. Процесс прогрессирующей блокировки узлов трубопроводных транспортных систем представляет собой опасный сценарий развития аварийной ситуации, поскольку каждый акт блокирования сопровождается одновременным переходом в состояние неработоспособности всех сходящихся в узел трубопроводов.

2. Наиболее эффективным образом повысить стойкость трубопроводных систем к развитию процесса прогрессирующей блокировки узлов можно за счет увеличения валентности узла-источника и включения в состав системы дополнительных линейных элементов, принадлежащих подмножеству  $G1$ .

3. Структурную оптимизацию трубопроводных систем следует осуществлять путем определения значений  $F_x$  для каждого из альтернативных вариантов с последующим выбором решения, обеспечивающего наиболее высокий уровень стойкости к развитию процессов прогрессирующего повреждения.

## Библиографический список

1. Oil and Gas Pipelines. Integrity and Safety Handbook [Text] / Edited by R. Winston. – John Wiley & Sons, Inc., 2015. – 816 p.
2. Shashi Menon, E. Pipeline Planning and Construction Field Manual [Text] / E. Shashi Menon. – Gulf Professional Publishing, USA, 2011. – 552 p.

3. Silowash, B. Piping Systems Manual [Text] / Brian Silowash. – The McGraw-Hill Companies, Inc., 2010. – 416 p.
4. Свердлов, А.Б. Анализ надежности газоперекачивающих агрегатов [Текст] / А.Б. Свердлов // Надежность. – 2015. – № 2(53). – С. 62-64.
5. Ткачев, О.А. Анализ надежности сетей, состоящих из идентичных элементов [Текст] / О.А. Ткачев // Надежность. – 2014. – № 1(48). – С. 30-34.
6. 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.
7. Черкесов, Г.Н. Оценка живучести сложных структур при многократных воздействиях высокой точности. Часть 1. Основы подхода [Текст] / Г.Н. Черкесов, А.О. Недосекин // Надежность. – 2016. – № 2(57). – С. 3-15.
8. Дейнеко, С.В. Обеспечение надежности систем трубопроводного транспорта нефти и газа [Текст]: учеб. пособие / С.В. Дейнеко. – М.: Техника, ТУМА ГРУПП, 2011. – 176 с.
9. 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.
10. 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.
11. Татт, У. Теория графов [Текст] / У. Татт; пер. с англ. Гаврилова Г.П. – М.: Мир, 1988. – 423 с.
12. Тарарычкин, И.А. Обеспечение стойкости трубопроводных систем к повреждениям элементов сетевой структуры [Текст] / И.А. Тарарычкин // Надежность. – 2018. – Т 18. – №1. – С. 26-31.

### 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 09.05.2018