



# Защита транспортных узлов и обеспечение стойкости трубопроводных систем



Игорь ТАРАРЫЧКИН

Igor A. TARARYCHKIN

## Protection of Transport Nodes and Resistibility of Pipeline Systems

(текст статьи на англ. яз. –  
English text of the article – p. 225)

**Выполнен анализ и установлены закономерности возникновения аварийных угроз на объектах трубопроводного транспорта, связанных с последовательным повреждением структурных элементов. При развитии нештатной ситуации блокировка отдельного узла системы ассоциируется с одновременным переходом в состояние неработоспособности всех сходящихся в его зону трубопроводов. Такое повреждение точечного элемента сетевой структуры приводит к тому, что прохождение через него транспортных потоков становится невозможным. Способность системы противостоять прогрессирующей блокировке зависит от её состава, структуры и характеризуется показателем стойкости, величина которого вычисляется с помощью метода имитационного моделирования. Рассмотрен пример использования кластерных схем при решении задачи структурного синтеза и выбора наилучшего варианта защиты трубопроводной транспортной системы.**

*Ключевые слова:* система, трубопровод, структура, транспортные узлы, кластеры, защита, повреждение, стойкость, показатель стойкости.

*Тарарычкин Игорь Александрович – доктор технических наук, профессор, Луганск, Украина.*

**Т**рубопроводные транспортные системы широко используются в различных отраслях промышленного производства. Их функционирование обеспечивает доставку потребителям целевого продукта в заданных объёмах и состояниях. Особое значение гарантированная доставка продукта имеет для непрерывных технологических процессов и при обслуживании объектов, отключение которых от источника продукта не допускается [1, с. 14; 2, с. 4].

В то же время функционирование транспортной системы может быть связано и с возникновением нештатных ситуаций. Наблюдаемый при этом переход отдельных элементов системы в состояние неработоспособности может существенно ограничивать ее эксплуатационные возможности или сопровождаться отключением отдельных потребителей. Причины повреждения структурных элементов обычно объясняются развитием коррозии, гидравлическими ударами, появлением неких резонансных явлений, сейсмической активностью, образованием оползней и т.п. [3–8].

Блокировка отдельного узла означает невозможность прохождения через него транспортного потока и рассматривается

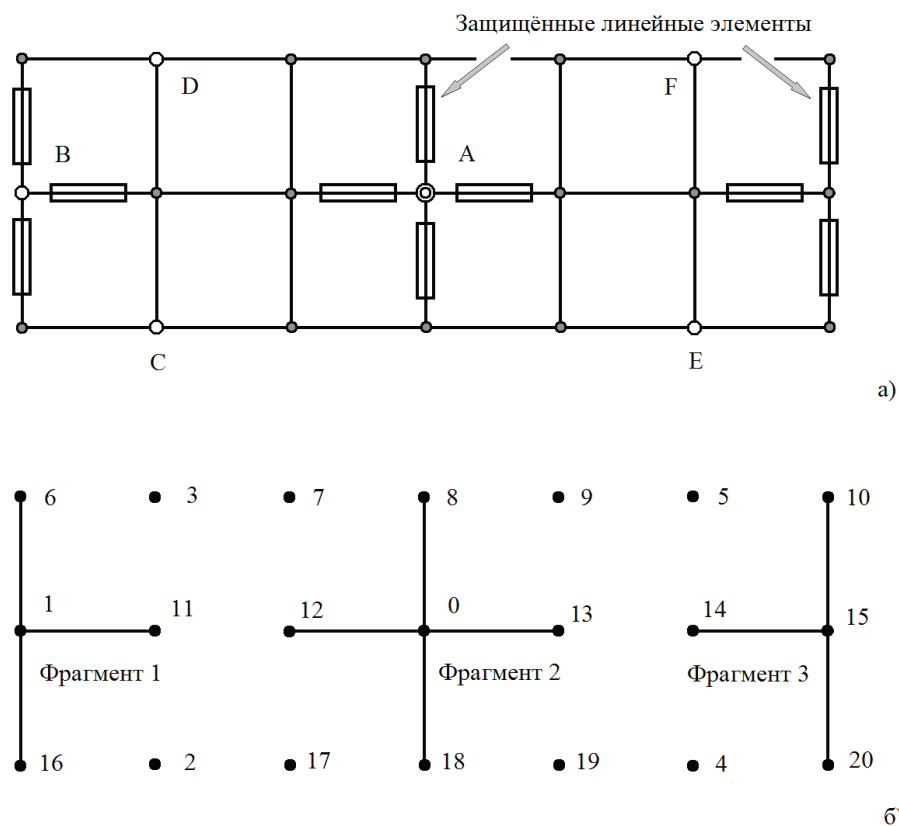


Рис. 1. Структурная схема системы с изолированными защищёнными узлами (а) и размеченный граф этой системы после завершения процедуры прогрессирующей блокировки узлов (б).

как результат одновременного перехода в неработоспособное состояние всех сходящихся здесь трубопроводов.

Из-за наличия в системе избыточных связей и альтернативных путей доставки продукта блокировка отдельного узла, как правило, не приводит к отключению от источника всех потребителей. Реальную опасность представляет процесс прогрессирующей блокировки, когда транспортные узлы переходят в состояние блокировки последовательно и в случайном порядке. Такой характер повреждения сетевой структуры сопровождается быстрой деградацией свойств системы. Конечным результатом развития процесса становится отключение от источника всех потребителей целевого продукта.

Повысить стойкость системы к развитию прогрессирующих повреждений можно, обеспечив защиту отдельных транспортных узлов и чётко сознавая критерии оценки происходящих событий.

## ОСОБЕННОСТИ КЛАСТЕРНОЙ СХЕМЫ

Защищённый транспортный узел системы рассматривается в дальнейшем как структурный элемент, не повреждаемый при любом варианте процесса прогрессирующей блокировки. Справедливым при этом является и иной, альтернативный взгляд на защиту отдельно взятого точечного элемента. Так, вполне корректно представить блокировку защищённого узла как событие, характеризующееся одновременной потерей и последующим мгновенным восстановлением работоспособности всех сходящихся в него трубопроводов, которые в этих условиях оказываются в роли защищённых линейных элементов.

Поскольку переход защищённых трубопроводов в состояние неработоспособности невозможен, то блокировка защищённого узла не приводит к изменениям в режиме функционирования всей транспортной системы.



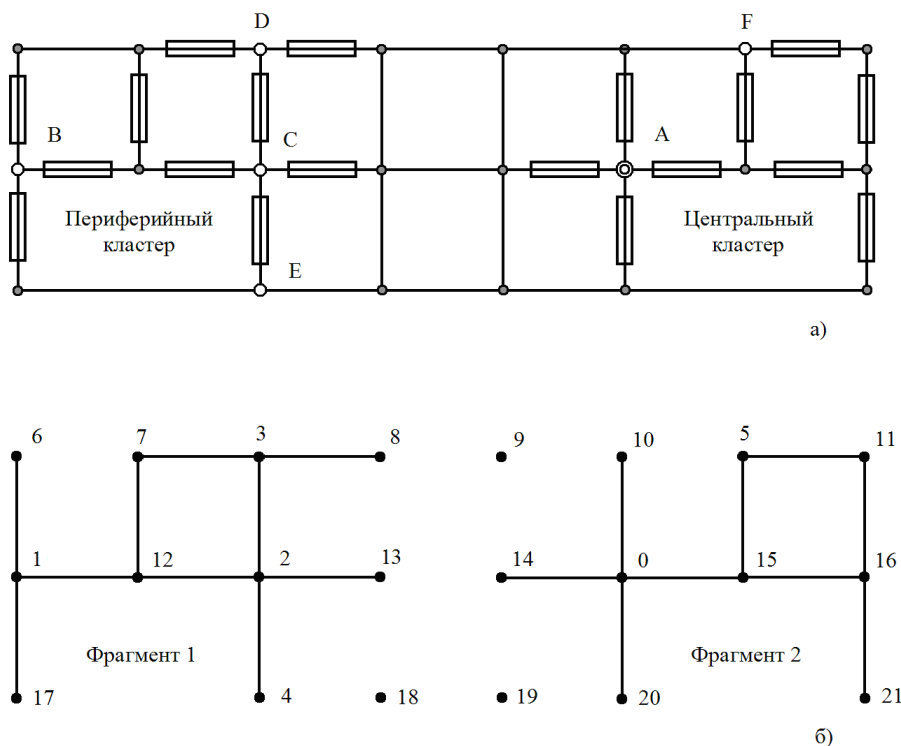


Рис. 2. Структурная схема системы с двумя защитными кластерами (а) и размеченный граф этой системы после завершения процедуры прогрессирующей блокировки узлов (б).

Рассмотрим структурные особенности транспортной системы с тремя защищёнными от блокировки узлами (рис. 1а).

Эти узлы (источник А, потребитель В и распределительный узел) выполняют различные функции и являются изолированными, поскольку они не связаны между собой защищёнными транспортными путями. Кроме того, в каждый из них сходятся только защищённые линейные элементы. Развитие процесса прогрессирующей блокировки приведёт к тому, что система, содержащая изолированные узлы, распадётся на оторванные друг от друга фрагменты (рис. 1б).

Если же защита расположенных поблизости узлов приводит к образованию совокупности взаимосвязанных защищённых линейных элементов, то в системе образуется защищённый фрагмент, способный существенным образом повлиять на её готовность противостоять развитию прогрессирующих повреждений.

Так, на рис. 2а показана структурная схема системы, состоящей из двух защищённых частей, каждая из которых содержит по четыре защищённых узла.

После полного завершения процесса прогрессирующего повреждения произойдёт образование двух не связанных между собой фрагментов, состоящих из неповреждённых линейных элементов системы (рис. 2б).

В теории перколяции подмножество связанных между собой узлов сложной сети принято называть кластером [9, с. 48]. В данном случае совокупность взаимосвязанных защищённых транспортных узлов следует рассматривать как некоторый защитный кластер, наличие которого оказывает влияние на стойкость к повреждениям всего сетевого объекта. Если в составе защитного кластера имеется узел-источник, то такой кластер называется центральным, в противном случае он рассматривается как периферийный. Очевидно, что в составе транспортной системы может быть только один центральный кластер.

Кроме того, узлы-потребители в составе центрального кластера защищены и не могут быть отключены от источника продукта из-за прогрессирующей блокировки. В ту же совокупность входят и пограничные узлы, принадлежащие одновременно кластеру и незащищённой части системы.

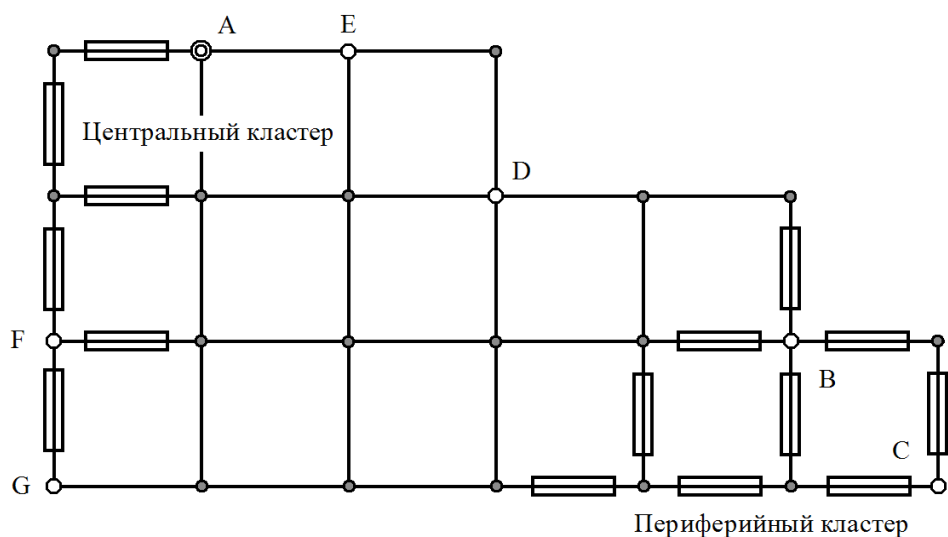


Рис. 3. Структурная схема трубопроводной системы с восемью защищёнными узлами в составе двух кластеров.

Таблица 1

Количественный состав структурных элементов трубопроводной системы

Наименование элемента системы	Количество в составе системы	Примечание
Транспортный узел	24	Включая источник продукта
Повреждаемый узел	16	Включая пограничные узлы
Потребитель продукта	6	
Отключаемый потребитель	4	B, C, D, E
Центральный кластер	1	
Периферийный кластер	1	
Узел-потребитель в составе центрального кластера	2	F, G
Узел-потребитель в составе периферийного кластера	2	B, C
Защищённый потребитель	2	F, G
Пограничный узел в составе центрального кластера	4	Включая источник продукта A
Пограничный узел в составе периферического кластера	3	

С учётом названной особенности блокировка пограничного узла сопровождается переходом в состояние неработоспособности лишь некоторой части трубопроводов, сходящихся в этот узел.

В общем случае защита точечных элементов сетевой структуры транспортных систем связана с возможным образованием некоторого количества:

- защищённых потребителей, которые не могут быть отключены от источника продукта в условиях прогрессирующей блокировки;
- повреждаемых узлов, которые способны изменять своё состояние при их блокировке;

- защитных кластеров, в составе которых могут присутствовать как источник, так и потребители целевого продукта.

Рассмотрим, к примеру, структурную схему трубопроводной системы, показанную на рис. 3. Данные по количественному составу отдельных структурных элементов системы приведены в таблице 1.

Проведённый анализ показал, что при развитии процесса прогрессирующей блокировки узлов порядок отключения от системы оказывается, как правило, следующим: сначала источника лишаются потребители B и C (совместно), затем потребитель D и в последнюю очередь потребитель E.



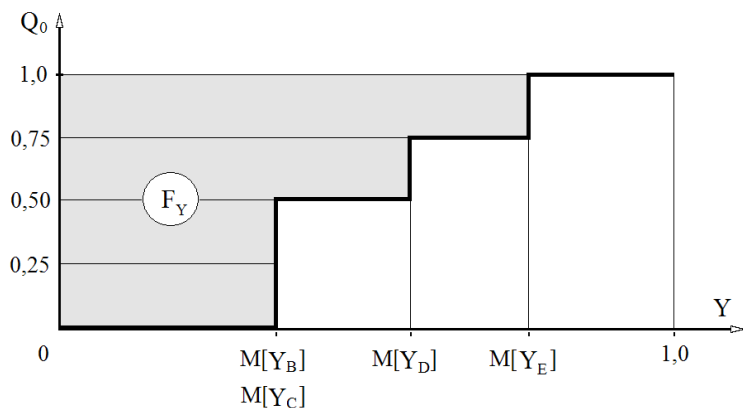


Рис. 4. Диаграмма повреждения сетевой структуры.

## ПОКАЗАТЕЛЬ СТОЙКОСТИ СЕТЕВЫХ СТРУКТУР

Завершение процесса прогрессирующей блокировки повреждаемых узлов всегда приводит к полному разрыву связей с источником всех отключаемых потребителей продукта. Однако в реальных условиях развитие аварийной ситуации заканчивается обычно на начальных этапах повреждения сетевой структуры. В этом случае последствия неблагоприятного сценария событий оказываются менее значительными у систем, обладающих более высоким уровнем стойкости к разрушающим воздействиям.

Для описания динамики процесса прогрессирующей блокировки транспортных узлов систем с защищенными точечными элементами принимаются следующие обозначения:

$U_0$  — общее количество потребителей продукта, отключение которых возможно в аварийной ситуации;

$u$  — количество потребителей, отключенных от источника продукта в текущий момент системного времени;

$Q_0$  — доля потребителей, отключенных от источника в данный момент системного времени от общего числа потребителей ( $Q_0 = u / U_0$ );

$R_y$  — общее количество повреждаемых, незащищенных транспортных узлов (включая пограничные), 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 ( $Y = r_x / R_y$ ).

Оценивая структурную схему на рис. 3, необходимо отметить, что в ней присутствует периферийный кластер с двумя потребителями продукта В и С. Эти потребители связаны между собой защищенными линейными элементами и могут быть отключены от источника продукта только совместно.

Следствием этой структурной особенности является совпадение значений математических ожиданий соответствующих степеней повреждения  $M[Y_B]$  и  $M[Y_C]$  на диаграмме, которая показана на рис. 4.

Определим показатель стойкости сетевой структуры к развитию процесса прогрессирующей блокировки как площадь  $F_Y$  образовавшейся ступенчатой фигуры (рис. 4):

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

То есть, показатель стойкости к развитию процесса прогрессирующей блокировки узлов представляет собой среднее арифметическое значение математических ожиданий степеней блокировки, соответствующих всем возможным фазовым переходам в системе [10].

Разработанный показатель стойкости  $0 \leq F_Y \leq 1$  можно также рассматривать как среднюю долю повреждаемых узлов транспортной системы, блокировка которых приводит к прекращению доставки целевого продукта отключаемым потребителям.

Таким образом,  $F_Y$  является важной структурной характеристикой сетевого объекта с защищенными точечными эле-

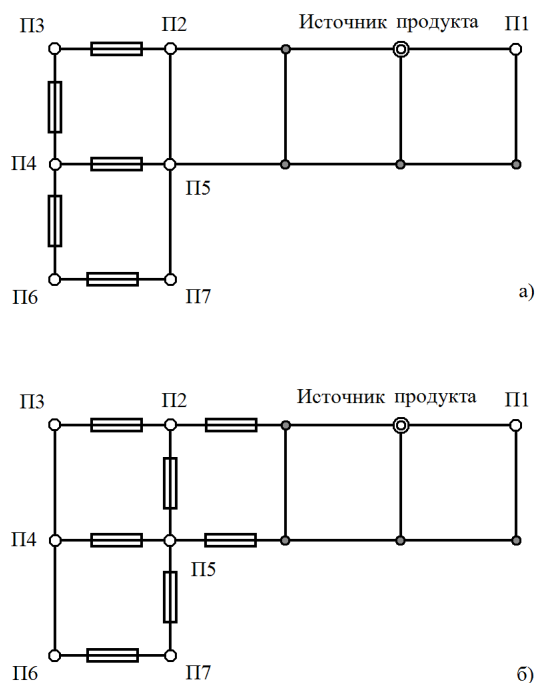


Рис. 5. Структурные схемы трубопроводных систем с условным обозначением STR1 (а) и STR2 (б).

ментами, позволяющей оценивать способность системы противостоять развитию аварийной ситуации по сценарию (алгоритму) прогрессирующей блокировки транспортных узлов. Для расчёта значений показателя стойкости вполне пригоден метод имитационного моделирования, сущность которого изложена в [11, с. 8].

Отметим также, что сетевые объекты с защищёнными точечными элементами в ситуации прогрессирующей блокировки узлов считаются сопоставимыми, если существует принципиальная возможность совмещения их диаграмм повреждения. Установлено, что такое совмещение вероятно, когда анализируемые системы имеют:

- одинаковое число узлов-потребителей, отключение которых от источника продукта возможно в результате развития процесса блокировки;
- одинаковое суммарное количество повреждаемых узлов;
- одинаковое число периферийных кластеров с двумя и более узлами-потребителями и совпадающее количество таких узлов в каждом из них;
- одинаковую последовательность отключения от источника как отдельных потребителей, так и периферийных кластеров с равным числом потребителей продукта.

Если хотя бы одно из перечисленных условий не выполняется, то корректное сравнение установленных значений показателей стойкости систем оказывается невозможным.

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СТОЙКОСТИ

Защита узлов трубопроводных систем может быть реализована с использованием различных организационно-технических приёмов. При этом практический интерес представляют обоснование и выбор наиболее эффективных проектных решений. Среди прочего встаёт и задача структурного синтеза, которая имеет решение, если сравниваемые сетевые структуры являются сопоставимыми [12, с. 81].

Предположим, транспортная система характеризуется структурной схемой STR1, показанной на рис. 5а. В неё входят периферийный кластер с потребителями П2, ... П7, а также отдельный потребитель целевого продукта П1. Характеристики структурного состава системы приведены в таблице 2.

Изменим условия защиты точечных элементов системы, беря в качестве альтернативы схему на рис. 5б. Характеристики альтернативной структуры STR2 также указаны в таблице 2.





Состав и свойства сетевых структур трубопроводных систем

Обозначение сетевой структуры	Количество структурных элементов			Наиболее вероятная последовательность отключения потребителей продукта	Показатель стойкости $F_y$
	Отключаемых потребителей продукта	Повреждаемых узлов	Отключаемых потребителей из состава периферийного кластера		
STR1	8	9	6	Потребители П2, ... П7 (совместно), затем потребитель П1	0,361
STR2	8	9	6	Потребители П2, ... П7 (совместно), затем потребитель П1	0,416

С учётом перечисленных ранее условий сопоставимости и данных таблицы 2 можно сделать заключение, что сетевые структуры STR1 и STR2 удовлетворяют всем обозначенным критериям, а установленные значения показателей стойкости можно корректно сравнивать между собой.

Расчётные значения  $F_y$ , установленные для этих систем, даны в таблице. Анализ показывает, что изменение условий защиты при переходе от структуры STR1 к структуре STR2 приводит к увеличению значений показателя стойкости системы к прогрессирующей блокировке узлов примерно на 15 %.

Это означает, что для полного разрыва связей между источником и потребителями целевого продукта в первом случае необходимо блокировать в среднем примерно 3,25 узла, а во втором — примерно 3,75 узла.

Таким образом, из рассмотренных альтернативных схем защиты трубопроводной системы лучшими свойствами обладает вариант на рис. 5б.

## ВЫВОДЫ

1. Разработанный показатель стойкости трубопроводной системы к процессу прогрессирующей блокировки узлов представляет собой среднюю долю повреждаемых узлов транспортной системы, блокировка которых в случайном порядке приводит к отключению от источника всех потребителей целевого продукта.

2. Корректное сравнение показателей стойкости различных сетевых структур к процессу прогрессирующей блокировки

возможно только при соблюдении установленных условий их сопоставимости.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Тетельмин В. В., Язев В. А. Магистральные нефтегазопроводы. Учеб. пособие / 4-е изд. — Долгопрудный, Московская обл.: Интеллект, 2013. — 352 с.
2. Боровков В. М., Калитюк А. А. Изготовление и монтаж технологических трубопроводов. — М.: Академия, 2007. — 240 с.
3. Теплинский Ю. А., Быков Ю. И. Управление эксплуатационной надёжностью магистральных газопроводов. — М.: ЦентрЛитНефтеГаз, 2007. — 400 с.
4. Шароварников А. Ф., Молчанов В. П., Воевода С. С. и др. Тушение пожаров нефти и нефтепродуктов. — М.: Калан, 2002. — 448 с.
5. Валеев А. Р., Ялалов Д. В. Анализ способов сейсмозащиты магистральных трубопроводов // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. — 2017. — № 3. — С. 38–42.
6. Медведева М. Л., Мурадов А. В., Прыгаев А. К. Коррозия и защита магистральных трубопроводов и резервуаров: Учеб. пособие. — М.: РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина, 2013. — 250 с.
7. Дейнеко С. В. Обеспечение надёжности систем трубопроводного транспорта нефти и газа. — М.: Техника, Тума групп, 2011. — 176 с.
8. Самойленко Н. И., Сенчук Т. С. Функциональная надёжность магистральных трубопроводных транспортных систем. — Харьков: Изд-во НТМТ, 2009. — 276 с.
9. Снарский А. А., Ландэ Д. В. Моделирование сложных сетей: Учеб. пособие. — Киев: Инжиниринг, 2015. — 212 с.
10. Стенли Г. Фазовые переходы и критические явления: Пер. с англ. — М.: Мир, 1973. — 421 с.
11. Тарарычкин И. А., Блинов С. П. Имитационное моделирование процесса повреждения сетевых трубопроводных структур // Мир транспорта. — 2017. — № 2. — С. 6–19.
12. Тарарычкин И. А., Блинов С. П. Моделирование процесса прогрессирующего повреждения трубопроводных транспортных систем с защищёнными линейными элементами // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. — 2018. — № 1. — С. 75–85. ●

Координаты автора: **Тарарычкин И. А.** — donbass\_8888@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 03.12.2018, принята к публикации 18.02.2019.