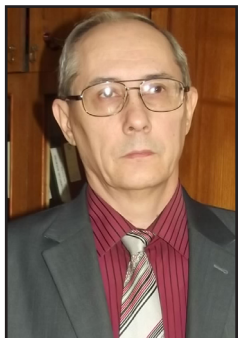




Влияние защиты линейных элементов на стойкость систем трубопроводного транспорта



Игорь ТАРАРЫЧКИН

Igor A. TARARYCHKIN

Impact of Linear Elements Protection on Stability of Pipeline Transport Systems

(текст статьи на англ. яз. – English text of the article – p. 52)

Защита отдельных линейных элементов (трубопроводов) выполняется с использованием технических, технологических и иных мер, обеспечивающих их работоспособность при наличии процесса прогрессирующего повреждения, то есть такого сценария развития аварийной ситуации, когда трубопроводы системы выходят из строя в случайной последовательности. С помощью метода имитационного моделирования установлено, что наибольший защитный эффект наблюдается, если группа трубопроводов расположена вблизи источника продукта, а в составе защищённого фрагмента присутствуют все незащищённые от отключения потребители. Показано, что для защищённого фрагмента системы (симплекса) предпочтительной является топология типа «линия» или «дерево».

Ключевые слова: трубопроводный транспорт, система, стойкость, надёжность, защита, аварийная ситуация, прогрессирующее повреждение, имитационное моделирование.

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


Системы трубопроводного транспорта используют для доставки потребителям сырья, полуфабрикатов, готовой продукции. При этом транспортируемые материалы могут находиться в различном агрегатном состоянии и обладать разными свойствами [1, 2]. Особую опасность представляет процесс доставки взрыво- и пожароопасных веществ, токсичных химических соединений.

Возможное развитие аварийных ситуаций при эксплуатации таких потенциально опасных объектов связано с угрозой для жизни и здоровья персонала, загрязнением окружающей среды и прекращением доставки потребителям целевого продукта [3]. Сценарий развития аварийной ситуации, при котором в состоянии неработоспособности случайным образом переходят отдельные линейные элементы (трубопроводы) системы, в дальнейшем будем называть прогрессирующим повреждением [4].

Развитие прогрессирующего повреждения на некотором этапе приводит к тому, что все потребители оказываются отключёнными от источника продукта, а система теряет способность к воспроизведению функционального эффекта даже в минимальных объёмах.

Таблица 1

Характеристики линейных элементов трубопроводной транспортной системы

Линейный элемент системы, соединяющий между собой:	Графическое изображение элемента	Принадлежность к отдельному подмножеству	Количественный состав элементов подмножества
источник и потребителя		G1	g_1
двух потребителей продукта		G2	g_2
отдельного потребителя и транспортный узел		G3	g_3
два транспортных узла		G4	g_4
источник продукта и транспортный узел		G5	g_5

Для предотвращения перехода отдельных линейных элементов в состояние неработоспособности используют различные технические, технологические и организационные приёмы. К примеру, трубопроводы защищают от коррозии, гидравлических ударов, сейсмических воздействий, перегрева, механических повреждений [5–7].

Такого рода защитные мероприятия являются затратными, однако позволяют повысить способность системы противостоять развитию процесса прогрессирующего повреждения и снизить возможный ущерб от аварийной ситуации.

С этой точки зрения представляется важным изучение влияния защиты линейных элементов трубопроводной системы на развитие процесса прогрессирующего повреждения её сетевой структуры, которая характеризуется наличием множества элементов как отдельных подмножеств G1, ... G5 (таблица 1).

Поскольку при развитии аварийной ситуации по варианту прогрессирующего повреждения защищённые линейные элементы не переходят в состояние неработоспособности, то в дальнейшем под показателем стойкости сетевой структуры $0 \leq F_v \leq 1$ понимается средняя доля незащищённых трубопроводов, переход которых в состояние неработоспособности приводит к отключению от источника всех незащищённых потребителей целевого продукта.

При этом незащищёнными считаются такие потребители продукта, отключение которых от источника в рассматриваемой сетевой структуре оказывается возможным на определённом этапе развития прогрессирующего повреждения.

Определим понятие симплекса как некоторой совокупности взаимосвязанных защищённых линейных элементов в сетевой структуре. Предположим, что в составе симплекса могут быть любые точечные элементы за исключением источника целевого продукта. Это означает, что симплекс может содержать только линейные элементы, принадлежащие подмножествам G2, G3 и G4.

Характеристикой симплекса является размерность, то есть количество входящих в его состав защищённых линейных элементов. Очевидно, что простейший симплекс размерности 2 возникает в результате защиты двух последовательно соединённых линейных элементов.

Корректное сравнение свойств сетевых структур с защищёнными элементами возможно только в том случае, если сопоставляемые объекты имеют в своём составе одинаковое число незащищённых линейных элементов, незащищённых потребителей продукта, а также симплекс одной и той же размерности или несколько симплексов с той же суммарной размерностью.

Изучение влияния эффекта защиты линейных элементов на процесс развития



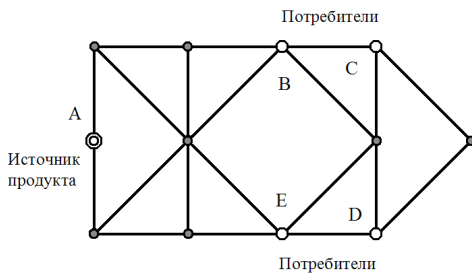


Рис. 1. Структурная схема трубопроводной системы, в составе которой имеется четыре потребителя, 20 линейных элементов и 12 узлов.

прогрессирующего повреждения осуществлялось при помощи метода имитационного моделирования [8, 9]. При реализации компьютерного эксперимента последовательный переход в состояние неработоспо-

собности незащищённых линейных элементов сетевой структуры выполнялся в случайном порядке с оценкой возможности доставки на каждом этапе повреждения незащищённым потребителям целевого продукта.

Для того чтобы понять, как положение симплекса в составе сетевой структуры влияет на эффективность защиты трубопроводной системы, рассмотрим объект, показанный на рис. 1.

Предположим, что для защиты сетевой структуры с 20 линейными элементами будет использован симплекс с размерностью 6. При этом в составе такого симплекса могут находиться любые элементы, за исключением принадлежащих подмножеству G_5 , а его положение в сети может быть

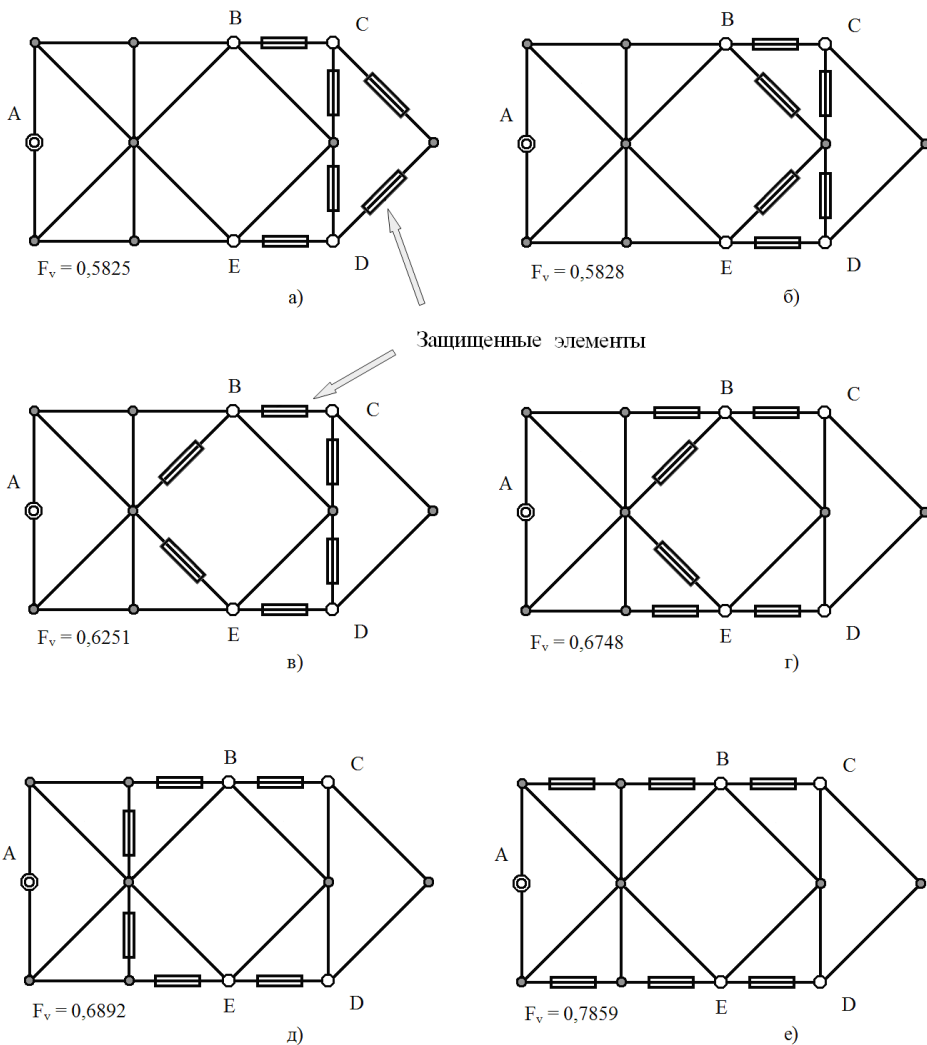


Рис. 2. Рост значений показателя стойкости по мере постепенного смещения элементов симплекса по направлению к источнику продукта.

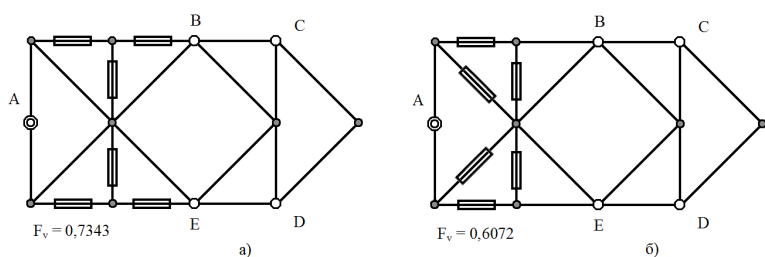


Рис. 3. Уменьшение значений показателя стойкости по мере выхода из состава симплекса размерности 6 потребителей целевого продукта C, D (а) и B, E (б).

произвольным. В этих условиях объекты, образованные на базе исходной структуры и содержащие симплекс с указанными характеристиками, окажутся сопоставимыми. Изменение топологии и положения симплекса в сети позволяет оценить их влияние на стойкость анализируемого сетевого объекта к развитию процесса прогрессирующего повреждения.

Схемы постепенного смещения элементов симплекса по направлению к источнику продукта и результаты расчёта значений F_v для каждого из вариантов защиты приведены на рис. 2 и 3.

Видно, что по мере смещения симплекса к источнику продукта происходит непрерывное увеличение значений F_v (рис. 2а–2е), причём разделение исходного симплекса на два с той же суммарной размерностью не приводит к уменьшению значений показателя стойкости (рис. 2е).

Уменьшение значений F_v наблюдается только на завершающих этапах смещения симплекса, по мере того, как из его состава выводятся потребители целевого продукта (рис. 3).

Таким образом, защиту сетевых объектов с использованием совокупности взаимосвязанных защищённых линейных элементов целесообразно осуществлять с учётом следующих рекомендаций:

1. Симплекс заданной размерности располагают между источником и потребителями целевого продукта.

2. Потребители целевого продукта должны быть по возможности включены в состав симплекса.

3. Эффективность защиты не снижается в том случае, если вместо одного симплекса использовать несколько, с той же суммарной размерностью.

Оценка результатов защиты линейных элементов различных сетевых структур позволяет предположить, что наибольший

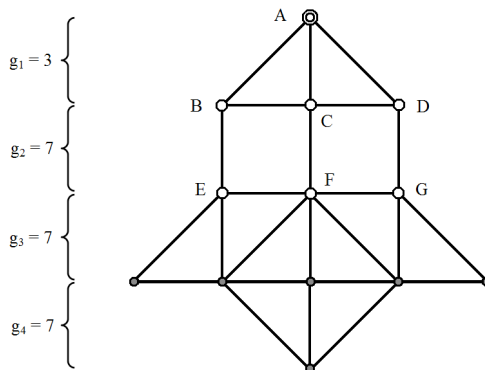


Рис. 4. Структурная схема трубопроводной транспортной системы, а также характеристика количественного состава элементов подмножеств G1–G4.

положительный эффект достигается при защите элементов подмножества G2, расположенных на минимальном «удалении» от источника продукта.

При защите элементов подмножества G3, расположенных на большем «удалении» от источника целевого продукта, эффективность таких мероприятий снижается. Наименьший положительный эффект имеет место в том случае, когда защищаемые элементы подмножества G4 наиболее «удалены» от источника.

Для уточнения представлений о влиянии перечисленных факторов на эффективность защитных мероприятий рассмотрим структурную схему трубопроводной системы, показанную на рис. 4.

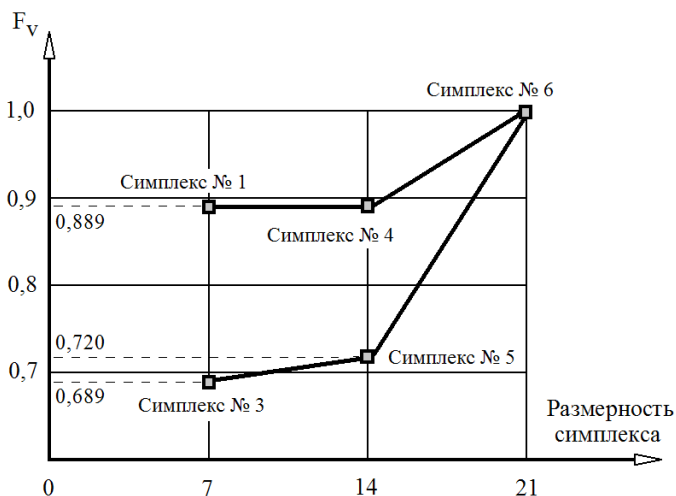
В составе такой системы имеется по семь элементов подмножеств G2, G3 и G4. Кроме того, элементы подмножества G2 расположены на минимальном «удалении» от источника целевого продукта, элементы подмножества G3 находятся на большем «удалении», а подмножества G4 – наиболее далеки от источника. Если защитить рассматриваемый объект при помощи симплекса размерности 7, то следует ожидать,



Характеристики симплексов, используемых для защиты сетевого объекта

Характеристики симплекса			
Обозначение	Размерность	Количественный состав	Структурные особенности
№ 1	7	$g_2 = 7$	Имеет минимальную размерность и находится на минимальном «удалении» от источника
№ 2	7	$g_3 = 7$	Имеет минимальную размерность и находится на некотором «удалении» от источника
№ 3	7	$g_4 = 7$	Имеет минимальную размерность и наиболее «удалён» от источника
№ 4	14	$g_2 = g_3 = 7$	—
№ 5	14	$g_3 = g_4 = 7$	—
№ 6	21	$g_2 = g_3 = g_4 = 7$	Под защитой находятся все возможные линейные элементы симплекса

Рис. 5. Значения показателя стойкости, установленные при использовании различных вариантов защиты сетевого объекта.



что включение в его состав элементов подмножества G2 даст наибольший положительный эффект.

Менее эффективным будет вариант включения в состав симплекса семи элементов подмножества G3, а минимальный

защитный эффект надо ожидать при включении элементов подмножества G4.

Характеристики такого рода симплексов с условным обозначением № 1, № 2 и № 3 приведены в таблице 2.

Вместе с тем при оценке эффективности различных вариантов защиты анализируемой структуры рассматривалась и возможность использования симплексов № 4, № 5, № 6 с размерностью 14 и 21 (таблица 2). Соответствующие расчётные значения показателей стойкости приведены на рис. 5. Видно, что высказанное ранее предположение относительно существования рациональных схем защиты сетевых структур оказывается справедливым.

Так, использование симплекса № 1 для защиты сетевого объекта оказывается наиболее эффективным, хотя в его составе имеется всего лишь семь защищённых элементов. Увеличение размерности симплекса за счёт включения в его состав новых элементов, принадлежащих под-

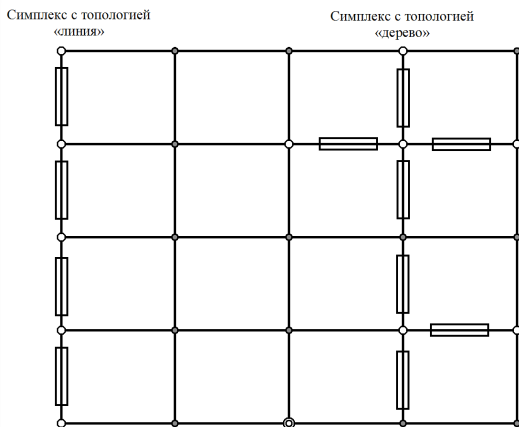


Рис. 6. Схема защиты сетевого объекта с использованием двух симплексов с размерностью 4 и 7.

множеству G3, не приводит к росту величины F_v (рис. 5). Наибольшего значения показатель стойкости достигает только в случае использования симплекса № 6 с размерностью 21.

Именно такая схема наращивания размерности симплекса должна рассматриваться как рациональная и позволяющая наиболее эффективным образом использовать имеющийся ресурсный потенциал.

Кроме того, анализ представленных на рис. 5 данных позволяет заключить, что наихудший вариант защиты имеет место при использовании симплекса № 3, построенного на основе элементов подмножества G4. При этом дальнейший рост размерности симплекса — за счёт дополнительного включения в его состав элементов подмножества G3, а затем и G4 — сопровождается непрерывным увеличением значений F_v . Очевидно, что в этом случае имеющийся ресурс, связанный с возможностью защиты сетевого объекта путём включения в состав симплекса дополнительных линейных элементов, используется не эффективно.

Получается, что наряду с рациональными схемами образования симплексов как инструмента защиты сетевых объектов существуют и иррациональные решения, характеризующиеся низкой эффективностью.

С практической точки зрения особый интерес представляет анализ ситуации, при которой требуемый уровень защиты сетевой структуры может быть достигнут с использованием симплекса минимальной размерности. Тогда отдельный симплекс должен представлять собой «линию» или более сложный объект типа «дерево» [10].

На рис. 6 показан пример формирования двух симплексов с топологией «линия» и «дерево», в составе которых присутствуют все потребители целевого продукта.

Здесь, однако, нужно иметь в виду, что полученное таким образом решение чаще всего бывает неоднозначным, а принятие окончательного варианта и выбор схемы защиты следует осуществлять путём оценки и сопоставления дополнительных ха-

рактеристик альтернативных проектных решений [11].

ВЫВОДЫ

1. Установлено, что использование симплексов в составе сетевой структуры трубопроводных транспортных систем является эффективным инструментом обеспечения их стойкости к прогрессирующим повреждениям.

2. Наибольший защитный эффект наблюдается в том случае, когда симплекс расположен вблизи источника, а в его состав включены все незащищённые потребители целевого продукта.

3. При защите от прогрессирующего повреждения наиболее предпочтительным является использование симплексов с топологией «линия» и «дерево». В этом случае требуемый положительный эффект достигается в условиях минимизации числа защищаемых линейных элементов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Васильев Г. Г. Трубопроводный транспорт нефти: Учебник для вузов / Г. Г. Васильев, Г. Е. Коробков, А. А. Коршак и др. — М.: Недра-Бизнесцентр, 2002. — Т. 1. — 407 с.
2. Коршак А. А., Нечваль А. М. Проектирование и эксплуатация газонефтепроводов: Учебник. — Ростов-на-Дону: Феникс, 2016. — 540 с.
3. Мазур И. И., Иванцов О. М. Безопасность трубопроводных систем. — М.: Елима, 2004. — 1104 с.
4. Тарарычкин И. А. Структурный синтез трубопроводных транспортных систем, стойких к повреждениям линейных элементов // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. — 2017. — Вып. 1. — С. 96–106.
5. Дейнеко С. В. Обеспечение надёжности систем трубопроводного транспорта нефти и газа. — М.: Техника, Тума групп, 2011. — 176 с.
6. Теплинский О. А., Быков И. Ю. Управление эксплуатационной надёжностью магистральных газопроводов. — М.: Центрилитнефтегаз, 2007. — 400 с.
7. Валеев А. Р., Ялалов Д. В. Анализ способов сейсмозащиты магистральных трубопроводов // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. — 2017. — № 3. — С. 38–42.
8. Строгалев В. П., Толкачева И. О. Имитационное моделирование: Учеб. пособие. — 2-е изд. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2015. — 295 с.
9. Кельтон Д., Лоу А. Имитационное моделирование. — 3-е изд. — СПб.; Киев: Изд. группа ВНУ, 2004. — 847 с.
10. Домнин Л. Н. Элементы теории графов: Учеб. пособие. — Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2007. — 144 с.
11. Антонов А. В. Системный анализ: Учебник. — М.: Высшая школа, 2004. — 454 с.

Координаты автора: **Тарарычкин И. А.** — donbass_8888@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 11.10.2017, принята к публикации 02.12.2017.

