DOI: 10.17122/ntj-oil-2018-1-75-85

УДК 519.688

И.А. Тарарычкин (Луганский национальный университет имени Владимира Даля, г. Луганск, ЛНР, Украина), **С.П. Блинов** (Удмуртский государственный университет, г. Ижевск, Российская Федерация)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОГРЕССИРУЮЩЕГО ПОВРЕЖДЕНИЯ ТРУБОПРОВОДНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ С ЗАЩИЩЕННЫМИ ЛИНЕЙНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

I.A. Tararychkin (Lugansk National University named after Vladimir Dahl, Lugansk, LNR, Ukraine), **S.P. Blinov** (Udmurt State University, Izhevsk, Russian Federation)

MODELING OF THE PROCESS OF PROGRESSIVE DAMAGE TO PIPELINE TRANSPORT SYSTEMS WITH PROTECTED LINEAR ELEMENTS

Введение

Трубопроводные транспортные системы используют в различных областях промышленности для доставки потребителям нефтепродуктов, природного газа и других веществ, необходимых для протекания технологических процессов.

Повреждения структурных элементов таких систем могут стать причиной изменения режимов их функционирования, а в некоторых случаях и отключения потребителей от источника целевого продукта. Для повышения стойкости сетевых структур к прогрессирующим повреждениям, необходимо применять мероприятия, направленные на защиту отдельных линейных элементов.

Цели и задачи

Разработать программу имитационного моделирования процесса повреждения сетевых структур трубопроводных транспортных систем.

Методы

Расчеты проводились с использованием программы имитационного моделирования, разработанной в системе MathCAD.

Background

Pipeline transport systems are used in various industries to deliver petroleum products, natural gas and others necessary for technological processes to consumers.

Damages of such systems structural elements can lead to their functioning mode changes, and in some cases may be a reason of consumers disconnection from the source of the target product. To increase the resistance of network structures to progressive damage, it is necessary to apply measures aimed at protecting individual linear elements.

Aims and Objectives

To develop a program simulating the process of network structures damage of pipeline transport systems.

Methods

The calculations were carried out using the simulation software developed in the MathCAD system.

Результаты

Установлено, что для различных схем защиты сетевых структур значения показателей стойкости могут отличаться на 50 %, что подтверждает важность принятия обоснованных проектных решений при решении задач, связанных с защитой линейных элементов трубопроводных систем.

Практическая ценность полученного в работе результата заключается в том, что разработанный программный продукт может быть использован при оценке и прогнозировании поведения трубопроводных транспортных систем в случае развития аварийных ситуаций.

Results

It is established that for various schemes of protection of network structures the values of the resistance indicators can differ by 50 %. It confirms the importance of making well-grounded design decisions in solving problems related to pipeline systems linear elements protection.

The practical value of the result obtained in the work is that the developed software product can be used in assessing and predicting the behavior of pipeline transport systems in case of emergency.

Ключевые слова: трубопроводная система, структура, повреждения, стойкость, сеть, защита

Key words: pipeline system, structure, damages, durability, network, protection

Трубопроводные транспортные системы используют в различных областях промышленности для доставки потребителям нефтепродуктов, природного газа и других веществ, необходимых для протекания технологических процессов. Повреждения структурных элементов таких систем могут стать причиной изменения режимов их функционирования, а в некоторых случаях и отключения потребителей от источника целевого продукта [1-3].

Наибольшую опасность представляют аварийные ситуации, когда в течение короткого промежутка времени в состояние неработоспособности переходит большое число трубопроводов, а их ремонт и быстрое восстановление затруднены по объективным причинам. Это может быть связано с возникновением пожаров, сейсмической активностью, сдвигов грунта и других событий [4-6].

Кроме того, причины возникновения и развития аварийных ситуаций могут быть связаны и с негативными процессами, протекающими в самой системе. Например, развитие коррозии под напряжением, гидравлические удары, внезапные разрушения при дей-

ствии вибрационной нагрузки с образованием резонансных состояний и т.п.

Развитие такого рода событий, связанных с повреждением некоторого количества линейных элементов (трубопроводов), характеризуется наличием следующего ряда особенностей:

1. Предсказать в каком месте и в какой момент времени произойдет повреждение отдельного трубопровода нельзя;
2. Невозможно указать количество трубопроводов, которые перейдут в состояние неработоспособности при развитии в системе аварийной ситуации;
3. Последствия развития аварийной ситуации для отдельных потребителей целевого продукта предсказать весьма проблематично.

В дальнейшем такого рода процесс, связанный с последовательным переходом в случайном порядке в состояние неработоспособности отдельных линейных элементов системы, называется прогрессирующим повреждением.

Повысить стойкость трубопроводной системы к развитию процесса прогрессирую-

щего повреждения можно за счет использования защитных мероприятий по отношению к отдельным линейным элементам [7-9].

Это могут быть мероприятия проектного характера, инженерно-технические, эксплуатационные, организационные и иные меры, направленные на обеспечение безотказного функционирования трубопроводов при развитии аварийной ситуации.

Таким образом, защищенные линейные элементы в дальнейшем рассматриваются как неповреждаемые объекты, способные сохранять состояние работоспособности в течение рассматриваемого периода эксплуатации. Такого рода формализация свойств защищенных линейных элементов позволяет рассматривать их в качестве объектов, способных мгновенно восстанавливать состояние работоспособности после нанесенного повреждения без каких-либо последствий для функционирования системы.

При наличии в составе системы защищенных линейных элементов показатель стойкости незащищенной части $0 \leq F_v \leq 1$ определяется как средняя доля от общего числа незащищенных трубопроводов, переход которых в случайной последовательности к состоянию неработоспособности сопровождается отключением всех незащищенных потребителей от источника целевого продукта.

Расчетное определение значений показателя стойкости позволяет оценивать эффективность защитных мероприятий и принимаемых проектных решений, направленных на повышение стойкости трубопроводных транспортных систем к развитию аварийных ситуаций по механизму прогрессирующего повреждения.

Целью настоящей работы является разработка и оценка возможностей компьютерной программы имитационного моделирования процесса прогрессирующего повреждения сетевых структур трубопроводных транспортных систем с защищенными линейными элементами.

Расчет значений показателя стойкости F_v выполнялся с использованием программы имитационного моделирования, разработанной в системе MathCAD [10].

На этапе ввода исходных данных заданными считаются:

- количество транспортных узлов в составе системы;
- общее число повреждаемых (незащищенных) и защищенных линейных элементов;
- количество потребителей целевого продукта, защищенных и незащищенных от отключения.

Сетевая структура трубопроводной системы в исходном состоянии характеризуется размеченным графом, который описывается матрицей смежности *Matsm*. После окончания процесса прогрессирующего повреждения структура системы задается размеченным графом, который описывается матрицей смежности *Matk*.

Переход системы из начального в конечное состояние связан с процедурой случайного «обнуления» соответствующих элементов бинарной матрицы *Matsm*. При этом процесс разрыва связей осуществляется до тех пор, пока все потребители не будут отключены от источника целевого продукта. Фрагмент расчетного модуля программы имитационного моделирования, позволяющей реализовать указанный расчетный алгоритм, показан на рисунке 1.

С иллюстративной целью на рисунке 1 приводится также краткая характеристика отдельных вычислительных блоков, поясняющая их функциональное назначение.

Многократный перезапуск программы имитационного моделирования с фиксацией на каждом из этапов количества элементов, повреждение которых приводит к разрыву связей между источником и всеми незащищенными потребителями продукта, позволяет сформировать статистическую базу данных.

В дальнейшем такая база использовалась для оценки характеристик случайной величины F_v и свойств анализируемой сетевой структуры.

Рассмотрим в этой связи конкретный пример. Исходная структурная схема трубопроводной транспортной системы с источником А и тремя защищенными линейными элементами показана на рисунке 2.

Расчетный модуль программы

Формирование системы матриц с пошаговым обнулением элементов матрицы смежности, осуществляемым в случайном порядке и характеризующим процесс постепенного повреждения структуры заданного графа

$Del(M, m) :=$ $\left(\begin{array}{l} (yes \leftarrow 1 \quad n \leftarrow rows(M) - 1) \\ A_{0,0} \leftarrow A_{n,n} \leftarrow 0 \\ \text{while } yes \\ \quad (i \leftarrow round(rnd(n)) \quad j \leftarrow round(rnd(n))) \\ \quad A_{i,j} \leftarrow A_{j,i} \leftarrow 1 \quad \text{if } m_{i,j} = 1 \\ \quad yes \leftarrow M_{i,j} = 0 \quad \text{otherwise} \\ M_{i,j} \leftarrow M_{j,i} \leftarrow 0 \\ [(i \quad j) \quad M \quad A] \end{array} \right.$

Зануление случайно выбранного единичного элемента матрицы M за исключением неприкасаемых единичек матрицы m .
Запоминание числа атак на неприкасаемых (в матрице A) и индексов удаленных единичек (i, j).

$Doloj(M, m, N) :=$ $\left(\begin{array}{l} (a_0 \leftarrow M \quad Ind_0 \leftarrow "(i \quad j)") \\ \text{for } k \in 1..N \\ \quad (Ind_k \quad a_k \quad A) \leftarrow Del(a_{k-1}, m) \\ (Ind \quad a \quad A) \end{array} \right.$

Последовательное зануление всех единичных элементов. На каждом шаге зануляется один случайно выбранный элемент (без учета "неприкасаемых").

Формирование системы матриц достижимости на основе полученной системы матриц смежности, их нормировка и вывод результатов

$NormExit(MM, mm, r) :=$ $\left(\begin{array}{l} str \leftarrow ("№ \text{повреждения}" \quad "Индексы поврежденных элементов") \\ str \leftarrow augment(str, "Число атак на неприкасаемых", "Время перехода") \\ str \leftarrow augment(str, "Результат") \\ N \leftarrow \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=0}^{rows(MM)-1} \sum (MM - mm)^{\langle i \rangle} \\ (Ind \quad b \quad Atak) \leftarrow Doloj(MM, mm, N) \\ \text{for } k \in 0..last(b) \\ \quad \left[\begin{array}{l} c_k \leftarrow \sum_{i=1}^r (b_k)^i \quad d_k \leftarrow c_k > 0 \\ pp_k \leftarrow k \quad u^{\langle k \rangle} \leftarrow (d_k^T)^{\langle 0 \rangle} \end{array} \right] \\ nnn \leftarrow \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=0}^{rows(MM)-1} \sum Atak^{\langle i \rangle} \\ tp \leftarrow concat(num2str(N), "+", num2str(nnn)) \\ u \leftarrow stack[str, (pp \quad Ind \quad Atak \quad tp \quad u^T)] \\ (b \quad c \quad d \quad u) \end{array} \right.$

$(b \quad c \quad d \quad u) := NormExit(Matsm, Matk, r)$

str - шапка результата
 Ind - массив индексов обрабатываемых элементов матрицы MM
 b - матрицы достижимости
 N - число зануляемых элементов
 $Atak$ - матрица числа наездов на неприкасаемых
 c - матрицы смежности
 d - нормированные матрицы смежности
 pp - № - порядковый номер операций
 tp - время перехода (число ходов)
 u - результат
выходные объекты

Рисунок 1. Листинг расчетного модуля программы

Исходные данные для расчетов

Исходная матрица смежности графа:

$$Mat_{sm} := \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

количество ребер
графа:

$$k := 7$$

количество вершин
графа:

$$r := 8$$

количество потребителей
целевого продукта:

$$upot := 5$$

количество незащищенных
линейных элементов:

$$knz := 4$$

количество потребителей,
защищенных от отключения:

$$kzp := 2$$

Конечная матрица смежности графа:

$$Mat_k := \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Расчетная схема:

Рисунок 4. Листинг блока исходных данных

По итогам многократной реализации вычислительного процесса осуществлялись сбор и обработка статистических данных с целью дальнейшего определения таких характеристик случайной величины F_V , как

среднее арифметическое значение и стандартное отклонение среднего.

Рассмотрим теперь проектную задачу, связанную с выбором схемы защиты линейных элементов и оценки ожидаемых характе-

ристик стойкости, принятых вариантов защиты сетевых объектов.

Предположим, требуется оценить стойкость к развитию процесса прогрессирующего повреждения сопоставимых трубопроводных систем, структурные схемы которых изображены на рисунке 6.

Различия между анализируемыми объектами обусловлены разницей в выборе расположения защищаемых от повреждения 3-х линейных элементов.

Исходное состояние графов рассматриваемых структур с учётом принятой схемы обозначения вершин показано на рисунке 7, а, конечное состояние анализируемых объектов после окончания процедуры прогрессирующего повреждения - на рисунке 8.

Соответствующие матрицы смежности для рассматриваемых альтернативных вариантов защиты линейных элементов приведены в таблице 1. В этой же таблице 1 представлены и результаты имитационного моделирования процесса прогрессирующего повреждения. Видно, что отключение незащищенных потребителей от источника целевого продукта происходит при последовательном

переходе в состояние неработоспособности примерно 49 % всех незащищенных трубопроводов для первой расчетной схемы и примерно 31 % - для второй.

Поскольку незащищенная от повреждения часть сетевой структуры содержит 12 линейных элементов, то отключение всех потребителей от источника целевого продукта в первом случае будет происходить при повреждении в среднем около 6-ти, а во втором случае около 4-х трубопроводов.

Количество линейных элементов, которое будет повреждено в первом случае больше, чем во втором на 50 %; притом что отличия между анализируемыми системами являются минимальными и связаны лишь с выбором расположения одного и того же количества защищаемых линейных элементов.

Таким образом, выбор схемы защиты структурных элементов трубопроводных транспортных систем с целью достижения высоких значений показателя стойкости к прогрессирующим повреждениям представляет собой актуальную практическую задачу, которая может быть решена с использованием разработанного программного алгоритма.

Рисунок 5. Форма представления результатов выполненных расчетов

Рисунок 6. Структурные схемы трубопроводных систем с защитой 3-х линейных элементов, расположенных справа (а) и слева (б) от источника продукта

Рисунок 7. Размеченные графы, характеризующие состояние объектов с правосторонней (а) и левосторонней (б) защитой линейных элементов до начала процедуры прогрессирующего повреждения

Рисунок 8. Размеченные графы, характеризующие состояние сетевых объектов с правосторонней (а) и левосторонней (б) защитой линейных элементов после окончания процедуры прогрессирующего повреждения

Таблица 1. Матрицы смежности, используемые в расчетах и результаты имитационного моделирования процесса прогрессирующего повреждения сетевых структур

Структурная схема, показанная на рисунке	Матрицы смежности <i>Mat_{sm}</i> , характеризующие начальное состояние сетевого объекта	Матрицы смежности <i>Mat_k</i> , характеризующие конечное состояние сетевого объекта	Показатель стойкости F_V
1	2	3	4
б, а (защита правой части)	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$	0,49

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4
б, б (защита левой части)	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	0,31

Выводы

1. Установлено, что стойкость трубопроводных транспортных систем к развитию процесса прогрессирующего повреждения является функцией сетевой структуры и принятой схемы защиты линейных элементов.

2. Разработана и опробована на конкретных примерах программа имитационного моделирования процесса прогрессирующего

повреждения систем трубопроводного транспорта. Положительный итог тестирования программы позволяет рекомендовать её для решения проектных задач, связанных с выбором эффективных схем защиты систем трубопроводного транспорта, и минимизации негативных последствий возможного развития аварийных ситуаций по механизму прогрессирующего повреждения.

Список литературы

1. Теплинский Ю.А., Быков Ю.И. Управление эксплуатационной надежностью магистральных газопроводов. М.: ЦентрЛитНефтеГаз, 2007. 400 с.
2. Самойленко Н.И., Сенчук Т.С. Функциональная надежность магистральных трубопроводных транспортных систем / Под ред. Н.И. Самойленко. Харьков: Изд-во НТМТ, 2009. 276 с.
3. Масловский В.В. Формирование свойств надежности элементов транспортных трубопроводных энергетических систем и региональной экологической безопасности при их производстве и ремонте. Харьков: ХНАГХ, 2009. 254 с.
4. Мансуров О.И., Мансуров И.Я. Системы повышения устойчивости магистральных трубопроводов, прокладываемых в сейсмических районах

References

1. Teplinskii Yu.A., Bykov Yu.I. *Upravlenie ekspluatatsionnoi nadezhnost'yu magistral'nykh gazoprovodov* [Management of Operational Reliability of Main Gas Pipelines]. Moscow, TsentrLitNefteGaz, 2007. 400 p. (in Russ.).
2. Samoilenko N.I., Senchuk T.S. *Funktsional'naya nadezhnost' magistral'nykh truboprovodnykh transportnykh sistem* [Functional Reliability of Main Pipeline Transport Systems]. Khar'kov, Izd-vo NTMT, 2009. 276 p. (in Russ.).
3. Maslovskii V.V. *Formirovanie svoistv nadezhnosti elementov transportnykh truboprovodnykh energeticheskikh sistem i regional'noi ekologicheskoi bezopasnosti pri ikh proizvodstve i remonte* [Formation of Reliability Properties of Transport Pipeline Energy Systems El-

// Трубопроводный транспорт (теория и практика). 2007. № 2 (8). С. 78-83.

5. Кофф Г.Л., Иванова А.М., Чеснокова И.В. Риск цунами на примере площадки бухты Козьмино // Трубопроводный транспорт (теория и практика). 2007. № 4 (10). С. 88-91.

6. Тушение пожаров нефти и нефтепродуктов / А.Ф. Шароварников, В.П. Молчанов, С.С. Воевода и др. М.: Калан, 2002. 448 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. Ткаченко В.Н. Электрохимическая защита трубопроводных сетей. 2-е изд. М.: Стройиздат, 2004. 320 с.

9. Медведева М.Л., Мурадов А.В., Прыгаев А.К. Коррозия и защита магистральных трубопроводов и резервуаров. М.: Изд-во РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2013. 250 с.

10. Строгалев В.П., Толкачева И.О. Имитационное моделирование. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. 295 с.

11. Емеличев В.А., Мельников О.И. и др. Лекции по теории графов. М.: Либроком, 2012. 392 с.

ements and Regional Environmental Safety during their Production and Repair]. Khar'kov, KhNAGKh, 2009. 254 p. (in Russ.).

4. Mansurov O.I., Mansurov I.Ya. Sistemy povysheniya ustoichivosti magistral'nykh truboprovodov, prokladyvaemykh v seismicheskikh raionakh [Systems for Increasing the Stability of Trunk Pipelines Paved in Seismic Regions]. *Truboprovodnyi transport (teoriya i praktika) - Pipeline Transport (Theory and Practice)*, 2007, No. 2 (8), pp. 78-83. (in Russ.).

5. Koff G.L., Ivanova A.M., Chesnokova I.V. Risk tsunami na primere ploshchadki bukhty Koz'mino [Tsunami Risk in the Example of the Kozmino Bay Site]. *Truboprovodnyi transport (teoriya i praktika) - Pipeline Transport (Theory and Practice)*, 2007, No. 4 (10), pp. 88-91. (in Russ.).

6. Sharovarnikov A.F., Molchanov V.P., Voevoda S.S. e.a. *Tushenie pozharov nefii i nefteproduktov* [Extinguishing Fires of Oil and Oil Products]. Moscow, Kalan, 2002. 448 p. (in Russ.).

7. Valeev A.R., Yalalov D.V. Analiz sposobov seizmozashchity magistral'nykh truboprovodov [Analysis of main pipelines seismic protection methods]. *Transport i khranenie nefteproduktov i uglevodorodnogo syr'ya - Transport and Storage of Petroleum Products and Hydrocarbon Raw Materials*, 2017, No. 3, pp. 38-42. (in Russ.).

8. Tkachenko V.N. *Elektrokhimicheskaya zashchita truboprovodnykh setei* [Electrochemical Protection of Pipeline Networks]. 2-e izd. Moscow, Stroizdat, 2004. 320 p. (in Russ.).

9. Medvedeva M.L., Muradov A.V., Prygaev A.K. *Korroziya i zashchita magistral'nykh truboprovodov i rezervuarov* [Corrosion and Protection of Main Pipelines and Reservoirs]. Moscow, Izd-vo RGU nefii i gaza im. I.M. Gubkina, 2013. 250 p. (in Russ.).

10. Strogalev V.P., Tolkacheva I.O. *Imitatsionnoe modelirovanie* [Simulation Modeling]. Moscow, Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman, 2015. 295 p. (in Russ.).

11. Emelichev V.A., Mel'nikov O.I. e.a. *Lektsii po teorii grafov* [Lectures on Graph Theory]. Moscow, Librokom, 2012. 392 p. (in Russ.).

Авторы

• Тарарычкин Игорь Александрович, д-р техн. наук, доцент
Луганский национальный университет
имени Владимира Даля
Профессор кафедры «Транспортные системы»
Украина, ЛНР, 90034, г. Луганск, кв. Молодежный,
20 А
e-mail: donbass_8888@mail.ru

• Блинов Семен Павлович, канд. физ.-мат. наук
Удмуртский государственный университет
Доцент кафедры «Математический анализ»
Российская Федерация, 426034, г. Ижевск,
ул. Красноггеройская, 71
e-mail: blinov38@mail.ru

The Authors

• Tararychkin Igor A., Doctor of Technical Sciences,
Associate Professor
Lugansk National University
named after Vladimir Dahl
Professor of Transport Systems Department
20 A, Molodjozny, Lugansk, 90034, LPR, Ukraine
e-mail: donbass_8888@mail.ru

• Blinov Semen P., Physical and Mathematical
Sciences
Udmurt State University
Assistant Professor of Mathematical Analysis
Department
71, Krasnogeroykaya str., , Izhevsk, 426034,
Russian Federation
e-mail: blinov38@mail.ru