

В.А. Острейковский, А.О. Генюш, Я.В. Силин

МОДЕЛИ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ НЕФТЕПРОМЫСЛОВЫХ ТРУБОПРОВОДОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕОРИИ КАТАСТРОФ

Рассматривается новая концепция оценки надежности промышленных трубопроводов с применением теории катастроф. Приведены аналитические зависимости для определения показателей надежности методами теории катастроф и моделей «нагрузка — несущая способность».

Модели, надежность, нефтепромысловые трубопроводы.

Введение

В настоящее время в России в предаварийном состоянии находятся промышленные трубопроводные системы большинства нефтедобывающих предприятий. На территории страны эксплуатируются около 350 тыс. км нефтепромысловых трубопроводов (НПТ), на которых ежегодно отмечается свыше 50 тыс. отказов, приводящих к огромным потерям нефти и загрязнению окружающей среды. Основными причинами высокой аварийности при эксплуатации трубопроводов являются: прогрессирующее старение действующих нефтепромысловых трубопроводов, сокращение ремонтных мощностей, низкие темпы работ по замене отработавших срок трубопроводов на трубопроводы с антикоррозионными покрытиями.

Методы теории катастроф для оценки надежности

С конца 50-х гг. XX в. в теории управления начало развиваться направление, связанное с анализом устойчивости динамических систем, выросшее в математическую теорию катастроф. Центральным понятием теории является термин «катастрофа». В.И. Арнольд дает следующее определение этого понятия: катастрофа — это скачкообразное изменение, возникающее в виде внезапного ответа системы на плавное изменение внешних условий [1].

Классическая физика — это по существу теория плавного поведения систем. Но изменения совершаются и скачками. Коррозия и эрозия стенки трубы развиваются медленно, но при определенных условиях в момент времени t_k происходит разрыв трубопровода (рис. 1, 2). Внезапные изменения в поведении систем описывают два раздела теории катастроф: особенностей гладких отображений Уитни и бифуркаций динамических систем Пуанкаре и Андронова [1–7].

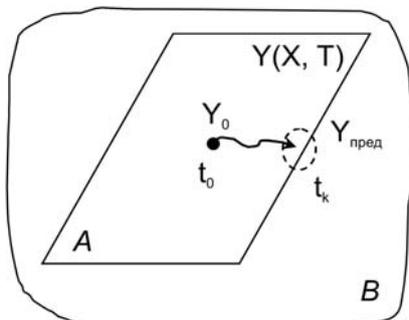


Рис. 1. Двумерная схема перехода системы из работоспособного состояния (область A) в неработоспособное (область B)

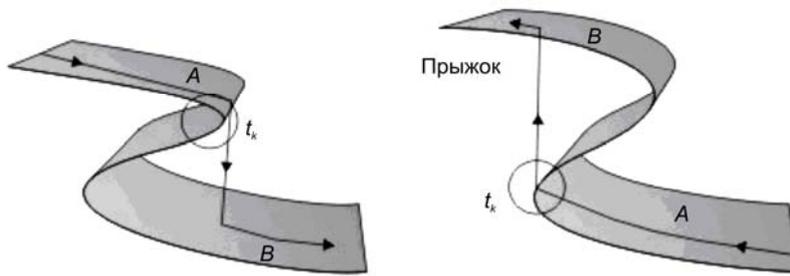


Рис. 2. Прыжок катастрофы: убывающий и возрастающий характер изменения выходного параметра $Y(t)$

Из всего разнообразия описанных моделей катастроф в данной статье была выбрана модель катастрофы сборки. Потенциальная энергия, характеризующая состояние НПТ, для катастрофы сборки имеет вид

$$E_{ab}(x) = \frac{1}{4}x^4 + \frac{1}{2}ax^2 + bx, \quad (1)$$

где коэффициенты a и b — параметры управления.

Многообразие катастрофы или поверхность равновесия (рис. 3) задается уравнением

$$x^3 + ax + b = 0. \quad (2)$$



Рис. 3. Многообразие катастрофы сборки в пространстве xab

Согласно принципу максимального промедления катастрофа наступает в момент выхода параметров управления системы из зоны I (зона работоспособности). При этом происходит скачкообразное изменение состояния системы, называемое катастрофой.

В [6, 7] рассмотрен математический аппарат для определения вероятности катастрофы сборки. Катастрофа сборки рассмотрена со стохастических позиций. Переменные управления a и b в общем случае изменяются во времени, при этом состояние объекта будет определяться случайным процессом изменения детерминанта $D(a, b, t)$. Объект теряет устойчивость (наступает

катастрофа), когда траектория точки (a, b) покидает область работоспособности I (рис. 3). При этом D изменяет знак с отрицательного на положительный.

Для случая, когда случайная величина D распределена по нормальному закону, формула для приближенной оценки вероятности катастрофы сборки (вероятности отказа) имеет вид [5–8]

$$Q = \frac{1}{2} + \Phi\left(\frac{m_D}{\sigma_D}\right), \quad (3)$$

где m_D и σ_D — соответственно математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение детерминанты D , в общем случае зависящие от времени:

$$m_D = 4m_a^3 + 27m_b^2, \quad (4)$$

$$\sigma_D^2 = 144m_a^4\sigma_a^2 + 2916m_b^2\sigma_b^2. \quad (5)$$

Для применения модели катастрофы сборки (1) при расчете характеристик надежности НПП произведем замену переменных и выразим управляющие параметры a и b через параметры несущей способности $r(t)$ и нагрузки $s(t)$:

Предположим, что параметр управления $b(t)$ равен нагрузке $s(t)$:

$$b(t) = s(t). \quad (6)$$

Принимаем, что момент времени $T_{\eta=1}$ (момент равенства нагрузки и несущей способности, η — коэффициент запаса работоспособности объекта) для модели ННС совпадает с моментом достижения параметрами управления a и b границы области работоспособности I для катастрофы сборки. На основе этого положения представляется возможным выразить параметр катастрофы $a(t)$ через несущую способность $r(t)$ и нагрузку $s(t)$ для линейной модели изменения несущей способности и фиксированной нагрузки.

Параметры a и b связаны выражением

$$4a^3 + 27b^2 = 0, \quad (7)$$

откуда

$$a = \sqrt[3]{-\frac{27b^2}{4}}. \quad (8)$$

Примем линейную модель уменьшения несущей способности объекта во времени:

$$r(t) = c + d \cdot t, \quad (9)$$

где c, d — коэффициенты модели.

Используя выражения (6)–(9), можно перейти от модели надежности «нагрузка — несущая способность» к модели «катастрофа сборки» для принятого случая линейной модели изменения несущей способности и фиксированной нагрузки. Далее, с помощью метода, описанного выше (3), производится расчет вероятности возникновения катастрофы сборки в зависимости от времени. Эта вероятность является аналогом вероятности отказа в теории надежности.

Алгоритм оценки показателей надежности систем НТП с применением теории катастроф предлагается следующим:

1) с помощью уравнений статистической динамики, теории упругости, механики разрушения твердых тел, изменения физических процессов в материалах НПП и других дисциплин рассчитываются характеристики несущей способности трубопровода;

2) анализируются внешние и внутренние нагрузки, действующие на НПП;

3) определяются статистические характеристики несущей способности материалов НПП и эксплуатационных нагрузок;

4) на основе закономерностей изменения состояния трубопровода во времени и под действием внешних факторов строится модель катастрофы;

5) рассчитываются характеристики безотказности трубопровода с использованием математического аппарата теории катастроф.

Расчет показателей надежности

Для достижения целей настоящей статьи были обработаны данные ультразвукового контроля толщины стенок НПТ одного из месторождений Западной Сибири, собранные за период с 2002 по 2006 г., объединенные с данными за период с 1984 по 1999 гг., использованными в работе [9]. В совокупности выборка по толщиномерии охватывает период с 1984 по 2006 г. Общий объем статистических данных — 1954 замера.

В табл. 1 приведены рассчитанные значения коэффициентов c и d для линейной и экспоненциальной моделей изменения числовых параметров несущей способности (9) труб НПТ 530×7,5 мм.

Таблица 1

НПТ	Моделируемый параметр	Модель усталости	Коэффициент	
			c	d
530×7,5 мм	$m_R(t)$	Линейная	7,3516	-0,2145
		Эсп.	7,3902	-0,0369
	$\sigma_R(t)$	Линейная	0,5485	0,1355
		Эсп.	0,7403	0,086

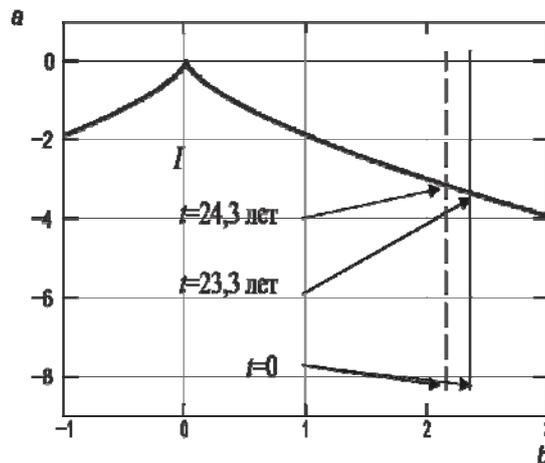


Рис. 4. Отображение многообразия катастрофы сборки на плоскость (a, b) :
 - - -, — траектории изменения параметров состояния от времени для НПТ 530×7,5
 Ст-20 и Ст-10 соответственно

На рис. 4 показано отображение многообразия катастрофы сборки на плоскость управляющих параметров (a, b) , а также проекции траекторий изменения состояния НПТ 530×7,5 мм от времени. В момент пересечения траекторией состояния НПТ границы бифуркационного множества и выхода из области I происходит катастрофа (отказ НПТ). Вероятность наступления катастрофы сборки определяет вероятность безотказной работы (ВБР) трубопровода. Для НПТ 530×7,5 мм из материала Ст-10 момент пересечения наступает через 23,3 года эксплуатации, для НПТ 530×7,5 мм из материала Ст-20 — через 24,3 года.

Результаты расчета показателей надежности на основе модели катастрофы сборки приведены на рис. 5, 6 и в табл. 2.

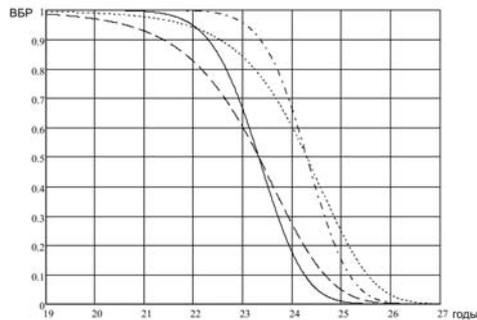


Рис. 5. НПТ 530×7,5 мм. Зависимость ВБР от времени при $A_S = 5\%$ и линейной модели $m_R(t)$:
 — Ст-10 $A_R = 5\%$;
 - - - Ст-10 $A_R = 10\%$;
 ····· Ст-20 $A_R = 5\%$;
 - · - Ст-20 $A_R = 10\%$

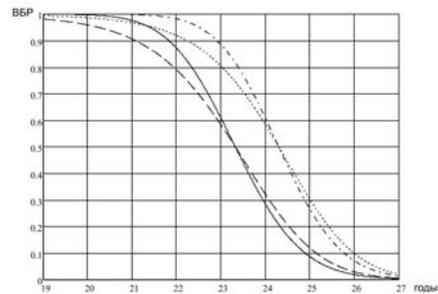


Рис. 6. НПТ 530×7,5 мм. Зависимость ВБР от времени при $A_S = 10\%$ и линейной модели $m_R(t)$:
 — Ст-10 $A_R = 5\%$;
 - - - Ст-10 $A_R = 10\%$;
 ····· Ст-20 $A_R = 5\%$;
 - · - Ст-20 $A_R = 10\%$

Таблица 2

ВБР НПТ 530×7,5 мм, линейная модель $m_R(t)$

Марка стали	$A_R, \%$	$A_S, \%$	$T_{cp}, \text{ лет}$	$T_{0,999}, \text{ лет}$	$T_{0,8}, \text{ лет}$
Ст-10	5	5	23,29	20,48	22,66
		10	23,34	19,55	22,34
	10	5	23,14	13,84	22,15
		10	23,19	13,39	21,93
Ст-20	5	5	24,27	21,70	23,69
		10	24,32	20,81	23,38
	10	5	24,14	15,88	23,23
		10	24,20	15,44	23,02

В табл. 2 представлены числовые показатели надежности для НПТ 530×7,5 мм. Приведены результаты расчета следующих показателей надежности [10]:

1) средней наработки до отказа ТСР по формуле

$$T_{cp} = \int_0^{\infty} P(t) dt; \quad (10)$$

2) времени достижения уровня ВБР $P = 0,999$ (показывает момент начала изменения вероятности безотказной работы);

3) времени достижения уровня ВБР $P = 0,8$.

Расчеты произведены для различных комбинаций материалов, коэффициентов вариации A_R и A_S , линейной модели $m_R(t)$.

Было проведено сравнение результатов расчета надежности НПТ, выполненного на основе модели «нагрузка — несущая способность» (ННС) и теории катастроф (ТК). На рис. 7, 8 даны графики зависимости вероятности безотказной работы НПТ 530×7,5 мм от времени для материалов Ст-10, Ст-20 и различных значений коэффициентов вариации нагрузки A_S и несущей способности A_R для линейной модели $m_R(t)$. Анализ графиков позволяет сделать выводы о схожести и различиях результатов, полученных методами физики отказов и теории катастроф.

В табл. 3 для НПТ 530×7,5 мм представлены показатели надежности, рассчитанные методами физики отказов и теории катастроф: в столбцах с четвертого по шестой — показатели надежности, полученные методом физики отказов; с седьмого по девятый — показатели надежности, полученные методом теории катастроф. В десятом, одиннадцатом и двенадцатом столбцах приведена разница в показателях надежности, рассчитанных с использованием указанных методов.

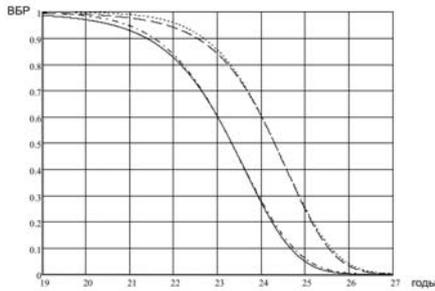


Рис. 7. НПТ 530×7,5 мм. Зависимость ВБР от времени при $A_S = 5\%$, $A_R = 10\%$ и линейной модели $m_R(t)$:
ВБР по ТК: — Ст-10; --- Ст-20.
ВБР по ННС: - - - - Ст-10; - - - Ст-20

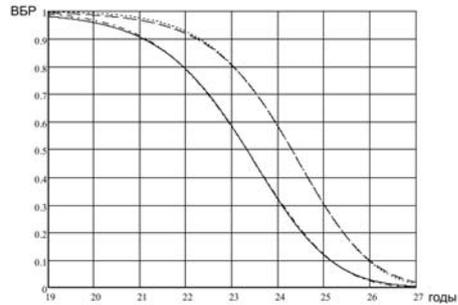


Рис. 8. НПТ 530×7,5 мм. Зависимость ВБР от времени при $A_S = 10\%$, $A_R = 10\%$ и линейной модели $m_R(t)$:
ВБР по ТК: — Ст-10; --- Ст-20.
ВБР по ННС: - - - - Ст-10; - - - Ст-20

Таблица 3

Сравнение ВБР НПТ 530×7,5 по ТК и ННС

Марка стали	$A_R, \%$	$A_S, \%$	ВБР по ННС			ВБР по ТК			Разница результата		
			$T_{ср}, \text{лет}$	$T_{0,999}, \text{лет}$	$T_{0,8}, \text{лет}$	$T_{ср}, \text{лет}$	$T_{0,999}, \text{лет}$	$T_{0,8}, \text{лет}$	$\Delta T_{ср}, \text{лет}$	$\Delta T_{0,999}, \text{лет}$	$\Delta T_{0,8}, \text{лет}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Ст-10	5	5	23,29	20,61	22,65	23,29	20,48	22,66	0,00	-0,13	0,01
		10	23,29	19,21	22,27	23,34	19,55	22,34	0,05	0,34	0,07
	10	5	23,20	18,02	22,20	23,14	13,84	22,15	-0,07	-4,18	-0,05
		10	23,20	17,00	21,93	23,19	13,39	21,93	-0,01	-3,60	0,01
Ст-20	5	5	24,27	21,83	23,68	24,27	21,70	23,69	0,00	-0,13	0,00
		10	24,27	20,56	23,34	24,32	20,81	23,38	0,05	0,25	0,05
	10	5	24,19	19,47	23,28	24,14	15,88	23,23	-0,05	-3,59	-0,05
		10	24,19	18,54	23,03	24,20	15,44	23,02	0,00	-3,10	-0,01

Заключение

Сравнение показателей надежности, рассчитанных с применением методов физики отказов и теории катастроф, показывает, что они довольно близки. Визуальный анализ рис. 5, 6 выявил высокую степень соответствия вероятностей безотказной работы НПТ, полученных методами физики отказов и теории катастроф, при невысоких коэффициентах вариации нагрузки и несущей способности. При повышении значений A_R и A_S различия ВБР становятся более заметными, особенно в начале и в конце периода эксплуатации. В целом разница в средней наработке до отказа $T_{ср}$ не превышает 0,1 года. При этом время достижения уровня ВБР 0,999 различается более существенно и при высоких коэффициентах вариации A_R и A_S составляет около четырех лет.

Таким образом, на примере оценки надежности НПТ по статистическим эксплуатационным данным показано, что методы теории катастроф могут ус-

пешно применяться к оценке надежности НПТ наряду с хорошо проработанными методами физики отказов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Арнольд В.И. Теория катастроф. 3-е изд., доп. М.: Наука, 1990. 128 с.
2. Постон Т., Стюарт И. Теория катастроф и ее приложения. М.: Мир, 1980. 607 с.
3. Томпсон Дж. М. Т. Неустойчивости и катастрофы в науке и технике. М.: Мир, 1985. 254 с.
4. Гилмор Р. Прикладная теория катастроф: В 2 кн. М.: Мир, 1984.
5. Николис Г., Пригожин И. Самоорганизация в неравновесных системах. М.: Мир, 1979. 511 с.
6. Острейковский В.А. Анализ устойчивости и управляемости динамических систем методами теории катастроф. М.: Высш. шк., 2005. 326 с.
7. Питухин А.В. Вероятностно-статистические методы механики разрушения и теории катастроф в инженерном проектировании. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 1998. 304 с.
8. Острейковский В.А. Об одной задаче оценки вероятностей исходных событий аварий методами математической теории катастроф // Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий: Материалы Междунар. науч.-практ. конф. М.: МИЭМ, 2010. С. 158–260.
9. Силин Я.В. Системный анализ надежности нефтепромысловых трубопроводов Западной Сибири методами физики отказов и теории катастроф: Дис. ... канд. техн. наук. Сургут, 2011. 168 с.
10. Острейковский В.А. Теория надежности: Учеб. для вузов. М.: Высш. шк., 2008. 463 с.

V.A. Ostreykovsky, A.O. Genyush, Ya.V. Silin

Models of the assessment of reliability of oil-field pipelines with application of the theory of accidents

The new concept of an assessment of reliability of trade pipelines with application of the theory of accidents is considered. Analytical dependences for definition of indicators of reliability by methods of the theory of accidents and the models «loading — bearing ability» are given.

Models, reliability, oil-field pipelines.