Д.А. Виноградов, А.К. Ращепкин, С.В. Астраханцев (Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа, Российская Федерация)

СТАТИСТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ПЛАСТМАССОВЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

Dmitriy A. Vinogradov, Andrey K. Rashepkin, Sergey V. Astrakhantsev
(Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russian Federation)

STATISTICAL APPROACH TO DETERMINING THE RESIDUAL RESOURCE OF PLASTIC PIPELINES

Введение

Достоинства пластмассовых трубопроводов хорошо известны, и поэтому они широко применяются в промышленности и коммунальном хозяйстве. В то же время их ресурс не безграничен. На срок эксплуатации оказывают влияние различные факторы, обуславливающие «старение» полимерных материалов, т.е. необратимое изменение их свойств. Это, в первую очередь, температурные и механические воздействия, взаимодействия с агрессивными средами. В ходе эксплуатации трубопровода возникают различного рода повреждения, дефекты, которые ухудшают его эксплуатационные характеристики и приводят к отказам трубопровода. При значительном объеме дефектов пластмассовый трубопровод достигает своего так называемого «предельного состояния», когда его дальнейшая эксплуатация становится невозможной вследствие потери несущей способности.

Цели и задачи

Статья посвящена расчету остаточного ресурса пластмассового трубопровода.

Background

The advantages of plastic pipelines are well known, and therefore they are widely used in industry and utilities. At the same time, their resource is not unlimited. The service life is influenced by various factors that cause the «aging» of polymeric materials, i.e. irreversible change in their properties. These are, first of all, temperature and mechanical influences, interactions with aggressive media. During the operation of the pipeline, various kinds of damage occur, defects that worsen its operational characteristics and lead to pipeline failures. With a significant amount of defects, the plastic pipeline reaches its so-called «limiting state», when its further operation becomes impossible due to the loss of bearing capacity.

Aims and Objectives

The article is devoted to the calculation of the residual resource of the plastic pipeline.

Результаты

Представлен анализ основных причин отказов пластмассовых трубопроводов в ходе их эксплуатации.

Предложена методика расчета остаточного ресурса пластмассового трубопровода статистическим методом на основе данных о прочности и пластичности трубопровода, собранных при его эксплуатации.

Представлен пример расчета остаточного ресурса пластмассового трубопровода.

Results

The analysis of the main causes of failures of plastic pipelines during their operation is presented.

A method is proposed for calculating the residual life of a plastic pipeline by a statistical method based on data on the strength and plasticity of the pipeline collected during its operation.

An example of calculating the residual life of a plastic pipeline is presented.

Ключевые слова: пластмассовые трубопроводы; остаточный ресурс; вероятность безотказной работы; статистический метод

Keywords: plastic pipelines; residual resource; probability of survival; statistical method

Достоинства пластмассовых трубопроводов хорошо известны, и поэтому они широко применяются в промышленности и коммунальном хозяйстве. В то же время их ресурс не безграничен.

На срок эксплуатации оказывают влияние различные факторы, обуславливающие «старение» полимерных материалов, т.е. необратимое изменение их свойств. Это, в первую очередь, температурные и механические воздействия, взаимодействия с агрессивными средами.

В ходе эксплуатации трубопровода возникают различного рода повреждения, дефекты, которые ухудшают его эксплуатационные характеристики и приводят к отказам трубопровода. При значительном объеме дефектов пластмассовый трубопровод достигает своего так называемого «предельного состояния», когда его дальнейшая эксплуатация становится невозможной вследствие потери несущей способности.

Проанализируем основные причины отказов пластмассовых трубопроводов в ходе

их эксплуатации.

Результат анализа представим в виде обобщенной схемы (рисунок 1).

Причинами отказов трубопроводов могут быть:

- комплексное воздействие различного рода нагрузок, как внешних, так и внутренних;
- старение полимерных материалов;
- механический износ;
- скрытые дефекты труб и фасонных деталей;
- дефекты, полученные в процессе монтажа трубопровода;
- нарушения правил технической эксплуатации трубопровода и т.д.

Большая часть пластмассовых трубопроводов проработала более 30 лет.

В результате термоокислительных процессов, механических и химических эксплуатационных воздействий в пластмассовых трубах накапливаются повреждения, что неизбежно ведет к их последующему разрушению.

Рисунок 1. Обобщенная схема отказов пластмассовых трубопроводов

Эксплуатационные повреждения сочетаются с дефектами, возникающими при экструзии труб и литье фасонных деталей, а также с повреждениями при строительно-монтажных и ремонтных работах.

Такая комбинация дефектов ускоряет процесс износа трубопровода.

Своевременное выявление повреждений пластмассовых трубопроводов представляет собой сложную задачу, поскольку из-

вестные средства и методы технической диагностики металлических трубопроводов не позволяют выявить все возможные дефекты полимерных труб и их соединений.

В этой связи возрастает опасность внезапных отказов пластмассовых трубопроводов вследствие отсутствия достоверной информации об их фактическом состоянии.

С одной стороны, продление эксплуатационного ресурса трубопровода сулит экономические выгоды, а с другой, возможные аварии, вызванные разрушением трубопровода, могут нанести серьезный материальный и иной ущерб.

Следовательно, задача продления эксплуатационного ресурса трубопровода является сложной. Необходимо учитывать его напряженно-деформированное состояние, наличие и характер дефектов стенок труб и их соединений, изменения физико-механических свойств полимерных материалов и другие влияющие факторы. Получение разнообразной информации, необходимой для всесторонней оценки и прогнозирования работоспособности пластмассового трубопровода, сопряжено со значительными затратами людских и материальных ресурсов. В этой связи представляется актуальной задача разработки такой *методики оценки остаточного ресурса трубопровода, при использовании которой минимизируется объем обследований его технического состояния.*

Наиболее достоверную информацию можно получить, используя статистический подход. Однако при таком подходе необходимо собрать огромный объем информации о типах дефектов, прочностных свойствах материалов и их статистических характеристиках. Необходимо знание малейших изменений деформаций конструкции в зависимости от воздействия окружающей среды, например циклических нагрузок. Некоторую информацию для проведения расчета просто невозможно восстановить, это - история нагружения трубопровода во времени, время появления монтажных дефектов, скрытых в приемосдаточной документации и т.д. Немаловажен и факт недостаточно длительного периода с начала эксплуатации трубопроводов из некоторых композиционных материалов, и в связи

с этим недостаток данных для достоверной статистической обработки их отказов.

Термином *остаточный ресурс* обозначим выработку пластмассовым трубопроводом ресурса (изменение прочности и пластичности), начиная с того времени, когда закончился первоначально установленный назначенный ресурс T_0 до того момента, когда напряжения в трубопроводе принимают критическое значение. Остаточный ресурс R_0 вычисляется по формуле:

$$R_0 = R - T_0, \quad (1)$$

где R - ресурс трубопровода от момента начала эксплуатации до состояния потери работоспособности.

Величину R_0 можно оценить либо эмпирически по результатам эксплуатации трубопровода, либо путем расчета на основе математических моделей.

Определим остаточный ресурс статистическим методом на основе данных о прочности и пластичности трубопровода, собранных при его эксплуатации. Оценку среднего значения R_0 можно рассчитать по формуле

$$R_0 = \frac{\sum_{i=1}^m Z_i + (n - k - m) \cdot t}{n - k} \quad \text{при } k \neq n, \quad (2)$$

где t - выработка ресурса трубопровода с момента окончания установленного ресурса T_0 ;

n - число наблюдений за состоянием трубопровода в период времени t ;

k - число отказов трубопровода за период времени T_0 ;

m - число отказов трубопровода за период времени t ;

Z_i - выработанный ресурс трубопровода в течение времени t .

Для пластмассовых трубопроводов, как правило, рассматривают несколько различных видов ресурса: работа по транспортировке, период простоя, консервация трубопрово-

да и др. По формуле (2) можно рассчитать остаточный ресурс только в том случае, если вырабатывается только один вид ресурса. Поэтому предварительно требуется определить эквивалентные значения величин t и Z_i для заданного вида ресурса.

Для вычисления эквивалентного значения выработки оцениваемого вида ресурса можно использовать формулу

$$t = t_0 + \sum_{j=1}^L K_j \cdot r_j, \quad (3)$$

где t_0 - величина выработки оцениваемого вида ресурса с момента окончания установленного ресурса T_0 ;

L - число других видов ресурса рассматриваемого трубопровода;

j - порядковый номер вида ресурса;

r_j - величина выработки каждого вида ресурса с момента окончания установленного ресурса T_0 ;

K_j - коэффициент для приведения значение каждого вида ресурса к значению оцениваемого вида ресурса.

Коэффициент приведения K_j определяется по формуле

$$K_j = \frac{\omega_j}{\omega_0}, \quad (4)$$

где ω_j - параметр потока отказов рассматриваемого трубопровода при выработке j -го вида ресурса;

ω_0 - параметр потока отказов при выработке оцениваемого по формуле (3) вида ресурса.

Рассматриваемый статистический метод оценки ресурса можно наглядно представить на обобщенном примере расчета остаточного ресурса пластмассового трубопровода.

Пример. Для трубопровода из полимерных труб назначен срок эксплуатации T_0 , равный 10 лет.

Вероятность безотказной работы пластмассового трубопровода на протяжении указанного срока эксплуатации $P(T_0) = 0,18$.

После окончания установленного срока эксплуатации T_0 в течение 4 лет выполнены 30 наблюдений состояния трубопровода ($t = 4$, $n = 30$). Проведенные наблюдения выявили 5 отказов данного трубопровода (таблица 1):

Таблица 1. Число отказов трубопровода из полимерных труб после окончания установленного срока эксплуатации

Год эксплуатации	11	12	13	14
Число отказов	1	2	2	1

Требуется рассчитать среднее значение остаточного ресурса указанного трубопровода, а также доверительные интервалы с доверительной вероятностью $\alpha = 0,9$.

По формуле (2) рассчитываем среднее значение остаточного ресурса

$$R_0 = \frac{1 + 2 \cdot 2 + 2 \cdot 3 + 1 \cdot 4 + (30 - 5) \cdot 4}{30} = 3,83 \text{ лет.}$$

Математическое ожидание оценки остаточного ресурса в данном примере равно его среднему значению $M(R_0) = R_0$.

Для определения доверительных интервалов будем использовать известную зависимость среднего значения остаточного ресурса на интервале наблюдения t от вероятности безотказной работы трубопровода [1-6]

$$R_0 = \frac{1}{P(T_0)} \cdot \int_0^t P(T_0 + Z) dZ, \quad (5)$$

где $P(T_0)$ - вероятность безотказной работы на протяжении установленного срока эксплуатации T_0 ;

$P(T_0 + Z)$ - функция изменения вероятности безотказной работы на интервале $[T_0, T_0 + t]$.

Для определения вида функции $P(T_0 + Z)$ обрабатываются статистические данные наблюдений за испытаниями трубопровода.

Для расчета несмещенной оценки математического ожидания среднего значения остаточного ресурса применяется формула

$$M(R_0) = \frac{R_0}{K_n(T_0)}, \quad (6)$$

где $K_n(T_0) = 1 - [1 - P(T_0)]^n$.

Для определения доверительного интервала оценки математического ожидания среднего значения остаточного ресурса пластмассового трубопровода используем известные формулы вычисления нижней R_{0H} и верхней R_{0B} границ интервала по заданной доверительной вероятности [7, 8]:

$$R_{0H} = M(R_0) - \frac{t}{2} \cdot \sqrt{\frac{1+a}{30 \cdot (1-a)}}; \quad (7)$$

$$R_{0B} = M(R_0) + \frac{t}{2} \cdot \sqrt{\frac{1+a}{30 \cdot (1-a)}}, \quad (8)$$

где a - доверительная вероятность.

Рассчитываем значения доверительного интервала по (7), (8):

$$R_{0H} = 3,83 - \frac{4}{2} \cdot \sqrt{\frac{1+0,9}{30 \cdot (1-0,9)}} = 2,24 \text{ лет};$$

$$R_{0B} = 3,83 + \frac{4}{2} \cdot \sqrt{\frac{1+0,9}{30 \cdot (1-0,9)}} = 5,42 \text{ лет}.$$

В результате выполненных расчетов по предложенной методике среднее оценочное значение остаточного ресурса R_0 рассматриваемого пластмассового трубопровода с заданной доверительной вероятностью $a = 0,9$ находится в интервале от 2,24 до 5,42 лет.

Выводы

Представлен анализ основных причин отказов пластмассовых трубопроводов в ходе их эксплуатации.

Предложена методика расчета остаточного ресурса пластмассового трубопровода статистическим методом на основе данных о прочности и пластичности трубопровода, собранных при его эксплуатации.

Представлен пример расчета остаточного ресурса пластмассового трубопровода.

Список литературы

1. Животкевич И.Н., Смирнов А.П. Надежность технических изделий. М.: Олита, 2003. 473 с.
2. Гмошинский В.Г. Инженерное прогнозирование. М.: Энергоиздат, 1982. 207 с.
3. Крамер Г. Математические методы статистики. М.: Мир, 1975. 648 с.
4. Шторм Р. Теория вероятностей. Математическая статистика. Статистический контроль качества. М.: Мир, 1970. 368 с.
5. Половко А.М. Основы теории надежности. М.: Наука, 1964. 446 с.
6. Мышкис А.Д. Лекции по высшей математике. М.: Наука, 1973. 640 с.

References

1. Zhivotkevich I.N., Smirnov A.P. *Nadezhnost' tekhnicheskikh izdelii* [Reliability of Technical Products]. Moscow, Olita Publ., 2003. 473 p. [in Russian].
2. Gmoshinskii V.G. *Inzhenernoe prognozirovanie* [Engineering Forecasting]. Moscow, Energoizdat Publ., 1982. 207 p. [in Russian].
3. Kramer G. *Matematicheskie metody statistiki* [Mathematical Methods of Statistics]. Moscow, Mir Publ., 1975. 648 p. [in Russian].
4. Shtorm R. *Teoriya veroyatnostei. Matematicheskaya statistika. Statisticheskii kontrol' kachestva* [Probability Theory. Math Statistics. Statistical Quality Control]. Moscow, Mir Publ., 1970. 368 p. [in Russian].

7. Садыхов Г.С. Остаточный ресурс технических объектов и методы его оценки // Качество и надежность изделий. 1986. С. 51-99.

8. Садыхов Г.С. Статистическое моделирование надежности в задачах определения возможности продления сроков эксплуатации технических объектов // Качество и надежность изделий. 1992. № 4 (20). С. 59.

p. [in Russian].

5. Polovko A.M. *Osnovy teorii nadezhnosti* [Fundamentals of the Theory of Reliability]. Moscow, Nauka Publ., 1964. 446 p. [in Russian].

6. Myshkis A.D. *Lektsii po vysshei matematike* [Lectures on Higher Mathematics]. Moscow, Nauka Publ., 1973. 640 p. [in Russian].

7. Sadykhov G.S. Ostatochnyi resurs tekhnicheskikh ob'ektov i metody ego otsenki [Residual Resource of Technical Objects and Methods of its Assessment]. *Kachestvo i nadezhnost' izdelii - Product Quality and Reliability*, 1986, pp. 51-99. [in Russian].

8. Sadykhov G.S. Statisticheskoe modelirovanie nadezhnosti v zadachakh opredeleniya vozmozhnosti prodleniya srokov ekspluatatsii tekhnicheskikh ob'ektov [Statistical Modeling of Reliability in the Tasks of Determining the Possibility of Extending the Service Life of Technical Objects]. *Kachestvo i nadezhnost' izdelii - Product Quality and Reliability*, 1992, No. 4 (20), pp. 59. [in Russian].

Авторы

• Виноградов Дмитрий Анатольевич, канд. техн. наук

Уфимский государственный нефтяной технический университет

Доцент кафедры «Прикладные и естественнонаучные дисциплины»

Российская Федерация, 450080, г. Уфа, ул. Менделеева, 195

e-mail: _vinogradov@mail.ru

The Authors

• Vinogradov Dmitriy A., Candidate of Engineering Sciences

Ufa State Petroleum Technological University

Assistant Professor of Applied and Natural Sciences Department

195, Mendeleev str., Ufa, 450080,

Russian Federation

e-mail: _vinogradov@mail.ru

• Рашепкин Андрей Константинович, канд. техн. наук

Уфимский государственный нефтяной технический университет

Доцент кафедры «Прикладные и естественнонаучные дисциплины»

Российская Федерация, 450080, г. Уфа, ул. Менделеева, 195

e-mail: rash01@list.ru

• Rashepkin Andrey K., Candidate of Engineering Sciences

Ufa State Petroleum Technological University

Assistant Professor of Applied and Natural Sciences Department

195, Mendeleev str., Ufa, 450080,

Russian Federation

e-mail: rash01@list.ru

• Астраханцев Сергей Викторович

Уфимский государственный нефтяной технический университет

Ассистент кафедры «Прикладные и естественнонаучные дисциплины»

Российская Федерация, 450080, г. Уфа, ул. Менделеева, 195

e-mail: asserv@mail.ru

• Astrakhantsev Sergey V.

Ufa State Petroleum Technological University

Assistant of Applied and Natural Sciences Department

195, Mendeleev str., Ufa, 450080,

Russian Federation

e-mail: asserv@mail.ru