

УДК 628.147:64.011.44

Математические модели износа трубопроводов систем водоснабжения

С. Ю. ДОЛМАТОВ¹, А. В. ГАЛКИН²

¹ Долматов Сергей Юрьевич, начальник отдела экономического аудита, ООО «Липецкая трубная компания «Свободный Сокол» 398007, Россия, г. Липецк, Заводская площадь, 1, тел.: (4742) 42-33-09, e-mail: s.dolmatov85@gmail.com

² Галкин Александр Васильевич, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой прикладной математики, Липецкий государственный технический университет 398055, Россия, г. Липецк, Московская ул., 30, тел.: (4742) 32-80-50, e-mail: avgalkin82@mail.ru

В последние годы правительство РФ разрабатывает различные программы, направленные на модернизацию сферы ЖКХ и улучшение качества жизни населения России: капитальный ремонт жилищного фонда, благоустройство дворовой территории, а также реконструкция систем водоснабжения и водоотведения. Однако, несмотря на все эти благие начинания, в конце очередного финансового года жители российских городов все чаще задают вопрос о целесообразности финансовых вложений в данную сферу. Вопрос закономерен и вызван низким качеством произведенного ремонта, что не только не улучшает условия проживания населения, но и приносит новые трудности, связанные с необходимостью исправления ошибок, появившихся в результате работы недобросовестных подрядчиков. Рассматривается вопрос экономической целесообразности

существующей модели реконструкции систем водоснабжения российских городов на примере Липецкой области. Описываются математические модели аварийности трубопроводов, анализируются эксплуатационные характеристики трубопроводов из различных материалов и их влияние на качество питьевой воды в регионе. На основании математических расчетов сделан вывод о возможности рационального инвестирования в процесс реновации водопроводных сетей при существенном улучшении их качественных характеристик.

Ключевые слова: реновация водопроводных сетей, математическая модель аварийности, трубы из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом, модернизация системы водоснабжения, ограниченное финансирование.

Капитальные вложения в строительство и реконструкцию водопроводных сетей должны использоваться с учетом минимизации аварийности и обновления водопроводного комплекса в долгосрочной перспективе. Использование трубной продукции низкого качества, не соответствующей нормативным требованиям, не только обуславливает неэффективность капиталовложений в сферу ЖКХ, но и приводит к существенному экономическому урону.

Россия располагает огромной территорией и, соответственно, сетью водоводов большой протяженности. Уже сейчас износ водных коммуникаций достигает чрезвычайно высоких значений — от 50 до 90%. Из-за прорывов тру-

бопроводов происходят потери воды при транспортировке потребителю, причем объем потерь в некоторых городах достигает 50%. Учитывая возрастающую стоимость водоочистки, а также большую протяженность водопроводной сети России, колоссальные объемы дешевой питьевой воды просто уходят в никуда. Эта проблема угрожает стать настоящей «дырой» в бюджете страны.

С учетом неуклонного роста аварийности водопроводных сетей потребность в их реконструкции и строительстве увеличивается с каждым годом. Решать эти вопросы необходимо последовательно и комплексно, иначе проблема амортизации водоводов в буквальном смысле

«прорвется наружу», и тогда ее масштабы станут действительно катастрофическими.

Устраняя проблемы аварийности и износа системы водоснабжения с помощью некачественных, а значит недолговечных труб, удается закрыть вопрос постоянного ремонта трубопровода на 10, максимум на 15 лет. Но даже этот срок не может быть гарантирован, поскольку никто не сможет поручиться за надежность и долговечность трубопроводов, построенных из фальсификата. При использовании таких труб критические ситуации с прочностью часто возникают уже в первые 10 лет их службы. То есть через 10–20 лет эксплуатации все полиэтиленовые трубы такого класса выйдут из строя и потребуют замены. Это приведет к экономическому краху водоканалов и коллапсу городской инфраструктуры.

Таким образом, даже при значительных капиталовложениях при сохранении существующих подходов проблема не может считаться решенной, поскольку из-за низкого эксплуатационного срока некачественных труб в ближайшей перспективе придется возвращаться к ней вновь и вновь. Получается замкнутый круг. Тем самым вопрос обновления водопроводной сети не решается, а масштабы проблемы амортизации водоводов только возрастают.

Именно поэтому бюджетная политика в сфере водопроводного хозяйства ЖКХ, тем более в условиях ограниченного финансирования, должна подразумевать вложение средств в те материалы для строительства трубопроводов, которые позволяют эффективно решать проблемы износа водоводов и при этом не возвращаться к ним вновь на протяжении многих десятилетий. Речь идет о

трубах со сроком службы более 50 лет с гарантией качества, надежности, долговечности и экологической безопасности.

Примером оптимизации процесса реновации водопроводных сетей являются расчеты, которые были выполнены в Липецкой трубной компании «Свободный Сокол». Специалисты отдела маркетинга на основании данных, полученных от Росстата, составили проект Программы по модернизации системы водоснабжения Липецкого региона сроком на 45 лет.

Расчеты выполнялись на основании следующих статистических показателей:

протяженность водопроводных сетей г. Липецка и Липецкой области – 7962 км;

средний износ (амортизация) сетей – 70%;

средний объем строительства и реконструкции водопроводных сетей за период 2011–2013 годов – 33 км, из которых 6 км – реконструкция имеющихся трубопроводов и 27 км – строительство новых сетей.

На рис. 1 приведены результаты, которые будут достигнуты при различных вариантах модернизации трубопроводной системы региона.

При недостаточном объеме работ по модернизации и использовании пластиковых труб (рис. 1, а) с заявленным сроком службы 50 лет к 2060 г. износ трубопроводной системы составит 90%, а остаточный срок службы сократится до нескольких лет. При этом важно подчеркнуть, что трубы из пластика еще не прошли проверку временем, не доказали свою надежность и способность к эксплуатации на срок в несколько десятилетий. Поэтому сегодня использование при прокладке трубопроводов связано с опреде-

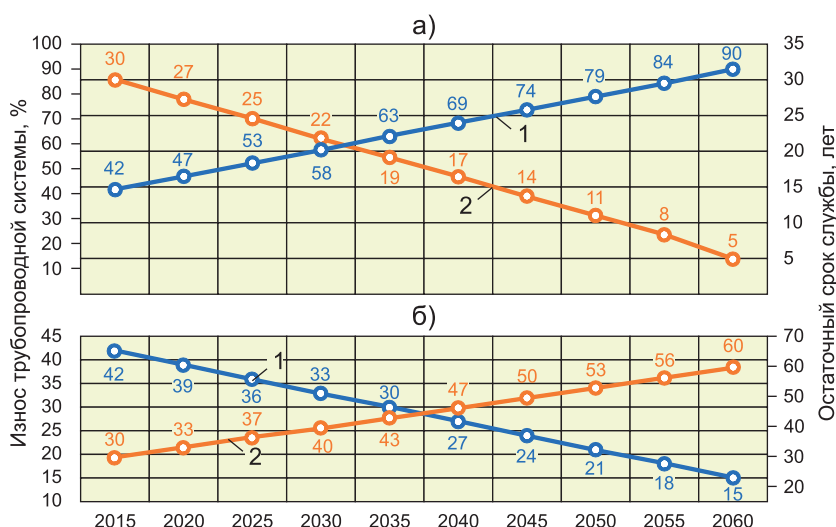


Рис. 1. Варианты модернизации трубопроводной системы
 а – недостаточная (использование труб со сроком службы 50 лет); б – регулярная (использование труб со сроком службы 100 лет); 1 – износ трубопроводной системы; 2 – остаточный срок службы

ленной степенью риска, поскольку это продукция, эксплуатационные характеристики которой все еще вызывают сомнения, а она предназначена для обеспечения функционирования систем, связанных с жизнедеятельностью человека, к которым относится водоснабжение и водоотведение.

Согласно Программе модернизации, которую предлагает ЛТК «Свободный Сокол» (рис. 1, б), при условии использования труб из высокопрочного чугуна, которые имеют гарантированный срок службы 100 и более лет, к 2060 г. износ трубопроводной системы составит 47%, а остаточный срок службы – 58 лет.

Проблема износа трубопроводной системы влечет еще одно негативное последствие. Так, в настоящее время потери воды при транспортировке по трубопроводам составляют до 50%, что резко увеличивает затраты на водоснабжение. В случае же недостаточного объема работ по модернизации и использованию пластиковых труб с заявленным сроком службы 50 лет к 2060 г. потери воды будут составлять 80–90%. Реализация программы по использованию труб сроком службы 100 и более лет способна привести к сокращению потерь воды до 10%. Также при этом появятся амортизационные отчисления, которые станут источником финансирования для восстановления основных фондов трубопроводных сетей.

Как видно из графиков, приведенных на рис. 1, при использовании труб со сроком службы 50 лет износ трубопроводной сети со временем растет, а остаточный срок трубопроводов сокращается. При использовании труб со сроком службы 100 лет износ сети минимален, а остаточный срок службы трубопроводов, напротив, резко увеличивается. Только таким образом и достигается реновация водопроводной сети.

По заявлениям самих производителей полиэтиленовых труб, фальсификат составляет более 35% рынка таких труб, и «засилье контрафактной продукции будет продолжаться в полной мере» [1]. Это свидетельствует об очевидности и остроте проблемы. Но даже если используется продукция из полиэтилена высокого качества с заявленным сроком службы 50 лет, то трубы из высокопрочного чугуна для обновления водопроводной сети оказываются эффективнее на долгосрочную перспективу. Это обстоятельство следует иметь в виду с учетом громадной протяженности водопроводных сетей в России, которые требуют постоянных финансовых вложений. В данном случае принцип «закопал и забыл», который реализуется при использовании труб из

высокопрочного чугуна с шаровидным графитом (ВЧШГ), оказывается очень эффективным способом разумных инвестиций.

Оптимизацию проектирования процесса реновации водопроводных сетей можно проводить на математических моделях аварийности [2]. С их помощью производится расчет эффективности использования того или иного материала при строительстве трубопроводов, исходя из параметров сети, качественных характеристик различных видов труб и стоимости затрат на их прокладку. На основании такого расчета становится возможным выбор наиболее эффективного материала для строительства трубопроводов, причем в долгосрочной перспективе.

Рассмотрим модель аварийности водопроводной сети. В качестве параметров модели приняты:

L – протяженность трубопровода, км;

A – аварийность старого трубопровода (количество аварий в год);

A/L – относительная аварийность (число аварий на 1 км протяженности трубопровода);

n – планируемый период, годы;

C_1, \dots, C_n – объем средств, выделяемых в n -й год на содержание водопровода, тыс. руб.;

T_1, \dots, T_T – вид материалов труб (ВЧШГ, полиэтилен, сталь, серый чугун и др.);

S_1, \dots, S_T – затраты на прокладку труб, включающие стоимость приобретения и стоимость прокладки 1 км трубы, тыс. руб./км;

p_T^n – вероятность безотказной работы трубы типа T_T возраста n лет определяется в соответствии с теорией надежности [3] по показательному закону распределения:

$$p_T^n = e^{-\lambda_T n},$$

где $\lambda_T = 1/t_T$, t_T – среднее время работы трубы типа T_T ;

x_T^n – протяженность трубопровода T_T , установленного в n -ом году от начала рассматриваемого периода, км;

$k_{ст}$ – коэффициент старения (отражает увеличение аварийности трубопровода с каждым годом).

Формула для расчета аварийности трубопроводов в конце рассматриваемого периода имеет вид:

$$\begin{aligned} & \frac{A}{L} [L - (x_1^1 + x_2^1 + \dots + x_T^1) - \dots - (x_1^n + x_2^n + \dots + x_T^n)] \times \\ & \times (1 + nk_{ст}) + x_1^1 (1 - p_1^1) + x_2^1 (1 - p_2^1) + \\ & + \dots + x_T^1 (1 - p_T^1) + \dots + x_1^n (1 - p_1^n) + \\ & + x_2^n (1 - p_2^n) + \dots + x_T^n (1 - p_T^n). \end{aligned} \quad (1)$$

Формула для расчета аварийности трубопровода за весь рассматриваемый период:

$$\frac{A}{L} [L - (x_1^1 + x_2^1 + \dots + x_r^1) - \dots - (x_1^n + x_2^n + \dots + x_r^n)] \times (1 + nk_{cr}) + x_1^1 [(1 - p_1^1) + (1 - p_1^2) + \dots + (1 - p_1^n)] + x_2^1 [(1 - p_2^1) + (1 - p_2^2) + \dots + (1 - p_2^n)] + \dots + x_r^1 [(1 - p_r^1) + (1 - p_r^2) + \dots + (1 - p_r^n)] + x_1^2 [(1 - p_1^1) + (1 - p_1^2) + \dots + (1 - p_1^{n-1})] + x_2^2 [(1 - p_2^1) + (1 - p_2^2) + \dots + (1 - p_2^{n-1})] + \dots + x_r^2 [(1 - p_r^1) + (1 - p_r^2) + \dots + (1 - p_r^{n-1})] + \dots + x_1^n (1 - p_1^1) + x_2^n (1 - p_2^1) + \dots + x_r^n (1 - p_r^1). \quad (2)$$

Ограничения на количество заменяемых труб определяются объемом выделяемых средств:

$$\begin{cases} s_1 x_1^1 + s_2 x_2^1 + \dots + s_m x_m^1 \leq C_1, \\ \dots \\ s_1 x_1^n + s_2 x_2^n + \dots + s_m x_m^n \leq C_n. \end{cases} \quad (3)$$

Таким образом, задача оптимизации заключается в минимизации функционала (1) или (2) в зависимости от целей расчета при ограничениях (3).

Пример использования метода математических моделей с наглядными графиками (рис. 2) приводится ниже. Графики изменения аварийности трубопровода из различных материалов при определенных вариантах ежегодного финансирования, которые построены с помощью математической модели, демонстрируют изменение аварийности определенной водопроводной сети в условиях финансирования в разных объемах:

- вариант а – постоянное финансирование;
- вариант б – финансирование, увеличивающееся на 1% в год;
- вариант в – случайное финансирование;
- вариант г – финансирование, уменьшающееся на 3% в год.

В модели анализируются три вида материалов труб со сроком службы: 20 лет, 50 лет, более 80 лет. В качестве расчетного периода берется отрезок в 50 лет.

На основании подтвержденных исследованиями эксплуатационных характеристик материалов труб вычисляется показатель аварийности – количество аварий на 1 тыс. км трубопровода за 50-летний период. Затем составляется график (рис. 2), демонстрирующий эффективность различных видов материалов труб с позиции изменения аварийности трубопроводной сети в долгосрочной перспективе.

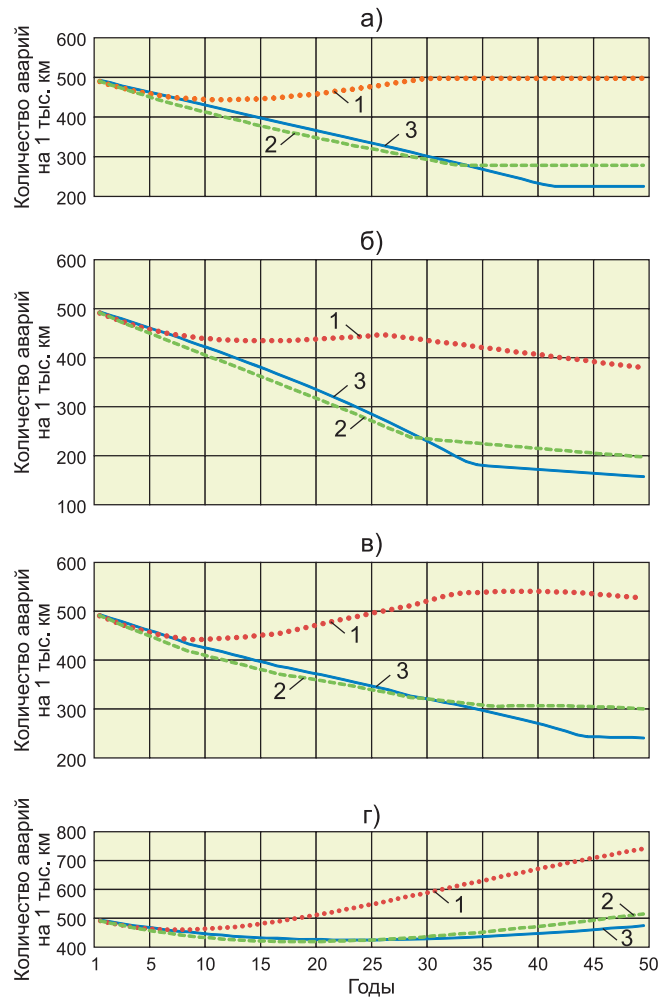


Рис. 2. Изменение аварийности водопроводной сети
 а – равномерное финансирование (вариант а); б – ежегодное увеличение финансирования на 1% (вариант б); в – случайное финансирование (вариант в); г – ежегодное уменьшение финансирования на 3% (вариант г); материал труб со сроком службы: 1 – 20 лет; 2 – 50 лет; 3 – 80 лет

Приведенные графики показывают эффективность использования труб из ВЧШГ при прокладке трубопроводов при различных вариантах финансирования, поскольку это позволяет более чем в 2 раза снизить аварийность (варианты а, б, в) по сравнению с существующими показателями. При этом показатели пластиковых труб могут быть такими же только в том случае, если не было допущено нарушений стандартов качества как при их производстве, так и при прокладке трубопровода. В случаях использования некачественных и недолговечных труб количество аварий либо остается на существующем уровне, либо увеличивается с течением времени (варианты а, в, г), что в конечном счете не позволяет говорить о реновации системы водоснабжения, а при ограниченном финансировании вообще сводится только к «латанию дыр».

Модернизацию водопроводных сетей необходимо решать в долгосрочной перспективе. Результаты сравнения различных видов труб с разными заявленными сроками службы показывают, что снижения аварийности можно добиться при использовании труб из ВЧШГ. Таким образом, становится очевидным, что для реновации системы водоснабжения использование качественных материалов обеспечит снижение затрат на модернизацию жилищно-коммунального хозяйства в нашей стране в будущем.

1. Пошлина на трубный полиэтилен может быть обнулена до конца года // Полимерные трубы. 2014. № 4 (46). С. 7.
2. Серкова Д. В. Задача управления модернизацией водопроводной сети с целью минимизации аварийности // Управление большими системами. УБС–2017: материалы XIV Всероссийской школы-конференции молодых ученых. – Пермь: Издательство Пермского национального исследовательского политехнического университета, 2017. С. 316–327.
3. Половко А. М., Гуров С. В. Основы теории надежности. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006. 704 с.

PIPELINE SYSTEMS

Mathematical models of water supply pipeline deterioration

S. Iu. DOLMATOV¹, A. V. GALKIN²

¹ Dolmatov Sergei Iur'evich, Chief of the Economic Audit Department, Lipetsk Pipe Company «Svobodny Sokol» LLC
1 Zavodskaya Sq., 398007, Lipetsk, Russian Federation, tel.: +7 (4742) 42-33-09, e-mail: s.dolmatov85@gmail.com

² Galkin Aleksandr Vasil'evich, Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Head of the Subdepartment of Applied Mathematics,
Lipetsk State Technical University
30 Moskovskaya St., 398055, Lipetsk, Russian Federation, tel.: +7 (4742) 32-80-50, e-mail: avgalkin82@mail.ru

Over recent years the RF Government has been developing different projects focused on the upgrade of public utilities and improvement of the quality of living of the Russian population: capital renovation of residential properties, improvement of the yard areas as well as reconstruction of water and sanitation systems. However, despite all these good initiatives at the end of the next financial year the residents of the Russian cities increasingly pose the question about the expediency of the financial investments in this sector. The question is legitimate and is caused by the low quality of the renovation made that does not only improve the living conditions but brings new difficulties related to the necessity to eliminate mistakes made by dishonest contractors. The problem of the economic expediency of the existing model of water supply system reconstruction adopted in the Russian cities through the example of the Lipetsk Area is considered. Mathematical models of pipeline failure rates are described; performance characteristics of pipelines made of different materials and their effect on the drinking water quality in the region are analyzed. Based on the mathematical calculations the conclusion is drawn about possible efficient investments in the process of water distribution pipeline renovation while providing for the significant improvement of their qualitative characteristics.

Key words: water distribution network renovation, mathematical model of failure rate, pipes made of ductile iron, water supply system upgrade, limited financing.

REFERENCES

1. [Pipe polyethylene duty can be slashed to zero before the end of the year]. *Polimernye Truby*, 2014, no. 4 (46), p. 7. (In Russian).
2. Serkova D. V. [The task of water network upgrade management with the purpose of reducing the failure rate]. Large-scale system management. UBS–2017. Proceedings of XIV All-Russian School-Conference of Young Professionals. Perm, Izdatel'stvo Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta Publ., 2017, pp. 316–327. (In Russian).
3. Polovko A. M., Gurov S. V. *Osnovy teorii nadezhnosti* [Fundamentals of the theory of reliability. St. Petersburg, BKHV-Peterburg Publ., 2006, 704 p.].