

УДК: 004.3

## 1.10. Методы прогнозирования аварий в системах водоснабжения

Быков А.А.<sup>1</sup>, Берсүгір М. Ә.<sup>2</sup><sup>1</sup> Финансовый университет при правительстве Российской Федерации, Москва, Россия<sup>2</sup> «Esil University», г. Астана, Республика Казахстан

*В статье рассматриваются существующие подходы к прогнозированию аварий в системах водоснабжения. Данная задача является одной из важнейших, так как она позволяет заранее провести работы по предупреждению аварий, а также, в случае возникновения подобных аварий, быть максимально готовыми к подобным ситуациям. Иными словами – прогноз позволит избежать возникновения аварийных ситуаций на сетях водоснабжения, что актуализирует выбранную тему исследования. Целью статьи является описание методов прогнозирования аварий в системах водоснабжения. Объект исследования – системы водоснабжения. Предмет исследования – методы прогнозирования аварий в системах водоснабжения. Методы исследования – анализ научный публикаций и статей, проводимый с целью обобщения существующих методик прогнозирования аварий в системах водоснабжения. Научная новизна исследования заключается в проведении обзора современных методов прогнозирования аварийных ситуаций. Практическая значимость состоит в оценке возможности реализации подобного прогноза с использованием инструментария информационных технологий.*

### **Введение**

Аварийные ситуации в работе систем водоснабжения, согласно статистике, чаще всего исходят от водонапорных башен, сетей транспортировки воды, либо от насосных станций. Более редким явлением стоит назвать возникновение аварий на станции очистки воды. Для обеспечения бесперебойного снабжения населения водой могут создаваться резервные источники водоснабжения и запасы воды на случай аварийных ситуаций, однако в большинстве случаев это является крайней мерой. По данной причине наиболее оптимальным подходом считается прогнозирование аварий, который позволяет производить своевременный ремонт участка, на котором возможно возникновение аварии, подготовить все службы и перевести их в режим повышенной готовности.

### **Методология исследования**

Целью статьи является описание методов прогнозирования аварий в системах водоснабжения.

Объект исследования – системы водоснабжения. Предмет исследования – методы прогнозирования аварий в системах водоснабжения.

Методы исследования - анализ научный публикаций и статей, проводимый с целью обобщения существующих методик прогнозирования аварий в системах водоснабжения. Научная новизна исследования заключается в проведении обзора современных методов прогнозирования аварийных ситуаций. Практическая значимость состоит в оценке возможности реализации подобного прогноза с использованием инструментария информационных технологий.

### **Результаты и обсуждение**

#### **Причины возникновения аварий и их последствия**

Наиболее распространенными причинами возникновения аварий в системах водоснабжения являются их естественный износ и коррозия. Размещение данной категории коммуникаций под землей приводит к тому, что они подвержены не только агрессивному воздействию почвы, но и негативным воздействиям, таким как неравномерное давление грунта, прогиб, температурное напряжение и гидроудар [Фролов, Быков, 2021]. Кроме того, несмотря на подачу очищенной воды, вследствие коррозии внутри труб может возникать проблема засоров различного рода отложениями и зарастаниями [Захаревич, Ким, Мартьянова, 2018].

В зависимости от плотности грунта изменяется время возникновения и протекания коррозии систем водоснабжения. При прокладке водопроводов в плотных породах земли возникает ситуация, когда земля практически не пропускает воздух, в результате существенно возрастает степень агрессивности почвы.

Возникновение аварийных ситуаций в системах водоснабжения является негативным последствием. В результате подобных аварий происходит ухудшение уровня жизни граждан, которые лишаются подачи жизненно важной воды. Вода, вытекающая из подземной трубы, попадает в грунт, что может привести к росту уровня грунтовой воды и возникновению подтоплений жилья или земель [Вероятностно-статистический метод..., URL].

В результате аварии в системе водоснабжения происходит подмытие грунта, что может привести к негативным последствиям. Во-первых, вымытый грунт может попадать в трубу и проходить далее по

системе. В результате повторное возникновение аварийной ситуации произойдет раньше, чем можно предположить. Во-вторых, подобная авария приводит к росту вероятности возникновения вспышки инфекционных заболеваний, так как с грунтом в трубу могут попасть возбудители инфекций. Подмытие водой из трубы может привести к выводу из строя других коммуникаций, которые пролегают в непосредственной близости. Наиболее распространенными случаями является нахождение трубы канализации в неосредственной близости. Результатом становится попадание загрязненных вод в окружающую среду, что может привести к негативным экологическим последствиям [Гальперин, Полуян, Чувипин, 2006].

**Прогноз аварий на основании долговечности инженерных систем**

Любая инженерная система, в том числе и система водоснабжения, может быть оценена на основании таких параметров надежности, как безотказность и долговечность [Любчик, 2011].

Безотказностью системы водоснабжения называют свойство водопровода по обеспечению непрерывной подачи воды с учетом некоторых расчетных параметров с сохранением герметичности на протяжении определенного временного промежутка.

Долговечность водопровода – это свойство, демонстрирующее возможность выполнения возлагаемых на него функций с учетом отключений на ремонтные работы до того момента, пока для водопровода не наступит предельный срок эксплуатации [Семиохин, 2017;4 Калинин, 2006].

Оценка показателей безотказности для функционирования систем водоснабжения содержит теоретическое либо статистическое значение определения функции распределения времени безотказной работы. Она демонстрирует степень вероятности работы водопровода без сбоев в определенный отрезок времени:

$$\bar{F}(t) = P(X > t), \quad (1)$$

Помимо этого, часто рассматривается обратный безотказной работе показатель – интенсивность отказов. Суть данного показателя в количественной оценке, насколько водопровод будет стремиться к отказу в зависимости от времени его функционирования:

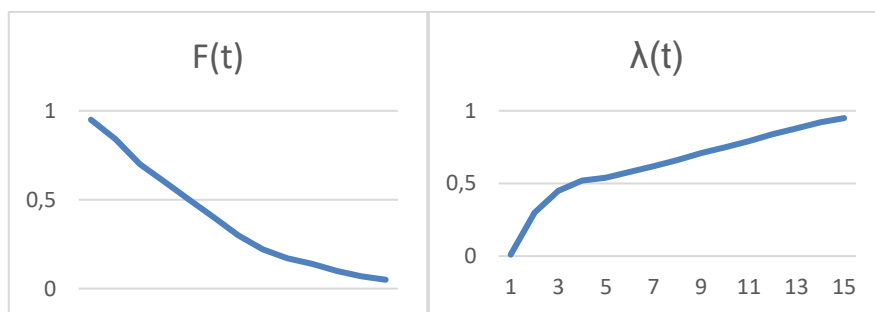
$$\lambda(t) = \frac{d(1-\bar{F}(t))}{\bar{F}(t)}, \quad (2)$$

Показатели вероятности безотказной работы и интенсивности отказов для водопроводов – это функции по времени. Первая всегда является убывающей функцией, то есть чем больше время эксплуатации систем водоснабжения, тем ниже вероятность их бесперебойной работы. Вторая может находиться в двух состояниях – либо возрастать, либо оставаться неизменной. Неизменность интенсивности отказов в системе водоснабжения будет происходить в той ситуации, когда для функции распределения наработки действует экспоненциальный закон:

$$F(t) = 1 - e^{-at}, \quad a = \lambda(t), \quad (3)$$

где  $a$  – параметр потока отказов для функции распределения.

На рисунке 1 представлены примеры графиков изменения показателей вероятности безотказной работы, а также интенсивности отказов.



**Рис. 1 – Пример изменения показателей вероятности безотказной работы и интенсивности отказов систем водоснабжения**

С целью получения наиболее точного значения показателя частоты отказов для каждого участка трубопровода следует учитывать большое число случайных факторов. Если учитывать какой-либо из важных факторов либо использовать усредненные значения, то возникают погрешности недопустимого уровня, что в свою очередь, дает не только некорректный прогноз аварий, но и некорректное отключение потребителей для проведения ремонтных работ, а также повышение затрат на проведение подобных ремонтных и сервисных работ. Кроме того, сложность оценки и прогноза состояний водопровода заключается в том, что на текущий момент времени не представлен инструментарий его диагностики для участков водопровода. По этой причине в настоящее время наиболее объективным вариантом оценки считается проведение сбора статистических данных о работе водопровода и их последующая обработка. Недостатками данного подхода является то, что срок службы водопровода достаточно длительный, соответственно, результаты сбора статистики будут представлены за продолжительный период [Методы прогнозирования..., 2011]. Однако такой подход приводит к

обесцениванию данных по изменению свойств труб водопровода. Как показывает практика, за длительные временные промежутки происходит изменение технологий, появление новых материалов при обновлении / ремонте участков трубопровода – это приводит к тому, что собранная статистическая база не имеет практической ценности [Фролов, Быков, 2021].

В качестве подхода, учитывающего данную ситуацию, в работе [6] предложен следующий метод. Для объекта, который находится в эксплуатации определенное количество лет ( $t_{\text{экспл}}$ ), существует показатель остаточной наработки  $T_{\text{ост}}$ . Данный показатель рассчитывается на основании выражения:

$$T_{\text{ост}} = \int_0^{\infty} \frac{F(t_{\text{экспл}} + x)}{F(t_{\text{экспл}})} dx, \quad (6)$$

Для определения периодов эксплуатации в качестве оцениваемых временных интервалов используется время между аварийными ремонтами для участков водопровода. Для данных временных отрезков существует прямая тенденция к снижению их продолжительности. Применяя формулы (2) и (6) производится расчет времени работы оцениваемого участка трубопровода до следующего отказа (к) на основании формулы:

$$t_{\text{ож}}^k = t_{\text{ож}}^{k+1} - \int_0^{\infty} \frac{(\Lambda(t))^k}{k!} e^{-\Lambda(t)} dt, \quad (7)$$

Расчет временного интервала между двумя взаимно следующими отказами рассчитывается по формуле:

$$t_{\text{ож}}^{k+1} = \int_0^{\infty} \frac{(\Lambda(t))^k}{(k-1)!} e^{-\Lambda(t)} dt, \text{ где } \Lambda(t) = \int_0^t \Lambda(x) dx, \quad (8)$$

После получения сведений о возникновении аварий на оцениваемом участке водопровода за определенный временной период возникает возможность объективной оценки частоты отказов для данного участка.

Сущность данной оценки заключается в следующем. Определение частоты отказов, равно как и других показателей безотказности, осуществляется с достоверно оцененными фактами отказа, а также временем его возникновения. При этом причины, по которым можно определить продолжительность времени между отказами, остаются неуточненными, поэтому для анализируемых параметров можно привести математические зависимости, в которых будут указаны такие параметры, как свойства водопровода, а также условия их эксплуатации. Это позволит на основании свойств каждого участка водопровода выполнить оценку данного участка с точки зрения старения, выраженную в виде формулы для закона распределения времени безотказной работы. Впоследствии реализация методики происходит в несколько шагов:

1. Определение состава внешних факторов, которые оказывают непосредственное влияние на значение показателя безотказности участка водопровода с учетом влияний внешней среды. Преобразование показателя в количественную оценку.

2. Определение показателя безотказности для оцениваемого участка трубопровода.

3. Оценка и выбор стратегии эксплуатации с учетом числа отказов и количества проведенных аварийных ремонтов.

4. Анализ экономических факторов для выбранной стратегии эксплуатации. Подобная оценка выполняется с учетом ограниченности количества допустимых аварийных ремонтов для любого участка водопровода с учетом окружающей среды. По этой причине оценивается экономическая выгода ремонта / замены участка трубы. С этой точки зрения ремонт более вывгоден, однако при возникновении аварийной ситуации затраты, связанные с потерей воды, могут быть намного выше. По этой причине учитывается не только статистика аварий, но и статистика затрат в количественном и финансовом эквиваленте, что позволяет не только прогнозировать аварии, но и оценивать потенциальные потери.

5. Анализ всех условий эксплуатации, стратегии восстановления. Помимо этого, оцениваются такие факторы, как экологическая безопасность, выраженная степень обеспечения защиты жизненно важных интересов потребителей, в области обеспечения их водными ресурсами. При этом оценивается возможность минимизации экологического риска ущерба, ущерба компонента природной среды, а также угроз природно-антропогенным объектам. Производится уточнение объема потерь воды с момента возникновения аварии и до устранения её отказа на основании имеющихся данных по потерям воды. Также оцениваются перспективы в отношении внедрения новых материалов и технологий в случае проведения реновации водопровода.

#### **Прогноз аварий на основании вероятности аварий**

В публикациях А.Р. Хабибулиной, С.Ю. Шишмакова [Хабибулина, 2020; Шишмаков, 2015] приводится несколько иная методика оценки надежности участка сети водопровода на основании вероятности возникновения аварии. Для этого распределение аварий оценивается на основании закона Пуассона, представленного в выражении (1).

Для дальнейшего расчета используется определенная статистика по авариям на участке  $X_i$  в отношении лет (i). Данная статистика формируется в виде временного ряда:  $X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_{t-1}, X_t$ . Где  $X_i = 0, 1, \dots, K$ .

Для данного временного ряда происходит вычисление параметра среднего числа аварий за год.

Вероятность возникновения в определенном промежутке времени с длительностью  $t$  числа аварий  $X$  будет представлена как  $P_t(X)$ . Взяв временной промежуток в 1 год ( $t=1$ ) и среднее число аварий равное единице, будет получено, что  $P(x) = 1$ .

Для оценки вероятности возникновения  $X$  аварий в определенном  $(t+i)$  году необходимо использовать статистику за  $t$  лет, а также определиться со значением величины  $I_{t+1}$ . Для этого необходимо определить значение среднего ускорения  $b$ , и изменения величины  $I$ , являющегося накопленным начальным значением. Далее на практике осуществляется сопоставление расчетных значений с существующими физическими и изменениями со статистикой возникновения аварий.

#### Заключение

На текущий момент ситуация с прогнозированием аварий является довольно сложной и не решенной. Существующие методики прогноза основаны на использовании методов математической статистики и теории вероятности, что не всегда дает качественный прогнозный результат, даже при использовании различных вспомогательных факторов и коэффициентов. Сбор статистики по авариям ведется долгое время, однако важно учитывать множество дополнительных факторов, влияющих на работу водопроводных сетей. Сегодня существует единая информационная база для служб ЖКХ, в которой ведется статистический анализ всех аварий на объектах по всей стране. Она используется нейронной сетью для проведения анализа и прогнозирования аварийных ситуаций. Однако на данный момент не ясно, насколько эффективно работает данное программное обеспечение и как нейронная сеть будет учитывать дополнительные факторы, например, ремонт пролегающих рядом коммуникаций, в результате которого может произойти сдвиг массы земли.

#### Литература

1. Вероятностно-статистический метод прогнозирования технического состояния трубопроводов. URL: <http://prognoz.org/lib/veroyatnostno-statisticheskii-metod-prognozirovaniya-tekhnicheskogo-sostoyaniya-truboprovodov> (дата обращения: 05.03.2023).
2. Гальперин Е.М., Полуян В.И., Чуви́пин В.И. Надежность систем водоснабжения и водоотведения // Водоснабжение и санитарная техника. 2006. №9.
3. Захаревич М.Б., Ким А.Н., Мартьянова А.Ю. Повышение надежности систем водоснабжения на основе внедрения безопасных форм организации их эксплуатации и строительства // Учебное пособие. СПбГАСУ, 2018.
4. Любчик А.Н. Прогнозирование технического состояния трубопроводов на основе анализа аварийных ситуаций. Санкт-Петербургский государственный горный университет. 2011.
5. Методы прогнозирования изменения содержания загрязняющих веществ в водных объектах во времени по результатам систематических гидрохимических наблюдений // ТЕХЭКСПЕРТ. 2011. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200097958> (дата обращения: 05.03.2023).
6. Оценка безотказности и прогнозирования долговечности трубопроводов подземной прокладки / М.В. Калинин: Сантехника. 2006. №4.
7. Семиохин С. И. Обзор современных подходов к прогнозированию временных рядов // Молодежный научно-технический вестник. 2017. №12.
8. Фролов А.О., Быков А.А. Проектирование автоматизированной системы обнаружения аварий в водопроводной сети / Sciences of Europe. 2021. № 65-1 (65). С. 50-54.
9. Фролов А.О., Быков А.А. Анализ факторов, сигнализирующих о состоянии систем водоснабжения / Машиностроение и безопасность жизнедеятельности. 2021. № 1 (42). С. 40-46.
10. Хабибулина А.Р. Прогнозирование чрезвычайных ситуаций в системе водоснабжения муниципального образования / Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева: Казань, 2020.
11. Шишмаков С.Ю. Методика прогнозирования нарушения работоспособности водопроводных сетей / С.Ю. Шишмаков // Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина». Екатеринбург, 2015.

#### References in Cyrillics

1. Veroyatnostno-statisticheskij metod prognozirovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya truboprovodov. URL: <http://prognoz.org/lib/veroyatnostno-statisticheskii-metod-prognozirovaniya-tekhnicheskogo-sostoyaniya-truboprovodov> (data obrashcheniya: 05.03.2023).
2. Gal'perin E.M., Poluyan V.I., CHuvipin V.I. Nadezhnost' sistem vodosnabzheniya i vodootvedeniya // Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika. 2006. №9.
3. Zaharevich M.B., Kim A.N., Mart'yanova A.YU. Povyshenie nadezhnosti sistem vodosnabzheniya na osnove vnedreniya bezopasnyh form organizacii ih ekspluatatsii i stroitel'stva // Uchebnoe posobie. SPbGASU, 2018.
4. Lyubchik A.N. Prognozirovanie tekhnicheskogo sostoyaniya truboprovodov na osnove analiza avarijnyh situacij // Sankt-Peterburgskij gosudarstvennyj gornyj universitet. 2011.

5. Metody prognozirovaniya izmeneniya soderzhaniya zagryaznyayushchih veshchestv v vodnyh ob"ektah vo vremeni po rezul'tatam sistematicheskikh gidrohimicheskikh nablyudenij // TEKHEKSPERT. 2011. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200097958> (data obrashcheniya: 05.03.2023).
6. Ocenka bezotkaznosti i prognozirovanie dolgovechnosti truboprovodov podzemnoj prokladki / M.V. Kalinin: Santekhnika, №4 – 2006.
7. Semiohin S. I. Obzor sovremennykh podhodov k prognozirovaniyu vremennykh ryadov // Molodezhnyj nauchno-tekhnicheskij vestnik. 2017. №12.
8. Frolov A.O., Bykov A.A. Proektirovanie avtomatizirovannoy sistemy obnaruzheniya avarij v vodoprovodnoj seti / Sciences of Europe. 2021. № 65-1 (65). S. 50-54.
9. Frolov A.O., Bykov A.A. Analiz faktorov, signaliziruyushchih o sostoyanii sistem vodosnabzheniya / Mashinostroenie i bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti. 2021. № 1 (42). S. 40-46.
10. Habibulina A.R. Prognozirovanie chrezvychajnykh situacij v sisteme vodosnabzheniya municipal'nogo obrazovaniya / Kazanskij nacional'nyj issledovatel'skij tekhnicheskij universitet im. A.N. Tupoleva: Kazan', 2020.
11. SHishmakov S.YU. Metodika prognozirovaniya narusheniya rabotosposobnosti vodoprovodnykh setey / S.YU. SHishmakov // Ural'skij federal'nyj universitet imeni pervogo Prezidenta Rossii B.N. El'cina». Ekaterinburg, 2015.

**Ключевые слова**

Системы водоснабжения, прогноз, прогнозирование аварий, прогнозирование неисправностей

*Быков Артем Александрович, доцент, кандидат технических наук, Финансовый университет при  
правительстве Российской Федерации, Москва, Россия,  
bykov\_a\_a@list.ru*

*Bersugir Mukhamedi Amiruly, кандидат физико-математических наук, заведующий кафедрой  
«Информационные системы и технологии» «Esil University», г. Астана, Республика Казахстан,  
bersugir68@mail.ru*

**Keywords**

Water supply systems, forecast, accident forecasting, malfunction forecasting

*Bykov Artem Alexandrovich, Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Financial University  
under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russia,  
bykov\_a\_a@list.ru*

*Bersugir Mukhamedi Amiruly, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Head of the  
Department of Information Systems and Technologies, Esil University, Astana, Republic of Kazakhstan,  
bersugir68@mail.ru*

**Artem Bykov, Mukhamedi Amiruly Bersugir, Methods for prediction of accident in water supply systems**

DOI: 10.34706/DE-2024-01-10

JEL classification: M10 – Деловое администрирование: Общее, M15 – Управление ИТ, L86 – информационные и интернет-услуги; Компьютерное программное обеспечение, K39 – Другие основные области права: Другое,

**Abstract**

The article discusses existing approaches to predicting accidents in water supply systems. This task is one of the most important, as it allows you to carry out work to prevent accidents in advance, as well as, in the event of such accidents, to be as prepared as possible for such situations. In other words, the forecast will make it possible to avoid the occurrence of emergency situations on water supply networks, which actualizes the chosen research topic. The purpose of the article is to describe methods for predicting accidents in water supply systems. The object of research is water supply systems. The subject of the study is methods for predicting accidents in water supply systems. Research methods are an analysis of scientific publications and articles, carried out in order to generalize existing methods for predicting accidents in water supply systems. The scientific novelty of the study lies in the review of modern methods for predicting emergency situations. The practical significance lies in assessing the possibility of implementing such a forecast using information