

Надежность транспортирующих систем водоотведения крупных городов

Dependability of water disposal systems of major cities

Леонид А. Баранов¹, Юрий А. Ермолин^{1*}
Leonid A. Baranov¹, Yuri A. Yermolin^{1*}

¹Российский университет транспорта (МИИТ), Москва, Российская Федерация

¹Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russian Federation

*ermolin.y@yandex.ru



Леонид А. Баранов



Юрий А. Ермолин

Резюме. Цель этой статьи состоит в разработке аналитической методики вычисления показателя надежности специфической древовидной транспортирующей сети – системы водоотведения сточных вод крупного города. **Методы.** В качестве меры надежности канализационной сети в целом предлагается рассматривать относительный объем сточной воды, сбрасываемой из канализационной сети в окружающую среду вследствие отказов ее элементов. Эта статья представляет простую и удобную методику вычисления этого объема. В основе этой методики лежит представление древовидной канализационной сети в виде комбинации Y-образных фрагментов, названных структурообразующими элементами. Каждый такой элемент формально заменяется его фиктивным эквивалентом с интенсивностью отказов, рассчитываемой из условия равенства объемов неочищенного сброса сточной воды реального и фиктивного элементов. Последовательное применение такого подхода сводит задачу оценки объема сбрасываемых стоков к элементарным подзадачам, решение которых находится методами теории вероятностей. **Результаты.** Определение показателя эксплуатационной надежности сводится к рекуррентной пошаговой процедуре эквивалентирования Y-образных фрагментов сети, на каждом шаге которой результаты расчетов на предыдущей стадии используются в качестве исходных данных. Каждый такой шаг, начиная от входов сети, приводит к новой (виртуальной) сети, в отношении которой процедура повторяется. Процесс эквивалентирования заканчивается, когда исходная сеть оказывается представленной всего одним фиктивным элементом, для которого показатель надежности определяется элементарно. **Заключение.** Разработана методика расчета показателя эксплуатационной надежности древовидной канализационной сети крупного города, удобная для применения. Перечислены некоторые практические задачи, при решении которых предлагаемая методика была бы продуктивна. Сформулированы направления перспективных исследований в этом направлении.

Abstract. The Aim of the paper is to develop an analytical procedure for calculating the dependability indicator of a specific tree-like transporting network, i.e., the water disposal system of a major city. **Methods.** It is suggested using the relative volume of sewage water released from a sewage system into the environment as the result of the failure of the former's components as the measure of dependability. This paper presents a simple and convenient method for calculating such volume. The method is based on the representation of a tree-like sewage network as a combination of Y fragments referred to as structural elements. Every such element is formally replaced with its pseudo equivalent with a failure rate calculated assuming that the volumes of untreated waste water released by actual and fictitious elements are equal. A consistent application of this approach reduces the problem of estimation of the volume of released waste water to elementary subproblems that are solved using probability methods. **Results.** The problem of identifying the operational dependability indicator comes down to a recurrent stepwise procedure for equalization of Y fragments of the network, at each step of which the calculation data from the preceding step are used as the input data. Each such step, starting from the entry network, leads to another (virtual) network, for which the procedure repeats. The equalization process ends when the original network is represented by only one pseudo element, for which the dependability indicator is defined in an elementary way. **Conclusion.** The authors developed a convenient method for calculating the operational dependability indicator of a tree-like sewer network of a major city. Some practical problems are referred to that can be solved using the proposed method. Future lines of research in the domain were identified.

Ключевые слова: древовидная канализационная сеть, показатель надежности, Y-образный фрагмент, эквивалентирование, пошаговая процедура.

Keywords: tree-like sewer network; dependability indicator; Y fragment; equalization; stepwise procedure.

Для цитирования: Баранов Л.А., Ермолин Ю.А. Надежность транспортирующих систем водоотведения крупных городов // Надежность. 2022. №2. С. 3-9. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2022-22-2-3-9>

For citation: Baranov L.A., Yermolin Yu.A. Dependability of water disposal systems of major cities. Dependability 2022;2:3-9. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2022-22-2-3-9>

Поступила 02.03.2022 г. / **После доработки** 28.04.2022 г. / **К печати** 17.06.2022 г.

Received on: 02.03.2022 / **Revised on:** 28.04.2022 / **For printing:** 17.06.2022.

Современное состояние науки и техники открывает большие возможности не только для внедрения прогрессивных достижений в конкретные производства, но и, в ряде случаев, является основой для разработки новых исследовательских технологий изучения различных объектов и систем промышленности, транспорта, коммунального хозяйства и т.п. инфраструктур. Развитие вычислительной техники, использование искусственного интеллекта, возможность оперативной обработки больших массивов информации (Big Data) иногда позволяют взглянуть на изучаемые, казалось бы, хорошо известные процессы с нетрадиционной точки зрения, и предложить более эффективные способы управления ими. При этом «ревизии», подчас, могут быть подвергнуты даже критерии, по которым это управление (понимаемое в широком смысле) осуществляется.

Примером такого подхода к изучению объекта может служить городская канализационная сеть, рассматриваемая далее с точки зрения надежности ее функционирования.

Система водоотведения города (особенно, крупного) является одной из важнейших инфраструктур, определяющих условия его нормального функционирования. Помимо производственной сферы, состояние городской системы водоотведения (канализации) самым непосредственным образом влияет на качество жизни буквально каждого человека, обеспечивая ему современный уровень комфортного обитания и сохранение здоровья. Существует небезосновательная точка зрения, объясняющая относительные успехи в борьбе с инфекционными болезнями, периодически уносившими жизни значительной части населения средневековой Европы, именно с изобретением и строительством канализации по схемам, основные принципы которых, развиваясь и совершенствуясь, сохранились до сих пор.

Назначением системы водоотведения является сбор и транспортировка сточных вод от мест их образования к очистным сооружениям по канализационной сети города. Как правило, такая сеть строится по напорно-самотечному принципу. Это означает, что сточная вода от мест ее образования по системе магистралей (труб, каналов, коллекторов), уложенных под землей с определенными уклонами, транспортируется самотеком, а в местах, где по условиям рельефа местности самотек невозможен, поднимается на более высокие отметки канализационными насосными станциями (КНС), после чего самотек продолжается. Количество КНС раз-

личной мощности для крупного города, занимающего большую территорию, может достигать нескольких десятков (например, в Москве их более 100). Вся сточная вода доставляется в итоге на очистные сооружения, где подвергается соответствующей обработке, после чего, очищенной, сбрасывается в естественный водоем [1].

Городская система водоотведения может быть отнесена к классу древовидных транспортирующих сетей [2, 3]. В качестве визуальной модели ей соответствует односвязный, ациклический граф, имеющий множество входных вершин (места образования сточных вод), единственный выход (очистные сооружения) и промежуточные вершины – точки соединений однородных участков транспортирующих магистралей: участков труб, каналов, коллекторов, насосных станций – ребер графа (рис. 1).

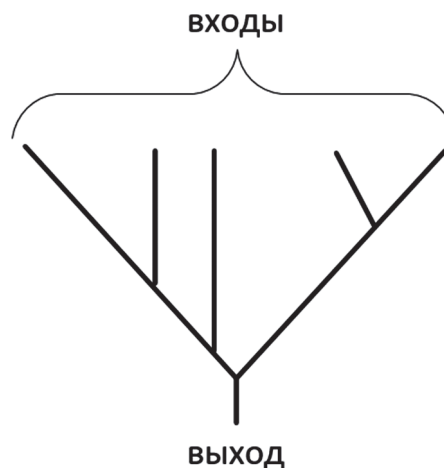


Рис. 1. Граф, отображающий канализационную сеть города

Примерами других объектов, также выполняющих «собирательную» функцию и относящихся к этому же классу, могут служить сети нефте- и газопроводов, доставляющие добываемый продукт от скважин к магистральному трубопроводу, подъездные пути к сортировочным горкам крупных железнодорожных станций, главные конвейеры сборочных производств и т.п. Несмотря на различия физических процессов, происходящих в таких системах, их древовидная конфигурация позволяет, по крайней мере, в некоторых случаях, сформулировать и рассмотреть некие специфические подходы к изучению подобных объектов.

Важнейшим свойством любого технического объекта является его надежность [4]. Ниже, на примере

городской системы водоотведения, предлагается один из возможных подходов к оценке надежности древовидных транспортирующих сетей, использующий именно их структурные особенности.

Надежность любого технического объекта принято оценивать некоторыми количественными показателями, такими, например, как среднее время наработки между отказами, вероятность безотказной работы за заданное время, коэффициент готовности и т.п. [4, 5]. В большинстве случаев каждый из таких показателей имеет ясный смысл, однозначно трактуется физически и не противоречит обыденным представлениям о степени надежности объекта. Когда же речь идет о надежности канализационной сети города, эти показатели либо вообще не применимы, либо трудно интерпретируемы и требуют уточняющих дополнительных пояснений и комментариев, т.е. теряют свою объективность [6-8]. Так, например, формальное утверждение «Вероятность безотказной работы канализационной сети города в течение года равна (цифра)», при его углубленном осмыслении с учетом специфики функционирования сети, практически никакой информации о ее надежности не несет. В силу этого, нахождение альтернативных показателей надежности городской канализационной сети как единого объекта, которые бы отличались большей информативностью и удобством использования при решении практических задач, непреходяще остается одной из актуальных проблем [9].

В процессе функционирования канализационной сети ее элементы (трубы, каналы, коллекторы) в случайные моменты времени выходят из строя, ремонтируются и вновь вступают в работу. Каждая авария влечет за собой некоторый объем сточной воды, сбрасываемой из поврежденного элемента на поверхность. В результате часть воды, поступившей на входы сети, не доставляется к ее выходу, т.е. сеть частично перестает выполнять свою функцию: транспортировать *всю* сточную воду к очистным сооружениям, что можно трактовать как снижение надежности процесса водоотведения в целом. Имея это в виду, в [10] предложено количественно оценивать надежность городской канализационной сети показателем эксплуатационной надежности γ , рассчитываемым по выражению:

$$\gamma = \frac{\Delta Q}{Q}, \quad (1)$$

где Q – общий объем сточной воды, поступивший на все входы сети за время T , а ΔQ – объем воды, не доставленный к очистным сооружениям вследствие аварий элементов сети за то же время.

По определению γ может изменяться в пределах от 0 до 1; при этом значению $\gamma = 0$ соответствует абсолютно надежная, а $\gamma = 1$ – абсолютно ненадежная сеть.

Таким образом, расчет γ , как это следует из (1), сводится к определению ΔQ .

Найдем ΔQ для простейшей канализационной сети, изображенной на рис. 2а.

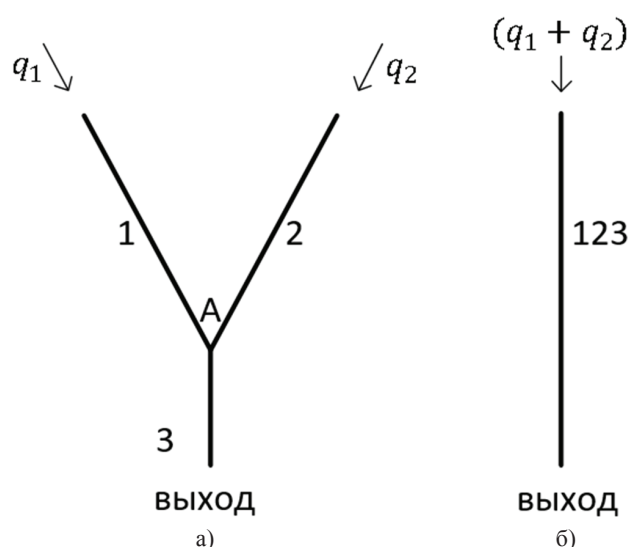


Рис. 2. Канализационная сеть а) и ее виртуальный эквивалент б)

Сеть имеет Y-образный вид и содержит три элемента: каналы 1, 2 и 3. Элементы 1 и 2 соединяются между собой в точке А. На входы сети поступают расходы сточной воды q_1 и q_2 , и по каналу 3 вода транспортируется на выход.

Рассчитаем объем воды ΔQ_y , не доставляемый на выход такой сети из-за аварий ее элементов за время T при следующих допущениях:

- расходы сточной воды на входах сети q_1 и q_2 постоянны и известны;
- каждый из элементов сети (i -й) находится под воздействием двух потоков событий: потока отказов и потока восстановлений с интенсивностями λ_i и μ_i соответственно;
- потоки отказов и восстановлений – стационарные пуассоновские с известными параметрами λ и μ ;
- при выходе элемента из строя (отказе) его пропускная способность становится равной нулю и вся сточная вода, поступающая на него, выбрасывается неочищенной на поверхность;
- вероятность одновременных отказов двух или трех элементов Y-образной сети пренебрежимо мала по сравнению с вероятностью отказа одного (любого) элемента.

Определение ΔQ_y сводится к нахождению математического ожидания дискретной случайной величины $(\Delta Q_y)_j$, принимающей четыре значения ($j = 1 \dots 4$) с финальными вероятностями, вычисляемыми как результат решения соответствующей системы линейных алгебраических уравнений [10-12], и имеет вид:

$$\Delta Q_y = \frac{(\rho_1 + \rho_3)q_1 + (\rho_2 + \rho_3)q_2}{1 + \rho_1 + \rho_2 + \rho_3} \cdot T, \quad (2)$$

где введены безразмерные параметры $\rho_i = \lambda_i / \mu_i$, характеризующие процесс «отказ-восстановление» каждого i -го элемента сети.

Следующий шаг в разработке инженерной методики расчета γ – виртуальная трансформация сети в направлении возможного упрощения ее структуры.

С этой целью рассмотрим «вырожденную сеть», изображенную на рис. 2б, – единственный элемент I_{23} , находящийся под воздействием потока отказов и потока восстановлений, характеризуемых безразмерным параметром ρ_{123} , на вход которого поступает расход сточной воды $(q_1 + q_2)$. Известно [10, 12], что объем ΔQ_I воды, не доставленный на выход этого элемента из-за его отказов за время T равен:

$$\Delta Q_I = \frac{\rho_{123}}{1 + \rho_{123}} \cdot (q_1 + q_2) \cdot T. \quad (3)$$

Раскладывая дробь, стоящую в правой части выражения (3), в ряд Маклорена и ограничиваясь линейным членом, имеем:

$$\Delta Q_I \approx \rho_{123} \cdot (q_1 + q_2) \cdot T. \quad (4)$$

Из (4) видно, что параметр ρ_{123} равен относительной доле объема сточной воды, не доставленной за время T на выход элемента из-за его отказов, т.е. численно совпадает с показателем эксплуатационной надежности γ , введенным выражением (1).

Если теперь ρ_{123} подобрать из условия $\Delta Q_I = \Delta Q_Y$, то элемент I_{23} , изображенный на рис. 2б, функционально будет вести себя (в смысле принятого критерия надежности) как Y-образная сеть, показанная на рис. 2а. И, значит, она может быть виртуально заменена единственным эквивалентным элементом I_{23} , имеющим параметр ρ_{123} .

Приравняв (2) и (4) и разрешая полученное уравнение относительно ρ_{123} , получаем (с учетом очевидного неравенства $(\rho_1 + \rho_2 + \rho_3) < 1$):

$$\rho_{123} = \gamma = \frac{(\rho_1 + \rho_3)q_1 + (\rho_2 + \rho_3)q_2}{q_1 + q_2}. \quad (5)$$

Таким образом, виртуальная замена Y-образной сети (рис. 2а) одним эквивалентным элементом (рис. 2б) дает возможность оценивать ее надежность, рассчитывая γ по простому выражению (5).

Идея дальнейших рассуждений состоит в выявлении возможности проведения процедуры эквивалентирования не только для Y-образной сети, но и для сколь угодно сложной древовидной сети в целом [2, 3]. Предпосылки успешности такого подхода состоят в следующем.

Визуальный анализ древовидной сети (см., например, рис. 1) позволяет отметить два обстоятельства: 1) любая сложная сеть представима в виде некоей композиции простейших Y-образных сетей (структурообразующих фрагментов); 2) при виртуальном эквивалентировании любого структурообразующего фрагмента основная особенность исходной сети – ее древовидность – остается неизменной.

Расчет показателя эксплуатационной надежности γ сводится к рекуррентной пошаговой процедуре эквивалентирования Y-образных фрагментов сети, на каждом шаге которой в качестве исходных данных используются результаты расчетов на предшествующем шаге. Каждый такой шаг, начиная от входов, приводит к новой (виртуальной) сети, в отношении которой процедура повторяется. Процесс эквивалентирования

заканчивается, когда исходная сеть оказывается представленной одним фиктивным элементом, показатель надежности которого определяется по выражению, аналогичному (5).

При заданной конфигурации канализационной сети процедура расчета γ хорошо алгоритмируется и удобна для использования вычислительной техники. Примеры применения разработанной методики для расчета надежности конкретных сетей можно найти в [8, 9, 13].

Введенный показатель эксплуатационной надежности городской канализационной сети обладает рядом преимуществ, которые могут способствовать его широкому применению в инженерной практике.

Показатель γ характеризуется большой информативностью: его значение зависит, как это видно уже из (5), не только от интенсивностей отказов и восстановлений всех элементов (λ и μ), но и от технологических параметров процесса водоотведения (расходов по всем входам сети q), а также от места отказавшего элемента в структуре объекта.

Вычисление γ весьма просто и удобно при проведении надежностных расчетов для реальных канализационных сетей. Определение традиционных показателей надежности обычно связано с необходимостью решения системы алгебраических уравнений, записанных по графу состояний относительно финальных вероятностей. Если учесть, что канализационная сеть города (особенно, крупного) может содержать сотни и даже тысячи однородных элементов, то решение такой системы, в силу ее большой размерности, представляет собой чрезвычайно трудную задачу даже для современного уровня развития вычислительной техники. При определении γ таких проблем не возникает: задача сводится к последовательному рассмотрению простых подзадач, решение которых никаких трудностей не представляет.

Интересно отметить еще одно обстоятельство. При расчете ΔQ_Y принято допущение об ординарности потоков отказов и восстановлений, воздействующих на каждый Y-образный фрагмент сети. Однако когда вычисляется значение γ для сети в целом, требование к ординарности потоков, по-существу, снимается, поскольку при неоднократных эквивалентированиях структурообразующих фрагментов, осуществляемых, в соответствии с предложенной методикой расчета γ , независимо друг от друга, неоднократно же учитывается ординарность, т.е. при замене каждого Y-образного фрагмента, что, в принципе, не исключает возможность появления на всей сети более чем одного отказа или восстановления одновременно.

Информационная насыщенность показателя эксплуатационной надежности γ позволяет расширить возможности его использования при эксплуатации систем водоотведения городов. Некоторые задачи, при решении которых γ может быть уместным и продуктивным, в постановочном плане перечислены ниже.

Ранжирование канализационных сетей по их надежности. Рассматривая γ как комплексный показатель надежности системы водоотведения в целом, можно количественно определить **следующие основные** состояния объекта, регламентируемые ГОСТ: исправное, неисправное, работоспособное, неработоспособное и предельное [5]. Идентификационным признаком принадлежности системы к тому или иному состоянию может служить численное значение γ . Интервал изменения γ ($0 \leq \gamma \leq 1$) разбивается на количество подынтервалов, равное числу состояний, а факт нахождения системы в определенном из них отражается значением показателя γ , принадлежащим подынтервалу, соответствующему этому состоянию:

- $0 \leq \gamma < \gamma_1$ – исправное;
- $\gamma_1 \leq \gamma < \gamma_2$ – неисправное;
- $\gamma_2 \leq \gamma < \gamma_3$ – работоспособное;
- $\gamma_3 \leq \gamma < \gamma_4$ – неработоспособное;
- $\gamma_4 \leq \gamma \leq 1$ – предельное.

При этом численные значения границ подынтервалов $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ и γ_4 должны устанавливаться регламентированными требованиями по охране окружающей среды.

Одним из возможных применений такого объективного ранжирования канализационных сетей может быть рациональное перераспределение регионального бюджета, выделяемого городам и населенным пунктам региона для содержания и реновации их коммунальных инфраструктур [14, 15].

Планирование мероприятий по реновации сети. Разработка планов кратко- и среднесрочных мероприятий по реновации городской канализационной сети обычно происходит путем сравнения нескольких вариантов, эмпирически предлагаемых экспертами-специалистами. Как правило, такое сравнение осуществляется по экономическим критериям и учитывает ограничения на материально-технические и финансовые возможности эксплуатирующей организации. Использование показателя эксплуатационной надежности при разработке таких планов может сводиться к виртуальной замене на модели сети элементов, предполагаемых к реновации каждым из вариантов, новыми – с соответствующими значениями λ , и расчетом γ для каждого предлагаемого варианта. Наиболее рациональным оказывается вариант, при котором значение γ оказывается наименьшим [9, 16].

Управление надежностью сети путем изменения восстановительного потенциала эксплуатирующей организации. Методологически постановка и алгоритм решения такой задачи по существу мало отличается от задачи, рассмотренной в предыдущем пункте. Различие состоит в управляющем параметре μ , физический смысл которого – среднее число ремонтов в единицу времени. Решение задачи в зависимости от конкретной постановки позволяет судить об экономически обоснованном количестве ремонтных бригад на сети, их численном составе, квалификации и оснащении, местах базирования в городе и т.п. факторах, влияющих на величину показателя эксплуатационной надежности.

Представляется, что круг проблем, которые могут решаться с привлечением показателя надежности γ , не ограничивается задачами, перечисленными выше, и при возникновении соответствующих эксплуатационных ситуаций может быть существенно расширен.

Существуют, однако, случаи, которые либо исключают, либо ограничивают возможность применения разработанной методики. Укажем на два из них.

Первый состоит в том, что встречаются города, канализационные сети которых не являются строго древовидными. Различные причины: хаотичный рост, особенности рельефа, неравномерное освоение городской территории и т.п. – исторически приводили к тому, что между отдельными бассейнами канализования сооружались гидравлические каналы-связки, нарушающие древовидность канализационной сети. Для таких сетей разработанная методика определения γ не применима, и проблема оценки надежности в рассматриваемом в данной статье смысле требует дальнейших исследований.

Второй случай обусловлен нестационарностью процессов, следствием чего является изменение интенсивностей отказов элементов сети с течением времени. При этом можно выделить две наиболее часто встречающиеся закономерности. Первая отражает естественный процесс «старения» элементов, сопровождающийся ростом числа их отказов в единицу времени. Вторая – специфическая, когда интенсивность отказов проявляет явную тенденцию к периодическому, посезонно-постоянному изменению. Обе эти тенденции, однако, не исключают возможности применения разработанной методики расчета показателя эксплуатационной надежности сети, предварительно выполнив формальную «стационаризацию» процессов. Суть стационаризации заключается в замене изменяющейся интенсивности потока отказов постоянной величиной, значение которой подбирается по некоторому предварительно принимаемому критерию. Результаты такого подхода в отношении «стареющих» элементов опубликованы в [16–18], а для посезонно-изменяющейся интенсивности – в [19–22]. Погрешности, допускаемые при такой приближенной замене [23], вполне приемлемы для инженерных расчетов.

Таким образом, в статье всесторонне рассмотрен специфический показатель эксплуатационной надежности городской канализационной сети как частного случая целого класса подобных объектов – древовидных транспортирующих структур. Подробно проанализированы достоинства введенного показателя: объективность, универсальность и информационная насыщенность. Отмечается ориентация методики расчета показателя надежности на решение практических задач, возникающих при эксплуатации городских канализационных сетей. Очерчен круг проблем, при решении которых использование введенного показателя эксплуатационной надежности может оказаться весьма продуктивным, а также сформулированы задачи для дальнейших исследований в этом направлении.

Библиографический список

1. Яковлев С.В., Воронов Ю.В. Водоотведение и очистка сточных вод: Учебник для вузов: М.: АСВ, 2002. 704 с.
2. Baranov L.A., Ermolin Y.A., Shubinsky I.B. On a Reliability of Tree-Like Transportation Networks // *Reliability: Theory & Applications*. No. 2(62). Vol. 16. Issue 2021. Pp. 115-123. DOI: <https://doi.org/10.24412/1932-2321.1-2021-262-115-123>
3. Baranov L.A., Godyaev A.I., Ermolin Y.A., Shubinsky I.B. Reliability of certain class of transportation networks // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 2096(1). Issue 1. Id. 012122.
4. Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д. Математические методы в теории надежности. М.: Наука, 1965. 524 с.
5. ГОСТ 27.002-2015. Надежность в технике. Термины и определения. М.: Стандартиформ, 2016. IV, 23 с.
6. Ермолин Ю.А., Алексеев М.И. О методологии исследования надежности стареющих элементов и систем водопровода и канализации // *Водоснабжение и санитарная техника*. 2022. № 9. С. 2-4.
7. Jin Y., Makherjee A. Modeling blockage failures in sewer systems to support maintenance decision making // *Journal of Performance of Constructed Facilities*. 2010. № 6. Pp. 622-633.
8. Ермолин Ю.А., Алексеев М.И. Надежность водоотводящих сетей и пути ее повышения // *Водоснабжение и санитарная техника*. 2012. № 1. С. 13-17.
9. Ермолин Ю.А., Баранов Л.А. Специфика и методологические особенности оценки надежности водоотводящих сетей крупных городов // *Водоснабжение и санитарная техника*. 2021. № 4. С. 50-53.
10. Ermolin Y.A. Estimation of raw sewage discharge resulting from sewer network failures // *Urban Water*. 2001. Vol. 3. No. 4. Pp. 271-276.
11. Ермолин Ю.А., Алексеев М.И. Reliability measure of a sewer network // *Вода и экология: проблемы и решения*. 2018. № 2(74). С. 51-58.
12. Baranov L.A., Ermolin Y.A., Shubinsky I.B. Reliability of a Big City Sewer Network // *Reliability: Theory & Applications*. No. 4(65). Vol. 16. Issue 2021. Pp. 121-136. DOI: <https://doi.org/10.24412/1932-2321-2021-465-121-136>
13. Алексеев М.И., Ермолин Ю.А. Использование оценки надежности стареющих канализационных сетей при их реконструкции // *Водоснабжение и санитарная техника*. 2004. № 6. С. 21-23.
14. Quimpo R.G., Shamsi U.M. Reliability based distribution system maintenance // *Journal of Water Resources Planning and Management Division*. 1991. № 117. Pp. 321-339.
15. Engelhardt M.O., Skipworth P.J., Savic D.A., et al. Rehabilitation strategies for water distribution networks: a literature review with a UK perspective // *Urban Water*. 2000. No. 2. Pp. 153-170.

16. Алексеев М.И., Баранов Л.А., Ермолин Ю.А. Приближенная аналитическая оценка показателей надежности стареющих объектов ВКХ // *Вода и экология: проблемы и решения*. 2019. № 3(79). С. 3-8.
17. Ермолин Ю.А., Алексеев М.И. Учет «старения» объекта при оценке его надежности // *Водоснабжение и санитарная техника*. 2016. № 5. С. 68-71.
18. Baranov L.A., Yermolin Yu.A. Dependability of objects with non-stationary failure rate // *Dependability*. 2017. No. 4. Pp. 3-9. DOI: [10.21683/1729-2646-2017-17-4-3-9](https://doi.org/10.21683/1729-2646-2017-17-4-3-9)
19. Ermolin Y.A. Reliability calculation under seasonally varying failure rate // *ISA Transactions*. 2007. Vol. 46. Pp. 127-130.
20. Ermolin Y.A. Stationarization of the seasonally changing failure flow (with reference to reliability problems) // *Applied Mathematical Modelling*. 2008. V. 32. Issue 10. Pp. 2034-2040.
21. Алексеев М. И., Баранов Л.А., Ермолин Ю.А. Оценка времени жизни объектов ВКХ под воздействием периодически изменяющегося потока отказов. (В порядке обсуждения) // *Водоснабжение и санитарная техника*. 2017. № 4. С. 50-54.
22. Baranov L.A., Ermolin Y.A. Reliability of systems with periodic piecewise constant failure rate // *Russian Electrical Engineering*. 2017. No. 9. Vol. 88. Pp. 605-608.
23. Баранов Л.А., Ермолин Ю.А. Оценка показателей надежности «линейно-стареющего» объекта // *Надежность*. 2015. № 4(55). С. 57-60.

References

1. Yakovlev S.V., Voronov Yu.V. [Waste water disposal and treatment]. Moscow: ASV; 2002. (in Russ.)
2. Baranov L.A., Ermolin Y.A., Shubinsky I.B. On a Reliability of Tree-Like Transportation Networks. *Reliability: Theory & Applications* 2021;2(62);115-123. DOI: <https://doi.org/10.24412/1932-2321.1-2021-262-115-123>
3. Baranov L.A., Godyaev A.I., Ermolin Y.A., Shubinsky I.B. Reliability of certain class of transportation networks. *Journal of Physics: Conference Series* 2021;2096(1):012122.
4. Gnedenko B.V., Beliaev Yu.K., Soloviev A.D. [Mathematical methods in the dependability theory]. Moscow: Nauka; 1965. (in Russ.)
5. GOST 27.002-2015. Dependability in technics. Terms and definitions. Moscow: Standartinform; 2016. (in Russ.)
6. Yermolin Yu.A., Alekseev M.I. [On the methodology of dependability research of ageing elements and systems of water supply and waste water disposal]. *Water Supply and Sanitary Technique* 2022;9:2-4. (in Russ.)
7. Jin Y., Makherjee A. Modeling blockage failures in sewer systems to support maintenance decision making. *Journal of Performance of Constructed Facilities* 2010;6:622-633.
8. Yermolin Yu.A., Alekseev M.I. Reliable operation of wastewater collection systems and ways of its improvement.

Water Supply and Sanitary Technique 2012;1:13-17. (in Russ.)

9. Yermolin Yu.A., Baranov L.A. Specificity and methodological features of evaluating the reliability of sewer networks in large cities. *Water Supply and Sanitary Technique* 2021;4:50-53. (in Russ.)

10. Ermolin Y.A. Estimation of raw sewage discharge resulting from sewer network failures. *Urban Water* 2001;3(4):271-276.

11. Ermolin Y.A., Alexeev M.I. Reliability measure of a sewer network. *Water and Ecology* 2018;2(74):51-58. (in Russ.)

12. Baranov L.A., Ermolin Y.A., Shubinsky I.B. Reliability of a Big City Sewer Network. *Reliability: Theory & Applications* 2021;4(65):121-136. DOI: <https://doi.org/10.24412/1932-2321-2021-465-121-136>.

13. Alekseev M.I., Yermolin Yu.A. [Using the dependability estimates of ageing sewer systems in the course of their reconstruction]. *Water Supply and Sanitary Technique* 2004;4:21-23. (in Russ.)

14. Quimpo R.G., Shamsi U.M. Reliability based distribution system maintenance. *Journal of Water Resources Planning and Management Division* 1991;117:321-339.

15. Engelhardt M.O., Skipworth P.J., Savic D.A. et al. Rehabilitation strategies for water distribution networks: a literature review with a UK perspective. *Urban Water* 2000;2:153-170.

16. Alexeev M.I., Baranov L.A., Ermolin Y.A. Approximate analytical estimate of reliability indices for ageing facilities of water supply and sewer systems. *Water and Ecology* 2019;3(79):3-8. (in Russ.)

17. Ermolin Iu.A., Alekseev M.I. Consideration of object ageing in estimating its reliability. *Water Supply and Sanitary Technique* 2016;5:68-71. (in Russ.)

18. Baranov L.A., Yermolin Yu.A. Dependability of objects with non-stationary failure rate. *Dependability* 2017;4:3-9. DOI: 10.21683/1729-2646-2017-17-4-3-9.

19. Ermolin Y.A. Reliability calculation under seasonally varying failure rate. *ISA Transactions* 2007;46:127-130.

20. Ermolin Y.A. Stationarization of the seasonally changing failure flow (with reference to reliability problems). *Applied Mathematical Modelling* 2008;32(10):2034-2040.

21. Alekseev M.I., Baranov L.A., Ermolin Iu.A. Evaluation of water and wastewater facilities life time under the conditions of periodic failure flow. *Water Supply and Sanitary Technique* 2017;4:50-54. (in Russ.)

22. Baranov L.A., Ermolin Y.A. Reliability of systems with periodic piecewise constant failure rate. *Russian Electrical Engineering* 2017;9(88):605-608.

23. Baranov L.A., Ermolin Yu.A. Estimation of reliability indices of a "linearly ageing" object. *Dependability* 2015;(4):57-64.

Сведения об авторах

Баранов Леонид Аврамович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Управление и защита информации», Российский университет транспорта (МИИТ), Москва, Российская Федерация, e-mail: baranov.miiit@gmail.com

Ермолин Юрий Александрович – доктор технических наук, профессор кафедры «Управление и защита информации», Российский университет транспорта, Москва, Российская Федерация, e-mail: ermolin.y@yandex.ru

About the authors

Leonid A. Baranov, Doctor of Engineering, Professor, Head of Department of Management and Protection of Information, Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russian Federation, e-mail: baranov.miiit@gmail.com.

Yuri A. Yermolin, Doctor of Engineering, Professor, Department of Management and Protection of Information, Russian University of Transport, Moscow, Russian Federation, e-mail: ermolin.y@yandex.ru.

Вклад авторов в статью

Барановым Л.А. предложен специфический подход к оценке надежности древовидных транспортирующих сетей и намечены перспективные направления исследований подобных объектов. **Ермолиным Ю.А.** разработана инженерная методика расчета показателя эксплуатационной надежности систем водоотведения крупных городов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, НТУ «Сириус», ОАО «РЖД» и Образовательного Фонда «Талант и успех» в рамках научного проекта № 20-37-51001.