

EDN: GQDPLB

УДК 628.144

А. Я. НАЙМАНОВ, Г. С. ТУРЧИНАФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»,
Российская Федерация, Донецкая Народная Республика, г. о. Макеевский, г. Макеевка**РАЦИОНАЛЬНАЯ ДЛИНА УЧАСТКОВ КОЛЬЦЕВОЙ СЕТИ
ВОДОСНАБЖЕНИЯ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ**

Аннотация. Свойства трубопроводов со временем ухудшаются, и их возможность сопротивляться внешним воздействиям также снижается. Тем не менее, при разработке проектов новых сетей или реконструкции имеющихся в эксплуатации, необходимо оценить возможности элементов системы и предусмотреть в проекте наиболее рациональные решения, отвечающие параметрам надежности на перспективу длительного срока службы сети. Одной из таких характеристик является длина участка трубопровода в распределительной системе водоснабжения. Уменьшение длины стороны кольца в сети, хотя и положительно скажется на повышении надежности, приведет к удорожанию системы из-за увеличения количества самих колец. Увеличение длины участка, наоборот, понизит его надежность. В данной статье рассмотрены возможные длины отдельных трубопроводов в кольцах с учетом действующих законодательных норм и правил, а также практической оценки результатов исследования аварий на водопроводной сети.

Ключевые слова: водопроводная сеть, надежность, диаметры и длины трубопроводов, вероятность безотказной работы, коэффициент готовности.

ВВЕДЕНИЕ

Надежность участка сети напрямую зависит от его длины. Обычно участок – это отрезок трубопровода, ограниченный с двух концов задвижками (рис. 1).

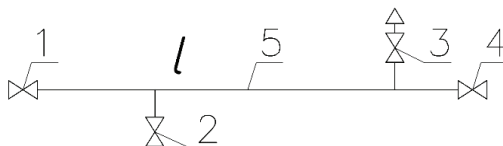


Рисунок 1 – Схема участка водопроводной сети: 1, 4 – задвижки в начале и в конце; 2 – выпуск; 3 – вентуз или аэрационный клапан.

В самой низкой, по отметкам земли, точке участка предусматривается выпуск для опорожнения трубопровода в случае необходимости ремонта. В самой высокой точке устанавливается вентуз для впуска и выпуска воздуха. Необходимо определить, при какой длине трубопровода участок будет иметь достаточную надежность в плане бесперебойной подачи воды потребителям, при этом не увеличивая количество колец в сети, что приведет к значительному удорожанию системы.

АКТУАЛЬНОСТЬ ЗАДАЧИ

В результате длительной эксплуатации сетей, аварийность трубопроводов значительно повышается. Отказ отдельных участков может привести к перебоям в поставке воды большому количеству потребителей. Помимо этого аварии на трубопроводах приводят к большим потерям воды, что также приводит к нежелательным экономическим последствиям. В ряде работ [7, 8, 9, 10] приведены

© А. Я. Найманов, Г. С. Турчина, 2023



результаты исследований распределительных систем водоснабжения, однако данные значения ниже в сравнении с анализом аварийности сети городов ДНР. Дополнительно стоит учесть, что оценка интенсивности отказов трубопроводов проводилась на основании данных ГУП ДНР «Вода Донбасса» для сетей с длительным сроком эксплуатации (в некоторых случаях превышающих 50 лет), что также вносит весомые поправки в параметры надежности участков. Данные исследования посвящены проблеме поиска оптимальной длины трубопровода, учитывая нормативные требования к длительности отключения участка из-за аварии и полученные результаты интенсивности отказов трубопроводов, находящихся в длительной эксплуатации.

МАТЕРИАЛЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

С точки зрения надежности участок (рис. 1) представляет собой систему с последовательным соединением элементов (рис. 2).

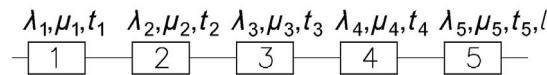


Рисунок 2 – Структурно-логическая схема участка сети.

Интенсивности отказов λ и интенсивности восстановления μ для элементов выбираются из справочной литературы [1, 2, 3]. Срок эксплуатации t для действующих трубопроводов принимается по данным эксплуатирующей организации, а для новых трубопроводов может приниматься равным 1 году. Кстати, после ремонта элемент условно считается новым.

Величины вероятностей безотказной работы P и коэффициентов готовности Kz каждого элемента вычисляем по формулам (1, 2), только длина участка в оценке элементов (1–4) не участвует.

$$P_i = e^{-\lambda_i t}; \tag{1}$$

$$Kz = \frac{\mu}{\mu + \lambda l} \tag{2}$$

Вычисляем P и Kz для каждого элемента структурно-логической схемы и далее величины P и Kz для всего объекта (участка) с последовательным соединением элементов.

$$P_{уч} = P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 \cdot P_4 \cdot P_5; \tag{3}$$

$$Kz_{(уч)} = Kz_{(1)} \cdot Kz_{(2)} \cdot Kz_{(3)} \cdot Kz_{(4)} \cdot Kz_{(5)}. \tag{4}$$

Однако, для вычисления коэффициента готовности систем с последовательным соединением, некоторые специалисты [4, 5] более обоснованной считают формулу (5)

$$Kz_{(сум)} = \frac{1}{1 + \sum_1^n \left(\frac{1}{Kz_{(i)}} - 1 \right)} = \frac{1}{1 + \sum_1^n \left(\frac{\lambda_i}{\mu_i} \right)}. \tag{5}$$

Формула (5) дает несколько большие величины коэффициентов готовности, чем формула (4).

Отметим, что только в P_5 и $Kz_{(5)}$ входит длина участка l . Формулы (4) и (5) дают возможность определить допустимую длину участка (l), если заданы нормативные величины $P_{норм}$ и $Kz_{(норм)}$ для участка сети. Основным документом для определения $P_{норм}$ и $Kz_{(норм)}$ можно считать «Правила предоставления коммунальных услуг...» [6]. В соответствии с этим документом допускается за один месяц не более двух перерывов в подаче холодной воды, длительность каждого перерыва не более 4 часов. В качестве объекта услуг «Правила...» рассматривают собственников и пользователей помещений в жилых домах, т. е. абонентов. Поскольку абонент привязан к участку сети водопровода, то требования можно считать относящимися к участку сети. В качестве расчетного периода в [6] принят 1 месяц (720 часов). Число отказов за 1 месяц (30 суток) равно 2, а количество часов отказов (неготовности) составляет 8 часов за расчетный период 720 часов.

Нормативные величины вероятности безотказной работы $P_{норм}$ и коэффициента готовности $Kz_{(норм)}$ вычисляются по формулам (6) и (7)

$$P_{(норм)} = \frac{30-2}{30} = 0,933; \quad (6)$$

$$Kz_{(норм)} = \frac{720-8}{720} = 0,989. \quad (7)$$

Теперь можно в формулы (3), (4) и (5) подставить вместо $P_{уч}$ и $Kz_{(уч)}$ величины $P_{норм}$ и $Kz_{(норм)}$ и найти допустимую длину участка

$$P_{(норм)} = (P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 \cdot P_4) P_5 = ae^{-\lambda l}, \text{ отсюда } l = \left(-\frac{\ln P_{норм}}{a} \right) \cdot \frac{1}{\lambda t}, \quad (8)$$

здесь $a = (P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 \cdot P_4)$ и $P_1 \cdot P_2 \cdot P_3$ и P_4 не зависят от l .

За расчетное время t следует принимать 1 месяц (720 часов). Элементы (1, 2, 3, 4) – это задвижки, для них $\lambda = 0,6 \cdot 10^{-4} \text{ ч}^{-1}$ [2, 3]. Тогда

$$a = (e^{-\lambda t})^4 = (e^{-0,6 \cdot 10^{-4} \cdot 720})^4 \approx (0,958)^4 = 0,8413. \quad (9)$$

В результате формула (9) приобретает вид

$$l = \left(-\frac{\ln 0,933}{0,8413} \right) \cdot \frac{1}{\lambda \cdot 720} = \left(\frac{-0,06935}{0,8413} \right) \cdot \frac{0,001389}{\lambda} = 0,8243 \cdot \frac{0,001389}{\lambda} = \frac{0,0001145}{\lambda} = 1,145 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\lambda}, \text{ км, итак } l = \frac{1,145 \cdot 10^{-4}}{\lambda}, \text{ км.} \quad (10)$$

Очевидно, имеет место быть гиперболическая зависимость l от λ . Интенсивность отказов λ зависит от материала и диаметра трубопроводов. Кроме того, она может изменяться в течение срока эксплуатации, особенно, для стальных и чугунных труб. В частности, по данным В. С. Ромейко с соавторами [7] количество отказов в год на 1 км за 20 лет эксплуатации стальных труб повышается с 0,5 до 3–4 в зависимости от условий эксплуатации. По данным же службы эксплуатации компании «Вода Донбасса» число отказов может возрасти для стальных труб даже до 5–6 в год на 1 км. В среднем для стальных и чугунных труб следует принять, видимо, величину $\lambda = 3 \frac{1}{\text{км} \cdot \text{год}}$ для вредных условий

эксплуатации. Если перевести в интенсивность отказов в час, то получим около $\lambda = 3 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{ч} \cdot \text{км}}$. Для труб из других материалов – полимеров и высокопрочного чугуна с шаровидным графитом (ВЧШГ), а также труб с защитным покрытием, не отмечено значительное изменение интенсивности отказов λ за время эксплуатации. Рекомендуемая величина $\lambda = 0,1 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{ч} \cdot \text{км}}$ [7, 8, 9, 10]. Очень мало сведений также о величинах λ для асбестоцементных и железобетонных труб.

Аналогичным путем можно вывести выражение для определения допускаемой длины участка и из формул (3) и (4) для коэффициента готовности. В частности, из уравнения (5) при 4 задвижках на участке

$$Kz_{(сист)} = \frac{1}{1 + 4 \frac{\lambda_{задв}}{\mu_{задв}} + \frac{\lambda l}{\mu}}, \quad (11)$$

здесь $\lambda_{задв} = 0,6 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{ч}}$, $\mu_{задв} = 4 \cdot 10^{-2} \frac{1}{\text{ч}}$, [2, 3].

Подставив параметры задвижек, получим

$$Kz_{(сист)} = \frac{1}{1,006 + \frac{\lambda l}{\mu}}. \quad (12)$$

Отсюда, при $Kz_{(норм)} = 0,989$, получим

$$l = 0,0051 \frac{\mu}{\lambda}, \text{ км,} \quad (13)$$

здесь μ – интенсивность восстановления трубопроводов, 1/ч;
 λ – интенсивность отказов, 1/(ч·км).

Допустимая длина участка зависит уже от двух параметров – интенсивности отказов λ и интенсивности восстановления μ . Эти величины зависят от диаметра и материала трубопровода.

Значения интенсивности восстановления μ можно получить по данным таблицы 26 СП 31.13330.2021 [11], учитывая, что

$$\mu = 1/T_{\theta}, \quad (14)$$

где T_{θ} – время ликвидации аварии (время восстановления).

Полученные данные приведены в таблице.

Таблица – Продолжительность и интенсивность восстановления трубопроводов водоснабжения

Диаметр труб, мм	Расчетное время ликвидации аварии (T_{θ}), ч, при глубине заложения труб до 2 м	μ , 1/ч	Расчетное время ликвидации аварии (T_{θ}), ч, при глубине заложения труб более 2 м	μ , 1/ч
До 400	8	0,125	12	0,083
Св. 400 до 1 000	12	0,083	18	0,056
Св. 1 000	18	0,058	24	0,042

Таким образом, получены две формулы для оценки допустимой длины участка водопроводной сети. Формула (10), исходя из нормативной вероятности безотказной работы $P_{норм} = 0,933$.

$$l \leq 1,145 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\lambda}, \text{ км.} \quad (15)$$

Формула (13), исходя из коэффициента готовности $Kg_{(норм)} = 0,989$

$$l = 0,0051 \frac{\mu}{\lambda}, \text{ км.} \quad (16)$$

Графики этих функций представляют собой гиперболы и приведены на рисунках 3 и 4.

Из двух величин рациональной длины участка сети, видимо, следует для проектирования сети принимать меньшее значение.

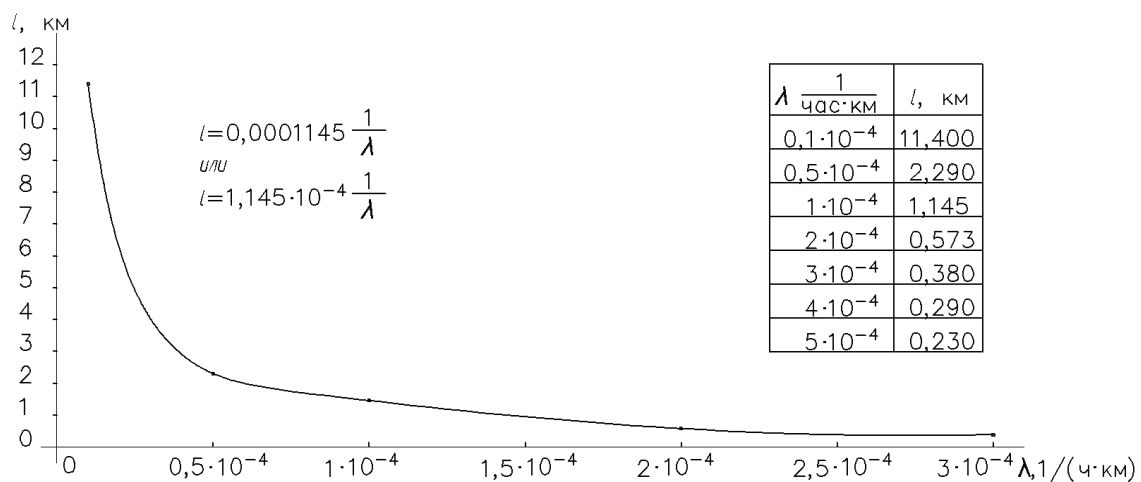


Рисунок 3 – Рациональная длина участка, исходя из нормативной величины вероятности безотказной работы $P = 0,933$.

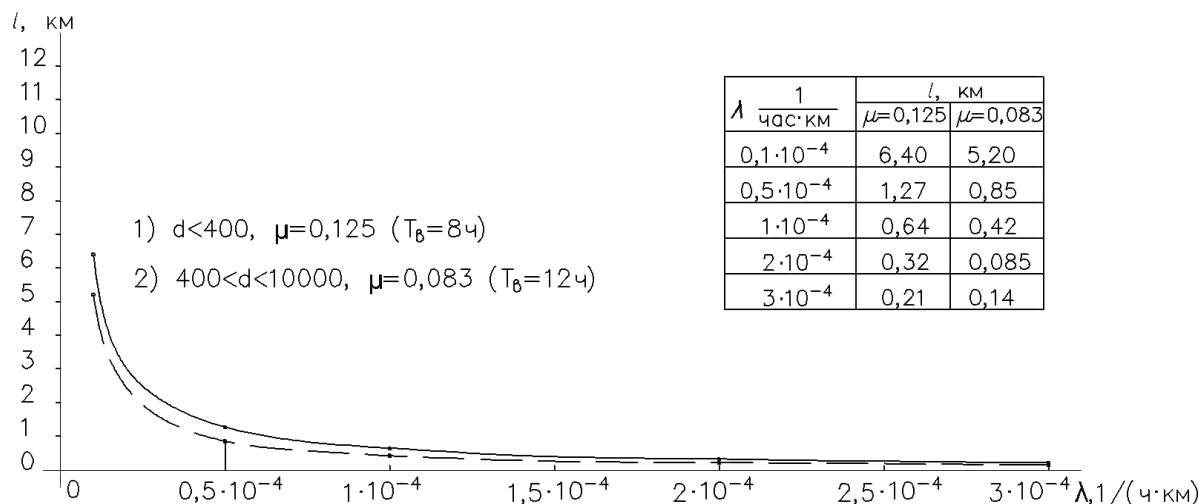


Рисунок 4 – Рациональная длина участка, исходя из нормативного коэффициента готовности $K_z = 0,989$.

Необходимо также учитывать, что для трубопроводов большого диаметра (более 500...600 мм) увеличение интенсивности отказов во времени имеет меньшие размеры, и за срок службы 20 лет по данным службы эксплуатации ГУП ДНР «Вода Донбасса» составляет около $\lambda \approx 1 \frac{\text{отказ}}{\text{год} \cdot \text{км}}$.

ВЫВОДЫ

В целом, подводя итоги, можно отметить, что длину стороны кольца водопроводной сети (участка) допустимо принимать:

– для стальных и чугунных труб без защитных покрытий при $\lambda = 3 \frac{1}{\text{км} \cdot \text{год}}$ за расчетный срок 20 лет:

при $d < 400 \text{ мм}$ $l \leq 200 \text{ м}$;

при $d \geq 400 \text{ мм}$ $l \leq 200 \text{ м}$;

– для пластмассовых труб и стальных и чугунных труб с защитным покрытием, независимо от диаметра $l \leq 5 \text{ км}$.

Очевидно, что применение стальных и чугунных труб без защитных антикоррозионных покрытий экономически нерационально, поскольку сеть будет иметь слишком большую длину и много колец.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Эксплуатация систем водоснабжения, канализации и газоснабжения: Справочник / под редакцией В. Д. Дмитриева, Б. Г. Мишукова. – 3-е изд., перераб. и доп. – Ленинград : Стройиздат, Ленинградское отделение. – 1988. – 383 с. – ISBN 5-274-00049-5. – Текст : непосредственный.
2. Ильин, Ю. А. Надежность водопроводных сооружений и оборудования / Ю. А. Ильин. – Москва : Стройиздат, 1985. – 241 с. – (Надежность и качество). – Текст : непосредственный.
3. Ильин, Ю. А. Расчет надежности подачи воды : научное издание / Ю. А. Ильин. – Москва : Стройиздат, 1987. – 320 с. – (Надежность и качество). – Текст : непосредственный.
4. Голинкевич, Т. А. Прикладная теория надежности : [учебник для вузов по специальности «Автоматизированные системы управления»] / Т. А. Голинкевич. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Высшая школа, 1985. – 168 с. – Текст : непосредственный.
5. Переверзев, Е. С. Надежность и испытания технических систем / Е. С. Переверзев ; АН УССР, Институт технической механики. – Киев : Наукова думка, 1990. – 326. – ISBN 5-12-001291-4 (В пер.). – Текст : непосредственный.
6. Правила предоставления коммунальных услуг собственникам и пользователям помещений в многоквартирных домах и жилых домов : с изменениями : Утверждено Постановлением Правительства РФ от 6 мая 2011 г. № 354, г. Москва. – Текст : электронный // Законодательство России : [сайт]. – 2011. – URL: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&nd=102147807> (дата обращения: 20.07.2022).
7. Защита трубопроводов от коррозии / В. С. Ромейко, В. Г. Баталов, В. Е. Бухин [и др.] ; под редакцией В. С. Ромейко. – Москва : ООО «Издательство ВНИИМП», 2002. – 218 с. – Текст : непосредственный.

8. Строительство трубопроводных систем с применением пластмассовых труб. Стокгольм – Москва : Северное объединение производителей пластмассовых труб (NPG). МГСУ. – 2000. – 114 с. – Текст : непосредственный.
9. Aklog, D. Reliability-based optimal design of water distribution networks / D. Aklog, Y. Hosoi. – DOI: 10.2166/ws.2003.0080. – Текст : электронный // Water Supply : [сайт]. – 2003. – No 3 (1-2). – P. 11–18. – URL: <https://iwaponline.com/ws/article-abstract/3/1-2/11/25698/Reliability-based-optimal-design-of-water?redirectedFrom=fulltext> (дата обращения: 16.09.2023).
10. Kowalski, D. Failure of water supply networks in selected Polish towns based on the field reliability tests / D. Kowalski, K. Miszta-Kruk. – DOI: 10.1016/j.engfailanal.2013.07.017/. – Текст : электронный // ResearchGate : [сайт]. – 2013. – No 35 (2013). – P. 736–742. – URL: https://www.researchgate.net/publication/261769066_Failure_of_water_supply_networks_in_selected_Polish_towns_based_on_the_field_reliability_tests (дата обращения: 16.09.2023).
11. СП 31.13330.2021. Свод правил. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения = Water supply. Pipelines and portable water treatment plants : актуализированная редакция СНиП 2.04.02-84* : издание официальное : утверждено приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 27 декабря 2021 г. № 1016/пр : дата введения 2022-01-28 / исполнитель Федеральное государственное бюджетное учреждение «Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук» (НИИСФ РААСН). – Москва : Стандартинформ, 2022. – 159 с. – Текст : непосредственный.

Получена 04.09.2023

Принята 27.10.2023

А. Я. НАЙМАНОВ, Г. С. ТУРЧИНА
РАЦІОНАЛЬНА ДОВЖИНА ДІЛЯНОК КІЛЬЦЕВОЇ ВОДОПРОВІДНОЇ
МЕРЕЖІ З ТОЧКИ ЗОРУ НАДІЙНОСТІ
ФДБОУ ВО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури», Російська
Федерація, Донецька Народна Республіка, м. о. Макіївський, м. Макіївка

Анотація. Властивості трубопроводів з часом погіршуються, і їх можливість чинити опір зовнішнім впливам також знижується. Тим не менш, при розробці проектів нових мереж або реконструкції існуючих в експлуатації, необхідно провести оцінку можливості елементів системи та передбачити в проекті найбільш раціональне рішення, яке б відповідало параметрам надійності на перспективу тривалого терміну служби мережі. Одною з таких характеристик є довжина ділянки трубопроводу у розподільній системі водопостачання. Зменшення довжини сторони кільця у мережі, хоч і позитивно вплине на підвищення надійності, приведе до удорожчання системи із-за підвищення кількості самих кілець. Підвищення довжини ділянки, навпаки, знизить його надійність. У цій статті розглянуті можливі довжини окремих трубопроводів у кільці з рахунком діючих законодавчих норм і правил, а також практичної оцінки результатів досліджень аварій на водопровідній мережі.

Ключові слова: водопровідна мережа, надійність, діаметри і довжини трубопроводів, вірогідність безвідмовної роботи, коефіцієнт готовності.

AUBEKIR NAIMANOV, GALINA TURCHINA
RATIONAL SECTIONS LENGTH OF LOOP WATER SUPPLES NETS FROM THE
VIEWPOINT OF RELIABILITY
FSBEI HE «Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture», Russian
Federation, Makeevka

Abstract. Pipeline properties deteriorate over time, and their ability to resist external influences also decreases. Nevertheless, when developing designs for new networks or reconstructing existing ones in operation, it is necessary to evaluate the capabilities of the system elements and provide for the most rational solutions in the project that meet reliability parameters for the long-term service life of the network. One such characteristic is the length of the pipeline section in the distribution water supply system. Reducing the length of the side of the loop in the network, although it will have a positive effect on improving reliability, will increase the cost of the system due to the increase in the number of loops themselves. Increasing the length of the section, on the contrary, will reduce its reliability. This article considers the possible lengths of individual pipelines in loops, taking into account the current legislative norms and rules, as well as practical assessment of the results of the research of emergencies on the water supply network.

Keywords: water supply nets, reliability, diameters and lengths of pipelines, probability of no failure, availability factor.

Найманов Аубекир Ягопирович – доктор технических наук, профессор кафедры городского строительства и хозяйства ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: водоснабжение, очистка воды, методы повышения надежности сетей водоснабжения и канализации.

Турчина Галина Сергеевна – магистр; старший преподаватель кафедры городского строительства и хозяйства ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: надежность сетей, методы повышения надежности сетей водоснабжения.

Найманов Аубекір Ягопирович – доктор технічних наук, професор кафедри міського будівництва та господарства ФДБОУ ВО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: водопостачання, очищення води, методи підвищення надійності мереж водопостачання та каналізації.

Турчина Галина Сергіївна – магістр; старший викладач кафедри міського будівництва та господарства ФДБОУ ВО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: надійність систем, методи підвищення надійності мереж водопостачання.

Naimanov Aubekir – Dr. Sc. (Eng.), Professor, Municipal Building and Economy Department, FSBEI HE «Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture». Scientific interests: water supply, water purification, methods of increasing reliability of water supply and sewer nets.

Turchina Galina – MPhil; Senior Lectures, Municipal Building and Economy Department, FSBEI HE «Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture». Scientific interests: reliability of systems, methods of increasing reliability of water supply nets.