

УДК 628.1-192+628.8-192

**Е.М. ГАЛЬПЕРИН**

кандидат технических наук, профессор кафедры водоснабжения и водоотведения Самарский государственный архитектурно-строительный университет

## О ВОСТРЕБОВАННОСТИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ ВОДОСНАБЖЕНИЯ И ВОДООТВЕДЕНИЯ

*ABOUT THE DEMAND FOR RELIABILITY VALUES OF WATER SUPPLY AND SEWERAGE SYSTEMS*

Установлено, что крупные недостатки в формулировании требования надежности к системам водоснабжения и водоотведения в действующих нормативных документах связаны с тем, что они сформированы на уровне первой половины XX века. В них не учтены последние достижения теории надежности, появившейся и интенсивно развивающейся во второй половине XX века, среди которых есть методически грамотный выбор показателей для оценки надежности сложных технических систем. Выбор научно обоснованных комплексов показателей надежности для систем водоснабжения и водоотведения и внедрение их в нормативные документы является задачей, не терпящей отлагательства.

**Ключевые слова:** показатели надежности, водоснабжение, водоотведение, методика, математические модели.

Надежность, согласно [1], определяется как свойство объекта сохранять **во времени** в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования. В процессе функционирования на системы водоснабжения и водоотведения воздействуют самые разные события, способные нарушить их нормальный процесс работы. Чаще всего это отказ одного или нескольких из элементов системы, но можно перечислить и ряд других условий: прекращение подачи электроэнергии, природные явления типа землетрясения, оползни и т.д. Таким образом, проявления причин, вследствие чего снижается надежность систем водоснабжения и водоотведения, носят разнообразный характер, поэтому в технической литературе появились термины «конструктивная надежность», «санитарная надежность» и другие. Но это разные стороны одного и того же надежности свойства объекта.

Надежность системы водоснабжения, в основном водопроводной сети как самой ненадежной её части, интересовала специалистов и потребителей

*It has been studied that major drawbacks in formulating the requirements for the reliability of water supply and sewerage systems in existing regulations are related to the fact of their being formulated in the first part of the XXth century. These regulations don't take into account the latest achievements in the reliability theory appeared and developed successfully in the second part of the XXth century. Among these achievements there is a methodologically correct selection of indices for estimating the reliability of complex technical systems. The selection of science-based reliability indices for water supply and sewerage systems and their introduction in the existing regulations is the task of primary importance.*

**Key words:** reliability indices, water supply, sewerage, methodology, mathematic models.

давно, практически с начала накопления знаний о ней. Надежности системы водоотведения стали уделять внимание сравнительно недавно, в последние два десятилетия. Связано это, в частности, с появлением крупных систем водоотведения, отказ коллектора большего диаметра которой наносит значительный ущерб окружающей среде, создает угрозу здоровью населения, резко ухудшая экологию, поэтому естественным является стремление при оценке надежности систем водоснабжения и водоотведения воспользоваться аппаратом теории надежности. Важнейшим вопросом является определение показателей надежности систем водоснабжения и водоотведения.

Следует отметить, что наличие показателей надежности в нормативных документах - свидетельство более высокого уровня в ее обеспечении по сравнению с их отсутствием или недостаточно полным представлением. В существующих нормативных документах на проектирование систем и устройств водоснабжения и водоотведения [2, 3], как правило, отсутствуют показатели надежности, они заменены регламентацией требований устанавливать определенное количество резервных устройств и сооружений. Но тогда неизвестно, какой уровень надежности

при этом достигается, достаточный ли он или регламентированный резерв излишний. При таком порядке обеспечения надежности невозможно определить ее уровень, оптимизировать методы ее создания, определить лучший вариант ее обеспечения. Все эти вопросы решаемы только при наличии в нормативных документах показателей надежности.

При установлении показателей надежности системы водоснабжения, в основном водопроводной сети, в большинстве работ прослеживается стремление напрямую использовать показатели безотказной работы и ремонтпригодности из [1]: вероятность безотказной работы, среднюю наработку до отказа и др.

В ряде таких работ рекомендуется производить декомпозицию кольцевой водопроводной сети на совокупность параллельно и последовательно соединенных участков. Далее определяется вероятность безотказной работы отдельных декомпозиционных частей кольцевой водопроводной сети по известным формулам расчета вероятности сложного события, состоящего из совокупности простых независимых событий. Вероятность безотказной работы  $n$  последовательно соединенных участков

вычисляется по выражению  $F_n = \prod_{i=1}^n f_i$ , а  $n$  парал-

лельно соединенных участков – по уравнению  $F_n = 1 - (1 - f_i)^n$ , где  $F_n$  – вероятность безотказной работы  $n$  участков,  $f_i$  – вероятность безотказной работы  $i$ -го участка ( $i=1...n$ ). Для получения оценки вероятности безотказной работы всей водопроводной сети в целом предлагается синтез отдельных декомпозиционных частей. Подобные методы оценки надежности характерны для объектов, имеющих сетевую природу, и обычно называются топологическими. Следует отметить, что в результате подобного подхода определяется вероятность безотказной работы той или иной структуры водопроводной сети, а не степень обеспечения водой потребителей. Известно, что отдельные участки водопроводной сети по-разному влияют на обеспечение потребителя водой. Отключение перемычки может абсолютно не сказаться на уровне обеспечения потребителя водой, в то время как отказ магистрали, особенно в начале сети, может очень существенно снизить величину водоподдачи, а вероятность безотказной работы структуры с отключенной магистралью может быть даже выше, чем с отключенной перемычкой. Такой подход и полученные с его помощью результаты не позво-

ляют судить о надежности обеспечения водой потребителей, что является основной функцией водопроводной сети.

В докторской диссертации Ле Лонга также введены расчетные и нормативные «вероятности безотказной работы системы»<sup>1</sup>. В статье<sup>2</sup> отмечается, что «надежность элементов системы водоснабжения может быть достаточно полно охарактеризована такими вероятностными понятиями, как случайные величины, потоки случайных событий и цепи Маркова с непрерывным временем», а в качестве показателей «надежности элементов системы водоснабжения служат вероятность безотказной работы, наработка на отказ и среднее время восстановления, среднее число отказов и др.».

При наличии значительного количества публикаций, в которых предлагается ряд критериев надежности трубопроводных систем, все они в основном сводятся к математической вероятности безотказной работы. При этом отмечается, что данному понятию придается разный смысл. В ряде работ вероятностью безотказной работы считается вероятность ненаступления события, именуемого отказом в течение периода времени  $t$ .

Среди показателей, характеризующих уровень надежности трубопроводов, упоминаются вероятность безотказной работы трубопроводов за заданный промежуток эксплуатации и среднее время безотказной работы (наработка между отказами).

Вопросы надежности водоотводящих систем и их показателей, в основном водоотводящей сети как наиболее уязвимой их части, стали привлекать внимание относительно недавно. Публикаций на эту тему значительно меньше, чем по надежности водопроводной сети.

Некоторые авторы полагают, что при анализе городской канализационной сети физически оправданным является показатель в виде среднего времени безотказной работы. Для количественной оценки надежности тоннельных коллекторов предложен ряд показателей<sup>3</sup>, среди которых такой, как «риск аварий», где «под риском аварий понимается вероятность их появления с загрязнением окружающей среды, водоема до  $i$ -го уровня».

<sup>1</sup> Ле Лонг. Оптимизация систем водоснабжения СРВ на надежность: автореф. дис...д-ра тех. наук. М.: ВНИИ ВОДГЕО, 1984.

<sup>2</sup> Макотонов В.С., Эренбург Э.С. Показатели надежности элементов системы водоснабжения: тезисы докладов Всесоюзной конференции по надежности систем водоснабжения. М.: МИСИ, 1973.

<sup>3</sup> Кармазинов Ф.В., Ильин Ю.А. Надежность тоннельных коллекторов // Водоснабжение и санитарная техника. 2003. № 5. Ч.2.

Обзор работ по определению надежности систем водоснабжения и водоотведения показывает, что наиболее рекомендуемыми показателями служат *вероятность* и *среднее время* безотказной работы объекта.

Системы водоснабжения и водоотведения относятся к сложным объектам, у которых отказ отдельных их элементов и частей не приводит к отказу целиком всей системы, а может снизить только уровень качества их функционирования. Отсюда следует, что такие показатели, как «вероятность безотказной работы», «средняя наработка на отказ» и другие не могут быть использованы для характеристики их надежности работы.

Об этом в [4] дано разъяснение, что «на практике часто встречаются попытки (как правило, неудачные) использовать для оценки надежности сложных систем показатели, заимствованные из теории надежности «простых» систем. Ими обычно служат среднее время безотказной работы системы, вероятность безотказной работы системы в течение заданного интервала времени и некоторые другие. Они учитывают лишь факт появления или отсутствия отказов в элементах системы и не дают никакого представления о влиянии отказов на конечный эффект функционирования сложной системы, поскольку она может выполнять свою задачу, если даже некоторые ее элементы «отказали».

Показатели надежности выполняют чрезвычайно ответственные функции как при проектировании объекта, так и в ходе его функционирования.

В стандарте СЭВ [5] содержится перечень принципов, которыми следует руководствоваться при выборе номенклатуры показателей надежности. Перечень включал в себя следующие принципы:

- **эффективности**, который состоит в том, что выбираемые показатели должны входить в общую оценку эффективности функционирования объектов, в частности, они должны дать возможность расчета надежности системы;
- **независимости**, означающий исключение избыточности в двух или более показателях надежности, вошедших в номенклатуру;
- **подтверждаемости**, т.е. должны нормироваться только те показатели, которые могут быть подтверждены доступными средствами;
- **полноты**, состоящий в том, что номенклатура показателей должна отражать все действия и события, производимые и происходящие с объектами, причем вид действия и событий должен быть точно определен;

- **практичности**, в соответствии с которым номенклатура показателей надежности должна позволять организовывать оптимальную эксплуатацию, планировать потребность в запасных частях, рассчитывать экономический эффект от повышения надежности объекта.

Предложена математическая модель функционирования сложной технической системы<sup>4</sup>, охватывающая все состояния, в которых объект может находиться. Согласно этой модели, все множество состояний системы образует пространство, отдельные точки которого представляют собой состояние системы. В процессе функционирования система переходит из одного состояния в другое, образуя траекторию ее движения в пространстве состояний. Анализ траектории движения позволяет полностью судить о надежности функционирования системы. Все множество состояний может быть разделено на множество **H**, в котором собраны все состояния с нормальным уровнем качества функционирования, множество **C**, в котором содержатся состояния со сниженным до установленного предела уровнем качества функционирования, и множество **A**, состояния в котором имеют уровень качества функционирования ниже установленного предела, система в этих состояниях считается неработоспособной. В процессе работы траектория движения системы может находиться в подмножестве **H**, либо **C**, либо **A**.

Время пребывания системы в подмножестве **H** -  $T_H$  - это среднее время работы системы за некоторый интервал времени (например, год) с нормальным уровнем качества функционирования, когда она выполняет свои функции на 100 %.

Время пребывания системы в подмножестве **C** -  $T_C$  - это среднее время работы системы за некоторый период работы (например, год) со сниженным уровнем качества функционирования, т.е. она выполняет свои функции менее, чем на 100 %, но не ниже определенного предела.

Время пребывания системы в подмножестве **A** -  $T_A$  - это время, когда уровень качества функционирования системы ниже допустимого предела, в этот период система пребывает в состоянии отказа.

Все показатели надежности в процессе анализа траектории движения могут быть подразделены на мгновенные или точечные и интервальные или временные.

<sup>4</sup> Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д. Математические модели в теории надежности. М.: Наука, 1965.

Мгновенные показатели характеризуют надежность отдельных состояний или точек пространства. К ним относятся:  $R^0$  – нормированные показатели состояний, при которых обеспечивается нормальная работа системы или она выполняет свои функции на 100 %;  $R^0_{\text{мин}}$  – нормированные показатели состояний, при которых система работает с пониженным до определенного предела уровнем качества функционирования.

Интервальные показатели надежности характеризуют стабильность работы системы на определенном интервале времени, например, за годовой период, к ним относятся  $T_H$ ,  $T_C$  и  $T_A=1-T_H-T_C$ .

К показателям надежности следует отнести также время перехода из одного состояния в другое в результате аварии или включения в работу отремонтированного элемента  $t_n$ . В системах водоснабжения и водоотведения переход из одного состояния в другое в период аварии требует длительного времени, связанного с установлением места аварии и отключением аварийного элемента от системы. В это время обычно надежность функционирования системы резко падает.

К показателям надежности следует отнести время ремонта или восстановления  $t_p$ . Очевидно, что период, когда от системы отключен ремонтируемый элемент или его часть, влияет на надежность функционирования.

В состояниях, которые входят в подмножество  $S$ , снижение уровня качества функционирования по сравнению с нормальным режимом происходит в разной степени в зависимости от того, какой элемент (или элементы) отключен. Для того, чтобы оценить снижение эффективности функционирования отдельных состояний в период  $T_C$  целесообразно ввести такой показатель, как выходной эффект  $B$ .

Итак, комплекс показателей надежности содержит в себе параметры  $R^0$ ,  $R^0_{\text{мин}}$ ,  $T_H$ ,  $T_C$ ,  $t_n$ ,  $t_p$ ,  $B$ , с помощью которых полностью оценивается надежность систем водоснабжения и водоотведения.

Применительно к той или иной системе водоснабжения и водоотведения или их части параметры комплекса показателей надежности конкретизируются. Продемонстрируем эту процедуру на примере сетей водоснабжения и водоотведения как наиболее уязвимых частей с точки зрения надежности систем водоснабжения и водоотведения.

Водопроводная сеть в [2] имеет наибольшее число показателей надежности. При нормальных условиях работы, т.е. при  $R^0$ , должен быть подан рас-

четный расход воды при обеспечении необходимого напора. Допускается временное снижение расчетного расхода на 30 % и свободного напора до 10 м. вод. ст., т.е.  $R^0_{\text{мин}}$ . Показатели  $T_H$  и  $T_C$  в нормативном документе отсутствуют. Время переходного процесса  $t_n$  в [2, п.4.4] указано в 10 мин для систем первой категории, 6 ч – второй и 24 ч – для третьей категории надежности. Время ремонта водопроводной сети в [2, п.8.4] указано в зависимости от глубины заложения трубы и ее диаметра, в пределах от 8 до 24 ч. Выходной эффект  $B$  в [2] не регламентируется.

В водопроводной сети параметр потока отказов изменяется от  $\lambda_{\text{мин}}=0,5$  до  $\lambda_{\text{макс}}=2,0 \frac{1}{\text{км} \cdot \text{год}}$ .

Приняв значение  $\lambda = 1,0 \frac{1}{\text{км} \cdot \text{год}}$ , получаем,

что в течение года на каждом километре водопроводной сети происходит в среднем одна авария. Согласно [2], время восстановления составляет одни сутки. Тогда получаем, что водопроводная сеть, имеющая несколько сот километров трубопроводов, в исправном состоянии практически не работает, в то время как по [2] все основные ее параметры рассчитываются для исправного состояния. Практика подтверждает, что водопроводная сеть, запроектированная в полном соответствии с действующим нормативным документом [2], оказывается очень ненадежной. Такое положение является следствием отсутствия в [2] показателей типа  $T_H$ ,  $T_C$  т. е. существующий комплекс требований к надежности водопроводной сети в СНиПе не соответствует принципу **полноты**.

Практика управления объектами коммунальной структуры требует внедрения таких показателей, как  $T_H$  и  $T_C$ . В апреле 2008 г. Министерство регионального развития РФ издало приказ №48 «Об утверждении методики проведения мониторинга выполнения производственных и инвестиционных программ организации коммунального комплекса», в котором в сфере водоснабжения введен такой показатель, как количество часов представления услуг за отчетный период, т.е. фактически  $T_H$ .

В действующем нормативном документе на проектирование водоотводящей сети [3] полностью отсутствуют показатели надежности. Требования к надежности водоотводящей сети в [3] прописаны косвенно, через установку минимальной скорости движения воды в трубах, регламентации минимального расстояния между параллельно проложенными трубопроводами и т.д. Предло-

женный перечень показателей надежности применительно к водоотводящей сети будет выглядеть следующим образом:

$R^0$  – показатель нормальной работы водоотводящей сети. В качестве него может быть принято количество неочищенной сточной жидкости, которое поступило на поверхность земли или в водоемы при выполнении водоотводящей сетью своей функции на 100 %, т.е.  $R^0=0$ ;

$R^0_{\text{мин}}$  – показатель сниженного уровня качества функционирования водоотводящей сети. Допустимое количество неочищенной сточной жидкости, поступающей на поверхность земли и в водоемы может быть установлено по санитарным соображениям, с учетом экологических требований, в соответствии с местными условиями и т.д.. Если это количество принимать в виде отрицательного числа, то  $R^0 > R^0_{\text{мин}}$ ;

$T_H$  – среднее в течение года время работы водоотводящей сети с нормальным уровнем качества функционирования. В это время включен не только период работы водоотводящей сети в исправном состоянии, но и в неисправных состояниях, при которых сооружена временная схема транспорта сточной жидкости в обход ремонтируемого участка;

$T_c$  – среднее в течение года время работы водоотводящей сети со сниженным уровнем качества функционирования;

$t_n$  – время перехода из аварийного состояния, при котором неочищенная сточная жидкость в недопустимом количестве поступает на поверхность земли и в водоемы, в неисправное состояние, при котором сточная жидкость по временной схеме поступает из верхнего колодца ремонтируемого участка в нижний его колодец. Во время переходного периода сточная жидкость неорганизованно выливается в окружающую среду;

$t_p$  – время ремонта или восстановления водоотводящей сети;

$B$  – выходной эффект, в качестве которого может быть принято количество неочищенной сточной жидкости, поступившей в окружающую среду, например, за год.

Представляет собой интерес определение значений некоторых из этих показателей применительно к существующим водоотводящим сетям. Например, в Санкт-Петербурге имеется около 300 км тоннельных коллекторов глубокого заложения. Установлено, что параметр потока отказов

для тоннельных коллекторов  $\lambda_{\text{макс}}=0,05 \frac{1}{\text{год} \cdot \text{км}}$

и  $\lambda_{\text{мин}}=0,025 \frac{1}{\text{год} \cdot \text{км}}$ , т.е.  $\lambda_{\text{ср}}=(0,05+0,025)/2=0,0375$ .

Итого: на тоннельных коллекторах в течение года происходит в среднем  $300 \cdot 0,0375 \cong 11$  аварий, при времени восстановления от 0,5 до 1,0 года<sup>5</sup>, фактически в исправном состоянии они не работают, т.е. из них все время сбрасывается в Финский залив неочищенная сточная жидкость или ТН=0. Этот вывод подтверждает публикация работников водоканала г. Санкт-Петербурга о том, что около 30 % сточных вод сбрасывается в водоемы, минуя ОС. Поразительно, что при этом нарушении действующего нормативного документа [3] не происходит.

**Выводы.** 1. Крупные недостатки в формулировании требования надежности к системам водоснабжения и водоотведения в действующих нормативных документах [2,3] связаны с тем, что они сформированы на уровне первой половины XX в. В них не учтены последние достижения теории надежности, появившейся и интенсивно развивающейся во второй половине XX в., среди которых есть методически грамотный выбор показателей для оценки надежности сложных технических систем [4].

2. Выбор научно обоснованных комплексов показателей надежности для систем водоснабжения и водоотведения и внедрение их в нормативные документы является задачей, не терпящей отлагательства.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- ГОСТ 27.002.-89 Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения [Текст]: сб. ГОСТов. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2002.
- СНиП 2.04.02-84\*. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения [Текст] / Госстрой СССР. – М.: Стройиздат, 1985.
- СНиП 2.04.03-85. Канализация. Наружные сети и сооружения [Текст] / Госстрой СССР– М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1986.
- Методика выбора показателей для оценки надежности сложных технических систем [Текст]. – М.: Изд-во стандартов, 1977.
- Стандарт СЭВ 292-76. Надежность в технике. Основные термины и определения [Текст]. – М., 1977.

© Гальперин Е.М., 2011

<sup>5</sup> Кармазинов Ф.В., Ильин Ю.А. и др. Надежность тоннельных коллекторов // Водоснабжение и санитарная техника 1999. № 12.