

НАДЕЖНОСТЬ ВОДОВОДОВ СИСТЕМ ВОДОСНАБЖЕНИЯ

Валерий Новохатний, Сергей Костенко

Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка
Адрес: Украина, 36011, г Полтава, Первомайский проспект, 24
E-mail: kanc@pntu.edu.ua

Аннотация. В системе водоснабжения выделено три комплекса: водозаборный, водоочистной и подающе-распределительный. Изложен обоснованный метод выбора основных показателей надежности. Предложен метод и даны примеры расчета надежности водоводов.

Ключевые слова: системы водоснабжения, показатели надежности, надежность водоводов.

ВВЕДЕНИЕ

Современное развитие централизованного водоснабжения в Украине идет путем реконструкции и модернизации действующих водопроводных сооружений, для которых характерно высокое энергопотребление, значительный износ и низкая надежность. Однако, в теории водоснабжения в Украине до сегодняшнего дня не проведены современные научные исследования и не внедрены соответствующие математические методы, которые позволяли бы определить показатели надежности как отдельных сооружений, так и систем водоснабжения в целом.

С другой стороны, государственные “Правила предоставления услуг по централизованному отоплению, снабжению холодной и горячей водой и водоотведению” выдвинули требования по количественным и качественным показателям перечисленных услуг. Для централизованного водоснабжения предусмотрено бесперебойное снабжение потребителей водой, но допускаются перерывы в подаче воды длительностью не более 6-ти часов в сутки и не более 2-х раз в месяц. Эти требования могут быть выполнены только в том случае, когда подающе-распределительный комплекс системы водоснабжения (ПРК) будет иметь надежность не ниже сформулированных требований.

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ, МАТЕРИАЛОВ, МЕТОДОВ

Основателем исследований надежности систем водоснабжения в бывшем СССР следует считать [1 – 6]. Значительного развития исследования надежности получили в работах [14, 15]. Однако, эти фундаментальные исследования были базой, но не смогли стать конкретными методиками инженерных расчетов надежности ввиду общности и сложности формул, взятых из теории надежности. Среди современных российских ученых следует назвать М.И. Алексева, Ю.А. Ермолина [7 – 9, 12], М.Г. Журбу [13], С.В. Храменкова [22], Е.М. Гальперина [11]. В Украине проблему надежности систем водоснабжения разрабатывают П.Д. Хоружый [21], А.А. Ткачук [20], А.Я. Найманов [16], В.Г. Новохатний [17 – 19].

Польские ученые активно исследуют проблему надежности систем водоснабжения, среди которых Н. Hołtoś, F. Piechurski, J.R. Rak, A. Studzinski, B. Tchórzewska-Cieślak [23 – 26] и другие. Анализ новейших исследований показал, что проблема надежности систем водоснабжения еще не решена до такого уровня, чтобы войти составной частью в технологические расчеты систем водоснабжения.

ЦЕЛЬ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Каждая научная школа предлагает свои подходы к расчетам надежности водопроводных сооружений, но при этом мало внимания уделяется обязательным принципам решения этих задач.

Во-первых, перед расчетами показателей надежности надо сначала решить какие показатели следует использовать. Показателей надежности достаточно много, но надо выбрать основные для конкретных сооружений и разрабатывать методику расчета именно этих показателей.

Во-вторых, научные работники мало внимания обращают на точность исходных данных по надежности отдельных элементов водопроводных сооружений. В результате, точность полученных значений показателей надежности этих сооружений может значительно отличаться.

В-третьих, методики расчета надежности по своей сложности не должны превышать сложности гидравлических расчетов и только тогда расчеты надежности войдут в технологические расчеты водопроводных сооружений составной частью.

В одной статье невозможно изложить все разработанные методы расчета надежности водопроводных сооружений, поэтому целью данной работы были: классификация систем водоснабжения по надежности, изложение принципов выбора основных показателей надежности, разработка метода и примеров расчета надежности водоводов.

ОСНОВНОЙ РАЗДЕЛ

Выделение подающе-распределительного комплекса

В общем виде система водоснабжения представляет последовательную цепь взаимосвязанных и взаимодействующих сооружений (рис. 1). Подающее-распределительный

комплекс (ПРК) – это составная часть системы водоснабжения (аналогично комплексу водозаборных сооружений и комплексу очистных сооружений), которая обеспечивает подачу и распределение воды потребителям и объединяет резервуары и водонапорные башни, насосные станции, водоводы и водопроводную сеть (рис. 2).

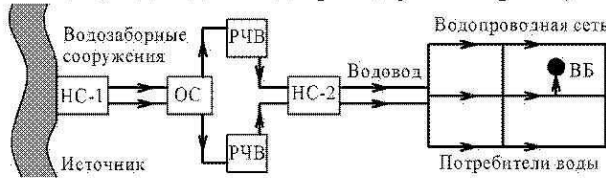


Рис. 1 Схема последовательной цепи взаимосвязанных водопроводных сооружений
Fig. 1 The scheme of the series chain interconnected water supply facilities

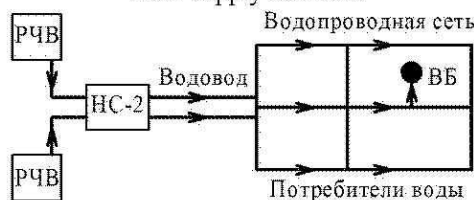


Рис. 2 Схема подающе-распределительного комплекса
Fig. 2 Scheme feeding-distribution complex

Надежность ПРК – это его свойство обеспечивать подачу, распределение воды соответствующего качества, в необходимом количестве, под требуемым напором всем потребителям воды в течении заданного времени и восстанавливать работоспособность после перерыва в подаче воды. Надежность ПРК $R_{ПРК}$ – это функция надежности отдельных сооружений, а именно – резервуаров и водонапорных башен, насосных станций, водоводов и водопроводной сети:

$$R_{ПРК} = f(R_{РЧВ}; R_{НС}; R_{Вод}; R_{ВС}), \quad (1)$$

где $R_{РЧВ}$; $R_{НС}$; $R_{Вод}$; $R_{ВС}$ – надежность резервуаров чистой воды, насосных станций, водоводов, водопроводной сети и водонапорных башен.

Деление потребителей на группы и категории

Системы водоснабжения работают на разных потребителей, которые выдвигают не одинаковые требования относительно уровня надежности обеспечения водой. Выбор основного показателя надежности специалисты в теории надежности рекомендуют выполнять, в первую очередь, с учетом последствий перерывов в подаче воды. С этой целью разделим всех потребителей воды на две группы, в зависимости от того, какой фактор является доминирующим при оценке последствий отказов. Факторов, которые принципиально отличаются, можно выделить только два.

Первый фактор – **опасность** отказа, независимо от продолжительности отказа, т.е. в этом случае определяющим есть факт отказа.

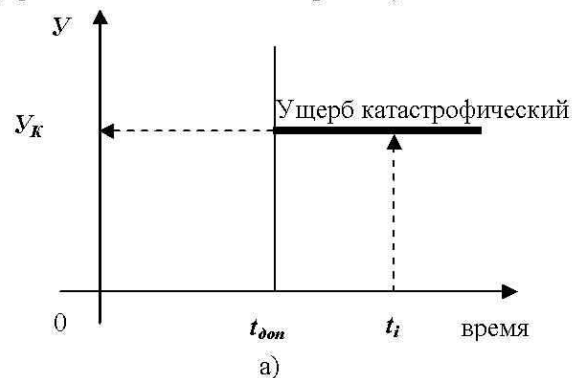
Второй фактор – **продолжительность** отказа; в этом случае определяющим есть время, на протяжении которого длился отказ.

Из всего множества потребителей воды выделим те из них, для которых отказ системы водоснабжения слишком опасен, потому что может привести к катастрофическим последствиям. Для таких потребителей чрезвычайной угрозой есть всего один отказ, а не время восстановления системы. Может быть и восстанавливать систему уже не имеет смысла, потому что катастрофические последствия привели, например, к гибели людей или экологической катастрофе. Объединим этих потребителей и системы водоснабжения, которых они обслуживают, в первую группу.

Первая группа – производства с непрерывным технологическим процессом в атомной энергетике, металлургии, химической, нефтехимической, медицинской промышленности, с применением взрывоопасных, сильнодействующих ядовитых веществ, ядерного, ракетного топлива.

Всех потребителей, которые не вошли в первую группу, отнесем ко **второй группе**. Отказы систем водоснабжения, которые обслуживают потребителей второй группы, не приводят к катастрофам, а только к материальным или моральным потерям, которые пропорциональны продолжительности и количеству перерывов. Потребители воды этой группы оговаривают только частоту и продолжительность этих перерывов.

Последствия отказов системы водоснабжения проявляются в виде ущербов, которые несет потребитель воды в случае отказов системы водоснабжения. Характер зависимости этих ущербов от перерывов в снабжении водой определяются тем, какой фактор является доминирующим при определении последствий отказов. За счет инертности систем водоснабжения существует некоторый промежуток времени в течении которого последствия отказа у потребителя не ощущаются (это может быть несколько минут). Назовем это время перерыва в водоснабжении допустимым $t_{дон}$. В случае превышения этого времени, у потребителя **первой группы** возникает опасная авария, которая приводит к катастрофе и соответствующим катастрофическим ущербам $У_K$ (рис. 3а). У потребителей **второй группы**, если перерыв в подаче воды превышает $t_{дон}$, катастроф не происходит, но потребитель несет потери, которые растут пропорционально продолжительности перерыва в снабжении водой (рис. 3б).



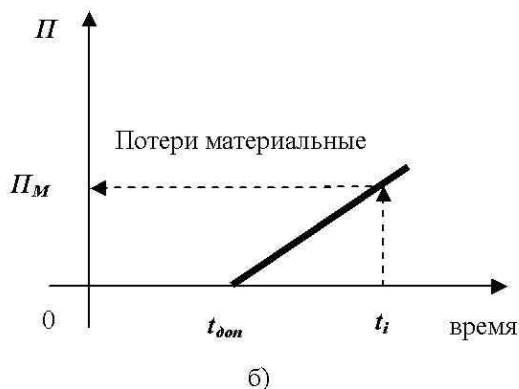


Рис. 3 Характер зависимости ущерба $У$ и материальных потерь $П$ от продолжительности перерыва в подаче воды для потребителей:

- а) первой группы;
- б) второй группы.

Fig. 3 The character of the dependence damage $У$ and material losses $П$ of the duration break in the supply of water to consumers:

- а) of a first group;
- б) of a second group.

Выбор основных показателей надежности

Отдельно взятые показатели надежности не дают возможности оценить экономическую полезность системы водоснабжения. Будем считать основным тот показатель надежности, который входит составной частью в экономический показатель, который оценивает экономическую полезность комплекса “система водоснабжения – потребитель”. В современных экономических условиях таким показателем можно принять годовой доход от эксплуатации этого комплекса. Учитывая то, что показатели надежности носят вероятностный характер, величина годового дохода также будет вероятностной. В качестве оценки примем среднее значение (математическое ожидание) дохода за один год эксплуатации комплекса.

Получим следующие выражения для среднегодового дохода $Д$:

– для потребителей **первой группы**:

$$Д = Д_0 t - У_K (1 - P(t)), \tag{2}$$

– для потребителей **второй группы**:

$$Д = Д_0 t - П_0 t_n (1 - K_T), \tag{3}$$

где t – продолжительность работы системы водоснабжения;

t_n – продолжительность простоя системы водоснабжения;

$У_K$ – катастрофический ущерб, в единицах стоимости, в случае отказа комплекса первой группы;

$П_0$ – материальные потери за единицу времени простоя комплекса второй группы в единицах стоимости;

$P(t)$ – вероятность безотказной работы системы водоснабжения в течение одного года для комплекса первой группы;

K_T – вероятность нахождения системы водоснабжения в работоспособном состоянии для комплекса второй группы, которая численно равна коэффициенту готовности.

Таким образом, в качестве количественной меры возникновения отказа для систем водоснабжения **первой группы** целесообразно взять вероятность возникновения отказа $Q(t)$ в течении времени работы t . Противоположная ей вероятность $P(t) = 1 - Q(t)$ представляет собой вероятность безотказной работы системы водоснабжения в течении времени t :

$$P(t) = P\{t \geq t_i\}, \tag{4}$$

где t_i – произвольный отрезок времени.

Для систем водоснабжения **второй группы** целесообразно в качестве основного показателя надежности принять коэффициент готовности K_T или противоположный ему коэффициент простоя $K_П = 1 - K_T$. Коэффициент готовности K_T представляет собой “свертку” двух базисных показателей надежности – средней наработки на отказ T и среднего времени восстановления T_B :

$$K_T = \frac{T}{T + T_B}. \tag{5}$$

Коэффициент готовности – это комплексный показатель, который учитывает одновременно и безотказность (показатель T), и ремонтпригодность (показатель T_B) системы водоснабжения.

Потребителей воды в населенных пунктах следует отнести ко **второй группе** потребителей. “Правила предоставления услуг ...” допускают перерывы в подаче воды длительностью не более 6-ти часов в сутки и не более 2-х раз в месяц. Таким образом, безотказность системы водоснабжения должна быть такой, чтобы $T \geq 360 \text{ часов}$, а ремонтпригодность должна быть такой, чтобы $T_B \leq 6 \text{ часов}$. Тогда коэффициент готовности $K_T = 360 / (360 + 6) = 0,9836$.

На основе изложенных принципов предложена классификация и определены основные показатели надежности (табл. 1). При этом, коммунальные системы водоснабжения, которые обслуживают потребителей второй группы предлагается разделить на 3 категории.

Первая категория – города с числом жителей $N \geq 50000$ – допускаются перерывы водоснабжения не более 3-х часов в сутки и не чаще 1-го раза в 3 месяца. Такая норма была принята в Великобритании в 1985 г.

Вторая категория – города с числом жителей $10000 \leq N \leq 50000$ – допускаются перерывы водоснабжения не больше 6-ти часов в сутки и не чаще 2-х раз в месяц. Такая норма отвечает украинским требованиям.

Третья категория – поселки городского типа и села с числом жителей $N < 10000$ – допускаются

перерывы водоснабжения не более 24-х часов и не чаще 2-х раз в месяц.

Таблица 1 Классификация потребителей и систем водоснабжения по надежности

Группы потребителей	Группы и категории систем водоснабжения	Значения основных и базисных показателей надежности		
1	Первая группа Подгруппа А – системы водоснабжения опасных производств	Максимум вероятности безотказной работы на протяжении срока службы $\max P(T)$		
	Подгруппа Б – противопожарные системы водоснабжения	Максимум коэффициента оперативной готовности за 3 часа локализации пожара $\max K_{ог} = K_{г}P(t)$		
2	Вторая группа Централизованные водопроводы населенных пунктов при количестве жителей	Наработка на отказ T , час	Среднее время восстановления работоспособности $T_{в}$, час	Коэффициент готовности $K_{г}$
	1 категория города $N \geq 50$ тыс. жителей	$T \geq 360$ час (0,5 месяца)	$T_{в} \leq 3$ часа	0,99861
	2 категория города 10 тыс. $\leq N \leq 50$ тыс. жителей	$T \geq 360$ час (0,5 месяца)	$T_{в} \leq 6$ часов	0,98361
	3 категория пгт. и села $N < 10$ тыс. жителей	$T \geq 360$ час (0,5 месяца)	$T_{в} \leq 24$ часа	0,93750

Надежность водоводов

Покажем, как можно рассчитать основные показатели надежности для водоводов – одного из сооружений ПРК. Водоводом в системе водоснабжения будем считать трубопровод, который состоит из одной или нескольких параллельно проложенных труб (ниток), которые транспортируют воду транзитом, т.е. без путевого разбора воды. Однако, возможны узловые отборы воды и тогда диаметры труб на отдельных участках водовода могут уменьшаться по направлению движения воды. Обычно водоводом вода подается от:

- водозаборных сооружений с поверхностного источника на очистные сооружения;
- скважин из подземных источников на очистные сооружения или в резервуары чистой воды;
- водопроводных очистных сооружений в водопроводную сеть населенного пункта, в том числе в групповых и районных водопроводах;
- внеплощадочных водопроводных сооружений на площадку промышленного предприятия.

Водовод, который состоит из одной нитки трубопровода назовем **простым**, а который состоит из 2-х и более ниток – **сложным**.

Основные показатели надежности рассчитываем на основе базисных показателей надежности T и $T_{в}$. Для водоводов, которые подают воду потребителям **первой группы**, основной показатель надежности – вероятность безотказной работы в течении времени t :

$$P(t) = \exp\left[-\frac{t}{T}\right] = \exp[-\omega t], \quad (6)$$

где T – средняя наработка на отказ водовода; ω – параметр потока отказов водовода.

Для водоводов, которые подают воду потребителям **второй группы**, основной показатель надежности – коэффициент готовности:

$$K_{г} = \frac{T}{T + T_{в}}. \quad (7)$$

Рассмотрим простой водовод, который состоит из нескольких участков разной длины и диаметра труб (рис. 5).

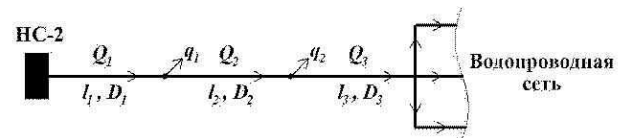


Рис. 5 Схема простого водовода
Fig. 5 Scheme of a simple conduit

Математической моделью для расчета надежности в этом случае будет последовательное соединение восстанавливаемых элементов. Элементом принимаем 1 км трубопровода фиксированного диаметра и материала труб. **Параметр потока отказов** водовода рассчитываем как для последовательно соединенных элементов:

$$\omega = \sum_{i=1}^n \omega_{oi} l_i = \sum_{i=1}^n \omega_i, \quad (8)$$

где l_i – длина участка трубопровода i -го диаметра, км; ω_{oi} – удельный параметр потока отказов – параметр потока отказов 1 км трубопровода i -го диаметра и материала труб, 1/год·км; n – количество участков трубопровода разного диаметра и материала труб.

Средняя наработка на отказ водовода:

$$T = 1/\omega, \text{ лет.} \quad (9)$$

Среднее время восстановления работоспособности водовода рассчитываем как средневзвешенную, относительно параметра потока отказов участков, величину:

$$T_{в} = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i T_{вi}}{\sum_{i=1}^n \omega_i} = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i T_{вi}}{\omega}, \quad (10)$$

где $\omega_i = \omega_{oi} l_i$ – параметр потока отказов i -го участка водовода; $T_{вi}$ – среднее время восстановления работоспособности i -го участка.

Рассмотрим сложный водовод, который состоит из 2-х одинаковых ниток без перемычек (рис. 6).

По условию задачи $l_1 = l_2; D_1 = D_2; \omega_1 = \omega_2; T_{B1} = T_{B2}$. Критерий отказа – прекращение подачи воды водоводом. Подача воды одной ниткой водовода не считается отказом. Воспользуемся методом вкладов, разработанным в теории надежности [10], при котором вычисляются “вклады” всех элементов в общий поток отказов.

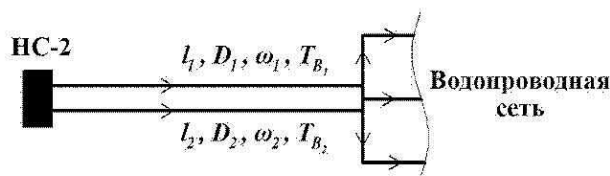


Рис. 6 Схема сложного водовода из 2-х одинаковых ниток

Fig. 6 Scheme of a complex conduit from 2 identical threads

Отказ первой нитки водовода не приводит к отказу водовода, но отказ водовода может произойти, если в это время в ремонте находится вторая нитка. Тогда вклад первой нитки составляет:

$$v_1 = \omega_1 K_{\Pi 2}, \quad (11)$$

где $K_{\Pi 2} = \omega_2 T_{B2}$ – коэффициент простоя второй нитки, который определяет вероятность того, что вторая нитка находится в ремонте.

Аналогично, вклад второй нитки v_2 в параметр потока отказов водовода равен $v_2 = \omega_2 K_{\Pi 1}$. Параметр потока отказов водовода находится как сумма вкладов обеих ниток:

$$\omega = v_1 + v_2 = \omega_1 K_{\Pi 2} + \omega_2 K_{\Pi 1} = 2\omega_1 K_{\Pi 2}. \quad (12)$$

Средняя наработка на отказ:

$$T = 1/(v_1 + v_2). \quad (13)$$

Среднее время восстановления работоспособности водовода:

$$T_B = \frac{v_1 T_{B1} + v_2 T_{B2}}{v_1 + v_2} = T_{B1} = T_{B2}. \quad (14)$$

И.А. Ушаков доказывает [10], что точность расчетов базисных показателей надежности методом вкладов достаточно высокая в том случае, когда интервалы простоев значительно меньше интервалов безотказной работы. Это условие выполняется для водоводов, у которых отношение T_B/T составляет 0,005 ... 0,01.

Рассмотрим водовод, который состоит из 2-х ниток с высоконадежной перемычкой. Нитки могут быть из труб одинакового или разного диаметра и материала, участки могут быть разной длины – все это не влияет на вид формул. Примем критерием отказа прекращение подачи воды водоводом. Подача воды по одной нитке водовода или с

неработающим участком, без прекращения подачи воды, не считается отказом (рис. 7).

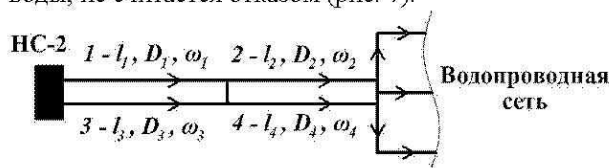


Рис. 7 Схема водовода из 2-х ниток с перемычкой
Fig. 7 Scheme conduit of 2 threads with jumper

Вычисляем вклады участков в параметр потока отказов водовода:

$$v_1 = \omega_1 K_{\Pi 3}, \quad v_3 = \omega_3 K_{\Pi 1}, \quad (15)$$

$$v_2 = \omega_2 K_{\Pi 4}, \quad v_4 = \omega_4 K_{\Pi 2}.$$

Параметр потока отказов водовода:

$$\omega = \sum_{i=1}^4 v_i. \quad (16)$$

Средняя наработка на отказ водовода:

$$T = 1/\omega. \quad (17)$$

Среднее время восстановления работоспособности водовода:

$$T_B = \frac{v_1 T_{B1} + v_2 T_{B2} + v_3 T_{B3} + v_4 T_{B4}}{v_1 + v_2 + v_3 + v_4}, \quad (18)$$

где $T_{B1}, T_{B2}, T_{B3}, T_{B4}$ – среднее время восстановления работоспособности соответствующих участков водовода.

Если $T_{B1} = T_{B2} = T_{B3} = T_{B4}$, тогда

$T_B = T_{B1}$, то есть, среднее время восстановления работоспособности водовода равно среднему времени восстановления работоспособности участка водовода.

Аналогичные формулы для расчета базисных показателей надежности можно получить для водовода из 2-х ниток с 2-мя высоконадежными перемычками (рис. 8).

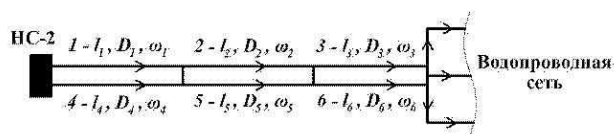


Рис. 8 Схема водовода из 2-х ниток с 2-мя перемычками

Fig. 8 Scheme conduit of 2 threads with 2 jumpers

Критерий отказа – прекращение подачи воды водоводом. Подача по одной нитке или отключенными в ремонт участками, без прекращения подачи воды, не считается отказом. Вклады участков в параметр потока отказов водовода:

$$v_1 = \omega_1 K_{\Pi 4}, \quad v_3 = \omega_3 K_{\Pi 6}, \quad v_5 = \omega_5 K_{\Pi 2}, \quad (19)$$

$$v_2 = \omega_2 K_{\Pi 5}, \quad v_4 = \omega_4 K_{\Pi 1}, \quad v_6 = \omega_6 K_{\Pi 3}.$$

Параметр потока отказов водовода:

$$\omega = \sum_{i=1}^6 v_i \quad (20)$$

Средняя наработка на отказ водовода:

$$T = 1/\omega. \quad (21)$$

Среднее время восстановления работоспособности водовода:

$$T_B = \frac{v_1 T_{B_1} + v_2 T_{B_2} + v_3 T_{B_3} + v_4 T_{B_4} + v_5 T_{B_5} + v_6 T_{B_6}}{v_1 + v_2 + v_3 + v_4 + v_5 + v_6}. \quad (22)$$

Рассмотрим пример расчета базисных показателей надежности такого водовода (рис. 9). Пусть участки 1, 2, 4, 5 выполнены из стальных труб ($\omega_0 = 1,2 \text{ 1/год}\cdot\text{км} = 1,37 \cdot 10^{-4} \text{ 1/час}\cdot\text{км}$), а участки 3, 6 выполнены из полиэтиленовых труб ($\omega_0 = 0,44 \text{ 1/год}\cdot\text{км} = 0,5 \cdot 10^{-4} \text{ 1/час}\cdot\text{км}$). Пусть среднее время восстановления стальных труб $T_{BC} = 12 \text{ часов}$, полиэтиленовых труб $T_{BII} = 10 \text{ часов}$.

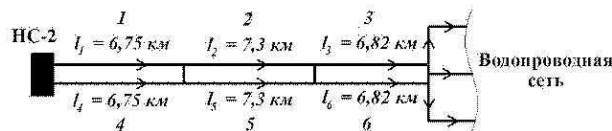


Рис. 9 Схема для примера расчета надежности водовода из 2-х ниток с 2-мя высоконадежными перемычками

Fig. 9 Scheme for example calculating the reliability of the conduit 2 threads with 2 highly reliable jumpers

Вычисляем параметр потока отказов участков:

$$\omega_1 = \omega_4 = \omega_0 l_1 = 1,37 \cdot 10^{-4} \cdot 6,75 = 9,25 \cdot 10^{-4} \text{ 1/час},$$

$$\omega_2 = \omega_5 = \omega_0 l_2 = 1,37 \cdot 10^{-4} \cdot 7,3 = 10,0 \cdot 10^{-4} \text{ 1/час},$$

$$\omega_3 = \omega_6 = \omega_0 l_3 = 0,5 \cdot 10^{-4} \cdot 6,82 = 3,41 \cdot 10^{-4} \text{ 1/час}.$$

Вычисляем коэффициент простоя участков:

$$K_{\Pi_1} = K_{\Pi_4} = \omega_1 T_{BC} = 9,25 \cdot 10^{-4} \cdot 12 = 1,11 \cdot 10^{-2},$$

$$K_{\Pi_2} = K_{\Pi_5} = \omega_2 T_{BC} = 10,0 \cdot 10^{-4} \cdot 12 = 1,2 \cdot 10^{-2},$$

$$K_{\Pi_3} = K_{\Pi_6} = \omega_3 T_{BII} = 3,41 \cdot 10^{-4} \cdot 10 = 0,34 \cdot 10^{-2}.$$

Вычисляем вклады участков:

$$v_1 = \omega_1 K_{\Pi_1} = 9,25 \cdot 10^{-4} \cdot 1,11 \cdot 10^{-2} = 1,03 \cdot 10^{-5} \text{ 1/час},$$

$$v_2 = \omega_2 K_{\Pi_2} = 10,0 \cdot 10^{-4} \cdot 1,2 \cdot 10^{-2} = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ 1/час},$$

$$v_3 = \omega_3 K_{\Pi_3} = 3,41 \cdot 10^{-4} \cdot 0,34 \cdot 10^{-2} = 0,12 \cdot 10^{-5} \text{ 1/час},$$

$$v_4 = \omega_4 K_{\Pi_1} = 9,25 \cdot 10^{-4} \cdot 1,11 \cdot 10^{-2} = 1,03 \cdot 10^{-5} \text{ 1/час},$$

$$v_5 = \omega_5 K_{\Pi_2} = 10,0 \cdot 10^{-4} \cdot 1,2 \cdot 10^{-2} = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ 1/час},$$

$$v_6 = \omega_6 K_{\Pi_3} = 3,41 \cdot 10^{-4} \cdot 0,34 \cdot 10^{-2} = 0,12 \cdot 10^{-5} \text{ 1/час}.$$

Параметр потока отказов водовода:

$$\omega = \sum_{i=1}^6 v_i = 4,7 \cdot 10^{-5} \text{ 1/час}.$$

Нарработка на отказ водовода:

$$T = 1/\omega = 21276 \text{ час} = 2,43 \text{ года}.$$

Среднее время восстановления работоспособности водовода:

$$T_B = \frac{(1,03 \cdot 12 + 1,2 \cdot 12 + 0,12 \cdot 10 + 1,03 \cdot 12 + 1,2 \cdot 12 + 0,12 \cdot 10) \cdot 10^{-5}}{(1,03 + 1,2 + 0,12 + 1,03 + 1,2 + 0,12) \cdot 10^{-5}} = 11,9 \text{ часа}.$$

Таким образом, водовод будет отказывать примерно 1 раз в 2,5 года на время примерно 12 часов.

Вероятность безотказной работы водовода в течении года:

$$P(t) = \exp[-4,7 \cdot 10^{-4} \cdot 8760] = e^{-0,412} = 0,6623.$$

Коэффициент готовности водовода:

$$K_G = \frac{21276}{21276 + 11,9} = 0,99944.$$

Коэффициент простоя водовода:

$$K_{II} = 1 - K_G = 0,00056.$$

Алгоритм расчета надежности водовода при высоконадежных перемычках.

1. Разрабатывается технологическая схема водовода.
2. Формируется критерий отказа водовода. Отказом считается прекращение подачи воды водоводом или другое условие.
3. Определяется параметр потока отказов ω_i каждого участка водовода по формуле:

$$\omega_i = \omega_0 l_i, \text{ 1/час}, \quad (23)$$

где l_i – длина участка, км; ω_0 – удельный параметр потока отказов, 1/год·км.

4. Определяются коэффициенты простоя участков водовода по формуле:

$$K_{\Pi_i} = \omega_i T_{B_i}, \quad (24)$$

где T_{B_i} – среднее время ремонта участка, час.

5. Вычисляются вклады участков v_i в параметр потока отказов водовода:

$$v_i = \omega_i K_{\Pi_i}, \text{ 1/час}, \quad (25)$$

где ω_i – параметр потока отказов i -го участка, 1/час; $K_{\Pi_j} = \omega_j T_{B_j}$ – коэффициент простоя j -го участка.

6. Вычисляется параметр потока отказов водовода как сумма вкладов отдельных участков:

$$\omega = \sum_{i=1}^n v_i, \text{ 1/час}, \quad (26)$$

где n – количество участков водовода.

7. Вычисляется средняя наработка на отказ водовода:

$$T = 1/\omega, \text{ часов}. \quad (27)$$

8. Вычисляется среднее время восстановления работоспособности водовода как средневзвешенная, относительно вкладов, величина:

$$T_B = \frac{\sum_{i=1}^n v_i T_{B_i}}{\sum_{i=1}^n v_i}, \text{ час,} \quad (28)$$

где T_{B_i} – среднее время восстановления i -го участка водовода, час.

9. Вычисляется основной показатель надежности: – для водоводов **первой** группы – **вероятность безотказной работы** в течении времени t :

$$P(t) = \exp[-\omega t], \quad (29)$$

– для водоводов **второй** группы – **коэффициент готовности**:

$$K_r = \frac{T}{T + T_B}, \quad (30)$$

или **коэффициент простоя** $K_{II} = 1 - K_r$. (31)

Обычно водоводы состоят из линейной части (трубы) и запорной и предохранительной арматуры (задвижки, клапаны, вантузы и др.). Если водовод проложен в две и больше параллельных ниток, то между ними устраивают перемычки, которые оборудуют задвижками для переключений. При этом, нормами разрешается уменьшить подачу воды только на 30%. Это можно сделать двумя путями:

- принять водовод в две нитки без перемычек на подачу воды $0,7Q$ каждой ниткой, что экономически выгодно только при коротких водоводах;
- принять водовод в две нитки с перемычками на подачу воды $0,5Q$ каждой нитки, когда при повреждениях отключается отдельный участок.

Рассмотрим схему водовода в две нитки с двумя перемычками и задвижками (рис. 10). Критерий отказа – прекращение подачи воды, или подача воды одной ниткой, или подача воды при двух выключенных участках.

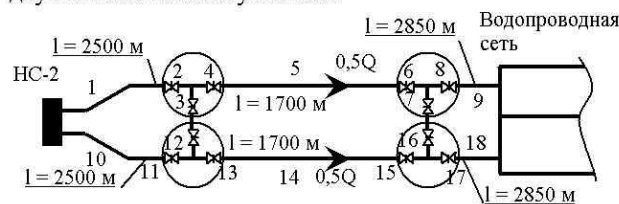


Рис. 10 Схема водовода в 2 нитки с 2-мя перемычками

Fig. 10 Scheme conduit in 2 threads with 2 jumpers

С точки зрения надежности, для принятого критерия отказа все задвижки на водоводе оказываются соединенными последовательно. Вызвано это тем, что отказ любой задвижки ведет к отключению двух участков, а для сохранения работоспособного состояния допускается отключение только одного участка. Под отказом задвижки считаем такое ее состояние, когда нужна

ее срочная замена (например, повреждение корпуса).

Для принятого критерия отказа работоспособными состояниями водовода будут только те состояния, когда работоспособны все участки или отказал только один участок (рис. 11).

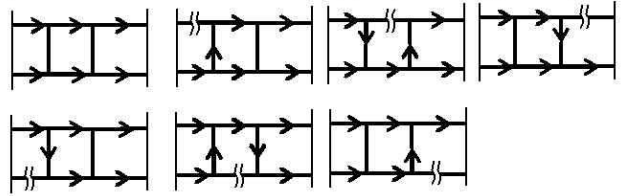


Рис. 11 Работоспособные состояния водовода в 2 нитки с 2-мя перемычками

Fig. 11 Operable condition of the conduit in 2 threads with 2 jumpers

Определим вклады элементов в параметр потока отказов водовода:

$$v_1 = \omega_1 (K_{II_5} + K_{II_9} + K_{II_{10}} + K_{II_{14}} + K_{II_{18}}),$$

$$v_5 = \omega_5 (K_{II_1} + K_{II_9} + K_{II_{10}} + K_{II_{14}} + K_{II_{18}}),$$

$$v_9 = \omega_9 (K_{II_1} + K_{II_5} + K_{II_{10}} + K_{II_{14}} + K_{II_{18}}),$$

$$v_{10} = \omega_{10} (K_{II_1} + K_{II_5} + K_{II_9} + K_{II_{14}} + K_{II_{18}}),$$

$$v_{14} = \omega_{14} (K_{II_1} + K_{II_5} + K_{II_9} + K_{II_{10}} + K_{II_{18}}),$$

$$v_{18} = \omega_{18} (K_{II_1} + K_{II_5} + K_{II_9} + K_{II_{10}} + K_{II_{14}}),$$

$$v_2 = \omega_2; v_3 = \omega_3; v_4 = \omega_4; v_6 = \omega_6,$$

$$v_7 = \omega_7; v_8 = \omega_8; v_{11} = \omega_{11}; v_{12} = \omega_{12},$$

$$v_{13} = \omega_{13}; v_{15} = \omega_{15}; v_{16} = \omega_{16}; v_{17} = \omega_{17}.$$

Примем для стальных труб $\omega_0 = 1,4$ 1/год·км; для задвижек $\omega = 0,15 \cdot 10^{-4}$ 1/час; среднее время ремонта участка трубопровода $T_B = 8$ час.

Параметры потока отказа участков:

$$\omega_1 = \omega_{10} = \omega_0 l = 1,4 \cdot 2,5 = 3,5 \text{ 1/год} = 4 \cdot 10^{-4} \text{ 1/час,}$$

$$\omega_5 = \omega_{14} = \omega_0 l = 1,4 \cdot 1,7 = 2,38 \text{ 1/год} = 2,72 \cdot 10^{-4} \text{ 1/час,}$$

$$\omega_9 = \omega_{18} = \omega_0 l = 1,4 \cdot 2,5 = 3,99 \text{ 1/год} = 4,55 \cdot 10^{-4} \text{ 1/час.}$$

Коэффициент простоя участков:

$$K_{II_1} = K_{II_{10}} = \omega \cdot T_B = 4 \cdot 10^{-4} \cdot 8 = 3,2 \cdot 10^{-3},$$

$$K_{II_5} = K_{II_{14}} = \omega \cdot T_B = 2,72 \cdot 10^{-4} \cdot 8 = 2,18 \cdot 10^{-3},$$

$$K_{II_9} = K_{II_{18}} = \omega \cdot T_B = 4,55 \cdot 10^{-4} \cdot 8 = 3,64 \cdot 10^{-3}.$$

Вклады элементов в параметр потока отказов водовода:

$$v_1 = v_{10} = 4 \cdot 10^{-4} (2,18 + 3,64 + 3,2 + 2,18 + 3,64) 10^{-3} = 5,94 \cdot 10^{-6} \text{ 1/час,}$$

$$v_5 = v_{14} = 2,72 \cdot 10^{-4} (3,2 + 3,64 + 3,2 + 2,18 + 3,64) 10^{-3} = 4,31 \cdot 10^{-6} \text{ 1/час,}$$

$$v_9 = v_{18} = 4,55 \cdot 10^{-4} (3,2 + 2,18 + 3,64 + 3,2 + 2,18) 10^{-3} = 6,55 \cdot 10^{-6} \text{ 1/час,}$$

$$v_2 = \dots = v_{17} = \omega_2 \dots = \omega_{17} = 0,15 \cdot 10^{-4} \text{ 1/час.}$$

Параметр потока отказов водовода:

$$\omega = \sum_{i=1}^{18} v_i = (2 \cdot 5,94 + 2 \cdot 4,31 + 2 \cdot 6,55) \cdot 10^{-6} +$$

$$+ 12 \cdot 0,15 \cdot 10^{-4} = 2,136 \cdot 10^{-4} \text{ 1/час.}$$

Наработка на отказ водовода:

$$T = \frac{1}{\omega} = \frac{1}{2,136 \cdot 10^{-4}} = 4682 \text{ час} \cong 0,53 \text{ года.}$$

ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамов Н.Н., 1972. Теория и методика расчета систем подачи и распределения воды. – М.: Стройиздат. – 288.
2. Абрамов Н.Н. О проблемах надежности систем водоснабжения // Водные ресурсы. – 1974. – №2. – 114 – 119
3. Абрамов Н.Н., Малов В.И. О надежности систем водоснабжения и путей ее обеспечения // Известия АН СРСР. Энергетика и транспорт. – 1976. – №1. – 161 – 176
4. Абрамов Н.Н., 1984. Надежность систем водоснабжения. – М.: Стройиздат. – 216.
5. Абрамов Н.Н., 1979. Надежность систем водоснабжения. – М.: Стройиздат. – 231.
6. Абрамов Н.Н., 1982. Водоснабжение: [учебник]. – М.: Стройиздат. – 440.
7. Алексеев М.И., Ермолин Ю.А. Использование оценки надежности стареющих канализационных сетей при их реконструкции // Водоснабжение и санитарная техника. – 2004. – №6. – 21 – 23
8. Алексеев М.И., Ермолин Ю.А., Определение показателей надежности объекта по сезонно изменяющейся интенсивности отказов // Водоснабжение и санитарная техника. – 2007. – №5. 5 – 8
9. Алексеев М.И., Ермолин Ю.А., Вероятностные характеристики времени наработки между отказами восстанавливаемых объектов водопроводно-канализационного хозяйства // Водоснабжение и санитарная техника. – 2009. – №5 – 26 – 28
10. Беляев Ю.К., Богатырев В.А., Болотин В.В. и др., 1985. Надежность технических систем: Справочник. – М.: Радио и связь. – 608.
11. Гальперин Е.М. Совершенствование расчетной модели функционирования кольцевой водопроводной сети // Водоснабжение и санитарная техника. – 2010. – №2. – 51 – 54
12. Ермолин Ю.А., Алексеев М.И. О методологии исследования надежности стареющих элементов и систем водопровода и канализации // Водоснабжение и санитарная техника. – 2002. – №9. – 2 – 4
13. Журба М.Г., Соколов Л.И., Говорова Ж.М., 2010. Водоснабжение. Проектирование систем и сооружений: в 3-х т. Т. 1. Системы водоснабжения, водозаборные сооружения: Учеб. пособие. – М.: Из-во АСВ. – 400.
14. Ильин Ю.А., 1985. Надежность водопроводных сооружений и оборудования. – М.: Стройиздат. – 240.
15. Ильин Ю.А., 1987. Расчет надежности подачи воды. – М.: Стройиздат. – 320.
16. Найманов А.Я. О надежности систем водоснабжения и водоотведения // Водоснабжение и санитарная техника. – 2005. – №7. – 30 – 35.
17. Новохатний В.Г., 2012. Надійність функціонування подавально-розподільного комплексу систем водопостачання: автореф. дис. докт. техн. наук. – К.: КНУБА. – 32.
18. Новохатний В.Г. Надійність подавально-розподільного комплексу систем водопостачання // Наук. вісник будівництва: 36. наук. праць. Вип. 48. – Харків: ХДТУБА. – 2010. – 36 – 42
19. Новохатний В.Г., Костенко С.О. Оцінювання надійності охолоджувальних систем обігового водопостачання сталеливарного заводу // Наук. вісник будівництва: 36. наук. праць. Вип. 72. – Харків: ХНУБА. – 2013. – 350 – 354
20. Ткачук О.А., 2008. Удосконалення систем подачі та розподілення води населених пунктів. – Рівне: НУВГП. – 301.
21. Хоружий П.Д., Хомуцька Т.П., Хоружий В.П., 2008. Ресурсозберігаючі технології водопостачання. – К.: Аграрна наука. – 534.
22. Храменков С.В., 2005. Стратегия модернизации водопроводной сети. – М.: ОАО Из-во “Стройиздат”. – 400.
23. Hotłoś H. Analiza strat wody w systemach wodociagowych // Ochrona Srodowiska. – 2003. – №1. – 17 – 24
24. Piechurski F. Straty wody i sposoby ich obnizania // Ochrona Srodowiska. – 2/2005, 4/2005, 1/2006, 2/2006.
25. Rak J., Tchorzewska-Cieślak B. Metody analizy i oceny ryzyka w systemie zaopatrzenia w wodę. - Rzeszów: Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, 2005.
26. Rak J. Podstawy bezpieczeństwa systemów zaopatrzenia w wodę. – Komitet Inzynierii Srodowiska PAN. – T. 28. – Lublin, 2005. – 1 – 215.

RELIABILITY OF CONDUITS OF WATER SUPPLY SYSTEMS

Summary. In the water supply systems allocated three complexes: water intake, water treatment and feeding-distribution. Set out a reasonable method for selecting key indicators of reliability. We propose a method and gives examples of calculating the reliability of conduits.

Key words: system of water supply, indicators reliability, reliability of conduits.