УДК 628.1: 628.21

Е.М. ГАЛЬПЕРИН

О ПРОЦЕДУРЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ СИСТЕМ ВОДОСНАБЖЕНИЯ И ВОДООТВЕДЕНИЯ

ABOUT DEFINITION OF FUNCTIONING RELIABILITY OF WATER SUPPLY AND WASTEWATER SYSTEMS

Предложена единая процедура определения надежности функционирования объектов систем водоснабжения и водоотведения. Процедура содержит три этапа. На первом этапе определяется время нахождения объекта за определенный период в исправном и неисправных состояниях путем использования аппарата теории систем массового обслуживания (СМО). На втором этапе с помощью известных технологических расчетов устанавливаются работоспособные или неработоспособные состояния у неисправных состояний. На третьем этапе определяется время выполнения объектом своих функций за определенный период на 100 % ($T_н$), менее чем на 100 %, но не ниже определенного предела (T_c), и время нахождения его в отказовых или аварийных состояниях (T_a). Применение рекомендованной процедуры продемонстрировано на примере насосной станции 2-го подъема.

***Ключевые слова**: надежность функционирования, СМО, работоспособные и неработоспособные состояния.*

The common procedure of definition of functioning reliability of water supply and wastewater systems is proposed. This procedure contains three stages.

At the first stage the time of being in working and improper states is defined by using apparatus of queueing theory.

At the second stage operable and unoperable states of improper states are determined with engineering simulation methods.

At the third stage the work time of an object and the time of its being in critical and failed conditions are defined.

This procedure is demonstrated by the example of 2-nd lift pump station.

***Key words**: functioning reliability, queue system, operable states, unoperable mode.*

Надежность функционирования устройств и сооружений в технике является их важнейшим качеством. Для объектов систем водоснабжения и водоотведения это качество особенно ценно, так как данные системы влияют на условия жизни практически всего населения страны, касаются каждого жителя, отражаясь на его здоровье и благополучии. Более того, влияя на экологию окружающей среды, надежность этих систем сказывается на условиях жизни будущих поколений.

Объекты водопроводной и водоотводящей систем в процессе работы испытывают воздействия как со стороны окружающей среды, так и возникающие внутри системы. Воздействие окружающей среды проявляется через изменения величины водопотребления и водоотведения, качества воды в источниках и т.д. Внутренние воздействия выступают в виде возникающих в случайные моменты времени неисправностей, изменения со временем характеристик устройств и агрегатов в результате износа и т.д. Существующие методы расчета объектов систем водоснабжения и водоотведения не всегда учитывают динамику этих изменений, ориентируясь в основном на некое среднее статическое состояние, в котором пребывает система в некоторый момент времени t. Такой подход в ряде случаев значительно упрощает рассмотрение сложных процессов, протекающих в системах в течение времени, упуская из рассмотрения в ходе их функционирования важные явления и события.

В настоящей статье предложена общая процедура определения надежности функционирования объектов систем водоснабжения и водоотведения, которые отличаются протеканием в них разных физико-химических процессов и принципов организации их работ. Комплекс показателей надежности таких объектов предложен в работе Е.М. Гальперина [1].

Процедура установления надежности функционирования объектов систем водоснабжения и водоотведения предусматривает выполнение трех этапов.

Первый этап содержит операции по определению среднего времени нахождения объектов водопроводных и водоотводящих систем в исправном и неисправных состояниях.

Второй этап состоит из технологических расчетов неисправных состояний. Известно, что водопотребление и водоотведение в течение суток в некоторых сооружениях не меняется, а в некоторых изменяется существенно. Технологические расчеты выполняются для расходов, надежность режима функционирования которых вычисляется.

Третий этап регламентирует определение за установленный промежуток времени:

- среднего времени функционирования объекта со 100 % выполнением своих функций;
- среднего времени функционирования объекта с выполнением своих функций менее чем на 100 %, но со снижением качества функционирования не более заранее установленного предела;
- среднего времени работы объекта в отказовых, аварийных состояниях.

Первый этап.

Очевидно, что как внешние, так и внутренние воздействия на объекты систем водоснабжения и водоотведения носят случайный характер, что предопределяет использование для описания хода работы таких систем аппарата теории случайных процессов. Наиболее плодотворным для этих целей представляется марковский случайный процесс с дискретными состояниями и непрерывным временем.

Случайный процесс, протекающий в системе, называется марковским, если для любого момента времени t_0 вероятностные характеристики процесса в будущем зависят только от его состояния в данный момент t_0 и не зависят от того, когда и как система пришла в это состояние. Процесс называется **процессом с дискретными состояниями, если его возможные состояния $\mathbf{e}^{(1)}$, $\mathbf{e}^{(2)}$, $\mathbf{e}^{(3)}$, …, $\mathbf{e}^{(к)}$ можно заранее перечислить (перенумеровать) и переход системы из состояния в состояние происходит «скачком», практически мгновенно. Процесс называется процессом с непрерывным временем, если моменты возможных переходов из состояния в состояние не фиксированы заранее, случайны, а не определены, если переход может осуществляться, в принципе, в любой момент.** Пример такого процесса: система водоводов **Е**, состоящая из двух водоводов, каждый из которых в случайный момент времени может выйти из строя (отказать), после чего мгновенно начинается его ремонт, тоже продолжающийся заранее не известное, случайное время (рис. 1).

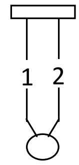

Рис. 1

Возможные состояния системы $\mathbf{e}_к^{(i)}$, где i – номер состояния, к – количество отключенных водоводов, можно перечислить:

$\mathbf{e}_0^{(1)}$ – оба водовода исправлены;

$\mathbf{e}_1^{(2)}$ – первый водовод ремонтируется, второй исправен;

$\mathbf{e}_1^{(3)}$ – второй водовод ремонтируется, первый исправен;

$\mathbf{e}_2^{(4)}$ – оба водовода ремонтируются.

Переходы системы из состояния в состояние происходят мгновенно, в случайные моменты выхода из строя того или другого водовода или окончания ремонта. Для анализа случайных процессов с дискретными состояниями удобно пользоваться геометрической схемой – так называемым **графом состояний**. Состояния системы изображаются прямоугольниками (или кругами, или даже точками), а возможные переходы из состояния в состояние – стрелками, соединяющими состояния. Граф состояний, у которого у стрелок проставлены интенсивности перехода, называют **размеченным**.

Размеченный граф состояний для рассматриваемого примера представлен на рис. 2,а. На нем в качестве интенсивности перехода при аварии поставлен параметр потока отказов $\lambda = \frac{1}{t_{без}}$, а при восстановлении параметр потока восстановления $\mu = \frac{1}{t_{рем}}$, где $t_{без}$ – время работы объекта между двумя последовательными отказами, а $t_{рем}$ – время ремонта или восстановления. Имея в своем распоряжении размеченный граф состояний, можно найти все вероятности состояний $P_i(t)$ как функции времени. Для этого составляются и решаются так называемые уравнения А.Н. Колмогорова – особого вида дифференциальные уравнения, в которых неизвестными функциями являются вероятности состояний.

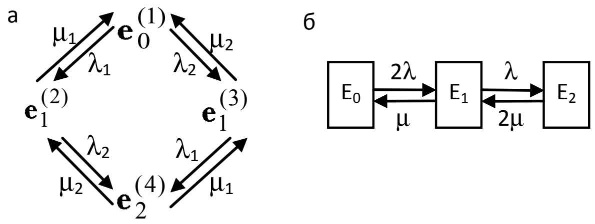

Рис. 2

Уравнения А.Н. Колмогорова для ранее упомянутой системы, содержащей два водовода и размеченный граф состояния, которая показана на рис. 2,а, имеют вид:

$$\left.\begin{aligned}
\frac{dP_0}{dt} &= \mu_1 P_1 + \mu_2 P_2 - (\lambda_1 - \lambda_2)\cdot P_0 \\
\frac{dP_1}{dt} &= \lambda_1 P_0 + \mu_2 P_3 - (\lambda_2 + \mu_1)\cdot P_1 \\
\frac{dP_2}{dt} &= \lambda_2 P_0 + \mu_1 P_3 - (\lambda_1 + \mu_2)\cdot P_2 \\
\frac{dP_3}{dt} &= \lambda_2 P_1 + \lambda_1 P_2 - (\mu_1 - \mu_2)\cdot P_3
\end{aligned}\right\}.$$

Это – система четырех линейных дифференциальных уравнений с четырьмя неизвестными функциями P_1, P_2, P_3, P_4. Заметим, что одно из них (любое) можно отбросить, пользуясь тем, что $P_1+P_2+P_3+P_4=1$. Выразив любую из вероятностей P_i через другие, это выражение подставим в вышеприведенную систему дифференциальных уравнений, а соответствующее уравнение с производной $\dfrac{dP_i}{dt}$ отбросим.

При $t \to \infty$ в системе **E** устанавливается предельный стационарный режим, в ходе которого система случайным образом меняет свои состояния, но их вероятности уже не зависят от времени. Называются они **финальными вероятностями состояния** и физически выражают среднее время пребывания системы в этих состояниях [2]. Так как P_1, P_2, … постоянны, то их производные равны нулю и дифференциальная система уравнений превращается в систему алгебраических уравнений.

В общем случае система состоит из **n** компонент или частей. Каждая компонента может находиться только в двух состояниях: действующей или работающей и неработающей или отключенной в результате обнаруженной в ней неисправности. Система в зависимости от неисправности той или иной компоненты или их сочетания, если отключено одновременно несколько компонент, может находиться в 2^n состояниях. Это множество состояний разбивается на подмножества, состоящие из исправного состояния $\mathbf{E_0}$ и подмножества неисправных состояний $\mathbf{E}_i$, где $i = 1, 2, \ldots, n$ – количество одновременно неисправных и отключенных компонент. Количество элементов каждого подмножества $\mathbf{E}_i$ равно числу сочетаний по i из **n** компонент, т.е. C_n^i. Количество неизвестных в системе уравнений А.Н. Колмогорова или число уравнений в ней также равно 2^n.

При числе компонент в системе n = 10 число уравнений будет 1024, а при n = 20 – свыше миллиона. Даже при возможностях современной вычислительной техники решение системы уравнений такого порядка непростая задача.

Учитывая невысокую достоверность значений λ и μ для каждой компоненты, с достаточной степенью точности можно принять осредненные значения величин λ и μ для всех компонент системы. В такой постановке задачи возможно уменьшение числа уравнений за счет объединения (сворачивания) всех состояний, содержащих **k** одновременно отключенных компонент в одно – $\mathbf{E_k}$. В таком случае граф состояния объекта с двумя водоводами приобретает следующий вид (рис. 2,б). Такой граф описывает схему «гибели и размножения», первоначально используемую для изучения развития популяции в биологических системах, почему и получила это название. Граф схемы «гибели и размножения» широко применяется в системах массового обслуживания (СМО). Особый интерес в приложении схемы «гибели и размножения» к решению надежностных задач водопроводно-канализационных систем представляет так называемая замкнутая система СМО. Замкнутой она называется потому, что характеризуется конечным и постоянным возможным максимальным числом заявок на обслуживание, т.е. в системе, имеющей **n** компонент, не может быть более **n** заявок на их обслуживание.

Граф состояния такой замкнутой СМО, имеющей **r** каналов обслуживания или ремонтных бригад, имеет следующий вид (рис. 3).

Одним из достоинств графа схемы «гибели и размножения» является то, что его решения могут быть получены заранее в явном виде. Формулы для определения P_k и P_0, полученные с помощью этого графа, имеют следующие выражения. (В этих выражениях будем вместо P_0 использовать T_0 – среднее

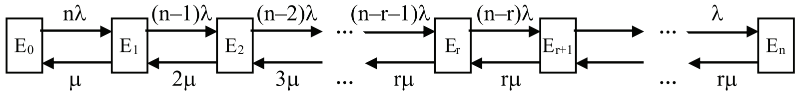

Рис. 3

время нахождения систем в исправном состоянии, а вместо P_k использовать T_k – среднее время нахождения системы в состояниях с k одновременно неисправными и отключенными компонентами) [3].

При $1 \le k \le r$

$$T_k = \frac{n!}{k!(n-k)!}\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^k \cdot T_0\,. \qquad (1)$$

При $r \le k \le n$

$$T_k = \frac{n!}{r^{k-r}\cdot r!(n-k)!}\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^k \cdot T_0 \qquad (2)$$

и

$$T_0 = \left[\sum_{k=0}^{r}\frac{n!}{(n-k)!}\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^k + \sum_{k=r+1}^{n}\frac{n!}{r^{k-r}\cdot r!(n-k)!}\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^k\right]^{-1}. \qquad (3)$$

В частности, при r = 1 для $1 \le k \le n$:

$$T_k = \frac{n!}{(n-k)!}\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^k \cdot T_0\,, \qquad (4)$$

$$T_0 = \left[\sum_{k=0}^{n}\frac{n!}{(n-k)!}\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^k\right]^{-1}. \qquad (5)$$

Второй этап.

Согласно существующим методикам технологических расчетов в исправном состоянии, при наличии исходных условий объект выполняет свои функции на 100 %. При неисправном состоянии уровень качества функционирования может не понизиться по сравнению с исправным состоянием или понизиться в зависимости от характера неисправности и условий работы.

Например, отключение в результате неисправности в кольцевой водопроводной сети перемычки может не отразиться на ее условиях функционирования. То же самое относится практически к случаю отключения из-за неисправности насоса на насосной станции и оперативного замещения его исправным резервным агрегатом. Аналогичная ситуация протекает на подземном водозаборе, когда выводят из работы неисправную скважину, замещая ее исправной, резервной и т.д.

Если неисправность компоненты и ее отключение приводит к понижению уровня качества функционирования, т.е. он становится менее 100 %, но величина этого понижения не более установленного предела, то объект остается в работоспособном состоянии, в противном случае он переходит в неработоспособное состояние. Например, объекты водопроводных систем остаются в работоспособном состоянии, если их производительность не понизится более чем на 25 % от расчетного уровня и свободный напор в сети будет не ниже 10 м вод. ст.

В результате выполнения второго этапа все неисправные состояния подразделяются на три группы:

а) неисправные состояния, при которых не происходит понижения уровня качества функционирования, т.е. он составляет 100 %;

б) неисправные состояния, при которых происходит понижение уровня качества функционирования, но не более установленного предела;

в) неисправные состояния, при которых понижение уровня качества функционирования более установленного предела.

Третий этап.

На этом этапе устанавливается за определенный промежуток времени, например, за год, среднее время функционирования объекта с нормальным уровнем качества функционирования – $T_н$, со сниженным до определенного предела – $T_с$ и временем нахождения объекта в отказовых, аварийных состояниях – $T_а$.

Очевидно, что $T_н$ является суммой нахождения объекта в исправном состоянии T_0 и в неисправных состояниях группы «а». Период времени $T_с$ складывается из времени нахождения объекта в неисправных состояниях группы «б». Период времени $T_а = 1 – T_н – T_с$ или время пребывания объекта в неисправных состояниях составляют период нахождения его в состояниях группы «в».

Предложенная процедура установления надежности объектов систем водоснабжения и водоотведения является универсальной и может быть применена к сооружениям, в которых протекают разные физико-химические процессы, что характерно для рассматриваемых систем. Изложенные принципы определения надежности функционирования ранее были продемонстрированы на примере кольцевой водопроводной сети [4]. В настоящей работе в качестве примера рассматривается водопроводная насосная станция II подъема, изображенная на рис. 4.

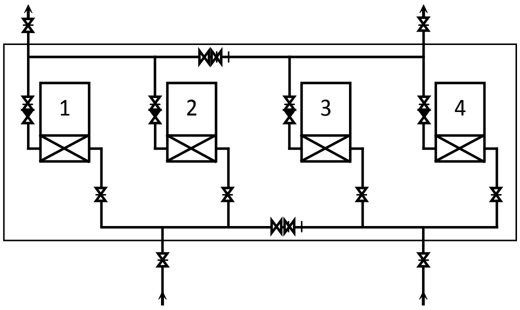

Рис. 4

Пример.

Первый этап. Определим T_0, T_1, T_2, T_3 и T_4, пользуясь выражениями (4), (5), в предположении, что все насосы одной марки – Д320-70 (6НД) и ремонтируются одной бригадой рабочих. Согласно литературным данным [4], для такой марки насоса $\lambda_{мин} = 1{,}6 \cdot 10^{-4} \frac{1}{ч}$, $\lambda_{ср} = 1{,}9 \cdot 10^{-4} \frac{1}{ч}$ и $\lambda_{макс} = 4{,}5 \cdot 10^{-4} \frac{1}{ч}$, т.е. очевидно, что параметр интенсивности отказов λ имеет большой диапазон изменений, такое положение характерно для большинства элементов водопроводно-канализационного оборудования [5]. Примем максимальные значения параметров интенсивности отказов λ, что предопределяет установление минимальной границы надежности насосного оборудования станции. При последовательном расположении оборудования по ходу движения воды: задвижка на всасывающей трубе насоса, насос, обратный клапан, задвижка на напорной трубе, общий параметр интенсивности отказов будет равен сумме параметров интенсивности отказов всех перечисленных элементов, т.е. $\lambda_{общ} = 2\lambda_{зад} + \lambda_{об.клап.} + \lambda_{насоса} = (2 \cdot 1 + 4{,}5 + 1) \cdot 10^{-4} = 7{,}5 \cdot 10^{-4} \frac{1}{ч}$. Определим параметр потока отказов и восстановления насосной установки за годовой период $\lambda = 7{,}5 \cdot 10^{-4} \cdot 8760 = 6{,}57 \frac{1}{год}$, $\mu = 4 \cdot 10^{-2} \cdot 8760 = 350{,}4 \frac{1}{год}$, наработка на отказ будет $t_{отказ} = \frac{1}{6{,}57} = 0{,}1522$ годового периода, что составляет 55,5 суток или 1333 часов, время восстановления $t_{рем.} = \frac{1}{350{,}4} = 0{,}00285$ года или около 25 часов. Результат расчет по формулам (4) и (5) представлен в табл. 1 и 2.

Второй этап. Принимается условие, что водопроводная насосная станция I категории надежности, два насоса рабочих, а два резервных. При этом полная расчетная производительность станции или

Таблица 1

k	$\frac{n!}{(n-k)!}$	$\left(\frac{\bar{\lambda}}{\mu}\right)^k$	$\frac{n!}{(n-k)!} \cdot \left(\frac{\bar{\lambda}}{\mu}\right)^k$
0	1	1	1
1	4	$0{,}1875 \cdot 10^{-1}$	$0{,}75 \cdot 10^{-1}$
2	12	$0{,}3516 \cdot 10^{-3}$	$0{,}4219 \cdot 10^{-2}$
3	24	$0{,}6592 \cdot 10^{-5}$	$0{,}1582 \cdot 10^{-3}$
4	24	$0{,}1236 \cdot 10^{-6}$	$0{,}2966 \cdot 10^{-5}$
			$\approx \Sigma$ 1,07939

Таблица 2

Наименование подмножества состояний	Обозначение подмножества состояний	Часть или доля годового периода	Время в сутках в течение года
Исправное	$T_0 = \frac{1}{1{,}07938}$	0,9265	338,16
Неисправное с одним отключенным насосом	$T_1 = 0{,}075 \cdot 10^{-1} \cdot T_0$	$0{,}6948 \cdot 10^{-1}$	25,36
Неисправное с двумя одновременно отключенными насосами	$T_2 = 0{,}4219 \cdot 10^{-2} \cdot T_0$	$0{,}391 \cdot 10^{-2}$	1,43
Неисправное с тремя одновременно отключенными насосами	$T_3 = 0{,}1582 \cdot 10^{-3} \cdot T_0$	$0{,}11 \cdot 10^{-3}$	0,05
Неисправное, все насосы не работают	$T_4 = 0{,}2966 \cdot 10^{-5} \cdot T_0$	≈ 0,00	≈ 0,00

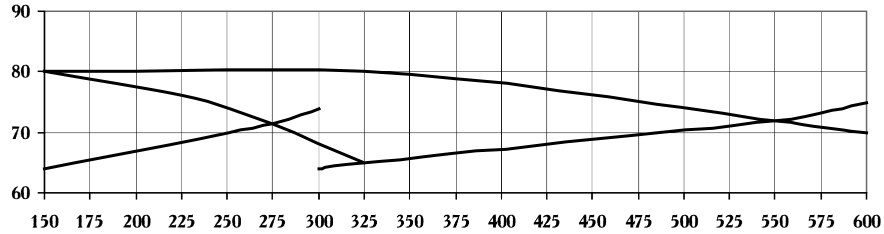

Рис. 5. Здесь 1 – характеристика Q–H одного насоса Д320-70; 2 – характеристика Q–H двух параллельно работающих насосов Д320-70; 3 – характеристика H(h) = *f* (Q) одного трубопровода; 4 – характеристика H(h) = *f* (Q) двух параллельно проложенных трубопроводов

ее нормальная работа в период $T_н$ обеспечивается в исправном состоянии T_0, в состояниях с одним неработающим насосом T_1 и в состояниях с двумя одновременно неработающими насосами T_2.

При одновременном отключении трех насосов производительность насосной станции становится меньше расчетной и время работы в этих состояниях относят к периоду T_c или T_a. Для того чтобы решить, к какому периоду относится такое состояние, выполнен гидравлический расчет совместной работы насосной станции с одним работающим насосом и напорными трубопроводами.

Из представленного графика (рис. 5) очевидно, что при работе двух насосов Д320-70 и двух водоводов производительность насосной станции составляет 550 м^3/ч воды. При работе одного насоса станция подает 325 м^3/ч, понижение производительности по сравнению с нормальной составит $\frac{550-325}{550}=0{,}409$ или около 41 %. Следовательно, время работы насосной станции с одним насосом относится к периоду T_a.

Третий этап. Насосная станция будет нормально обеспечивать 100 % расчетной производительности при исправном состоянии и в состояниях при одном и двух неработоспособных насосах, т.е. $T_н = T_0 + T_1 + T_2 = 0{,}9265 + 0{,}06948 + 0{,}00391 = 0{,}99989$ годового периода или 338,16 + 25,36 + 1,43 = 364,95 суток в течение года. Среднее в течение года время работы насосной станции с допустимым снижением расчетной производительности $T_c = 0$, а среднее в течение года функционирование в отказовых состояниях $T_a = T_3 + T_4 = 0{,}11 \cdot 10^{-3}$ годового периода, т.е. около 1 часа. Очевидно, что рассматриваемая насосная станция является высоконадежным сооружением.

Определение надежности насосных станций систем водоотведения выполняется аналогичным образом.

Выводы. Предложена процедура определения надежности функционирования сооружений систем водоснабжения и водоотведения, ориентированная на единый порядок вычисления показателей надежности объектов вне зависимости от протекающих в них физико-химических процессов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Гальперин Е.М.* О надежности проектируемой водопроводной сети города // Известия вузов. Строительство. 2013. № 4.С. 22-25.

2. *Вентцель Е.С.* Исследований операций. Задачи, принципы, методология. М.: Наука, 1980. 68 с.

3. *Гнеденко Б.В., Коваленко И.Н.* Введение в теорию массового обслуживания. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Наука, 1987. 128 с.

4. *Гальперин Е.М.* Надежностные расчеты кольцевой водопроводной сети // Водоснабжение и санитарная техника. 2003. № 3. С. 30-32.

5. *Ильин Ю.А.* Расчет надежности подачи воды. М.: Стройиздат, 1987. 104 с.

Об авторе:

ГАЛЬПЕРИН Евгений Моисеевич
кандидат технических наук, доцент кафедры водоснабжения и водоотведения
Самарский государственный архитектурно-строительный университет
443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 194,
тел. (846) 339-14-11
E-mail: kafvv@mail.ru

GALPERIN Evgeny
PhD in Engineering Science, Associate Professor of Water Supply and Wastewater Chair
Samara State University of Architecture and Civil Engineering
443001, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 194,
tel. (846) 339-14-11
E-mail: kafvv@mail.ru

Для цитирования: *Гальперин Е.М.* О процедуре определения надежности функционирования объектов систем водоснабжения и водоотведения // Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура. 2014. Вып. № 1 (14). С. 52-67.