

УДК 621.6.

О.Ю. Елагина, д.т.н., заведующая кафедрой, e-mail: elaguina@mail.ru; **Г.И. Вышегородцев**, к.т.н., доцент; **Б.М. Гантимиров**, к.т.н., доцент, кафедра трибологии и технологии ремонта нефтегазового оборудования, РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина; **В.В. Тарасов**, к.т.н., заместитель начальника Управления по газификации и использованию газа, ОАО «Газпром»; **Н.Н. Коновалов**, д.т.н., заместитель генерального директора, ОАО НТЦ «Промышленная безопасность»; **А.А. Сергеев**, заведующий лабораторией, НТЦ Эксплуатация систем распределения газа ОАО «Газпром промгаз»

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВЕРОЯТНОСТИ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОТДЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В статье рассмотрена методика применения показателей технического состояния отдельных элементов для оценки уровня надежности многокомпонентного объекта. В качестве многокомпонентного объекта рассматривается газораспределительная сеть простейшей топологии. Показана возможность оценки вероятности безотказной работы системы в течение времени на основе изменения характеристик отдельных элементов системы.

Количественной мерой единичных свойств надежности являются показатели надежности. Для многокомпонентных систем наиболее используемым показателем является вероятность безотказной работы, под которой, согласно ГОСТ 53480, понимают вероятность выполнения объектом или системой требуемой функции в заданный интервал времени.

В качестве исходной информации для расчета показателей надежности систем газоснабжения используют или статистические данные об отказах объектов, накопленные в процессе их эксплуатации, или данные, полученные в процессе испытаний комплектующих изделий, материалов, и опытных и серийных образцов изделий. Каждый из перечисленных подходов получения и обработки исходной информации имеет свои преимущества и недостатки. Одной из проблем, возникающих при обработке ретроспективной информации эксплуатации газораспределительных сетей, является необходимость детализации видов отказов, типов оборудования, условий эксплуатации и дру-

гих значимых факторов, влияющих на однородность выборки. При получении исходных данных на основе отчетов об отказах на рассматриваемом объекте его элементы, как правило, представлены укрупненно и отсутствует конкретизация внешних воздействий, вызвавших отказ.

Информация о функционировании отдельных элементов, полученная в процессе их эксплуатации или собранная в результате лабораторных испытаний, может быть расширена на отдельные детали и комплектующие. Однако использование экспериментально-эксплуатационной информации в значительной степени зависит от правильного выявления наиболее значимых показателей технического состояния, отвечающих за надежность работы рассматриваемых элементов системы. При этом под показателями технического состояния объекта понимают параметры, установленные технической документацией на объект, состояние которого оценивается в определенный момент времени при определенных условиях внешней среды.

В связи с этим целью настоящей работы является количественная оценка вероятности безотказной работы газораспределительной сети, основанная на экспериментальном определении показателей технического состояния отдельных ее элементов.

В ОБЩЕМ ВИДЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ЗАДАЧ, КОТОРЫЕ НЕОБХОДИМО РЕШИТЬ ДЛЯ ДОСТИЖЕНИЯ ПОСТАВЛЕННОЙ ЦЕЛИ, ВЫГЛЯДИТ СЛЕДУЮЩИМ ОБРАЗОМ:

- разбивка газораспределительной сети на отдельные элементы,
- определение исходного и текущего состояния элементов сети по выбранным в соответствии с нормативными документами показателям технического состояния,
- оценка вероятности безотказной работы элементов сети на основе текущих значений показателей технического состояния,
- определение общего уровня вероятности безотказной работы газораспределительной сети в соответствии

со структурной схемой компоновки отдельных ее элементов,

- выявление наиболее значимого элемента (или элементов) газораспределительной сети, оказывающего наиболее существенное влияние на значения показателей надежности объекта в целом,
- разработка мер конструкторско-технологического или организационно-технического характера, обеспечивающих рост показателей надежности выделенного элемента,
- определение достигнутого уровня надежности газораспределительной сети в целом при использовании предложенных мер,
- технико-экономическая оценка использования предложенных мер по отношению к достигнутому уровню надежности,
- принятие решений по использованию предложенных мер по поддержанию уровня надежности газораспределительной сети в целом.

Количественная оценка вероятности безотказной работы газораспределительной сети проводилась на примере типового участка межпоселкового отвода. Структура рассматриваемой газораспределительной сети представлена в таблице 1.

В качестве отдельных элементов системы рассматривались трубопровод и запорно-регулирующая арматура, состоящие, в свою очередь, из компонентов с разным сроком службы. Анализ основных причин выхода из строя трубопровода показывает, что возникновение отказов связано с зарождением трещиноподобных дефектов, развитие которых под действием внешних факторов приводит к потере герметичности и утечкам транспортируемой газовой среды. Зарождение таких дефектов провоцируется развитием явлений старения

Таблица 1. Структура газораспределительной сети

Структура	Подземные со сроком службы:			Наземные со сроком службы:		
	до 10 лет	до 20 лет	до 30 лет	до 10 лет	до 20 лет	до 30 лет
Трубопроводы стальные, км	23,1	13,2	54,1	1,7	9,2	13,8
Шаровые краны, шт.	5	12	23	11	7	7

металла труб, сопровождающихся существенным изменением их механических характеристик. При развитии этих процессов в низкоуглеродистых нелегированных или малолегированных сталях наблюдается небольшое повышение предела прочности (временного сопротивления разрыву) при значительном росте предела текучести, что существенно уменьшает запас прочности стали. Одновременно наблюдается уменьшение общего относительного удлинения (δ), равномерного удлинения (δ_p), относительного сужения (ψ), что характеризует увеличение склонности стали к хрупкому разрушению и представляет основную опасность деформационного старения [1, 2]. Для подземных трубопроводов на фоне процессов старения наблюдается развитие процессов коррозии. Высокая плотность дислокаций и уровень микронапряжений, возникающие у сталей, бывших в эксплуатации, усугубляют их склонность к коррозии.

Согласно РД 12-411-01 «Инструкция по диагностированию технического состояния подземных стальных газопроводов», деградационные изменения свойств металла труб оцениваются отношением предела текучести к пределу прочности. Именно эта характеристика была выбрана в качестве показателя технического состояния трубопровода. Допустимые значения отношения σ_T/σ_B не должны превышать 0,9.

Оценка изменения механических свойств металла труб, изготовленных из низкоуглеродистых нелегированных сталей, в процессе старения была осуществлена по методике, приведенной в РД 12-411-01. Зависимость изменения основных механических характеристик металла труб от времени эксплуатации газопровода без учета прочих факторов определяется по формуле:

$$\varphi(t) = \frac{\sigma_T^0 + ct + et^2}{\sigma_B^0 + \alpha t + bt^2}$$

где: σ_T^0, σ_B^0 – начальные значения прочностных свойств металла труб, МПа; t – время эксплуатации, год; c, e, α, b – коэффициенты.

Рост отношения предела текучести к пределу прочности металла труб в результате старения приводит к снижению вероятности безотказной работы, которая может быть определена следующим образом.

$$\tilde{P}(t)_{\text{старение}} = 1 - \frac{\varphi(t) - \varphi_0}{\varphi_0}$$

где $\varphi(t), \varphi_0$ – значения отношения предела прочности к пределу текучести металла труб в исходном состоянии и через заданное время эксплуатации t . Полученные значения механических свойств и вероятности безотказной работы для труб, изготовленных из сталей с разным содержанием углерода, представлены в таблице 2.

Старение металла труб наряду с увеличением склонности к образованию

Таблица 2. Значения показателей пластичности и вероятности безотказной работы труб с разным сроком службы

Характеристики	Срок эксплуатации, лет				
	0	10	20	30	40
Группа А (Ст2 (ГОСТ 380), сталь 10 (ГОСТ 1050))					
Отношение предела прочности к пределу текучести	0,596685	0,599614	0,611587	0,632075	0,660461
Вероятность безотказной работы	1	0,995091	0,975025	0,94069	0,893115
Группа Б (сталь 20 (ГОСТ 1050), Ст3, Ст4 (ГОСТ 380))					
Отношение предела прочности к пределу текучести	0,624204	0,62545	0,636004	0,655139	0,682021
Вероятность безотказной работы	1	0,998004	0,981096	0,95044	0,907374

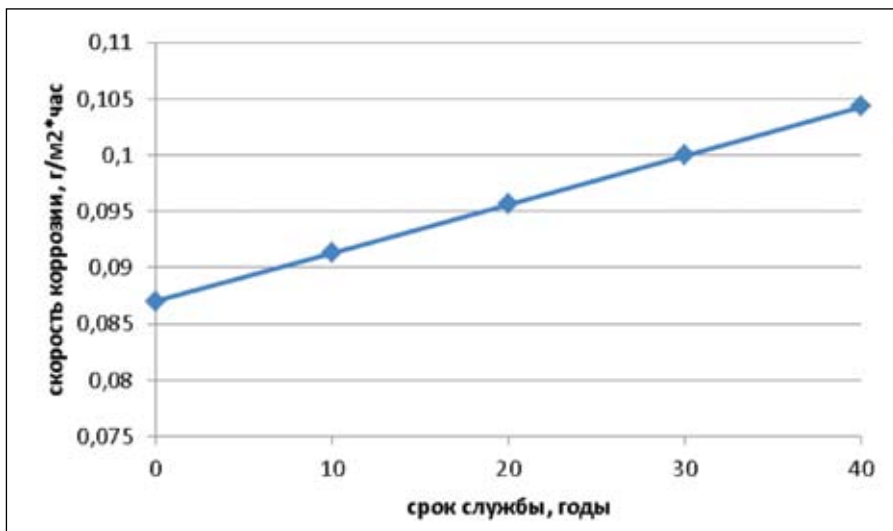


Рис. 1. Зависимость изменения скорости коррозии от степени деформации металла

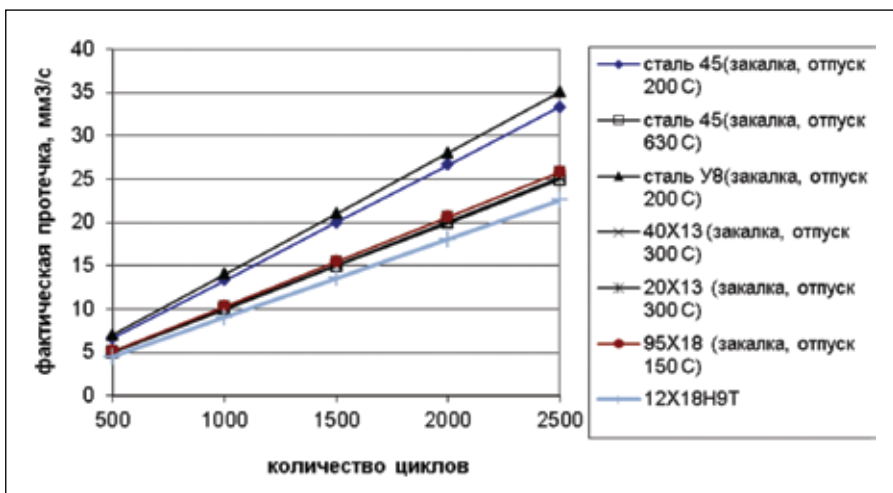


Рис. 2. Зависимость величины протечки из-за износа поверхности шарового элемента от количества циклов «открытия-закрытия»

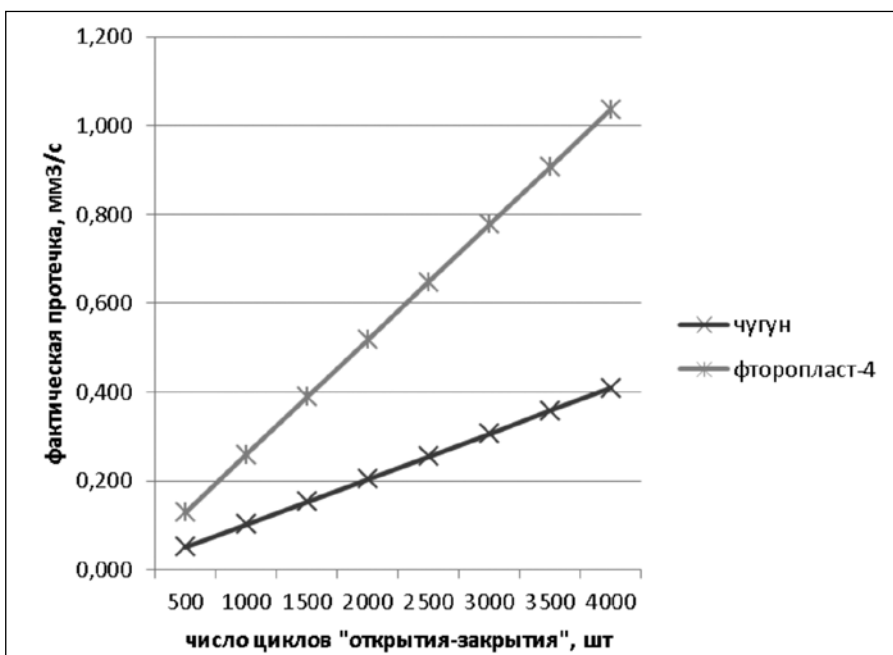


Рис. 3. Фактическая протечка в результате износа уплотнительного элемента в зависимости от количества циклов «открытия-закрытия»

трещин сопровождается изменением коррозионной стойкости, что приводит к увеличению количества коррозионных дефектов, возникающих в металле стенки трубы с увеличением срока службы трубопровода. Для оценки коррозионностойких характеристик нового и состаренного металла были проведены лабораторные исследования. Экспериментальные образцы, изготовленные из низкоуглеродистой низколегированной стали, подвергались искусственному старению по ГОСТ 7268-82 с различной степенью предварительной деформации и испытывались в солевом растворе течение 432 часов. По результатам замера потери массы образцов была определена скорость коррозии, представленная на рисунке 1.

Как видно из графика, увеличение степени деформации приводит к возрастанию скорости коррозии вследствие повышения неравновесности структуры стали. Используя полученные данные, были определены значения изменения вероятности безотказной работы труб, подвергающихся коррозионному воздействию.

$$\tilde{P}(t)_{\text{коррозия}} = 1 - \frac{v(t) - v_0}{v_0}$$

где: $v(t)$, v_0 – значения скорости коррозии металла труб в исходном состоянии и с заданной степенью старения.

На основе полученных характеристик, учитывая взаимное влияние факторов старения и коррозии металла, были определены значения вероятности безотказной работы труб с разным сроком службы при наличии коррозионно-механического воздействия (табл. 3). Анализ полученных данных показывает, что стали группы А более склонны к появлению коррозионных дефектов на металлы, бывшие в эксплуатации, чем стали группы Б.

Вторым элементом рассматриваемой газораспределительной сети является запорная арматура. Многолетние данные по эксплуатации шаровых кранов показывают, что потеря герметичности, возникающая в результате накопления износных повреждений контактирующих поверхностей запорного элемента и уплотнения, является наиболее значимой характеристикой при оценке надежности работы системы. В связи с этим в качестве нормируемого показателя тех-

We measure it.

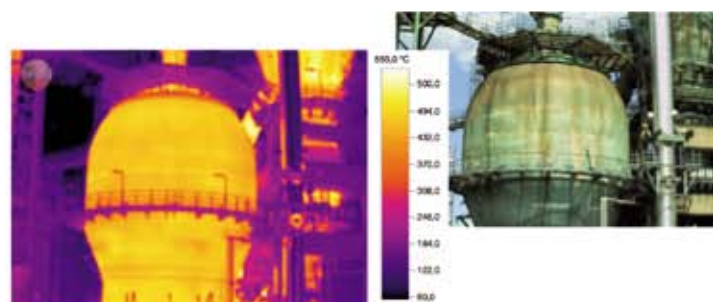


Тепловизоры testo 881, testo 875
Видеть больше. Знать больше.



- диагностика состояния электрооборудования,
- определение уровня жидкости в резервуарах,
- поиск энергопотерь и т.д

**Тепловизор testo 875 –
99 000 руб. за комплект (с НДС)!**



Российское отделение **testo** (Германия) –
ООО «Тэсто Рус»
Тел.: +7 (495) 221-62-13; Факс: +7 (495) 221-62-16;
E-mail: info@testo.ru; www.testo.ru/teplovizor

Таблица 3. Значения скорости коррозии и вероятности безотказной работы труб с разным сроком службы

Характеристика	Срок эксплуатации, лет				
	0	10	20	30	40
Скорость коррозии, г/м ² ч	0,087	0,09129	0,09566	0,1	0,10433
Вероятность безотказной работы по коррозионному фактору	1	0,95	0,90	0,85	0,80
Группа А (Ст2 (ГОСТ 380), сталь 10 (ГОСТ 1050))					
Вероятность безотказной работы труб по факторам старения и коррозии металла (P(t) _{старение} * P(t) _{коррозия})	1	0,946	0,878	0,80	0,715
Группа Б (сталь 20 (ГОСТ 1050), Ст3, Ст4 (ГОСТ 380))					
Вероятность безотказной работы труб по факторам старения и коррозии металла (P(t) _{старение} * P(t) _{коррозия})	1	0,949	0,883	0,81	0,727

нического состояния этого элемента газораспределительной сети целесообразно выбрать величину протечки в атмосферу. Согласно СТО Газпром 2-4.1-406-2009, допустимые значения протечек газа по затвору запорных кранов, отработавших не менее 30 лет, не должны превышать нормы герметичности по классу D1 в соответствии с ГОСТ 9544.

Изнашивание запорного элемента связано с разного рода воздействиями. К ним можно отнести фреттинг-коррозию при работе крана в положении «открыто», изнашивание при трении об уплотнение при перестановке затвора, однако наиболее значительный износ возникает в результате газоабразивного изнашивания в момент перекрытия газового потока. При переходе из положения «открыто» в положение «закрыто» и обратно наружная поверхность запорного элемента контактирует с газовым потоком, содержащим до 1 мг/м³ механических примесей, и подвергается активному газоабразивному износу. Основываясь на экспериментальных данных об интенсивности изнашивания ряда конструкционных сталей, полученных при испытаниях образцов на газоабразивное изнашивание, было рассчитано изменение геометрических размеров шарового элемента с проходным диаметром 100 мм, работающего при расходе газа 0,1 м³/с. Величина протечки, возникающая при движении потока газа со скоростью 1,5 м/с при давлении 1,6 МПа, в зависимости от количества циклов «открытия-закрытия» представлена на рисунке 2.

Износ уплотнения возникает при трении о поверхность шарового элемента на этапе перестановки «открыто-закрыто» и обратно. Потеря герметичности в результате

Таблица 4. Значения вероятности безотказной работы шарового элемента запорного устройства в результате его износа

Материал шарового элемента	Вероятность безотказной работы для разного количества циклов «открытия-закрытия»				
	500	1000	1500	2000	2500
20X13 (закалка, отпуск 300 С)	0,95	0,89	0,84	0,79	0,74
12X18Н9Т	0,95	0,91	0,86	0,81	0,77

Таблица 5. Значения вероятности безотказной работы трубопроводной части газопроводной сети

Структура	Подземные со сроком службы:			Наземные со сроком службы:			Вероятность безотказной работы
	до 10 лет	до 20 лет	до 30 лет	до 10 лет	до 20 лет	до 30 лет	
Трубопроводы стальные, км	23,1	13,2	54,1	1,7	9,2	13,8	0,872
Долевое соотношение участка ($k^i_{\text{труба}}$)	0,20	0,11	0,47	0,01	0,08	0,12	
Вероятность безотказной работы участка ($P^i_{\text{труба}}$)	0,946	0,878	0,8	0,9951	0,975	0,9407	
Показатель технического состояния участка ($P^i_{\text{труба}}$)	0,190	0,101	0,376	0,015	0,078	0,113	

Таблица 6. Значения вероятности безотказной работы запорной арматуры газораспределительной сети

Структура	Подземные со сроком службы:			Наземные со сроком службы:			Вероятность безотказной работы
	до 10 лет	до 20 лет	до 30 лет	до 10 лет	до 20 лет	до 30 лет	
Шаровые краны, шт.	23	12	5	11	7	7	0,882
Долевое соотношение группы ($k^i_{\text{кран}}$)	0,35	0,18	0,08	0,17	0,11	0,11	
Вероятность безотказной работы группы (сталь 20X13 + фторопласт-4) ($P^i_{\text{кран}}$)	0,95	0,89	0,84	0,95	0,89	0,84	
Показатель технического состояния участка ($P^i_{\text{кран}}$)	0,073	0,164	0,297	0,161	0,096	0,090	0,897
Вероятность безотказной работы группы (12X18Н9Т + фторопласт-4) ($P^i_{\text{кран}}$)	0,95	0,91	0,86	0,95	0,91	0,86	
Показатель технического состояния участка ($P^i_{\text{кран}}$)	0,073	0,167	0,304	0,161	0,098	0,093	

износа уплотнительного элемента определяется двумя факторами – интенсивностью его изнашивания и характеристиками его поворота. На основе данных об изменении интенсивности изнашивания уплотнительных элементов запорной арматуры, изготовленных из разных материалов по конструктивной схеме плавающего шара, в зависимости от давления газа был проведен расчет изменения объемного износа уплотнительного элемента с шириной уплотнительной поверхности 5 мм, результаты которого представлены на рисунке 3.

Используя данные рисунков 2 и 3 о величине фактической протечки, можно

определить значения вероятности безотказной работы шарового узла запорного устройства в зависимости от количества циклов «открытия-закрытия» по следующей зависимости:

$$\tilde{P}(t)_{\text{коррозия}} = 1 - \frac{q^w(t) - q^w_0}{q^w_0},$$

где: $q^w(t)$, q^w_0 – значения суммарной фактической протечки от износа шарового и уплотнительного элементов и их исходного состояния.

Расчет вероятности безотказной работы проводился для кранов марки LD (ООО «ЧелябинскСпецГражданСтрой») с шаровыми элементами, выполненным из стали 20X13 и 12X18Н9Т, и уплотни-

тельным элементом, изготовленным из фторопласта-4. Результаты расчета представлены в таблице 4.

Как видно из полученных данных, вероятность безотказной работы крана с шаровым элементом, выполненным из аустенитной коррозионностойкой стали, с увеличением количества циклов «открытия-закрытия» снижается в меньшей мере по сравнению с аналогом, выполненным из стали 20X13.

Определение общего уровня вероятности безотказной работы газораспределительной сети должно проводиться в соответствии со структурной схемой компоновки отдельных ее элементов. Расчет вероятности безотказной работы рассматриваемой газораспределительной сети выполняется для двух составляющих – трубопроводной части и запорной арматуры. Трубопроводная часть рассматриваемой газораспределительной сети включает в себя участки

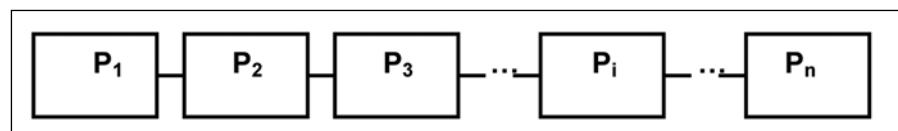


Рис. 4. Пример изображения системы с последовательным соединением компонентов

Таблица 7. Вклад каждой составляющей системы в общую вероятность безотказной работы

Структура	Долевой вклад отдельных элементов в $P_c(t)$, %					
	Подземные со сроком службы:			Наземные со сроком службы:		
	до 10 лет	до 20 лет	до 30 лет	до 10 лет	до 20 лет	до 30 лет
$P_c = 0,74$						
Трубопроводная часть	24,66	13,08	48,83	1,91	10,12	14,65
Шаровые краны (сталь 20X13)	9,49	21,34	38,60	20,88	12,45	11,75
$P_c = 0,78$						
Трубопроводная часть	24,34	12,91	48,21	1,88	9,99	14,46
Шаровые краны (сталь 12X18Н9Т)	9,40	21,47	39,04	20,61	12,56	11,87

труб с различным сроком службы, что определяет разную вероятность их безотказной работы. Для оценки общей вероятности безотказной работы этой составляющей газораспределительной сети необходимо определить долевое соотношение ($k^i_{\text{труба}}$) каждого из участков (l^i) в общей протяженности сети (L):

$$k^i_{\text{труба}} = \frac{l^i}{L}$$

Затем определить вероятности безотказной работы трубопровода в целом с учетом вклада каждого из участков с разным сроком службы:

$$P_{\text{труба}} = 1 - \sum k^i_{\text{труба}} \left(\frac{\varphi^i(t) - \varphi_0}{\varphi_0} \right)$$

При этом следует учитывать условия прокладки трубопровода. В случае наземного залегания снижение вероятности безотказной работы определяется развитием процессов старения, а при подземной укладке протекание процесса старения сопровождается коррозионным воздействием.

С использованием данных таблиц 2 и 3 был проведен расчет вероятности безотказной работы трубопроводной части, выполненной из ст. 2, результаты которого представлены в таблице 5. Как видно из представленных данных, вероятность безотказной работы трубопроводной части газораспределительной сети составила 0,872.

Расчет вероятности безотказной работы запорной арматуры выполняется таким же образом, что и для трубопроводной части. Долевое соотношение шаровых кранов с разным сроком службы определяется по отношению к их общему количеству в рассматриваемой газопроводной системе. Расчет параметра технического состояния каждой группы кранов проводится исходя из условия, что число циклов «открытия-закрытия» в год не превышает 50. Результаты расчета представлены в таблице 6.

Исходя из последовательного соединения элементов межпоселкового отвода газораспределительной сети (рис. 4), вероятность ее безотказной работы в настоящий момент времени $P_c(t)$ можно определить по формуле:

$$P_c(t) = P_1(t) \cdot P_2(t) \dots P_i(t) \dots P_n(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t),$$

где $P_i(t)$ – вероятность безотказной работы i -го элемента;

n – количество элементов в системе; Для рассмотренного случая газораспределительной сети вероятность безотказной работы при использовании шаровых кранов с шаровым элементом, выполненным из стали 20X13, составила 0,74. При использовании шаровых кранов с запорным органом, выполненным из стали 12X18Н9Т, вероятность безотказной работы системы в целом повысится до 0,78. Анализ процентного отношения параметров технического

состояния отдельных элементов системы к общей вероятности безотказной работы позволяет выявить элемент, вносящий наибольший вклад в надежность системы в целом (табл. 7).

Как видно из представленных данных, надежность рассматриваемой газопроводной системы наиболее существенно зависит от состояния участка трубопровода со сроком службы, приближающимся к 30 годам. Замена трубопроводной части этого участка позволит повысить вероятность безотказной работы газопроводной системы до 0,857– 0,891 при сохранении эксплуатируемых шаровых кранов. Замена только запорной арматуры без переделки трубопроводной части увеличит исследуемый показатель до 0,836. В то же время полная реконструкция наиболее старой части газораспределительной сети обеспечит рост вероятности безотказной работы до 0,927.

Таким образом, проведенные исследования показали принципиальную возможность определения вероятности безотказной работы газораспределительной сети, используя показатели технического состояния отдельных ее элементов. Применение предложенного подхода позволяет проводить оценку эффективности применения мер конструкторско-технологического или организационно-технического характера для обеспечения необходимого уровня надежности объекта в целом.

Литература:

1. Ямалеев К.М. Старение металла труб в процессе эксплуатации нефтепроводов // Транспорт и хранение нефти. – М.: ВНИИОЭНГ, 1990. – 64 с.
2. Ланчаков Г.А., Зорин Е.Е., Пашков Ю.А., Степаненко А.И. Работоспособность трубопроводов / В 3 ч., ч. 2 – Сопротивляемость разрушению – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2001. – -343 с.

Ключевые слова: система управления надежностью, параметр технического состояния, газораспределительная сеть, труба, шаровой кран.