

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ НЕФТЕПРОМЫСЛОВЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

Острейковский В.А., Силин Я.В.

Сургутский государственный университет

Работа посвящена совершенствованию методов статистической оценки надежности нефтепромысловых трубопроводов (НПТ). Приведены существующие методики оценки, а также новый метод, позволяющий производить расчет вероятности безотказной работы НПТ в зависимости от протяженности. Проанализированы статистические данные об отказах НПТ на месторождениях Западной Сибири, произведен расчет вероятности безотказной работы в соответствии с предлагаемыми методиками.

В сложных условиях эксплуатации поддержание надежности и безопасности эксплуатации НПТ является довольно важной задачей, определяющей сохранение чистоты окружающей среды и отсутствие необходимости расходов на внеплановый ремонт трубопроводов. Обеспечение безопасности невозможно без комплексного подхода, включающего в себя исследование закономерностей изменения состояния трубопровода в процессе эксплуатации и анализ показателей надежности.

В настоящее время на нефтегазодобывающих предприятиях уже накоплен значительный опыт по проектированию, строительству и эксплуатации нефтепромысловых трубопроводов. Дальнейшее развитие в данном направлении должно учитывать как необходимость сохранения экологии, так и обеспечения эффективности использования вложенных средств. Принятие обоснованных решений должно подкрепляться точными расчетами, позволяющими оценить затраты и экономическую эффективность. Исходными данными для расчетов сроков эксплуатации, периодичности планово-предупредительных ремонтов и др. должны являться данные о надежности НПТ в зависимости от заданных условий эксплуатации и конструкции трубопровода. Показатели надежности могут быть получены различными методами, в зависимости от применяемых исходных данных. Одним из таких методов является статистическая оценка надежности нефтепромысловых трубопроводов, основанная на эксплуатационных данных, включающих информацию об отказах, конструктивных параметрах и условиях эксплуатации трубопроводов.

Целью статьи является совершенствование методов статистической оценки надежности нефтепромысловых трубопроводов. В статье приведены существующие методики оценки, а также новый метод, позволяющий производить расчет вероятности безотказной работы НПТ в зависимости от протяженности. В статье проанализированы статистические данные об отказах НПТ на месторождениях Западной Сибири, произведен расчет вероятности безотказной работы в соответствии с предлагаемыми методиками.

Рассмотрим номенклатуру и состав НПТ одного из цехов добычи нефти и газа Западной Сибири. Общая протяженность трубопроводов в цехе составляет ~270 км. В табл. 1 показано, что наиболее используемыми являются трубопроводы $\varnothing 159$ и $\varnothing 219$ мм. В табл. 2 приведен сортамент применяемых трубопроводов [1, 2].

Таблица 1

Номенклатура НПТ

№ п/п	Диаметр трубопровода, мм	Протяженность, км	% от общего количества НПТ
1	114	10,9	4,0
2	159	110,7	41,0
3	219	58,6	21,5
4	273	27,4	10,0
5	325	19,6	7,0
6	426	28,3	10,5
7	530	16,0	6,0
	Итого:	270,3	100

Таблица 2

Сортамент применяемых трубопроводов

Толщина стенки δ , мм	Диаметр трубопровода, мм							
	114	159	168	219	273	325	426	530
5	+	+		+	+			
6		+		+	+	+		
6,5				+				
7		+		+	+		+	
7,5				+				+
8	+			+		+		
9	+							
12			+					
20					+			

Трубопроводы изготовлены из сталей следующих марок: Ст.10, Ст.20, 17Г1С, 17Г1СУ, 17ГС, 09Г2С. При этом, в зависимости от цеха добычи нефти и газа, применяемость Ст. 10 варьируется от 60 до 80 %, что не удовлетворяет требованиям РД 39-132-94, в которых сказано, что применение труб из Ст. 20 и Ст. 10 по ГОСТ 8731-74, ГОСТ 8733-74 в северной климатической зоне не допускается.

Для анализа надежности были использованы эксплуатационные данные одного из месторождений Западной Сибири. Выборка включает в себя данные по характеристикам, составу и отказам нефтепромысловых трубопроводов, введенных в эксплуатацию с 1986 по 2007 годы. Известно, что с течением времени комплекс факторов, влияющих на надежность нефтепроводов, изменяется. В связи с увеличением срока использования месторождений количество нефти снижается, в пласт закачивается большее количество воды, растет агрессивность перекачиваемых жидкостей. В то же время повышается качество содержания НПТ, увеличивается опыт работы у служб, ответственных за безопасную эксплуатацию НПТ, внедряются современные методы контроля и повышения надежности. Все это определяет важность задачи анализа новых статистических данных по эксплуатации НПТ.

Отказом трубопроводов промыслового сбора и транспорта продукции скважин считается нарушение работоспособности, связанное с внезапной полной или частичной остановкой трубопровода из-за нарушения герметичности трубопровода или запорной и регулирующей арматуры или из-за закупорки трубопровода [3].

В табл. 3 приведены данные по характеру зафиксированных отказов нефтепромысловых трубопроводов с 2003 по 2007 годы (последние 5 лет эксплуатации). Основной причиной отказов стала коррозия трубопровода (96 % от общего числа аварий). Доля отказов по всем остальным причинам, а именно: брак строительства, брак трубы, механические повреждения и другие, составляет не более 4 %.

В табл. 4 приведены значения обобщенного показателя безотказности (количество отказов на 1000 км труб в год) для труб различного диаметра. Из таблицы видно, что имеется тенденция к уменьшению количества отказов

на 1000 км для труб большего диаметра по сравнению с трубами меньшего диаметра. Однако, низкие значения показателя для труб $\varnothing 530$ скорее говорят о недостаточности статистических данных.

Таблица 3

Динамика причин отказов НПТ в процентном соотношении

№ п/п	Причины отказов	Годы					Весь период
		2003	2004	2005	2006	2007	
1	Коррозия внутренняя	3	30	77	80	93	63
2	Коррозия наружная	–	2	1	–	–	1
3	Коррозия очаговая	71	28	13	15	2	19
4	Коррозия ручейковая	22	35	8	3	2	13
5	Брак трубы	1	1	–	1	1	1
6	Брак строительный	1	1	–	1	1	1
7	Повреждение механическое	–	–	1	–	–	1
8	Другие, не определено	2	3	–	–	1	1

Таблица 4

Обобщенный показатель безотказности

Диаметр трубопровода, мм	Частота отказов, отказ · 1000км/год
114	527
159	300
168	91
219	208
273	267
325	145
426	78
530	4

На рис. 1 приведено распределение отказов по времени эксплуатации для всего сортамента НПТ рассмотренного месторождения. Видно, что наибольшее число отказов (порядка 75 %) приходится на период с 3 по 10 годы эксплуатации. Согласно проведенному качественному анализу, распределение отказов по времени не противоречит распределению Вейбулла.

Анализируя данные рис. 1 можно заметить наличие двух локальных максимумов на 3 и 6 годах эксплуатации, причем максимум на 3 году является еще и глобальным. Причина данной особенности становится понятной из рис. 2, где приведено распределение отказов по времени эксплуатации для НПТ, разбитых на группы в зависимости от рабочего давления. Видно, что для трубопроводов с давлением ≥ 2 МПа максимум отказов приходится на 3 год эксплуатации, а для трубопроводов с давлением < 2 МПа – на 6 год эксплуатации, что хорошо объясняет наличие двух локальных максимумов на гистограмме (рис. 1), построенной без учета давления в трубопроводе.

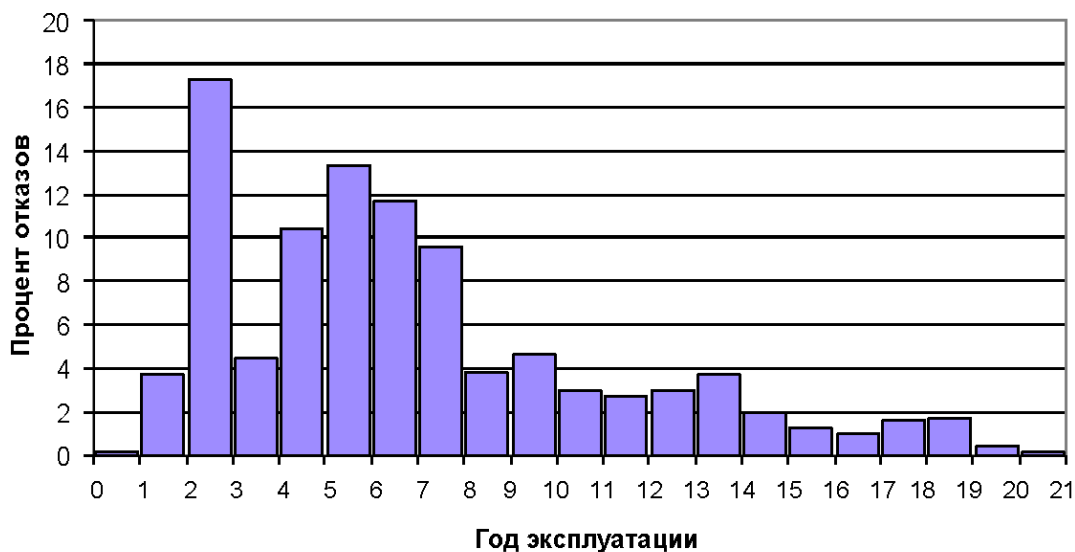


Рисунок 1. Распределение отказов по времени эксплуатации для всего сортамента НПТ

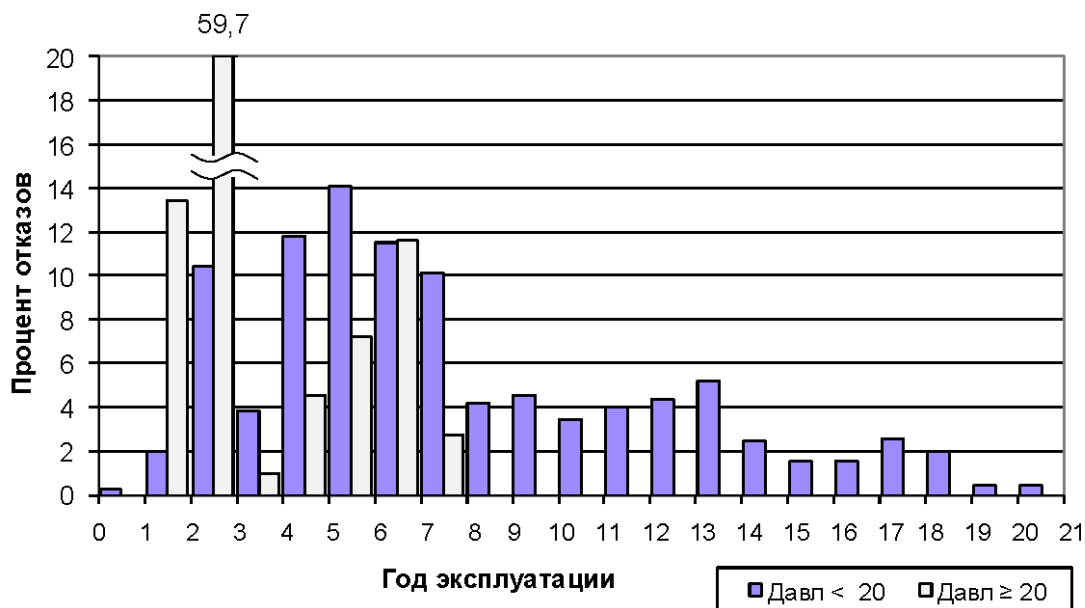


Рисунок 2. Распределение отказов по времени эксплуатации для всего сортамента НПТ в зависимости от давления в трубопроводе

В настоящее время имеется немало работ, посвященных повышению надежности эксплуатации НПТ. В целом среди них можно выделить работы, различающиеся по подходу и самому отношению к термину надежность. Часть работ основывается на изучении свойств материалов трубопровода, механики распространения трещин, коррозионных процессов и др. явлений, определяющих отказоустойчивость трубопроводов. Другая часть основывается на статистических данных по эксплуатации и отказам трубопроводов, при этом предлагаются модели для расчета таких показателей надежности, как вероятность безотказной работы, средняя наработка на отказ, параметр потока отказов и др.

Например, Муравьевым И.И. и Острейковским В.А. в Сургутском государственном университете предлагается ряд моделей определения характеристик надежности по данным эксплуатации с учетом того, что система сбора и перекачки нефти представляет собой систему с распределенными параметрами [4]:

1. Вероятность безотказной работы (ВБР) НПТ в зависимости от изменения протяженности из-за зафиксированных отказов и профилактических замен:

$$P^*(t, l) = \frac{L_0(t) - \sum_{i=1}^{t/\Delta t} \Delta l_i(\Delta t)}{L_0(t)}, \quad (1)$$

где $L_0(t)$ – протяженность НПТ, м; $\Delta l_i(\Delta t)$ – изменение протяженности НПТ в период эксплуатации за промежуток времени от $t - \Delta t/2$ до $t + \Delta t/2$; t – время, для которого определяется ВБР; * – означает статистическую оценку характеристики надежности.

2. Вероятность безотказной работы НПТ с учетом длины отказавшего участка при зафиксированном количестве отказов НПТ:

$$P^*(t, l, n) = \frac{L_0(t) - l_0 \cdot \sum_{i=1}^{t/\Delta t} n_i}{L_0(t)}, \quad (2)$$

где l_0 – протяженность отказавшего участка НПТ, м; n_i – число отказов НПТ за промежуток времени от $t - \Delta t/2$ до $t + \Delta t/2$.

Вероятность безотказной работы НПТ с учетом средневзвешенной протяженности участка НПТ при отказе и зафиксированном количестве отказов:

$$P^*(t, l_{cp}, n) = \frac{L_0(t) - l_{cp} \cdot \sum_{i=1}^{t/\Delta t} n_i}{L_0(t)}, \quad (3)$$

где l_{cp} – средневзвешенная протяженности участка НПТ при отказе, м, подсчитывается по формуле:

$$l_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^{t/\Delta t} \frac{l_i(\Delta t)}{n_i(\Delta t)}}{t/\Delta t}, \quad (4)$$

где $n_i(\Delta t)$ – число отказов НПТ за промежуток времени от $t - \Delta t/2$ до $t + \Delta t/2$.

Сущность моделей (1) – (4) заключается в том, что классические модели определения характеристик надежности по результатам эксплуатации в теории надежности предназначены в основном для сосредоточенных объектов. Например, при статистическом подсчете вероятности безотказной работы анализируется некоторое количество сосредоточенных объектов с такими параметрами как: число объектов в начале испытаний, число отказавших объектов в интервале времени Δt_i . Таким образом, одному отказу сопоставляется один объект. В отличие от такого подхода в [4] предлагаются модели, учитывающие, что НПТ представляют собой механическую систему с распределенными параметрами. Под самым малым элементом НПТ принимаем поставляемую заводом-изготовителем установленную длину трубопровода, которая в общем случае имеет переменную длину. То есть одному отказу сопоставляется участок НПТ переменной длины.

Для определения по результатам эксплуатации других характеристик безотказности: интенсивности и плотности вероятности с учетом эффекта восстанавливаемости, необходимо пользоваться уравнением Вольтерра второго рода:

$$\omega(t) = f(t) + \int_0^t \omega(\tau) \cdot f(t-\tau) d\tau, \quad (5)$$

где $\omega(t)$ – характеризует отказы как первоначально внедренных, так и замененных НПТ; $f(t)$ – характеризует отказы первоначально внедренных НПТ; $\int_0^t \omega(\tau) \cdot f(t-\tau) d\tau$ – характеризует отказы замененных НПТ.

По данным эксплуатации определяются значения параметра потока отказов $\omega(t)$, а затем по выражению (5) – плотность $f(t)$. После нахождения $f(t)$, используя известную связь между вероятностью безотказной работы и интенсивностью отказов, находим интенсивность отказов $\lambda(t)$.

В дополнение к перечисленным выше моделям авторы предлагают использовать подход, основанный на рассмотрении трубопровода как системы, состоящей из последовательно соединенных объектов (участков НПТ определенной длины). Последовательное соединение известно в теории надежности под названием основного соединения элементов.

Рассмотрим подробнее отказ НПТ. Будем считать отказом выход из строя некоторого, в общем случае небольшого, участка (элемента) трубопровода. Так как элементы трубопровода соединены последовательно, то отказ любого из них влечет за собой отказ всей системы. При восстановлении участка НПТ (замена трубы, сварочные работы и т.п.) трубопровод вновь переходит в работоспособное состояние. Анализ статистических данных показал, что в 7 % отказов производится замена труб, в остальных случаях порыв ликвидируется установкой хомутов, бандажей, сварочными работами. Таким образом, ремонт НПТ после отказа обычно носит локальный характер и затрагивает лишь небольшой участок трубопровода.

В случае последовательного соединения вероятность безотказной работы системы, состоящей из N элементов, при условии, что отказы элементов независимы, равна:

$$P(t) = \prod_{i=1}^N P_i(t), \quad (6)$$

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

Будем считать, что вероятности безотказной работы любого из элементов рассматриваемого НПТ одинаковы. В этом случае формула (6) примет вид

$$P(t) = (P_s(t))^N, \quad (7)$$

где $P_s(t)$ – вероятность безотказной работы элемента трубопровода.

Статистически вероятность безотказной работы рассчитывается по формуле:

$$P(t) = \lim_{\substack{\Delta t \rightarrow 0, \\ N_0 \rightarrow \infty}} \frac{N_0 - \sum_{i=1}^{t/\Delta t} n_i}{N_0} \approx N \frac{(t)}{N_0} \quad (8)$$

где N_0 – число объектов в начале испытания, $N(t)$ – число исправно работающих НПТ за промежуток от 0 до t , n_i – число отказавших объектов в интервале времени Δt_i , t – время, для которого определяется ВБР.

С учетом (7) и (8) получим формулу для расчета вероятности безотказной работы НПТ:

$$P^*(t, l, n) = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^{t/\Delta t} n_i}{\frac{L_0(t)}{l_3}} \right)^{\frac{l}{l_3}}, \quad (9)$$

где $L_0(t)$ – суммарная протяженность НПТ, участвующих в выборке; l_3 – длина элемента трубопровода; l – длина НПТ, рассчитываемого на надежность; n_i – число отказов НПТ за промежуток времени от $t - \Delta t/2$ до $t + \Delta t/2$; t – время, для которого определяется ВБР.

В качестве примера произведем по формулам (2) и (9) расчет надежности участков НПТ длиной 150 и 300 метров. На рис. 3 изображена ВБР для всей номенклатуры НПТ в зависимости от времени эксплуатации для участков длиной 150 и 300 м: 1 – расчет по формуле (2), 2 – расчет по формуле (9).

В табл. 5 приведены рассчитанные по формуле (9) значения ВБР для всей номенклатуры рассматриваемых трубопроводов с 1 по 21 год эксплуатации. В табл. 6 приведено изменение ВБР по 3-х годичным периодам.

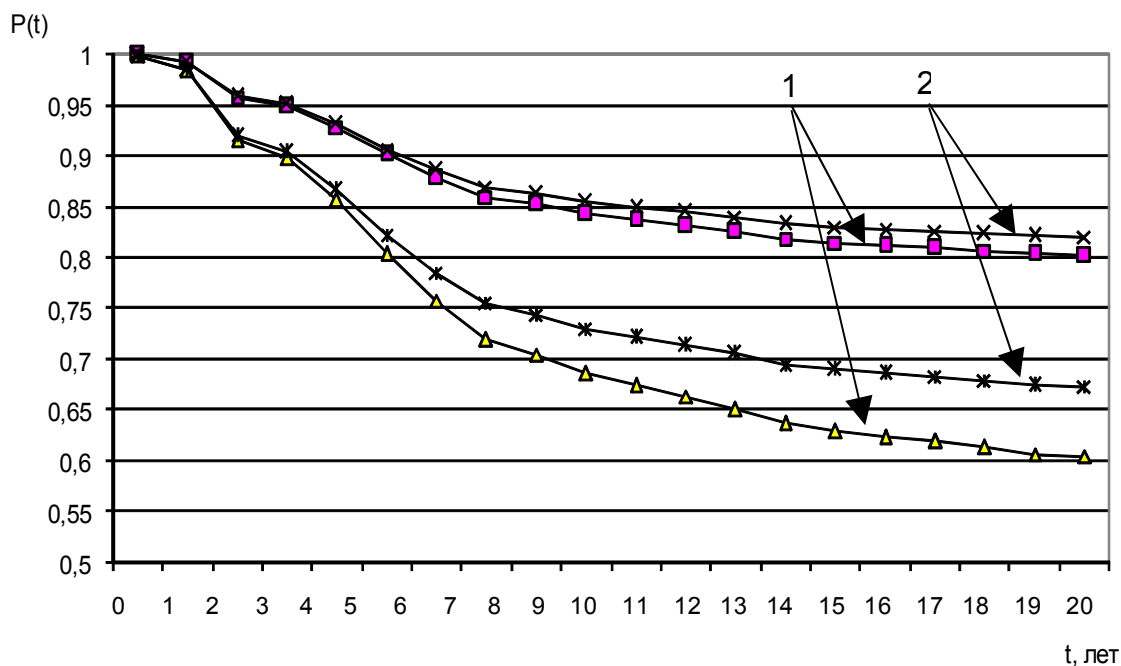


Рисунок 3. Вероятность безотказной работы НПТ:
 —□—, —×— — длиной 150 м; —△—, —*— — длиной 300 м.

Таблица 5

Рассчитанные значения ВБР

Год экспл.	ВБР $P(t, 300, n)$, по формуле (9)							
	Все	Ø114	Ø159	Ø168	Ø219	Ø273	Ø325	Ø426
1	0,999	0,999	1,000	1,000	0,998	1,000	1,000	1,000
2	0,985	0,977	0,999	1,000	0,994	0,931	0,998	1,000
3	0,920	0,885	0,909	1,000	0,987	0,885	0,863	0,904
4	0,903	0,839	0,892	1,000	0,982	0,881	0,859	0,901
5	0,867	0,757	0,859	1,000	0,972	0,832	0,848	0,895
6	0,822	0,665	0,829	1,000	0,932	0,771	0,843	0,890
7	0,785	0,596	0,805	0,970	0,900	0,718	0,833	0,889
8	0,756	0,556	0,786	0,970	0,872	0,695	0,809	–
9	0,744	0,540	0,767	0,953	0,868	0,693	0,807	–
10	0,731	0,530	0,750	0,920	0,826	0,690	0,803	–
11	0,722	0,521	0,734	0,920	0,805	0,689	–	–
12	0,714	0,513	0,722	0,920	0,787	0,685	–	–
13	0,706	0,500	0,712	0,920	0,768	0,685	–	–
14	0,695	0,492	0,674	0,920	0,758	0,685	–	–
15	0,690	0,487	0,658	0,920	0,750	0,685	–	–
16	0,686	0,484	0,657	0,903	0,743	0,677	–	–
17	0,684	0,480	0,652	0,903	0,742	0,674	–	–
18	0,679	0,474	0,644	0,896	0,736	0,674	–	–
19	0,675	0,465	0,640	0,884	0,736	0,671	–	–
20	0,674	0,464	0,638	0,864	0,733	0,670	–	–
21	0,673	0,462	–	–	–	–	–	–

Таблица 6

Изменения ВБР по времени эксплуатации

НПТ	Диапазон изменения ВБР (ΔP) в течение эксплуатации						
	0–3	4–6	7–9	10–12	13–15	16–18	19–21
Все НПТ	0,080	0,097	0,078	0,030	0,024	0,011	0,006
Ø114	0,115	0,220	0,126	0,027	0,025	0,013	0,012
Ø159	0,091	0,080	0,062	0,045	0,064	0,014	0,006
Ø168	0,000	0,000	0,047	0,033	0,000	0,024	0,031
Ø219	0,013	0,055	0,064	0,082	0,037	0,014	0,003
Ø273	0,115	0,114	0,078	0,008	0,000	0,011	0,004
Ø325	0,137	0,019	0,036	0,004	–	–	–
Ø426	0,096	0,014	0,001	–	–	–	–

Анализ данных табл. 5, 6 позволяет сделать ряд выводов о надежности НПТ различного диаметра:

1. Для НПТ $\varnothing 114$, 159, 273, 325, 426 наблюдается сравнительно быстрое снижение ВБР уже в первые три года эксплуатации. Данный факт говорит о невысокой их надежности и тяжелых условиях эксплуатации.

2. Наиболее быстрое снижение ВБР наблюдается у трубопроводов $\varnothing 114$. Так, к 10 году эксплуатации ВБР для НПТ $\varnothing 114$ достигает значения 0,53 для участка длиной 300 м. После 10 года снижение ВБР существенно замедляется. Это скорее всего объясняется тем, что к 10 году происходит замена существенной доли труб данного диаметра. В целом, ВБР НПТ $\varnothing 114$ ниже, чем ВБР для всей выборки.

3. Для всего сортамента НПТ также наблюдается наибольшие темпы снижения надежности в первые 9 лет эксплуатации. К 10 году ВБР достигает значения 0,73. После 10 года снижение ВБР стабилизируется.

4. Для НПТ $\varnothing 168$ можно видеть довольно медленное снижение ВБР. Фактически, в течение первых 6 лет эксплуатации она близка к 1. Впоследствии происходит ее медленное уменьшение на $\sim 0,030$ каждые три года. К 13 году ВБР равна 0,92, а к 21 – 0,86. Столь медленное снижение ВБР свидетельствует о более высокой надежности трубопроводов данного диаметра.

5. Трубопроводы $\varnothing 219$ по сравнению с другими НПТ имеют более высокий показатель ВБР. Для них снижение ВБР достигает максимума 0,082 в период между 10 – 12 годами эксплуатации. В первые 6 лет снижение ВБР сравнительно небольшое и составляет 0,068. К 13 году эксплуатации ВБР достигает значения 0,77 для участка длиной 300 м, после чего снижение ВБР замедляется.

6. Анализ значений ВБР для всей номенклатуры НПТ показывает, что имеются различия в результатах расчета по формулам (2) и (9). Так, для участка НПТ длиной 150 м на 5 году эксплуатации значения ВБР по формулам (2) и (9) составляют 0,927 и 0,931 соответственно, а на 20 году эксплуатации значения ВБР составляют 0,803 и 0,821, то есть разрыв значений увеличивается. Для участка НПТ длиной 300 м значения ВБР по формулам (2) и (9) составляют 0,857 и 0,867 на 5 году эксплуатации, 0,607 и 0,673 на 20 году. То есть, с увеличением времени

эксплуатации до 20 лет разница значений ВБР для участка длиной 300 м составляет 0,07 или порядка 10 %. Заметим, что расхождения в результатах, полученных по формулам (2) и (9) тем больше, чем больше длина участка НПТ и срок его эксплуатации.

Литература

1. Промысловые трубопроводы и оборудование: Учеб. пособие для вузов / Ф.М. Мустафин, Л.И. Быков, А. Г. Гумеров и др. – М.: Недра, 2004.
2. Промысловые трубопроводы / В.Д. Куликов, А.В. Шибнев, А.Е. Яковлев, В.Н. Антипов. – М.: Недра, 1994.
3. РД 39-132-94. Правила по эксплуатации, ревизии, ремонту и отбраковке нефтепромысловых трубопроводов / Госстрой России – М.:ГУП ЦПП, 1994.
4. Муравьев И.И. О моделях надежности нефтяных промысловых трубопроводов в условиях эксплуатации распределенных систем / И.И. Муравьев, В.А. Острейковский // Системный анализ и обработка информации в интеллектуальных системах / Сб. науч. тр. каф. ИВТ № 1 // Под общ. ред. засл. деят. науки и техники РФ, проф., д.т.н. В.А. Острейковского. – Сургут: Изд-во СурГУ, 2002. - С. 17-22.