

2.3. Алгоритм оценки скорости внутренней и наружной коррозии магистральных трубопроводов по результатам аппаратной диагностики

В модели определения скорости коррозии (2.3), которая берется за основу расчетов, присутствует параметр V_0 - скорость коррозии в ненапряженном металле. Данная величина определяется лабораторными испытаниями образцов металла трубы, для реализации данной операции необходимо затратить много времени. Также на предприятиях, занимающихся обслуживанием магистральных трубопроводов, как правило, нет специального оборудования для проведения исследований, а заказ данной работы сторонней организации ведет к значительным временным и экономическим затратам. Поэтому желательно данный параметр определять косвенным способом. Создание способа видится в использовании результатов аппаратной диагностики, систематизированным и содержащим номер участка трубопровода, километр по трассе и потери металла в результате коррозии. Имея данные по двум диагностикам за весь период работы участка трубопровода либо данные одной диагностики, если коррозия началась сразу с момента ввода в эксплуатацию трубопровода, имея данные по режимы эксплуатации и вид напряженного состояния трубы, можно определить значение параметра V_0 .

Согласно разработанной нами схемы (см. рис. 2.11), выполняется определение начальных скоростей внутренней и наружной коррозии в ненапряженном металле $V_{0в}$ и $v_{0н}$. По полученным данным проводится прогноз дальнейшего поведения коррозионных дефектов с учетом реальных факторов, определяется "запас прочности" трубопровода (время безопасной эксплуатации при том же режиме) или подбираются параметры работы трубы для увеличения безопасного срока эксплуатации.

В качестве исходных данных об участке трубопровода используются: дата ввода в эксплуатацию, дата замен изоляционного покрытия, P_B , представленное в виде модели или таблицы базы данных со значениями

давления на данном участке за исследуемый период эксплуатации, p_H , D_B или D_H , σ_T , S_0 , F_H , T , V , тип и толщина изоляционного слоя, вид износа изоляционного покрытия, параметры катодной защиты.

Из результатов аппаратной диагностики используются следующие данные: дата проведения диагностики, глубины наружного и внутреннего коррозионных дефектов $S_{H.э}$ и $S_{B.э}$, параметры состояния изоляции и катодной защиты.

Также определяются следующие входные параметры для настройки "чувствительности модели": предполагаемые исходные v_{0B} и v_{0H} , H_t и $H_{tпр}$ - шаг по времени и шаг по времени проверочный, H_{V0B} , H_{V0H} - шаги увеличения/ уменьшения начальной внутренней и наружной скорости коррозии, Eps , Eps_1 - погрешность и проверочная погрешность между расчетными и реальными значениями глубин каверн, коэффициенты поправки шагов увеличения/ уменьшения скоростей коррозии.

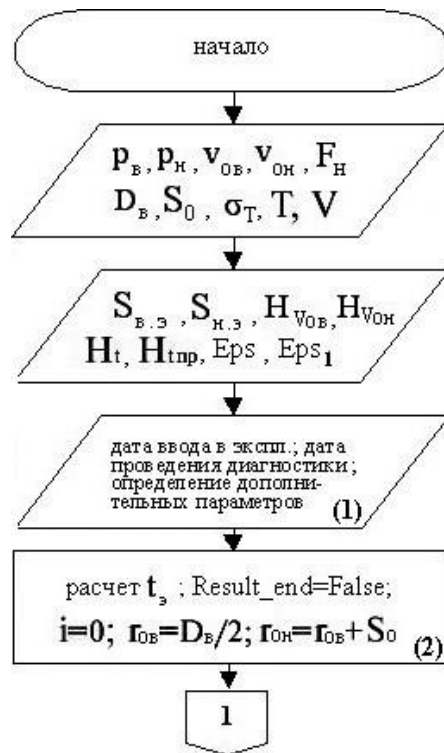


Рис. 2.11. Структурная схема определения скоростей внутренней и наружной коррозии по результатам аппаратной диагностики магистральных трубопроводов (начало).

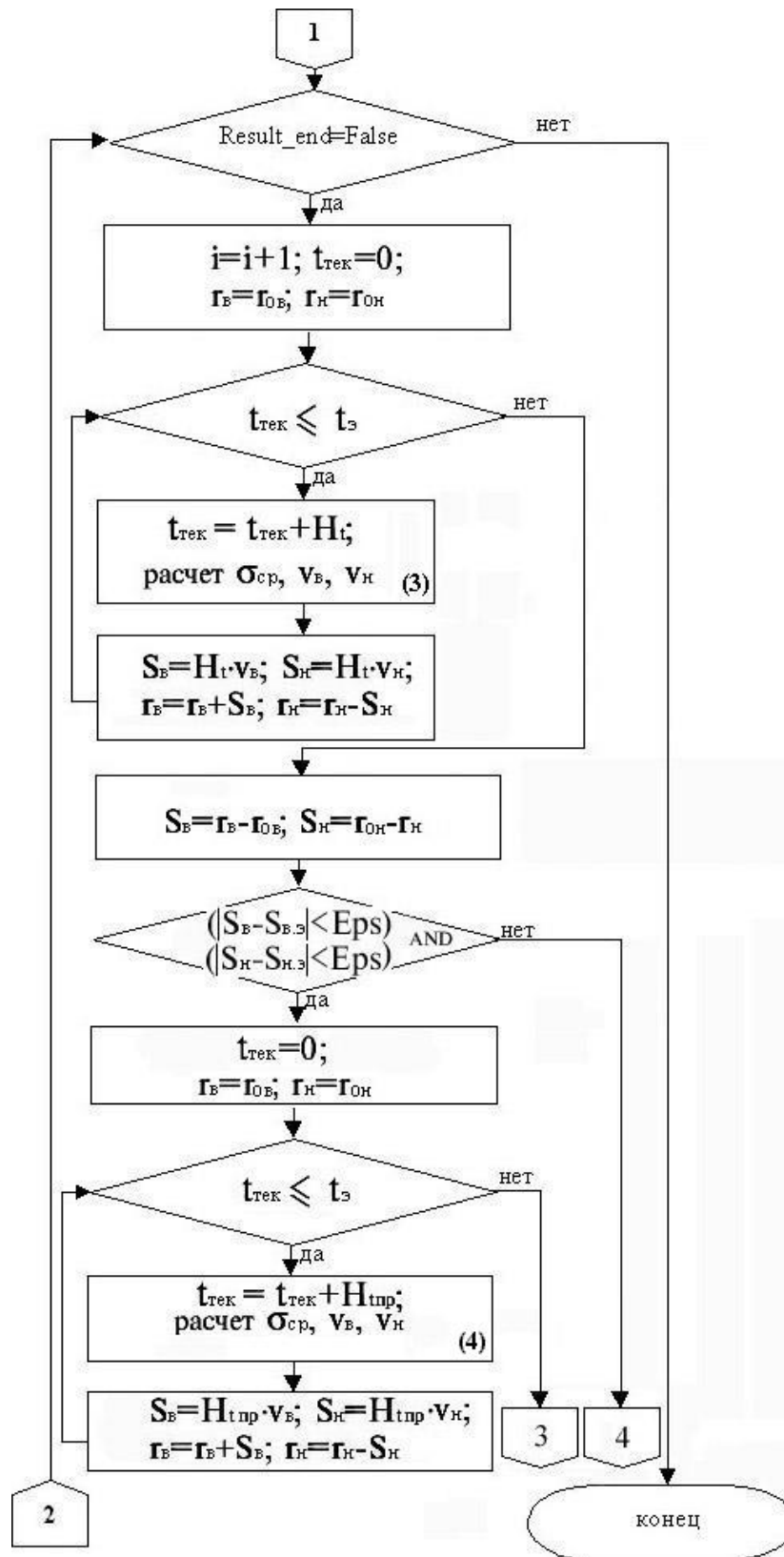


Рис. 2.11. Структурная схема определения скоростей внутренней и наружной коррозии по результатам аппаратной диагностики магистральных трубопроводов (продолжение).

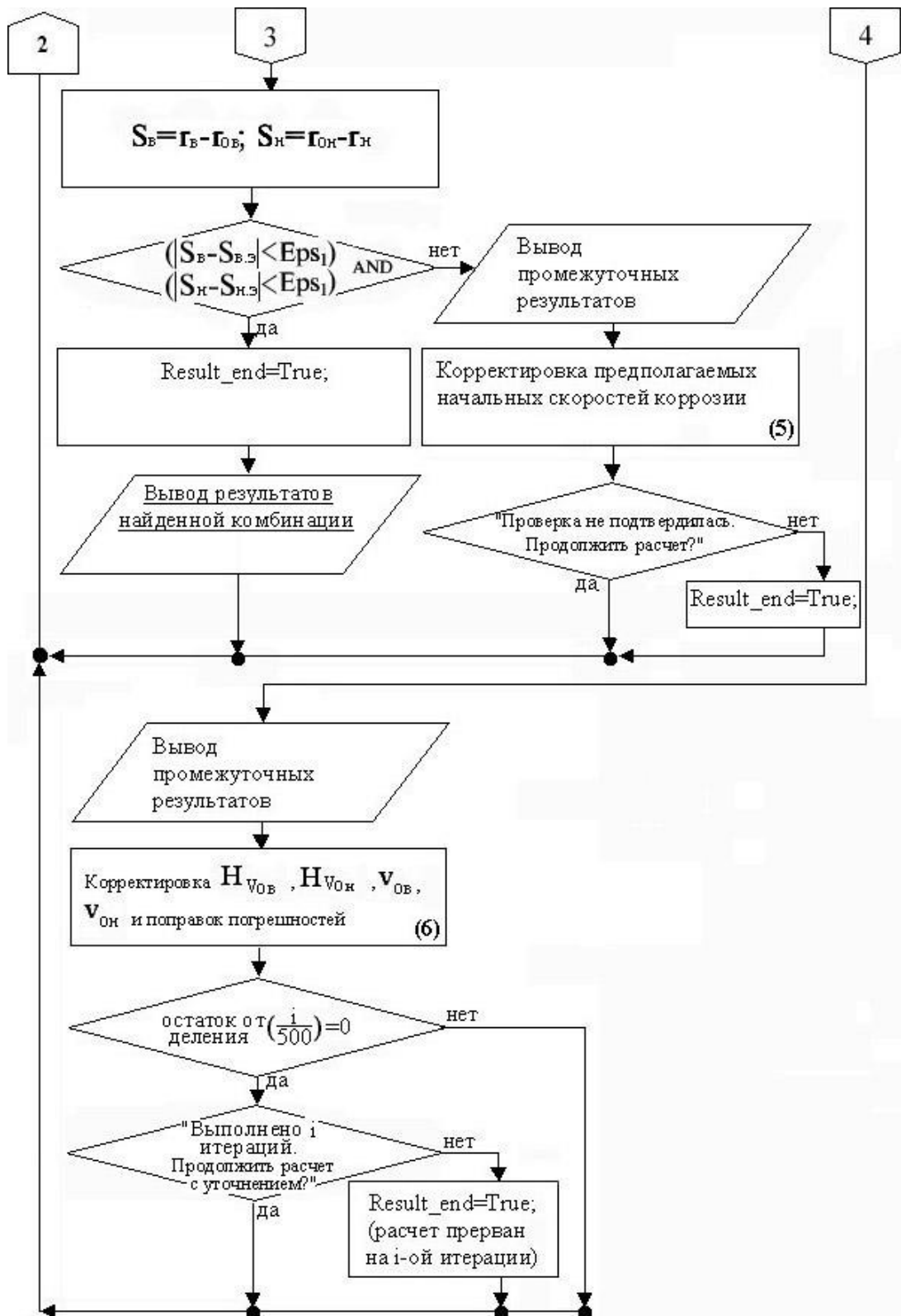


Рис. 2.11. Структурная схема определения скоростей внутренней и наружной коррозии по результатам аппаратной диагностики магистральных трубопроводов (окончание).

Опишем подробнее состав и назначение укрупненных блоков, представленных на рис. 2.11.

Блок (1): "Дата ввода в эксплуатацию; дата проведения диагностики; определение дополнительных параметров".

Под определением дополнительных параметров понимается:

- определение вида действующих нагрузок с учетом тонкостенности/толстостенности трубы;
- определение толщины изоляционного покрытия, мм; срок годности, лет; промежутки времени, через которые проводилась замена изоляционного покрытия; определение функции разрушения изоляционного слоя;
- определение параметров катодной защиты;
- среднесезонные температуры наружной среды;
- параметры функции переменного давления или база данных значений давления за период эксплуатации.

Блок 2: "Расчет t_0 ".

Под расчетом t_0 понимается определение количества лет в эксплуатации магистрального трубопровода между двумя диагностиками либо между вводом в эксплуатацию и первой диагностикой, если коррозия началась сразу.

Блок 3: "Расчет σ_{cp}, V_B, V_H ".

Расчетное время приравняется к нулю. Далее выполняются расчеты в цикле, пока расчетное время не сравняется со временем от начала эксплуатации до аппаратного обследования. В каждом цикле определяется среднее напряжение σ_{cp} на текущий момент времени, определяются скорости наружной коррозии V_H и внутренней коррозии V_B в напряженном металле трубы на данном интервале времени, определяется изменение глубин наружной и внутренней коррозионных каверн [70] на данном интервале времени, который численно равен величине шага увеличения времени.

Блок 4: "Расчет σ_{cp}, V_B, V_H ".

Данный блок выполняется аналогично предыдущему с той лишь разницей, что в качестве вместо шага по времени H_t используется шаг по времени проверочный $H_{\text{тпр}}$.

Блок 5: "Корректировка предполагаемых начальных скоростей коррозии".

В зависимости от знака разности между расчетной и реальной глубиной каверн, выполняется изменение предполагаемой начальной скорости коррозии. Если модуль разности между расчетной и реальной глубиной внутренней каверны больше проверочной погрешности, а знак получаемой разности "+", то v_{0B} уменьшается на H_{V0B} , в противном случае, если знак получаемой разности "-", v_{0B} увеличивается на H_{V0B} . Аналогичные действия выполняются по отношению к наружному дефекту.

Блок 6: "Корректировка H_{V0B} , H_{V0H} , v_{0B} , v_{0H} и поправок погрешностей".

Если расчетная глубина каверны получается со знаком минус, то шаг увеличения/ уменьшения начальной скорости коррозии уменьшается в два раза. Такая проверка выполняется для внутреннего и наружного дефекта.

Для ускорения процесса расчета первоначальные шаги увеличения/ уменьшения начальной скорости коррозии задаются "более грубыми". В процессе расчета проверяем попадание модуля разности расчетной и реальной глубины каверны в области приближения к результату с заданной погрешностью Eps . После попадания в первую область приближения шаг увеличения/ уменьшения начальной скорости коррозии уменьшается в два раза. В дальнейших циклах будет проверяться попадание во вторую, третью... области приближения, пока модуль разности расчетной и реальной глубины каверны не станет меньше Eps . Подобная последовательность операций выполняется отдельно для наружной и внутренней каверн.

В зависимости от знака разности между расчетной и реальной глубиной каверн, выполняется изменение предполагаемой начальной скорости коррозии. Если модуль разности между расчетной и реальной глубиной внутренней

каверны больше погрешности, а знак получаемой разности "+", то V_{0B} уменьшается на $H_{V_{0B}}$, при этом, прежде чем изменить V_{0B} , проверяется разность $V_{0B} - H_{V_{0B}}$. Если разность меньше нуля, то выполняется корректировка $H_{V_{0B}}$.

Если модуль разности между расчетной и реальной глубиной внутренней каверны больше погрешности, а знак получаемой разности "-", то V_{0B} увеличивается на $H_{V_{0B}}$. Аналогичные действия выполняются по отношению к наружному дефекту.

Приведем пример расчета на основе вышеописанного алгоритма (см. рис. 2.12).

Определение начальных скоростей внутренней и наружной коррозии

Выход

Определение исходных начальных скоростей по промежуточным данным:

Введите исходные данные:

рабочее давление, МПа: 0014.20

наружное давление, МПа: 0000.40

внутренний диаметр, мм: 0180

предпол-мая внутренняя нач скорость, мм/год: 00.25

предпол-мая наружная нач скорость, мм/год: 00.13

предел текучести, МПа: 0210.00

толщину стенки, мм: 15.00

коэффициент несущей способности: 0.20

температура, К: 0293.00

молярный объем металла, см³: 0007.000

Введите данные диагностики:

дата ввода в эксплуатацию, дд.мм.гггг: 06.09.1979

дата диагностики, дд.мм.гггг: 10.06.1995

глубина наружной каверны, мм: 02.1100

глубина внутренней каверны, мм: 03.5600

"Чувствительность" модели:

Шаг увел./уменьш. скорости внутр коррозии, мм/год: 0.1000

Шаг увел./уменьш. скорости наруж коррозии, мм/год: 0.1000

Погрешность, мм: 0.0010

Погрешность проверочная, мм: 0.0009

Рез-ты: время экспл-и: 15.76095 лет.
 Номер расчета: 12
 Time_ = 15.76096 лет, вошедших в расчет.
 При $v0_vn = 0.19600$ и шаг $h_v0_vn = 0.00010$:
 $S_vn = 3.56012$ $S_vn_expl = 3.56000$
 При $v0_n = 0.11613$ и шаг $h_v0_n = 0.00010$:
 $S_n = 2.10946$ $S_n_expl = 2.11000$
 Найдена комбинация.

Результат вычислений:

нач. внутр. скорость: 0.19600

нач. наруж. скорость: 0.11613

Записать в файл Рассчитать Выход

Рис. 2.12. Определение начальных внутренней и наружной скоростей коррозии по результатам аппаратной диагностики.

В качестве модели расчета среднего напряжения в стенках трубы используется формула, выведенная из уравнений Ламе [70] (модель №1). В

качестве базового уравнения определения скорости внутренней и наружной коррозии используется (2.9), которое модифицируется при учете влияния изоляционного покрытия [78], катодной защиты, температурных перепадов и т.п. Трубопровод относится к толстостенным трубам. Из рис. 2.12 видно, что за время эксплуатации $t_3 = 15,76$ лет начальные скорости наружной и внутренней коррозии были определены. Начальная внутренняя скорость коррозии $v_{0В} = 0,196$ мм/год, начальная наружная скорость коррозии $v_{0Н} = 0,11613$ мм/год.

В работе [74] приведен алгоритм оценки начальных внутренней и наружной скоростей коррозии и порядок расчета ВНПС участка трубопровода с использованием данного алгоритма.

2.4. Адекватность модели для оценки ВНПС линейной части МТ, работающего в реальных условиях и коррозионном износе

Для проверки адекватности модели были использованы данные по нескольким участкам резервной нитки подземного магистрального нефтепровода в Ханты-Мансийском округе.

Характеристика трубопровода:

1. исследуемый участок - резервная нитка, не пересекается рекой, дорогами;
2. глубина засыпки – 1 м;
3. наружный диаметр трубопровода – 1220 мм;
4. толщина стенки – 14,5 мм;
5. марка стали - 17Г1СУ;
6. завод-производитель - ЧТПЗ (Челябинский ТПЗ);
7. стандарт – ТУ 14-3-602-77;
8. год постройки – 1982 – резервная;
9. год пуска в эксплуатацию – 1983 – резервная;
10. испытательное давление при сдаче в эксплуатацию- 34-76км - 82,1 кг\см²; 76-212км - 61 кг\см²; 212-223км - 80,6 кг\см²;

11. изоляционное покрытие - 1 слой пленки Поликен, 1 слой обертки Поликен, состояние удовлетворительное;
12. параметры трубы представлены в табл. 2.3;
13. метеорологические данные вокруг трубы представлены в табл. 2.4;
14. характеристики перекачиваемой нефти представлены в табл. 2.5;
15. сведения о пропусках диагностических снарядов по нефтепроводу представлены в табл. 2.6.

Таблица 2.3

Параметры трубы

Рабочее давление, МПа	Сопротивление разрыву, МПа	Предел текучести, МПа	Относительно удлинение, %	Ударная вязкость КСУ, Дж/см ²	Температура измерения КСУ, °С	Эквивалент углерода	Давление испытательное (без осевого подпора),	Давление испытательное (с осевым подпором), МПа	Конструкция трубы	Коэффициент надежности
6,3	510	363	20	39,2	-40	0,46	8,0	7,5	016	1,47
5,4	510	363	20	39,2	-40	0,46	8,0	7,5	016	1,47

Таблица 2.4

Метеорологические данные

Наименование	Зимой		Летом	
	Макс.	мин.	Макс.	Мин.
Средняя Т воздуха на поверхности земли, С°	0	-55	+36	+10
Средняя Т воздуха на глубине залегания труб, С°	+8	- 5	+24	0

Таблица 2.5

Характеристика перекачиваемой нефти

Наименование	Удельный вес, г/см ³	Вязкость, сСт	Температура застывания, °С	Температура вспышки, °С
Проектная	845-871,1	8,5-17,4	-13	Не выше -25
Фактическая	845-871,1	8,5-17,4	-13	Не выше -25

Сведения о пропусках диагностических снарядах по нефтепроводу

Дата (число, месяц, год)	Тип диагности- ческого снаряда	Наименование организации, производившей диагностику	Диагностиру- емый участок (км., длина)	Количество выявленных дефектов (шт.)	Прим.
13.11.99	Магнескан MFL	ЦТД Диаскан	34-76км -42км	1054	резервная нитка
20.09.01	Магнескан MFL	ЦТД Диаскан	34-76км -42км	1968	резервная нитка

Обработка первичных данных по внутреннему давлению, приведена в табл. 2.7, статистическая обработка данных по давлению в табл. 2.8.

Обработанные данные внутреннего давления за месяц (посуточно)

Дата	Количество изменений давления за сутки	Количество изменений давления в сторону возрастания	Количество изменений давления в сторону убывания	Минимальное значение за сутки, кг/см ²	Максимальное значение за сутки, кг/см ²	Среднее значение за сутки, кг/см ²	Минимальное значение за сутки, МПа	Максимальное значение за сутки, МПа	Среднее значение за сутки, МПа
21.01.02	24	13	11	0	4,85	2,3036	0,000000	0,475621	0,225905
22.01.02	13	6	7	0,65	4,35	2,1017	0,063743	0,426588	0,206106
23.01.02	28	13	15	0	9	2,9726	0,000000	0,882595	0,291511
24.01.02	23	11	12	0,3	2,35	1,0068	0,029420	0,230455	0,098733
25.01.02	7	4	3	0,4	1,4	0,821	0,039226	0,137293	0,080512
26.01.02	22	10	12	0	6,15	1,9395	0,000000	0,603107	0,190199
27.01.02	18	8	10	0,5	8,65	2,1095	0,049033	0,848272	0,206871
28.01.02	13	8	5	0	2,55	1,8561	0,000000	0,250069	0,182021
29.01.02	19	10	9	0,6	2	1,1033	0,058840	0,196132	0,108196
30.01.02	14	7	7	0,05	4,4	1,7561	0,004903	0,431491	0,172214
31.01.02	16	7	9	0	8,5	3,3337	0,000000	0,833562	0,326923
01.02.02	15	7	8	0,3	3	1,899	0,029420	0,294198	0,186228
02.02.02	22	10	12	0	5,5	2,8826	0,000000	0,539364	0,282685
03.02.02	15	6	9	0,8	2,8	1,7816	0,078453	0,274585	0,174715
04.02.02	33	15	18	0	11,2	2,041	0,000000	1,098341	0,200153
05.02.02	25	11	14	0	12	1,8779	0,000000	1,176794	0,184158
06.02.02	15	9	6	2,6	9,2	4,537	0,254972	0,902208	0,444926
07.02.02	23	10	13	0	9,1	4,9087	0,000000	0,892402	0,481377
08.02.02	12	6	6	0,5	5,2	2,5134	0,049033	0,509944	0,246479
09.02.02	29	14	15	0	7,8	2,2656	0,000000	0,764916	0,222179
10.02.02	18	9	9	0	3,3	1,8986	0,000000	0,323618	0,186188
11.02.02	14	7	7	0	9,1	0,6724	0,000000	0,892402	0,065940
12.02.02	22	10	12	0	6,75	2,0047	0,000000	0,661946	0,196593
13.02.02	10	5	5	0,4	1,5	1,0174	0,039226	0,147099	0,099772
14.02.02	44	22	22	0	13,1	2,3899	0,000000	1,284666	0,234368
15.02.02	21	11	10	0	5,5	1,4986	0,000000	0,539364	0,146962
16.02.02	24	11	13	1	5,5	2,0068	0,098066	0,539364	0,196799
17.02.02	9	4	5	1,5	2,55	1,9986	0,147099	0,250069	0,195995
18.02.02	11	5	6	1,5	3	2,0054	0,147099	0,294198	0,196662
19.02.02	27	17	10	0	2,9	1,7328	0,000000	0,284392	0,169929
20.02.02	17	7	10	1,35	5,1	2,8047	0,132389	0,500137	0,275046

Статистические характеристики данных внутреннего давления

Среднее, МПа	0,212977047
Стандартная ошибка, МПа	0,001551022
Медиана, МПа	0,184364335
Мода, МПа	0,147099204
Стандартное отклонение	0,144128219
Дисперсия выборки	0,020772944
Эксцесс	7,549940918
Асимметричность	2,319046209
Интервал	1,284666379
Минимум, МПа	0
Максимум, МПа	1,284666379
Сумма, МПа	1839,0568
Счет	8635

Для оценки адекватности модели были выполнены следующие операции:

1. Для каждого дефекта была определена начальная скорость коррозии по алгоритму, описанному в пункте 2.3, а также дата начала коррозии и дата наступления предельного состояния. С учетом того, что исследовалось достаточно большое число дефектов (43 дефектов) и начало коррозии зависит от многочисленных факторов, распределение времени начала коррозии было принято нормальным с математическим ожиданием M и среднеквадратичное отклонением $\sigma_{\text{откл}}$.

Общие для всех дефектов данные: Дата ввода трубопровода в эксплуатацию 01.01.1983. $p_B=0,2129$ МПа; $p_H=0,11$ МПа; $D_H=1220$ мм; $s_o=14,5$ мм; $\sigma_T=363$ МПа; $\mu=0,35$; $T=293$ К; $V=7,1$ см³; $v_{\text{ош}}=0 \div 0,3$ мм/год; $A=1.0716$ МПа; $v=00.8380$ час⁻¹; Переменное внутреннее давление определяется по (2.34), среднее напряжение определяется по (2.30).

Таблица 2.9

Экспериментальные данные по дефектам и расчетные данные по начальной скорости коррозии и времени начала коррозии с момента ввода трубопровода в эксплуатацию

№ п/п	Глубина особенности на 13.11.1999, мм	Глубина особенности на 20.09.2001, мм	Разница между глубинами дефектов за период с 13.11.1999 по 20.09.2001, мм	Нач. внутр. скорость за период с 13.11.1999 по 20.09.2001, мм/год	Время начала коррозии с момента ввода в эксплуатацию, лет
1	2	3	4	5	6
1.	1,3	1,9	0,6	0,31944	12,8177584
2.	1,6	2,7	1,1	0,58569	14,1453922
3.	1,6	2,3	0,7	0,37331	12,5958504
4.	2,1	2,5	0,4	0,21300	7,0560514
5.	2,8	3,7	0,9	0,48037	11,0681044
6.	1,1	1,2	0,1	0,05294	0
7.	1,3	1,8	0,5	0,26656	12,0085911
8.	1,8	2,9	1,1	0,58756	13,814233
9.	1,8	1,9	0,1	0,05288	0
10.	2	2,2	0,2	0,10631	0
11.	1,6	3,5	1,9	1,01362	15,2880345
12.	1,4	1,7	0,3	0,15975	8,1390278
13.	1	2,5	1,5	0,74819	15,3979668
14.	1	2,5	1,5	0,74819	15,3979668
15.	0	1,3	1,3	0,69325	16,8577373
16.	0	1	1	0,53500	16,860598
17.	0	1,1	1,1	0,58750	16,8574648
18.	0	1,1	1,1	0,58750	16,8574648
19.	0	1,1	1,1	0,58750	16,8574648
20.	0	2	2	1,06831	16,8580097

Продолжение таблицы 2.9

№ п/п	Глубина особенности на 13.11.1999, мм	Глубина особенности на 20.09.2001, мм	Разница между глубинами дефектов за период с 13.11.1999 по 20.09.2001, мм	Нач. внутр. скорость за период с 13.11.1999 по 20.09.2001, мм/год	Время начала коррозии с момента ввода в эксплуатацию, лет
1	2	3	4	5	6
21.	0	1,8	1,8	0,96244	16,8597806
22.	0	1,9	1,9	1,01481	16,858097
23.	0	1	1	0,53500	16,860598
24.	0	1	1	0,53500	16,860598
25.	0	1,1	1,1	0,58750	16,8574648
26.	0	1,5	1,5	0,80125	16,8577373
27.	0	1,3	1,3	0,69444	16,8577373
28.	0	1,1	1,1	0,58750	16,8574648
29.	0	1,6	1,6	0,85469	16,8574648
30.	0	1	1	0,53500	16,860598
31.	0	1	1	0,53500	16,860598
32.	0	2,6	2,6	1,38950	16,859372
33.	0	1	1	0,53500	16,860598
34.	0	1,1	1,1	0,58750	16,8574648
35.	0	1,4	1,4	0,74775	16,8574648
36.	0	1,3	1,3	0,69444	16,8577373
37.	0	1,4	1,4	0,74775	16,8574648
38.	0	1,2	1,2	0,64100	16,8578735
39.	0	2,6	2,6	1,38950	16,859372
40.	0	1,2	1,2	0,64100	16,8578735
41.	0	1,5	1,5	0,80125	16,8577373
42.	0	1	1	0,53500	16,860598
43.	0	1,1	1,1	0,58750	16,8574648

Таблица 2.10

Статистика по времени начала коррозии (столбец 6 в таблице 2.9)

Количество значений	43
Математическое ожидание	14,0458
Std. Error of Mean	1,0176
Медиана	16,8575
Мода	16,86
Среднеквадратичное отклонение	6,6726

2. Для трубопровода, эксплуатирующегося в однородных условиях, но не прошедшего диагностики (предсказание аварий на котором особенно актуально), был определен момент начала коррозии как $(M - \sigma_{откл}) = 14,0458 - 6,6726 = 7,3732$ лет (для страховки) и, используя полученные начальные скорости коррозии, определен спектр времен наступления предельного состояния для каждой начальной скорости соответственно.

Таблица 2.11

Экспериментальные данные по дефектам и расчетные данные для оценки адекватности модели

№ п/п	Глубина особенности на 13.11.1999, мм	Глубина особенности на 20.09.2001, мм	Время перехода в предельное состояние, реальное, лет (при дате начала коррозии, представленной в столбце 6 таблицы 2.9)	Переход в предельное состояние при начале коррозии $t_{кор} = 7,3732$ лет	Разница в годах между реальным временем перехода в предельное состояние и расчетным	% отклонений
1	3	4	5	6	7	8
1.	1,3	1,9	55,252	49,8074416	5,4446	9,8540
2.	1,6	2,7	37,292	30,5198078	6,7722	18,1599
3.	1,6	2,3	48,916	43,6933496	5,2227	10,6768
4.	2,1	2,5	70,712	71,0291486	-0,3171	-0,4485

Продолжение таблицы 2.11

№ п/п	Глубина особенности на 13.11.1999, мм	Глубина особенности на 20.09.2001, мм	Время перехода в предельное состояние, реальное, лет (при дате начала коррозии, представленной в столбце 6 таблицы 2.9)	Переход в предельное состояние при начале коррозии $t_{кор} = 7,3732$ лет	Разница в годах между реальным временем перехода в предельное состояние и расчетным	% отклонений
1	3	4	5	6	7	8
5.	2,8	3,7	39,307	35,6120956	3,6949	9,4001
6.	1,1	1,2	213,39	220,7632	-7,3732	-3,4553
7.	1,3	1,8	62,83	58,1946089	4,6354	7,3777
8.	1,8	2,9	36,07	29,628967	6,4410	17,8570
9.	1,8	1,9	134,83	142,2032	-7,3732	-5,4685
10.	2	2,2	116,5	123,8732	-7,3732	-6,3289
11.	1,6	3,5	28,369	20,4541655	7,9148	27,8996
12.	1,4	1,7	92,801	92,0351722	0,7658	0,8252
13.	1	2,5	33,524	25,4992332	8,0248	23,9374
14.	1	2,5	33,524	25,4992332	8,0248	23,9374
15.	0	1,3	35,545	26,0604627	9,4845	26,6832
16.	0	1	41,328	31,840602	9,4874	22,9563
17.	0	1,1	39,062	29,5777352	9,4843	24,2800
18.	0	1,1	39,062	29,5777352	9,4843	24,2800
19.	0	1,1	39,062	29,5777352	9,4843	24,2800
20.	0	2	28,682	19,1971903	9,4848	33,0689
21.	0	1,8	30,083	20,5964194	9,4866	31,5347
22.	0	1,9	29,356	19,871103	9,4849	32,3099
23.	0	1	41,328	31,840602	9,4874	22,9563
24.	0	1	41,328	31,840602	9,4874	22,9563
25.	0	1,1	39,062	29,5777352	9,4843	24,2800
26.	0	1,5	32,911	23,4264627	9,4845	28,8187

Продолжение таблицы 2.11

№ п/п	Глубина особенности на 13.11.1999, мм	Глубина особенности на 20.09.2001, мм	Время перехода в предельное состояние, реальное, лет (при дате начала коррозии, представленной в столбце 6 таблицы 2.9)	Переход в предельное состояние при начале коррозии $t_{кор} = 7,3732$ лет	Разница в годах между реальным временем перехода в предельное состояние и расчетным	% отклонений
1	3	4	5	6	7	8
27.	0	1,3	35,545	26,0604627	9,4845	26,6832
28.	0	1,1	39,062	29,5777352	9,4843	24,2800
29.	0	1,6	31,856	22,3717352	9,4843	29,7723
30.	0	1	41,328	31,840602	9,4874	22,9563
31.	0	1	41,328	31,840602	9,4874	22,9563
32.	0	2,6	26,161	16,674828	9,4862	36,2607
33.	0	1	41,328	31,840602	9,4874	22,9563
34.	0	1,1	39,062	29,5777352	9,4843	24,2800
35.	0	1,4	34,121	24,6367352	9,4843	27,7960
36.	0	1,3	35,545	26,0604627	9,4845	26,6832
37.	0	1,4	34,129	24,6447352	9,4843	27,7895
38.	0	1,2	37,139	27,6543265	9,4847	25,5383
39.	0	2,6	25,754	16,267828	9,4862	36,8338
40.	0	1,2	37,139	27,6543265	9,4847	25,5383
41.	0	1,5	32,911	23,4264627	9,4845	28,8187
42.	0	1	41,328	31,840602	9,4874	22,9563
43.	0	1,1	39,062	29,5777352	9,4843	24,2800
средние:			47,7424	40,5429	7,1995	21,1397

3. Сравнение расчетных и экспериментальных данных дало следующие результаты: расчетные отклонения составили (в процентах от реального времени наступления предельного состояния): минимум – **0,8252%**, максимум – **36,8338%**, в среднем по выборке - **21,1397%** (другими словами переход участка трубопровода в предельное состояние предсказан раньше реального в среднем на **21%**), что позволяет считать модель адекватной.

ВЫВОДЫ

1. Определена базовая модель определения скорости коррозии. Описаны варианты напряженного состояния трубопровода и интегральные оценки времени до наступления предельного состояния.
2. Преобразована модель оценки скорости коррозии. Учтено влияние средств катодной защиты, изоляционного покрытия и его износа, температурные перепады, переменное давление.
3. Создана графовая модель, которая позволяет наглядно отследить параметры, влияющие на скорость коррозии.
4. Выделены шесть моделей нагружения трубопровода. Эти модели охватывают большинство известных на практике случаев нагружения линейной части подземных трубопроводов, и тем самым позволяют рассмотреть процесс утончения трубопроводов в рамках нефтегазопроводной системы России.
5. В базовой модели определения скорости коррозии (2.9) V_0 определяется лабораторным путем на образцах металла трубы в условиях, приближенных к эксплуатационным. Это не всегда возможно выполнить, поэтому удобнее определять V_0 по результатам аппаратной диагностики с помощью разработанного нами алгоритма (пункт 2.3).
6. Получены зависимости для определения скорости наружной коррозии с учетом изоляционного покрытия трех видов (в условиях их **100%** целостности), а также получили зависимость (2.15), которая позволит учесть износ и "старение" изоляции в процессе эксплуатации.

7. На основе анализа экспериментальных данных определена модель переменного внутреннего давления, которая в условиях частичного отсутствия статистических данных по давлению позволит учесть степень влияния переменного давления на ВНПС участка трубопровода.
8. На основе экспериментальных данных проверена адекватность разработанной модели.