

Министерство науки и высшего образования РФ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)**

**Б1.В.ДВ.03.01 МЕХАНИКА РАСТРЕСКИВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ  
ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМ**

Направление подготовки (специальность) 21.04.01 Нефтегазовое дело

Профиль подготовки (специализация) 21.04.01.01 Трубопроводный инжиниринг

Форма обучения очная

Год набора 2024

## **РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)**

Программу составили  
зав. кафедрой, канд. техн. наук Сокольников Александр Николаевич

## 1 Цели и задачи изучения дисциплины

### 1.1 Цель преподавания дисциплины:

Целью преподавания дисциплины «Механика растрескивания и разрушения трубопроводных систем» является изучение особенностей растрескивания под напряжением и последующего разрушения линейной части трубопроводных систем объектов трубопроводного транспорта.

### 1.2 Задачи изучения дисциплины:

Задачами изучения дисциплины «Механика растрескивания и разрушения трубопроводных систем» являются изучение основных законов и теоретических основ процессов растрескивания конструкционных металлов и сплавов, концепций и методов исследования материалов труб и идентификации показателей растрескивания, системного стратегического определения механизма растрескивания под напряжением и методов определения надёжности и расчёта остаточного ресурса трубопроводных систем при эксплуатации объектов трубопроводных систем.

1.3 Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю), соотнесенных с планируемыми результатами освоения образовательной программы высшего образования:

Код и наименование индикатора достижения компетенции	Запланированные результаты обучения по дисциплине
ПК-3 Способен планировать и проводить аналитические, имитационные и экспериментальные исследования, критически оценивать данные и делать выводы	
ПК-3.1 Планирует и проводит аналитические, имитационные и экспериментальные исследования	Знать классификацию возможных типов отказов Уметь определять показатели надежности, долговечности и безопасности Владеть навыками формализации критериев предельных состояний для соответствующих типов отказов
ПК-3.2 Проводит критическую оценку данных и делает выводы	Знать механизм разрушения трубопроводных систем и влияние на него осложняющих факторов. Уметь определять остаточный ресурс трубопроводов и технологического оборудования. Владеть навыками анализа причин разрушения трубопроводных систем.

Дисциплина реализуется без применения ЭО и ДОТ

## 2 Объем дисциплины (модуля)

Вид учебной работы	Всего, зачетных единиц (акад.час)	Семестр
		4
<b>Общая трудоемкость дисциплины</b>	3 (108)	3 (108)
<b>Контактная работа с преподавателем:</b>	0,6 (20)	0,6 (20)
занятия лекционного типа	0,3 (10)	0,3 (10)
практические занятия	0,3 (10)	0,3 (10)
<b>Самостоятельная работа обучающихся</b>	1,4 (52)	1,4 (52)
<b>Вид промежуточной аттестации (Экзамен)</b>	36	Экзамен

### 3 Содержание дисциплины (модуля)

№ п/п	Вид работ	Темы занятия	Объем часов	Семестр /курс	Часы в эл. формате
<b>Раздел 1. Основы оценки эксплуатационной надежности, уровня повреждения и темпов разрушения трубопроводных систем</b>					
1.	Лек	Прогнозируемые испытываемые нагрузки и воздействия окружающей среды на трубопроводные системы	2	4	
2.	Лек	Классификация возможных типов отказов	2	4	
3.	Лек	Выбор предельных состояний и формализация критериев предельных состояний для соответствующих типов отказов	2	4	
4.	Ср	Изучение теоретического материала	20	4	
<b>Раздел 2. Основы оценки надёжности и расчёта остаточного ресурса трубопроводных систем</b>					
1.	Лек	Формирование расчетных участков и требований к расчетным схемам участков и конструктивных элементов	2	4	
2.	Лек	Выбор и определение показателей надежности, долговечности и безопасности	2	4	
3.	Пр	Расчёт остаточного ресурса по характеристикам трещиностойкости	6	4	
4.	Пр	Расчёт остаточного ресурса по статистике отказов трубопроводов	4	4	
5.	Ср	Изучение теоретического материала. Подготовка к выполнению расчетных заданий	32	4	
6.	Экзамен		36	4	

## **4 Учебно-методическое обеспечение дисциплины**

### **4.1 Печатные и электронные издания:**

1. Бауэр А. А., Кушнарченко В. М., Пятаев А. Е., Чирков Ю. А. Надежность трубопроводов, транспортирующих сероводородсодержащие среды. Монография. Надежность трубопроводов, транспортирующих сероводородсодержащие среды [Электронный ресурс]: Монография : монография. - Оренбург: ОГУ, 2015. - 592 с. – Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/97973> .

2. Тугунов П.И., Новоселов В.Ф., Коршак А.А., Шаммазов А.М. Типовые расчеты при проектировании и эксплуатации нефтебаз и нефтепроводов [Электронный ресурс]: Учеб. пособие для вузов. - Уфа: Дизайн Полиграф Сервис, 2002. - 655 с – Режим доступа: <http://lib3.sfu-kras.ru/ft/lib2/elib/u62/i-255061.pdf> .

**4.2 Лицензионное и свободно распространяемое программное обеспечение, в том числе отечественного производства (программное обеспечение, на которое университет имеет лицензию, а также свободно распространяемое программное обеспечение):**

1. Microsoft Office Professional Plus 2010 Russian. Офисный пакет Microsoft Office.

**4.3 Интернет-ресурсы, включая профессиональные базы данных и информационные справочные системы:**

1. Электронная правовая система "КонсультантПлюс". <https://www.consultant.ru>  
Электронная правовая система "КонсультантПлюс"

2. Электронная библиотека РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина  
<http://elib.gubkin.ru/>

## **5 Фонд оценочных средств**

Фонд оценочных средств является приложением к рабочей программе дисциплины (модуля), хранится на кафедре, обеспечивающей преподавание данной дисциплины (модуля).

**6 Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)**

Для организации образовательного процесса необходима следующая материально-техническая база:

1) учебные аудитории для проведения учебных занятий по дисциплине, оснащенные специализированной мебелью и демонстрационным оборудованием: проектором, ноутбуком;

2) помещение для самостоятельной работы, оснащенное специализированной мебелью и 12 компьютерами с подключением к сети Интернет и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду Университета

Министерство науки и высшего образования РФ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

### **ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ**

по дисциплине (модулю) Б1.В.ДВ.03.01 Механика растрескивания и разрушения  
трубопроводных систем

Направление подготовки 21.04.01 Нефтегазовое дело

Направленность (профиль) 21.04.01.01 Трубопроводный инжиниринг

**1 Перечень компетенций с указанием индикаторов их достижения, соотнесенных с результатами обучения по дисциплине (модулю), практики и оценочными средствами**

Семестр	Код и содержание индикатора компетенции	Результаты обучения	Оценочные средства
ПК-3 Способен планировать и проводить аналитические, имитационные и экспериментальные исследования, критически оценивать данные и делать выводы			
4	ПК-3.1: Планирует и проводит аналитические, имитационные и экспериментальные исследования	Знать классификацию возможных типов отказов	Разноуровневые задачи и задания. Вопросы для подготовки к промежуточной аттестации
		Уметь определять показатели надежности, долговечности и безопасности	Разноуровневые задачи и задания. Вопросы для подготовки к промежуточной аттестации
		Владеть навыками формализации критериев предельных состояний для соответствующих типов отказов	Разноуровневые задачи и задания. Вопросы для подготовки к промежуточной аттестации
4	ПК-3.2: Проводит критическую оценку данных и делает выводы	Знать механизм разрушения трубопроводных систем и влияние на него осложняющих факторов	Разноуровневые задачи и задания. Вопросы для подготовки к промежуточной аттестации
		Уметь определять остаточный ресурс трубопроводов и технологического оборудования	Разноуровневые задачи и задания. Вопросы для подготовки к промежуточной аттестации
		Владеть навыками анализа причин разрушения трубопроводных систем	Разноуровневые задачи и задания. Вопросы для подготовки к промежуточной аттестации

**2 Типовые оценочные средства или иные материалы, с описанием шкал оценивания и методическими материалами, определяющими процедуру проведения и оценивания достижения результатов обучения**

## Разноуровневые задачи и задания

В данной дисциплине реализуются задачи (задания) репродуктивного уровня.

### Задание 1. Расчёт остаточного ресурса по характеристикам трещиностойкости

Рассчитать остаточный ресурс нефтепроводов по характеристикам трещиностойкости стали.

Расчет остаточного ресурса включает в себя:

1. Определение допускаемой глубины трещиноподобных дефектов по максимальным усредненным рабочим давлениям за принятый к исследованию год эксплуатации.
2. Определение критической глубины трещины при средних рабочих давлениях.
3. Определение остаточного ресурса по характеристикам трещиностойкости стали.
4. Определение предельного разрешенного давления при глубине трещиноподобных дефектов не более допускаемой глубины.

Исходными данными для расчета служат:

1. Результаты испытаний на трещиностойкость при статическом циклическом растяжении образцов стали трубы по ГОСТ 25.506-85;
2. Результаты механических испытаний при однократном растяжении статической нагрузкой образцов стали трубы по ГОСТ 1497-84;
3. Результаты анализа режима работы трубопровода, материалов коррозионных изысканий и обследований.

Исходные данные для расчета выбираются из табл. 1, 2 и 3 по номеру варианта.

Таблица 1. Результаты испытания образцов на трещиностойкость при статическом нагружении по ГОСТ 25.506-85

№ варианта	№ образца	Геометрические характеристики				Максимальное усилие при разрушении $P_c$ , МН	Средняя длина трещины $L_{cp}$ , мм	Глубина усталостной трещины $h$ , мм	Число циклов нагружения $N$
		Ширина, мм	Толщина, мм	Глубина надреза, мм	Площадь сечения нетто, мм				
1	1/2-1	30	6	1,2	144	0,05616	1,730	2,930	66800
2	1/2-2	29,9	6,1	1,3	143,52	0,05597	1,657	2,957	72600
3	1/2-3	29,8	6	1,6	131,12	0,05113	1,482	3,082	59400
4	2/2-1	30,1	6,1	1,5	138,46	0,04830	2,048	3,548	74300

5	2/2-2	30	6	1,5	135	0,04725	1,895	3,395	65900
6	2/2-3	30	6,1	1,5	138	0,04800	1,732	3,232	75100
7	3/2-1	30	6,2	1,5	141	0,04935	1,796	3,296	54800
8	3/2-2	30,1	6,2	1,6	138,46	0,04830	1,729	3,329	49800
9	3/2-3	29,9	6,1	1,5	137,54	0,04795	1,874	3,374	57200
10	4/2-1	30	6,1	1,5	138	0,04830	1,385	2,885	67400
11	4/2-2	30,1	6	1,6	132,44	0,04620	2,015	3,615	72500
12	4/2-3	30,1	6,1	1,4	141,47	0,04900	1,884	3,284	59300
13	5/2-1	30	6	1,5	135	0,04700	1,806	3,306	64400
14	5/2-2	30,1	6,1	1,6	135,45	0,04700	1,351	2,951	65200
15	5/2-3	30,1	6,2	1,6	138,46	0,04830	1,820	3,420	71100
16	6/2-1	30,1	6	1,5	135,45	0,03800	1,836	3,336	81300
17	6/2-2	30	6,1	1,6	135	0,03800	1,495	3,095	72300
18	6/2-3	30,1	6	1,5	135,45	0,03800	1,322	2,822	68400
19	7/2-1	29,9	6,2	1,5	140,53	0,04919	1,749	3,120	74300
20	7/2-2	30	6,1	1,5	138	0,04830	1,600	3,100	88500
21	7/3-3	29,8	6	1,5	131	0,05231	1,481	3,082	59400

Таблица 2. Сводные исходные данные к расчету остаточного ресурса

№ образца	1/2-1	2/2-1	3/2-1	4/2-1	5/2-1	6/2-1	7/2-1
	1/2-2	2/2-2	3/2-2	4/2-2	5/2-2	6/2-2	7/2-2
	1/2-3	2/2-3	3/2-3	4/2-3	5/2-3	6/2-3	7/2-3
Временное сопротивление растяжению $\sigma_{вр}$ , МПа	594	597	598	539	576	532	581
Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$ , МПа	390	408	391	376	395	370	352
Относительное сужение после разрыва $\psi_x$ , %	47,2	60,3	54,3	48,5	44,9	69,9	64,3
Максимальное рабочее давление $P_{max}$ , МПа	3,15	3,1-5	3,15	3,63	2,37	2,89	3,95
Среднее рабочее давление $P_{ср}$ , МПа	2,99	2,99	2,99	3,33	1,89	2,60	3,32'
Толщина стенки трубы, мм	12,5	12,5	12,5	9,0	9,0	8,0	8,0
Наружный диаметр трубы, мм	1020	1020	1020	820	820	530	530
Число циклов перепада давления за год N	295	295	295	289	178	136	156

Таблица 3. Коэффициенты равномерного сужения сечения образцов при испытаниях на растяжение по ГОСТ 1497-84

№ образца	Усредненные рабочие характеристики рабочего сечения			Коэффициент равномерного сужения $\psi_B$
	Начальный диаметр	Диаметр шейки	Диаметр сечения равномерного сужения	
1/2	5	2,98	4,6	18,65
2/2	5	2,77	4,65	13,51
3/2	5	2,85	4,63	14,26
4/2	5	3,03	4,65	13,51
5/2	5	2,95	4,4	22,56
6/2	5	2,5	4,62	14,62
7/2	5	2,6	4,6	15,36

### Инструкции и/или методические рекомендации по выполнению

Остаточный ресурс по характеристикам статической трещиностойкости определяется при наличии установленных диагностикой острых трещиноподобных дефектов.

Расчет остаточного ресурса выполняется по характеристикам статической трещиностойкости при статическом нагружении, определяемым в соответствии с ГОСТ 25.506-85, ГОСТ 1497-84.

Предварительно по данным механических испытаний на одноосное растяжение вычисляются параметры малоциклового трещиностойкости:

$$\psi_B = \frac{F - F_B}{F} \quad (1)$$

$$m = -\ln(1 - \psi_B) \quad (2)$$

$$n = 1 + m \quad (3)$$

$$\varepsilon_{i \text{ пр}} = \frac{\ln(1 + \psi_k)}{\varepsilon_{0,2}} \quad (4)$$

$$C = \frac{1}{2\pi \cdot \varepsilon_{i \text{ пр}}^n} \quad (5)$$

где  $\psi_B$  - коэффициент равномерного сужения сечения при растяжении;

$\psi_k$  - коэффициент относительного сужения при разрыве;

$F$  - исходная рабочая площадь сечения образца;

$F_B$  - площадь сечения образца в зоне равномерного сужения;

$\varepsilon_{0,2} = 0,002$  - относительная остаточная деформация, равная 0,2%.

Характеристики статической трещиностойкости определяются по результатам циклических испытаний образцов в соответствии с ГОСТ 25.506-85:

1) разрушающее напряжение по максимальной разрушающей силе  $P_c$  для образца с трещиной

$$\sigma_c = \frac{P_c}{b \cdot t} \quad (6)$$

где  $b$  - ширина образца;

$t$  - толщина образца "брутто";

2) степень снижения разрушающих напряжений от наличия трещин в образце при относительной глубине трещины, равной  $\eta = h/t = 0,5$

$$\alpha_{TF}^{(0,5)} = \frac{2\sigma_c}{\sigma_{вр}} \quad (7)$$

где  $\sigma_{вр}$  - временное сопротивление растяжению;

3) предел трещиностойкости для относительной глубины равной  $\eta = 0,5$ ,

$$I_c^{(0,5)} = 5\sigma_c \cdot \sqrt{h} \quad (8)$$

где  $h$  - полная глубина трещины на образце;

4) разрушающие кольцевые напряжения для бездефектной трубы с учетом характеристик циклической трещиностойкости

$$\sigma_{\infty} = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{\sigma_{0,2}}{\varepsilon_{0,2}^m} \left( \frac{m}{\sqrt{3}} \right)^m \quad (9)$$

где  $\sigma_{0,2}$  - условный предел текучести.

Допускаемая глубина трещины определяется по максимальному усредненному давлению из совместного решения двух функций, образующих равенство

$$K_I = I_c / m_I \quad (10)$$

где  $K_I$  - коэффициент интенсивности напряжений при максимальном усредненном давлении, МПа  $\times \sqrt{M}$ ;

$I_C$  - предел трещиностойкости для допускаемой глубины трещины, Мпа  $\times \sqrt{M}$ ;

$m_I$  - коэффициент запаса по пределу трещиностойкости, определяемый по формуле

$$m_I = \frac{\sigma_{0,2}}{\sigma_p} \left( \frac{1 - (\sigma_p / \sigma_{\varepsilon p})^2}{1 - (\sigma_{0,2} / \sigma_{\varepsilon p})^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

где  $\sigma_p$  - уровень рабочих напряжений, в данном случае равен кольцевым напряжениям при максимальном давлении

$$\sigma_p = \frac{P_{\max} \cdot D_{вн}}{2t_n} \quad (12)$$

где  $D_{вн}$  - внутренний диаметр трубы, м;

$t_n$  - толщина стенки, м.

Коэффициент интенсивности напряжений определяется по формуле

$$K_I = \sigma_p \sqrt{h} \cdot Y(\eta) \quad (13)$$

где  $Y(\eta)$  - полином, зависящий от текущего значения относительной глубины трещины  $\eta$ . Для образца типа 5 по ГОСТ 25.506-85\*

$$Y(\eta) = 1,99 - 0,41\eta + 18,7\eta^2 - 38,48\eta^3 + 53,85\eta^4 \quad (14)$$

Предел трещиностойкости определяется по формуле

$$I_c = 0,4 \cdot I_c^{(0,5)} \cdot \frac{\alpha_{TR}}{\alpha_{TR}^{(0,5)}} (1 - \eta) Y(\eta) \quad (15)$$

где  $\alpha_{TR}$  - степень разрушающих напряжений при текущем значении

$$\alpha_{TR} = 1 - 4\eta(1 - \eta) \cdot (1 - \alpha_{TR}^{(0,5)}) \quad (16)$$

Из совместного решения уравнений (13) и (15) с учетом коэффициента  $m_I$  в соответствии с равенством (10) получается допускаемая относительная глубина трещины  $\eta_{mp}$ .

Критическая глубина трещины определяется для среднего рабочего давления за исследуемый период.

Для этого из совместного решения уравнения (13) и (15) при коэффициенте запаса по пределу трещиностойкости  $m_I$  равном единице ( $m_I = 1$ ), определяется относительное значение критической глубины трещины  $\eta_{кр}$ .

Остаточный ресурс определяется по времени роста трещины от допускаемой глубины до критической при усредненном максимальном давлении перекачки по формуле

$$T_s = \frac{N_{TR}}{N_p} \quad (17)$$

где  $N_p$  - расчетное число циклов перепада рабочего давления за 1 год;

$N_{TR}$  - долговечность труб при циклическом нагружении (в числах циклов), определяемая по формуле

$$N_{TR} = \frac{h_0}{h_{\text{кp}}} N_0 \quad (18)$$

где  $h_0$  - начальная глубина трещины, определяемая из данных диагностики. В случае отсутствия острых трещиноподобных дефектов по данным диагностики начальная глубина трещины  $h_0$  принимается равной допускаемой глубине трещины;

$N_0$  - предельное число циклов нагружения

$$N_0 = \frac{h_{\text{кp}} - h_0}{c [K_{Ic}^{(0)}]^m} \quad (19)$$

где коэффициент интенсивности упругопластических деформаций

$$K_{Ic}^{(0)} = \left( \frac{K_I^{(0)}}{\sigma_{0,2}} \right)^{\frac{2}{m+1}} \quad (20)$$

В формулах (9.26) и (9.27):

$c, m$  - параметры;

$K_{Ic}^{(0)}$  - коэффициент интенсивности напряжений, определяемый по формуле (13) для максимального усредненного рабочего давления и начальной глубины трещины.

Предельное разрешенное давление определяется по характеристикам трещиностойкости, определенным при испытаниях на малоцикловую трещиностойкость по формуле

$$\bar{P}_c = \frac{2t}{D_{BH}} \cdot \sigma_{\theta c} \quad (21)$$

где  $\sigma_{\theta c}$  - разрушающее окружное напряжение для трубы с трещиной

$$\sigma_{\theta c} = \alpha_{тр} \cdot \sigma_{\theta b} (1 - \eta) \quad (22)$$

где  $\eta$  - относительная глубина трещины, вычисляемая по начальной глубине трещины, принимаемой равной допускаемой глубине;

$\alpha_{тр}$  - степень снижения разрушающих напряжений;

$\sigma_{\theta b}$  - разрушающее кольцевое напряжение для бездефектной трубы определяемое по формуле (9).

## Задание 2. Расчёт остаточного ресурса по статистике отказов трубопроводов

Произвести расчет остаточного ресурса промышленного трубопровода с вероятностью прогноза 95%.

Участок	Обозначение	1	2	3	4	5	6
Диаметр, мм	d	0,114	0,13	0,159	0,219	0,285	0,325
Толщина стенки, мм	s	5	5	6	6	8	8
Длина участка, м	l	12	11	15	11	15	14
Время эксплуатации участков, лет	$\tau$	7,2	8,5	12,2	10,8	11,2	5,8
Зафиксированное кол-во отказов		4	3	7	5	6	3

## Инструкции и/или методические рекомендации по выполнению

При прогнозировании остаточного ресурса трубопровода возможна ситуация, когда данные об износе его элементов имеются не в полном объеме. Но имеются данные по отказам и информация о величине общего (среднего) износа на момент диагностирования. Величина общего износа равна произведению средней скорости износа на величину наработки к моменту диагностирования

$$\Delta_{\sigma} = V_{\sigma} \cdot \tau_d \quad (1)$$

В данном разделе будет рассматриваться только линейная модель износа, которой соответствует показатель  $m = 1$ . В обозначениях относительного износа, использованных в предыдущих разделах

$$\Delta_{\sigma} = \delta_{\sigma} \cdot t_n \quad \text{и} \quad V_{\sigma} = a_{\sigma} \cdot t_n \quad (2)$$

Следует отметить, что в нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности существует банк данных по скорости общей коррозии, который используется при проектировании трубопроводов для назначения

прибавки на коррозию. Этими данными можно воспользоваться и при диагностировании, принимая в пределах разброса опытных данных верхнее значение  $V_{cp}$ , учитывая при этом очевидное ограничение:

$$V_{cp} < \frac{0,85 \cdot t_n - t_R}{\tau_d} \quad (3)$$

Кроме этого, общий (средний) износ достаточно надежно определяется на прямых участках трубопровода и не требует большого числа точек измерения. Однако для удовлетворительной оценки вариации износа необходимо провести измерение толщины стенки во всех потенциально опасных участках.

Предположим, что условие прочности трубопровода имеет вид  $[\delta] = 1 - \frac{t_R}{t_n} - \delta_0$ , но рассеиванием  $[\delta]$  можно пренебречь, тогда формула для определения  $[\delta]$

$$[\delta] = 1 - \frac{t_R}{t_n} \quad (4)$$

Можно доказать, что такое допущение приводит к некоторому занижению значения расчетного остаточного ресурса и идет в запас.

Допустим, что доля отказавших элементов на момент диагностирования  $\tau_d$  составляет  $\alpha = \frac{r+1}{z}$ , где  $r$  - число отказавших элементов;  $z$  - полное число элементов в трубопроводе (фасонных деталей и отдельных труб). При этом точечная оценка вероятности безотказной работы на момент диагностирования по РД 50-690-89

$$P(\tau_d) = 1 - \alpha \quad (5)$$

В данном случае полагается, что на момент диагностирования возможно дополнительное, не зафиксированное в паспорте, разрушение. Таким образом, в качестве расчетного числа разрушений принимается действительное значение, увеличенное на единицу. Очевидно, что такое допущение идет в запас.

Число элементов  $z$ , включая отрезки труб и фасонные детали, можно определить по паспорту трубопровода или для ориентировочных оценок по формуле

$$z = \frac{L}{\lambda} \quad (6)$$

где  $L$  - длина трубопровода в метрах;

$\lambda$  - среднее расстояние между элементами.

При детерминированном параметре  $[\delta]$  формула для вероятности безотказной работы на момент диагностирования  $\tau_d$  имеет вид

$$P(\tau_d) = \Phi \frac{[\delta]^{-\alpha_{\Phi}} \cdot \tau_d}{S_a \cdot \tau_d} \quad (7)$$

С другой стороны, вероятность безотказной работы на момент диагностирования определена по формуле (5). Приравнявая правые части выражений (5) и (7), получим соотношение

$$\tau_d = \frac{[\delta]}{S_a \cdot U_{1-\alpha} + a_{cp}} \quad (8)$$

Для подсчета остаточного ресурса при линейной модели износа получаем формулу, в которой  $\Gamma=0,01\gamma(1-\alpha)$ :

$$\tau_{ост} = \frac{[\delta]}{S_a \cdot U_{\gamma(1-\alpha)} + a_{cp}} - \tau_d \quad (9)$$

Исключив из последних двух уравнений  $S_a$  получим следующее выражение для расчета остаточного ресурса:

$$\tau_{ост} = \tau_d \cdot \frac{[\delta] - \delta_{cp}}{\frac{[\delta]}{U_{1-\alpha} / U_{\gamma(1-\alpha)} - 1} + \delta_{cp}} \quad (10)$$

В данном выражении  $[\delta]$  вычисляется по формуле (4), а

$$\delta_{cp} = a_{cp} \cdot \tau_d = \frac{V_{cp}}{t_n} \cdot \tau_d \quad (11)$$

Задавая величину  $V_{cp}$ , по формулам (11) и (10) можно определить остаточный ресурс. Отметим, что в расчете по данной методике не используется понятие доверительной вероятности, т.к. задается априорное значение скорости износа.

Описанный в данном разделе метод расчета может быть применен только для ориентировочных оценок, если отсутствуют измерения толщины стенки элементов трубопровода, но в их паспортах имеется достоверная информация об имевших место разрушениях. В расчете следует учитывать лишь те отказы, которые связаны с износом трубопровода и возникшей течью. Необходимо располагать данными по скорости общей коррозии, а число элементов должно быть не меньше необходимого значения по РД 50-690-89.

Данный метод может быть использован в дополнение к традиционному расчету, изложенному в предыдущем разделе. При этом в формулу (11) следует подставлять верхнюю оценку средней скорости коррозии  $a_{cp}^*$ . После проведения двух расчетов в качестве действительного значения остаточного ресурса следует принимать минимальную из полученных оценок. Результаты расчетов по обоим методам становятся вполне сопоставимыми, если они выполнены по линейной модели и скорость износа стенки в обоих случаях принималась постоянной. Линейная модель износа достаточно широко используется на практике при расчете ресурса трубопроводов.

Достоинством предлагаемого метода оценки остаточного ресурса является то, что рассеивание параметров износа определяется по относительному числу отказов. Физическая природа этих отказов не имеет значения, поэтому метод может быть распространен и на другие типы разрушения.

## Критерии оценивания

– оценка «отлично»: решение задачи правильное. Описание хода ее решения подробное, последовательное, грамотное, с теоретическими обоснованиями (в т.ч. из лекционного курса), с необходимыми схематическими изображениями объекта расчета и их пояснением. При защите задачи студент правильно и свободно владеет терминологией, может объяснить ход решения задачи, дает верные и четкие ответы на дополнительные вопросы.

– оценка «хорошо»: решение задачи правильное. Описание хода ее решения имеется, но недостаточно подробное и логичное, с единичными ошибками в деталях, некоторыми затруднениями в теоретическом обосновании (в т.ч. из лекционного материала), в схематических изображениях объекта расчета. При защите задачи студент владеет только основной терминологией, может объяснить ход решения задачи, дает верные, но недостаточно четкие и полные ответы на дополнительные.

– оценка «удовлетворительно»: решение задачи правильное. Объяснение хода ее решения недостаточно полное, непоследовательное, с ошибками, слабым теоретическим обоснованием (в т.ч. лекционным материалом), со значительными затруднениями и ошибками в схематических изображениях объекта расчета. При защите задачи ответы на дополнительные вопросы недостаточно четкие, с ошибками в деталях.

– оценка «неудовлетворительно»: решение задачи неправильное. Объяснение хода ее решения дано неполное, непоследовательное, с грубыми ошибками, без теоретического обоснования (в т.ч. лекционным материалом), без умения схематических изображений объекта расчета, или с большим количеством ошибок. При защите задачи ответы на дополнительные вопросы неправильные или отсутствуют.

### **Вопросы для подготовки к промежуточной аттестации**

1. Какие основные механизмы растрескивания трубопроводных систем существуют и как они влияют на их надежность?

2. Как классифицируются виды разрушения трубопроводных систем и чем они отличаются по характеру повреждений?

3. Какие внутренние и внешние нагрузки являются определяющими в процессе образования трещин в трубопроводах?

4. Как эксплуатационные факторы, такие как давление и температура, влияют на долговечность трубопроводных систем?

5. Каким образом коррозионные процессы способствуют снижению механической прочности трубопроводов?

6. Какие методы неразрушающего контроля применяются для выявления и оценки растрескивания в трубопроводных системах?

7. Как локальные напряжения и деформации способствуют образованию трещин в конструкциях трубопроводов?
8. Какие современные модели расчёта позволяют прогнозировать развитие растрескивания в трубопроводных системах?
9. Как особенности сварных швов влияют на механическую прочность трубопроводов и их склонность к растрескиванию?
10. Какие нормативные документы и стандарты регулируют испытания трубопроводных систем на устойчивость к разрушениям?
11. Как температурные режимы влияют на процессы растрескивания и разрушения трубопроводов?
12. Какие подходы используются для мониторинга состояния трубопроводов и раннего выявления дефектов?
13. Как изменение химического состава и микроструктуры материалов влияет на их устойчивость к растрескиванию?
14. Какие преимущества и ограничения имеют аналитические и численные методы расчёта прочности трубопроводных систем?
15. Какие профилактические меры могут быть применены для продления срока службы трубопроводов?
16. Каким образом вибрационные нагрузки способствуют развитию трещин, и как их можно учитывать в расчетах?
17. Какие технологические особенности монтажа и эксплуатации трубопроводов могут способствовать образованию трещин?
18. Как экологические и климатические факторы влияют на процессы разрушения трубопроводных систем?
19. Какие современные материалы и технологии используются для повышения устойчивости трубопроводов к растрескиванию?
20. Как цифровое моделирование и симуляция помогают прогнозировать поведение трубопроводных систем при различных нагрузках?
21. Какие типы дефектов в трубопроводных системах являются наиболее критичными для обеспечения их безопасной эксплуатации и почему?
22. Какие методы оценки остаточного ресурса трубопроводов применяются с учетом накопленного растрескивания?
23. Как интеграция лабораторных испытаний и полевых наблюдений повышает точность диагностики состояния трубопроводов?
24. Какие ключевые факторы следует учитывать при разработке стратегии ремонта и реконструкции трубопроводных систем?
25. Как влияет циклическая нагрузка на накопление повреждений и развитие трещин в трубопроводных системах?
26. Какие механизмы саморазмножения трещин существуют и как они отражаются на эксплуатационном ресурсе трубопроводов?
27. Как изменение условий эксплуатации (например, колебания давления или температуры) влияет на динамику развития трещин?
28. Какие методы расчёта риска и надежности трубопроводных систем применяются для оценки вероятности растрескивания?

29. Как современные информационные технологии и системы мониторинга способствуют принятию оперативных решений по предотвращению разрушения трубопроводов?

### **Инструкции и/или методические рекомендации по выполнению**

Форма промежуточной аттестации – экзамен.

Экзамен проводится в письменно-устной форме по билетам.

Экзаменационный билет включает два вопроса из списка, приведенного выше.

Студенту отводится время на ответ в письменном виде. Допускается ответ в виде схем и рисунков. После письменного ответа студент переходит к устной беседе с преподавателем, при которой возможно изменение условий вопроса в билете преподавателем или дополнительные вопросы, как по билету так и в целом из списка вопросов к экзамену. После беседы преподаватель оценивает ответы студента по шкале: «неудовлетворительно», «удовлетворительно», «хорошо», «отлично».

### **Критерии оценивания**

– «отлично» выставляется обучающемуся, если он глубоко и прочно усвоил программный материал, исчерпывающе, последовательно, четко и логически стройно его излагает, умеет тесно увязывать теорию с практикой, не затрудняется с ответом при видоизменении заданий, владеет разносторонними навыками и приемами выполнения практических задач;

– «хорошо» выставляется обучающемуся, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, не допускает существенных неточностей в ответе на вопрос, владеет необходимыми навыками и приемами их выполнения;

– «удовлетворительно» выставляется обучающемуся, если он имеет знания только основного материала, но не усвоил его деталей, допускает неточности, недостаточно правильные формулировки, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, испытывает затруднения при выполнении практических работ

– «неудовлетворительно» выставляется обучающемуся, если он не знает значительной части программного материала, допускает существенные ошибки, неуверенно, с большими затруднениями выполняет практические работы

При наличии обучающихся из числа лиц с ограниченными возможностями здоровья, в соответствии с индивидуальной программой реабилитации инвалида оценочные средства выбираются с учетом их индивидуальных психофизических особенностей.

### **Процедура проведения промежуточной аттестации с привлечением Комиссии ПА**

Проведение промежуточной аттестации (ПА) с привлечением Комиссии ПА осуществляется в целях внутренней независимой оценки качества подготовки обучающихся. Во время проведения промежуточной аттестации по дисциплине с привлечением Комиссии ПА вопросы обучающимся имеет право задавать и оценивать результаты ответов обучающихся только педагогический работник, проводящий занятия по дисциплине.

Комиссия ПА присутствует в качестве наблюдателей во время проведения промежуточной аттестации по дисциплине и осуществляет оценку процедуры проведения промежуточной аттестации и оценку результатов промежуточной аттестации.

Оценка процедуры промежуточной аттестации по дисциплине (модулю) осуществляется Комиссией ПА на основе анализа ФОС

по следующим позициям:

- наличие рецензированного ФОС;
- наличие описания в ФОС процедуры проведения ПА с привлечением Комиссии ПА;
- соответствия оценочных материалов для проведения экзамена содержанию дисциплины и формируемым компетенциям.

Разработчик  Сокольников А.Н.