

# ОСНОВНЫЕ ПОДХОДЫ К МАТЕМАТИЧЕСКОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ И ПЛАНИРОВАНИЮ ДТОиР ВНУТРЕННИХ ЭЛЕМЕНТОВ ОБОРУДОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ ПЕРЕРАБОТКИ ГАЗА

**Нефедов Сергей Васильевич**

Главный научный сотрудник КНТЦ УТСЦ ПО

Нефедов С.В., Федотова А.И., Ряховских И.В. (ООО «Газпром ВНИИГАЗ»),  
Савинов С.Г., Фомин В.В. (ПАО «Газпром»)

VII Международный научно-практический семинар «Повышение надежности магистральных газопроводов, подверженных коррозионному растрескиванию под напряжением» (КРН-2024)



### Модель прогнозирования технического состояния статического оборудования объектов переработки газа для оптимизации планирования диагностики, технического обслуживания и ремонта

Цель работы – повышение надежности статического технологического оборудования переработки газа при капитальном ремонте ПАО «Газпром»

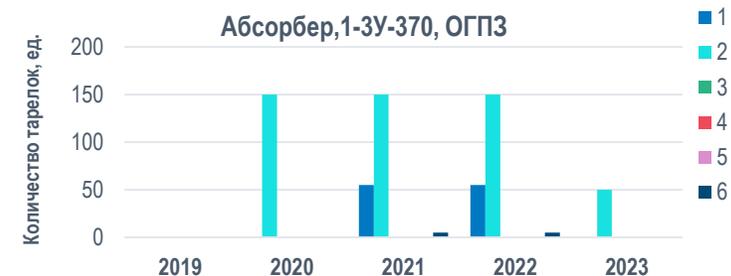
Задачи:

- на основе результатов статистического анализа накопленных эксплуатационных данных сформировать **статистические модели прогнозирования ТС** статического оборудования, выполнить верификационные расчеты
- на основе анализа фактических данных о причинах отказов и дефектах статического оборудования сформировать **физические модели** возникновения, накопления и развития повреждений конструктивных элементов оборудования, выполнить оценку параметров кинетических моделей развития коррозионных и коррозионно-механических дефектов и повреждений, моделей прочности и разрушения ВКУ
- в соответствии с Программой выполнить **экспериментальные исследования и испытания** образцов конструктивных элементов для оценки параметров физических моделей, обработку результатов испытаний и **оценку достоверности** физических моделей
- .....
- сформировать предложения по **цифровизации аналитических моделей** прогнозирования ТС и планирования ДТОиР статического оборудования (в части ВКУ), включая: предложения по разработке классификаторов и БД процесса ДТОиР статического оборудования
- сформировать предложения по дальнейшим **экспериментальным исследованиям** статического оборудования (в части ВКУ) для верификации и актуализации Модели

# Дефекты и повреждения внутренних контактирующих элементов (ВКУ) сосудов и аппаратов объектов переработки

Характерные виды и обобщенные параметры контроля повреждений абсорберов и десорберов АГПЗ и ОГПЗ

№ п/п	Наименование повреждения	Элемент СРД	Контролируемый параметр повреждений
1.	Общий и локальный коррозионный износ	Внутренний вылет штуцеров (тело, фланцы, крепежные элементы, сварные швы, опорные элементы), тарелки (полотна, опорные балки (горизонтальные и вертикальные), переливные карманы, клапаны, крепежные элементы, сварные швы) обечайки (тело, сварные швы, места приварки штуцеров) Гальваническая коррозия - места контакта металлов, с разными электродными потенциалами (полотно тарелки и опорного элемента). Возможна межкристаллитная коррозия нержавеющей сталей (полотно тарелок, клапаны тарелок)	Для общей коррозии (эрозии) - глубина, для локальных повреждений - глубина и площадь поражения. Замеры проводятся только для обечаек и штуцеров. Методы: ВИК, УЗТ.
2.	Сероводородно-коррозионное растрескивание под напряжением и водородное индуцированное растрескивание металла и сварных швов. Необходимо подтверждение данного повреждения путем проведения испытаний	Корпус сосуда и ВКУ, сварные швы	Длина (высота), площадь поражения (размеры). Не контролируется. Замеры проводятся только для сварных швов и основного металла обечаек.
3.	Охрупчивание и растрескивание металла. Необходимо подтверждение данного повреждения путем проведения испытаний.	Корпус сосуда и ВКУ, сварные швы	Ударная вязкость, критическая температура хрупкости. Замеры на ВКУ не проводятся, проводятся только для обечаек и штуцеров.
4.	Напряжения и деформации металла при эксплуатационных нагрузках (прогибы, нарушение проектного положения)	Полотна тарелок, горизонтальных опорных элементов, опоры внутренних штуцеров.	Глубина прогиба. Замеры зачастую не проводятся. Только визуальный осмотр.
5.	Образование отложений на поверхности металла. (заклинивание клапанов полотен тарелок)	Внутренняя поверхность сосуда и ВКУ	Толщина и площадь отложения. Зачастую замеры не проводятся. Только визуальный осмотр.



- 1 - коррозия полотна
- 2 - наличие загрязнений полотна/элементов
- 3 - нарушения механической целостности (разрывы полотна, трещины, надломы и т.д.)
- 4 - вылет активных элементов (клапанов тарелок)
- 5 - нарушение механической целостности опорных элементов
- 6 - выполнен ремонт / замена





# Перечень исходных данных математической модели прогнозирования с указанием источников их получения и форматов представления

## Для статистических моделей

Параметры ВКУ колонного аппарата 20С01

Наименование установки 1У-70		Возврат к перечню	Загрязнение ВКУ, млн. руб.									
Позиция аппарата по схеме 20С01			- к заполнению									
Периодичность осмотра	1 раз в год											
Дата последнего осмотра	28.05.2023											
Дата предстоящего осмотра	28.05.2024											

№ ВКУ	Тип	Вид	Материал	Примечание	Диаметр, мм	Пото-ность	Кол-во активных элементов	Год установки/замены	2019		2020		2021		2022		2023		2024		2025		2026	
									Выявленные дефекты	Выполнен ремонт/замена	Необходимость замены	Планируемая дата замены	Выявленные дефекты	Выполнен ремонт/замена	Необходимость замены	Планируемая дата замены	Выявленные дефекты	Выполнен ремонт/замена	Необходимость замены	Планируемая дата замены	Выявленные дефекты	Выполнен ремонт/замена	Необходимость замены	Планируемая дата замены
1	тарелка	Клаганная	A.240 Туре410S		3576	2	450	1974	огс	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	
2	тарелка	Клаганная	A.240 Туре410S		3576	2	450	1974	огс	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	
3	тарелка	Клаганная	A.240 Туре410S		3576	2	450	1974	огс	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	
4	тарелка	Клаганная	A.240 Туре410S		3576	2	450	1974	огс	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	
5	тарелка	Клаганная	A.240 Туре410S		3576	2	450	1974	огс	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	
6	тарелка	Клаганная	A.240 Туре410S		3576	2	450	1974	огс	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	
7	тарелка	Клаганная	A.240 Туре410S		3576	2	450	1974	огс	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	
8	тарелка	Клаганная	A.240 Туре410S		3576	2	450	1974	огс	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	
9	тарелка	Клаганная	A.240 Туре410S		3576	2	450	1974	огс	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	
10	тарелка	Клаганная	A.240 Туре410S		3576	2	450	1974	огс	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	
11	тарелка	Клаганная	A.240 Туре410S		3576	2	450	1974	огс	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	
1	насадка	перекрестног очня	08X13		3576	2	12	2005	К,З	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	
2	насадка	перекрестног очня	08X13		3576	2	12	2005	К,З	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	
3	насадка	перекрестног очня	08X13		3576	2	12	2005	К,З	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	
4	насадка	перекрестног очня	08X13		3576	2	12	2005	К,З	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	
5	насадка	перекрестног очня	08X13		3576	2	12	2005	К,З	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	
6	насадка	перекрестног очня	08X13		3576	2	12	2005	К,З	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	
7	насадка	перекрестног очня	08X13		3576	2	12	2005	К,З	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	
8	насадка	перекрестног очня	08X13		3576	2	12	2005	К,З	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	

Выявленные дефекты	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	Итого
К Коррозия полотна	8								8
З Наличие загрязнений полотна/элементов	8								8
МЦ Нарушения мех. целостности (разрывы полотна, трещины, надломы и т.д.)		1	1						2
ЗЗ Забивка активных элементов									0
ВЗ Вылет активных элементов									0
О Нарушение мех. целостности опорных элементов									0
отс Отсутствие дефектов	11								11
<b>Итого</b>	<b>27</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>30</b>

1 ремонт	
2 ремонта	
3 ремонта	
4 ремонта	
полная замена	
погрешность КР	

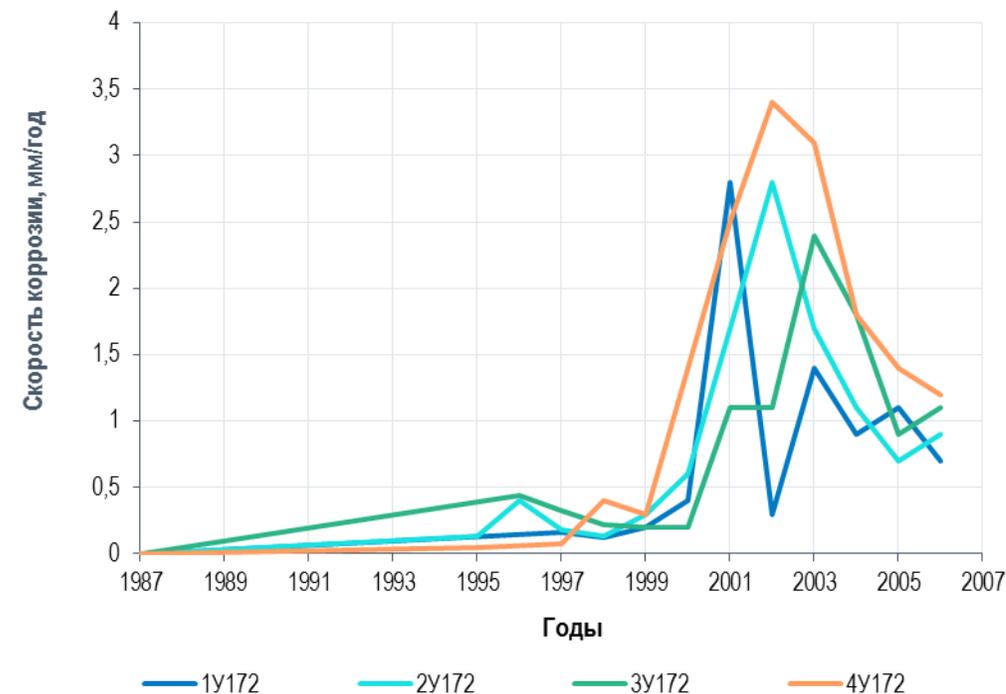
# Перечень исходных данных математической модели прогнозирования с указанием источников их получения и форматов представления

## Для физических моделей

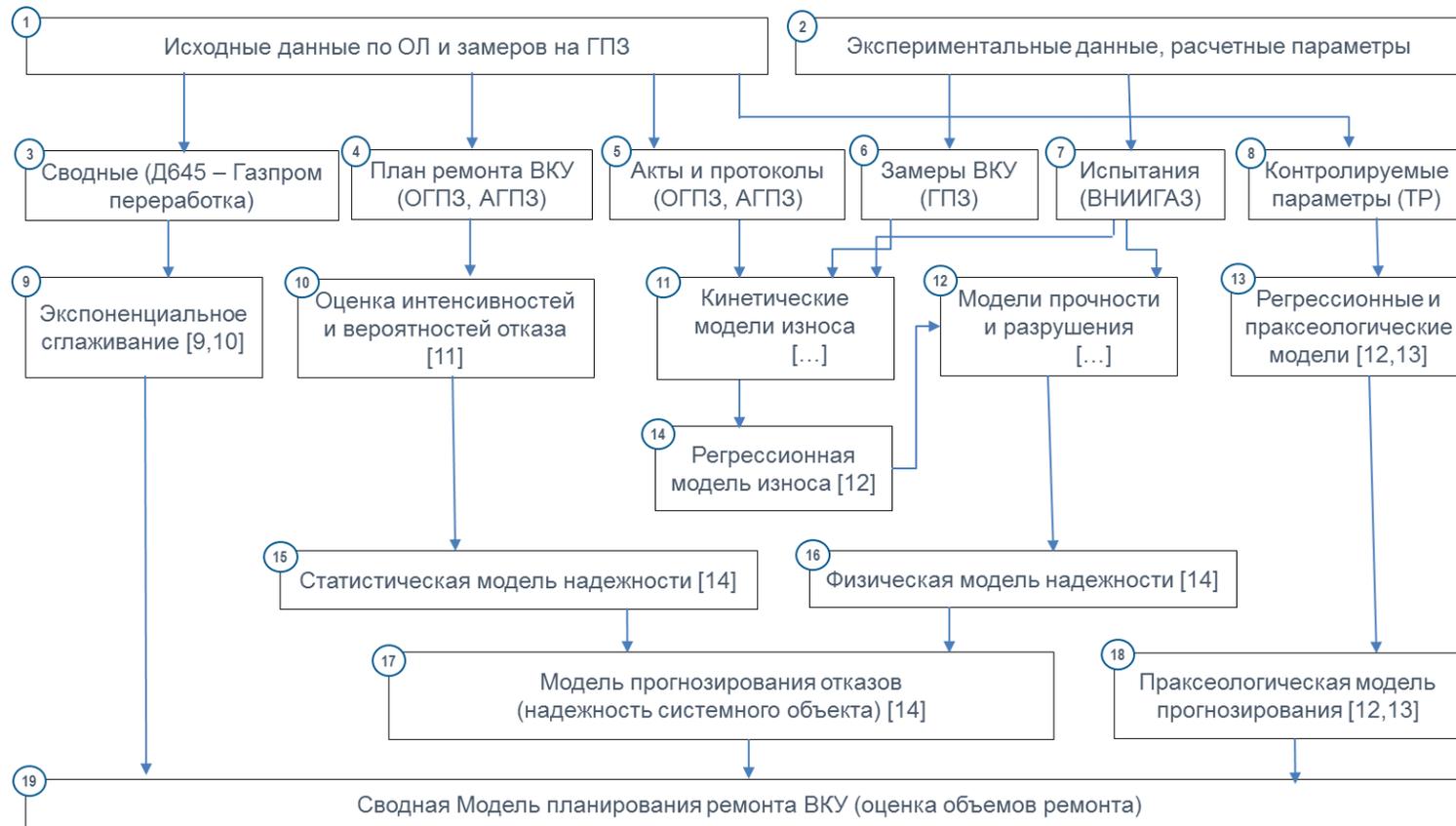
### Скорость коррозии элементов абсорберов установок 1У272, 2У272, 3У172 (по данным заключения экспертизы промышленной безопасности и др.)

Установка			3У272			4У172	4У272		
Ввод в эксплуатацию			2000			1986	2001		
Год ЭПБ			2020	2022	2023	2023	2017	2019	2023
Обечайка	Тарелка	Элемент сосуда	Кср, мм/год	Кср, мм/год	Кср, мм/год	К, мм/год	К, мм/год	К, мм/год	К, мм/год
Днище № 1		Обечайка	0,09		0,08	0,1		0,09	0,1
V1			0,14		0,07	0,081			0,432
		H5	0,09		0,08-0,09				
		A1	0,09					0,09	
		RV1	0,09-0,72		0,09			0,09	
		RV2	0,09-0,72		0,09			0,09	
		RV3-4			0,09				
		E	0,02-0,04		0,09			0,09	
		PI2	0,02-0,03		0,09			0,09	
		PI3			0,09				
		H4	0,07-0,09		0,04-0,09			0,07	
	T	0,03-0,09		0,04-0,09			0,09		
	33								
V2		Обечайка	0,09		0,07	0,086		0,14	0,432
		K2C			0,34				
		K2D			0,3				
		K2E			0,19				
		K2F			0,17				
		32							
	31								
	30								
V3		Обечайка	0,01		0,09	0,065		0,09	0,432
		T1	0,02		0,09			0,09	
		A5	0,03-0,04					0,09	
		S1	0,09		0,09-0,13			0,09	
	S2	0,03		0,09-0,13			0,09		

### Скорость коррозии в абсорберах (кубовая часть) сероочистки газа на установках У-172/272 АГПЗ



[Отчет по НИР № 3848-04-16 от 26.02.2006 на тему «Разработка новых нетрадиционных технологий и создание перспективных систем комплексной защиты от коррозии газотранспортных систем и газопромыслового оборудования» этап 4. 2008]



№	Наименование показателя	Символическое обозначение	Примечание
1	Комплексный технический показатель состояния оборудования (СРД в целом)	$P_{ТС}^X$	Суммарный показатель по всем составным частям оборудования
2	Комплексный технический показатель состояния элемента	$P_{ТС}^X$	Суммарный показатель по всем видам износа элемента
3	Показатель коррозионно-эрозийного износа элемента	$P_{кор}^X, P_{эр}^X$	Расчетный показатель по выбранным моделям износа на основе данных ДО
4	Показатель коррозионно-эрозийного износа корпуса СРД		
5	Расчетный срок службы элемента до ремонта	$T_{рем}^X$	
6	Расчетный срок службы корпуса СРД до ремонта		
7	Планируемый объем ремонта элементов оборудования	$N_{рем}^X$	Расчетный показатель по выбранным физическим или статистическим моделям прогнозирования

## Физические модели

скорость коррозионного износа, критерии разрушения, остаточный ресурс

## Вероятностно-статистические модели

показатели надежности, прогнозный срок ремонта

## Модели коррозионно-эрозионного разрушения

Остаточный ресурс элемента

$$\Gamma = \frac{S_{\phi} - S_{отб}}{CR}$$

$\Gamma$  - остаточный ресурс технического устройства или его элемента  $S_{\phi}$  - фактическая толщина (для стенки сосуда минимальное из полученных при измерении толщины) оцениваемого элемента по результатам диагностирования, мм;  $S_{отб}$  - отбраковочная толщина оцениваемого элемента, мм;  $CR$  - скорость равномерной коррозии (эрозионного износа), мм/год. Величину  $S_{отб}$  назначает специалист, проводящий техническое диагностирование на основе результатов прочностного расчета либо на основе НД

На основе диагностических обследований

$$CR_{ymin1} = (S_{ном} - S_{мин}) / \Delta\tau_0$$

$$CR_{ymin2} = (S_{мин1} - S_{мин2}) / \Delta\tau_1$$

где  $CR_{ymin}$  - скорость износа, мм/год;  $S_{ном}$  - номинальная толщина, мм;  $S_{мин}$  - минимальная толщина, мм;  $\Delta\tau_0$  - интервал времени от даты ввода элемента в эксплуатацию до даты проведения контроля, лет;  $S_{мин1}$  - значение минимальной толщины при предыдущем контроле, мм;  $S_{мин2}$  - значение минимальной толщины при последующем контроле, мм;  $\Delta\tau_1$  - интервал времени между датами эксплуатационных контролей, лет

Математическая модель коррозии на основе экспериментальных исследований

Уравнение регрессии линейной модели с учетом взаимодействия факторов

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_kx_k + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + \dots + b_{k-1,k}x_{k-1}x_k$$

где:  $y$  - результирующая переменная (скорость коррозии),  $X_1 \dots X_{k-1}$  - факторные переменные,  $b_0 \dots b_{k-1}$  - коэффициенты уравнения

Механистическая модель S. Nesić

$$CR = K_{H_2S} CR_{H_2S} + K_{CO_2} CR_{CO_2}$$

$$CR_{CO_2} = A_{CO_2} \ln \frac{C_{b,CO_2} - Flux_{CO_2} \left( \frac{\delta_{os}}{D_{CO_2} \epsilon \psi} + \frac{1}{k_{m,CO_2}} \right)}{C_{s,CO_2}} \quad CR_{H_2S} = A_{H_2S} \ln \frac{C_{b,H_2S} - Flux_{H_2S} \left( \frac{\delta_{os}}{D_{H_2S} \epsilon \psi} + \frac{1}{k_{m,H_2S}} \right)}{C_{s,H_2S}}$$

где:  $CR_{H_2S}$  - скорость коррозии в сероводородной среде, моль/(м<sup>2</sup>с);  $k_{m,H_2S}$  - коэффициент массопереноса  $H_2S$  в пограничном слое жидкости;  $k_{m,H_2S} = 1,0 \times 10^{-4}$  в застойных зонах, м/с;  $D_{H_2S}$  - коэффициент диффузии  $H_2S$  в воде,  $D_{H_2S} = 2,00 \times 10^{-9}$ ;  $\epsilon, \psi$  - пористость и извитость внешнего макинитового слоя,  $\epsilon = 0,9$ ;  $\delta_{os}$  - толщина внешнего слоя, м;  $C_{b,H_2S}, C_{s,H_2S}$  - концентрация  $H_2S$  в объеме раствора и на поверхности стали соответственно.

Эрозионный износ

$$\left( \frac{T - T(p)}{T^*(p)} \right)^2 + \left( \frac{C - C(p)}{C^*(p)} \right)^2 + \left( \frac{H - H(p)}{H^*(p)} \right)^2 = 1$$

где:  $H$  - глубина язвенной коррозии;  $P$  - давление в аппарате;  $T$  - температура;  $C$  - среда

$$\begin{aligned} T(P) &= 180 - 20 \cdot P; \\ C(P) &= 0,25 \cdot P^2 \cdot 10^{-2} - 2,75 \cdot 10^{-1} \cdot P + 3,25 \\ H(P) &= P^2 \cdot 10^{-2} - 6,1 \cdot P \cdot 10^{-1} + 2 \\ T^*(P) &= 120 - 13,4 \cdot P; \\ C^*(P) &= -0,53 \cdot P^2 \cdot 10^{-2} + 2,53 \cdot 10^{-1} \cdot P + 2; \\ H^* &= \frac{0,22 \cdot P^2 \cdot 10^{-1} + 38,24}{0,1 \cdot P + 19,12} \end{aligned}$$

## Модели прочности и разрушения

### Статическое разрушение

При достижении эквивалентных напряжений значений предела прочности или текучести из-за повышенных нагрузок (отложения) либо потери сплошности металла (коррозия и эрозия)

### Потеря устойчивости

При достижении сжимающих напряжений критического значения. Температурные деформации или повышенные нагрузки

### Малоцикловое разрушение

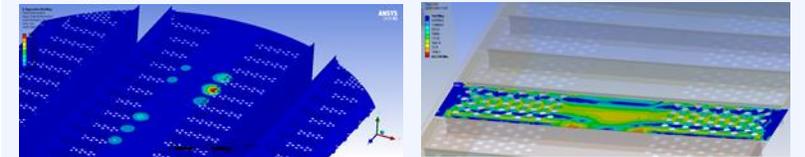
Исчерпание прочности материала под действием переменных нагрузок высокой амплитуды (количество циклов до  $10^5$ )  
Скачки давления, пуск аппарата, вспенивание и т.д.

### Многоцикловое разрушение

Исчерпание прочности материала под действием переменных нагрузок малой амплитуды (количество циклов свыше  $10^5$ )  
Вибрация

### Длительное статическое разрушение

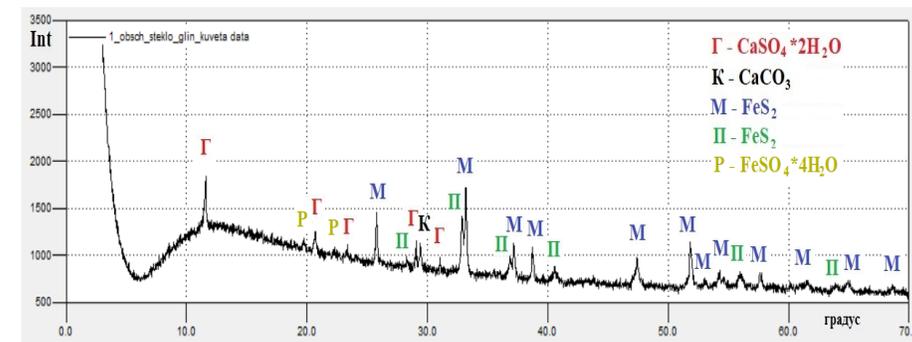
Исчерпание прочности материала при постоянной нагрузке в следствие протекания процессов ползучести  
При температурах эксплуатации не реализуются



## Программа экспериментальных исследований на 2023 год для разработки физических моделей деградации



№ п/п	Эксплуатируемое оборудование	Абсорбер	Десорбер	Результаты исследований
	Метод исследования или контролируемый параметр			
1-й подход				
1	Подбор и доставка элементов ВКУ из АГПЗ и ОГПЗ. Подбор элементов ВКУ для исследований проводится с учетом графика вывода оборудования на ППР			
2	Визуально измерительный контроль (ВИК)			
2.1	Тип повреждений (питтинги, язвы и др.)			
2.2	Площадь повреждений, см <sup>2</sup>			
2.3	Толщина отложений, мм		Элементы тарелок АГПЗ	Оценка коррозионных и механических повреждений. Оценка параметров распределения глубин коррозионных повреждений поверхности металла
2.4	Поверхностные дефекты (коробление, прогибы и другие отклонения от первоначальной формы элемента)			
3	Ультразвуковая дефектоскопия			
3.1	Утонение металла		Образцы металла элементов статического оборудования 50 шт.	Изменение толщины металла
4	Исследования на ударный изгиб (ГОСТ 9454)			
4.1	Механические свойства стали		08X13, образец тип II (АГПЗ) Температура +20 и +100 °С	Соответствие структуры металла требованиям стандарта на соответствующую сталь. Оценка изменения механических свойств в сероводородной среде (сероводородное охрупчивание металла)
5	Испытания на растяжение (ГОСТ 1497)			
5.1	Механические свойства стали		08X13, образец тип 4, 2x8x55 мм (АГПЗ)	Соответствие структуры металла требованиям стандарта на соответствующую сталь. Оценка изменения механических свойств в сероводородной среде.
6	Спектральный анализ			
6.1	Элементный состав металла (стали)		Элементы ВКУ АГПЗ	Содержание легирующих компонентов стали (определение марки стали)
7	Рентгенофазный и рентгеноструктурный анализ			
7.1	Фазовый и структурный состав отложений		5 проб АГПЗ 4 пробы ОГПЗ	Определение доминирующего механизма коррозии
8	Оптический метод или металлографический метод (ГОСТ 25849-83)			
8.1	Глубина коррозионных поражений (поверхностные дефекты)		Элементы тарелок АГПЗ	Оценка глубины коррозионных повреждений
8.2	Микроструктура стали			Соответствие структуры металла требованиям стандарта на соответствующую сталь



Результаты исследования фрагментов тарелок десорбера установки 4У272 АГПЗ (2022 год)

№ темп лета	Место поражения	Вид поражения	Глубина поражения, мм	Размеры поражения, мм	Толщина темплета, мм (по УЗТ)					Толщина отложений, мм
					№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	
1.1					2,4	2,4	2,2	2,2	2,1	1,2
	оборотная сторона	под клапанами	язвы	2						11
1.2		по основному металлу	язвы, питтинги		2,4	2,2	2,1	2,1	2,1	1,1
	оборотная сторона	под клапанами	язвы	2						0,8
2.1		по основному металлу	язвы, питтинги	0,5	2,1	2,2	2,1	2,1	2,1	1
	оборотная сторона	по основному металлу	язвы, питтинги	0,5						0,5
		по основному металлу, места крепления	трещина (надрыв)	55						

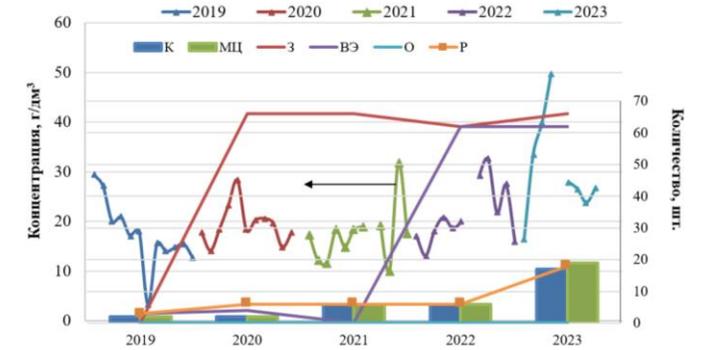
## Механизмы разрушения:

- сероводородная коррозия (общая и локальная)
- углекислотная коррозия
- язвенная коррозия
- гальваническая коррозия
- межкристаллитная коррозия (требует проверки)
- кислородная коррозия
- сероводородное растрескивание
- эрозионный износ
- механическая деструкция металла под действием избыточных нагрузок

## Факторы влияния:

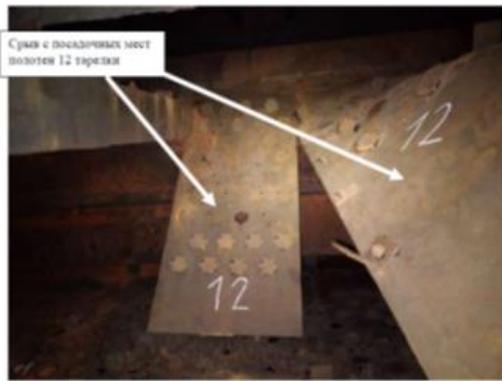
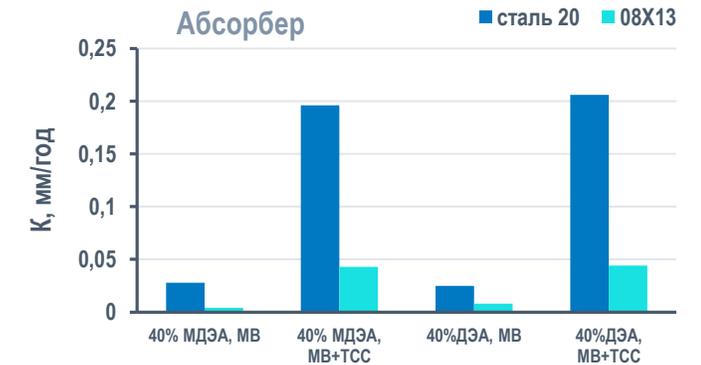
- температура
- парциальное давление CO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>S
- тип абсорбента
- мольное соотношение кислых газов и амина
- минеральный состав раствора абсорбента (амина)
- содержание ТСС в растворе абсорбента
- скорость газожидкостного потока
- количество отложений на поверхности ВКУ

Динамика изменения концентрации H<sub>2</sub>S в насыщенном амине и количества тарелок, на которых обнаружены дефекты (десорберы 2У20СО3/04, 2У-370 ОГПЗ)

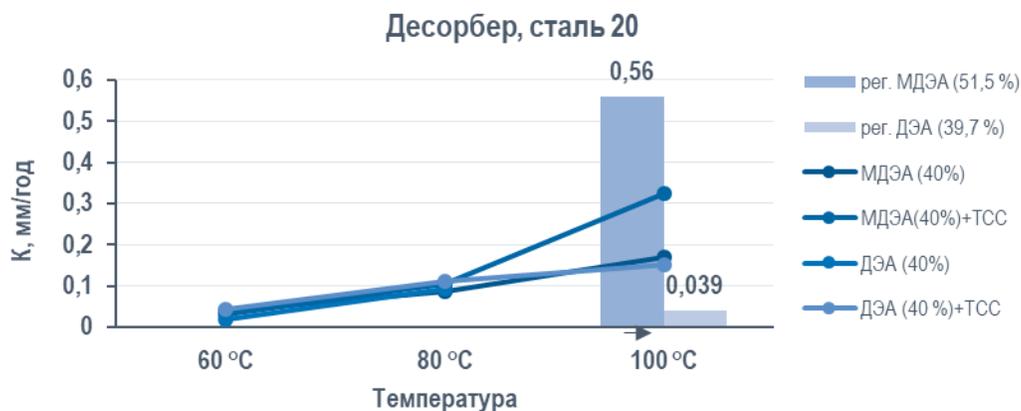


К - коррозия полотна  
 З - наличие загрязнений полотна/элементов  
 МЦ - нарушения механической целостности (разрывы полотна, трещины, надломы и т.д.)  
 ВЭ - вылет активных элементов (клапанов)  
 О - нарушение механической целостности опорных элементов  
 Р - выполнен ремонт / замена

Влияние ТСС на скорость коррозии в 40 % растворах аминов при 90 °С



## Автоклавные исследования



## Исследования темплетов тарелок десорбера CO2 АГПЗ

### Механические свойства

Образец	Температура испытания, °C	Предел текучести ( $\sigma_{0,2}$ ), МПа	Временное сопротивление разрыву ( $\sigma_w$ ), МПа	Относительное удлинение ( $\delta$ ) при $L_0=25$ мм, %	НВ	Ударная вязкость (КСУ), Дж/см <sup>2</sup>
Темплет тарелки десорбера 4У272 АГПЗ (2022 г.)	+20	349	481	14	120-190	70
	+100	-	-	-	-	110
Лист тонкий сталь 08Х13 ГОСТ 5582	+20		410	21		-
Лист сталь 08Х13 сечение 2 мм ГОСТ 5582	+20	257-350	460-510		148-156	235-323
	+100	275-297	430			353
ASTMA240 сталь А 240 Type 405	+20	171	420	20		500

### Элементный состав

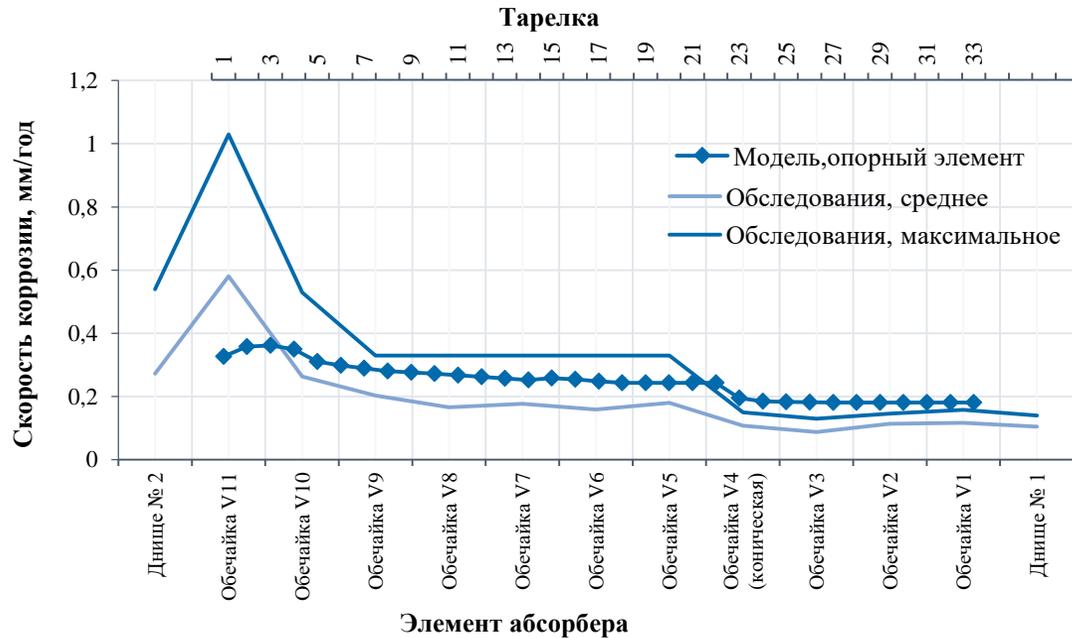
№ пробы	Элемент, %														
	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu	Nb	V	Ti	Mo	Al	Co	W
1.1	0,0692	0,2235	0,1971	0,0298	0,0323	13,5516	0,357	0,1632	0,0069	0,0161	0,0526	0,0304	0,0168	0,0245	0,0047
2.1	0,0777	0,3451	0,2422	0,0155	0,0328	13,1983	0,2558	0,1429	0,007	0,0203	0,0575	0,0256	0,0544	0,0225	0,0028
3.1	0,0719	0,3245	0,2348	0,0325	0,0251	13,1053	0,2522	0,132	0,0075	0,02	0,062	0,0265	0,0649	0,0222	0,0029
4.1	0,062	0,4176	0,2473	0,0151	0,0308	13,0787	0,2097	0,1503	0,0074	0,0173	0,0683	0,0177	0,0829	0,0221	0,0032
5.1	0,0607	0,361	0,2462	0,0184	0,032	13,1328	0,2582	0,1494	0,0074	0,0201	0,0542	0,0284	0,0551	0,0222	0,034
6.1	0,0831	0,44	0,2061	0,0142	0,0303	13,2232	0,2572	0,1621	0,007	0,0172	0,0206	0,0242	0,1032	0,0226	0,0032
7.1	0,0652	0,3955	0,2396	0,0161	0,0279	13,1322	0,2522	0,137	0,0071	0,02	0,0597	0,0276	0,0525	0,0221	0,0029
8.1	0,0657	0,3585	0,2442	0,0243	0,0291	13,3406	0,2531	0,1473	0,007	0,0199	0,0586	0,0282	0,0531	0,0223	0,0033
9.1*	0,0681	0,4157	0,4344	0,0127	0,0301	13,0936	0,2602	0,1403	0,0071	0,0184	0,0343	0,0315	0,071	0,023	0,0036
10.1	0,0609	0,225	0,1903	0,0158	0,0335	13,6487	0,3534	0,163	0,0072	0,016	0,0537	0,0315	0,011	0,0235	0,0041
ГОСТ 5632 Химический состав стали 08Х13	до 0,08	до 0,8	до 0,8	до 0,025	до 0,03	12-14	до 0,6								
ASTMA240 сталь А 240 Type 405	до 0,08	1,0	до 1,0	0,03	0,04	11,5-14,5	до 0,6						0,1-0,3		

## Математическая модель расчета равномерной скорости коррозии

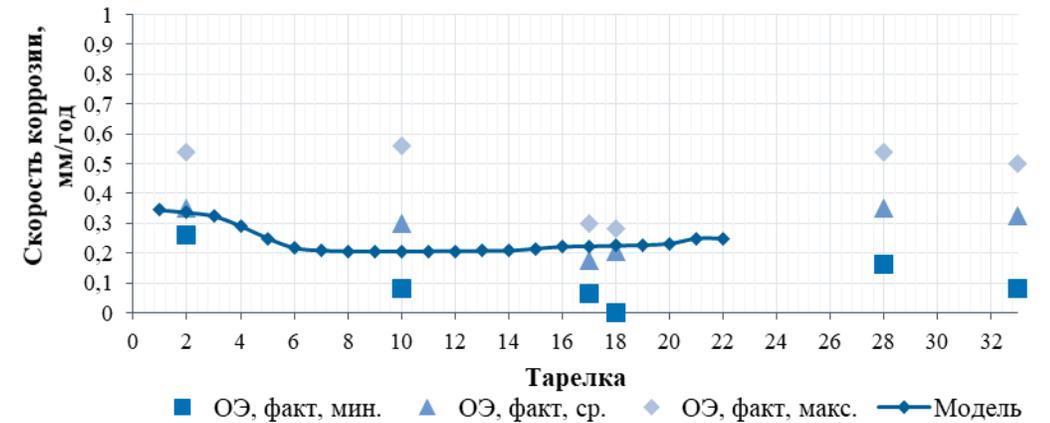
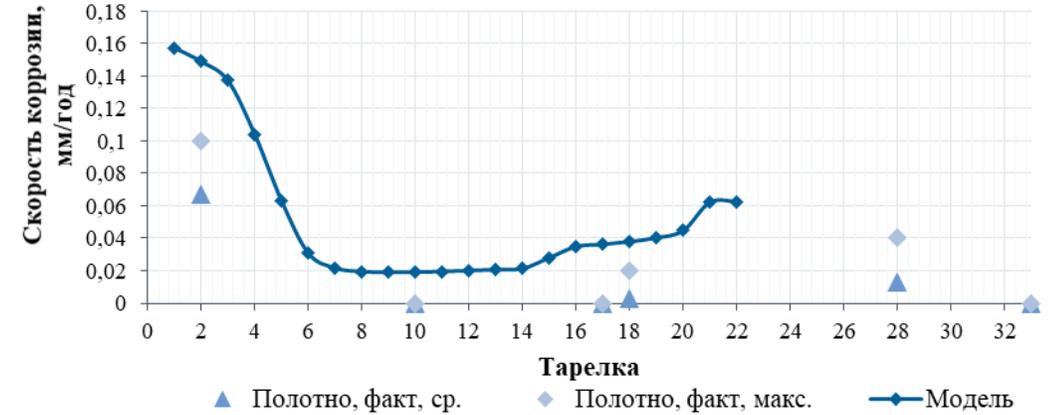
$$CR_{\text{равн}} = b_0 + b_1 P_{H_2S} + b_2 P_{CO_2} + b_3 P_{\text{общ}} + b_4 T + b_5 C_{\text{МДЭА}} + b_6 C_{\text{ДЭА}} + b_7 M + b_8 C_{\text{ТСС}} + b_9 M_{\text{ст}}$$

где:  $CR_{\text{равн}}$  - скорость общей коррозии, мм/год,  $b_0...b_9$  - коэффициенты корреляции, определяющие ход экспоненциальной зависимости, описывающей экспериментальные данные изменения скорости равномерной коррозии,  $P_{H_2S}$  - парциальное давление  $H_2S$ , МПа,  $P_{CO_2}$  - парциальное давление  $CO_2$ , МПа,  $P_{\text{общ}}$  - давление в аппарате, МПа,  $T$  - температура, °С,  $C_{\text{МДЭА}}$  - концентрация МДЭА, масс.%,  $C_{\text{ДЭА}}$  - концентрация ДЭА, масс.%,  $M$  - минерализация (сумма солей  $NaCl$ ,  $CaCl_2$ ,  $Na_2SO_4$ ), г/дм<sup>3</sup>,  $C_{\text{ТСС}}$  - концентрация ТСС (сумма анионов ацетата и формиата), масс.%,  $M_{\text{ст}}$  - марка стали (1 - сталь 20, 2 - сталь 08Х13)

Скорость коррозии стенок абсорбера СО1 АГПЗ по данным диагностических обследований и скорость коррозии ОЭ и полотен тарелок, рассчитанной математической моделью



Результаты выездных исследований ВКУ десорбера CO2 4У272 АГПЗ (протокол от 06.12.2023 № 4367)



# Расчеты остаточного ресурса элементов ВКУ на основе математической модели расчета скорости равномерной коррозии

## Ресурс элементов абсорбера CO1 АГПЗ

Тарелка	Скорость коррозии, мм/год		Ресурс элемента, лет	
	ОЭ (сталь20)	Полотно тарелок (сталь 08X13)	ОЭ	Полотно тарелок
33	0,1907	0,0043	> 20	> 20
32	0,1907	0,0044	> 20	> 20
31	0,1909	0,0046	> 20	> 20
30	0,191	0,0046	> 20	> 20
29	0,1911	0,0047	> 20	> 20
28	0,1912	0,0049	> 20	> 20
27	0,1914	0,0051	> 20	> 20
26	0,1918	0,0054	> 20	> 20
25	0,1927	0,0064	> 20	> 20
24	0,1956	0,0093	> 20	> 20
23	0,2053	0,019	19,5	> 20
22	0,2523	0,066	15,9	15,2
21	0,2523	0,066	15,9	15,2
20	0,2523	0,066	15,9	15,2
19	0,2524	0,066	15,8	15,2
18	0,2524	0,066	15,8	15,2
17	0,2578	0,0715	15,5	14
16	0,2632	0,0769	15,2	13
15	0,2678	0,0815	14,9	12,3
14	0,2612	0,0748	15,3	13,4
13	0,2664	0,0801	15	12,5
12	0,2715	0,0852	14,7	11,7
11	0,2764	0,09	14,5	11,1
10	0,281	0,0947	14,2	10,6
9	0,2852	0,0988	14	10,1
8	0,289	0,1026	13,8	9,7
7	0,2979	0,1116	13,4	9
6	0,307	0,1207	13	8,3
5	0,3196	0,1333	12,5	7,5
4	0,3576	0,1713	11,2	5,8
3	0,37	0,1837	10,8	5,4
2	0,366	0,1797	10,9	5,6
1	0,3346	0,1482	12	6,7

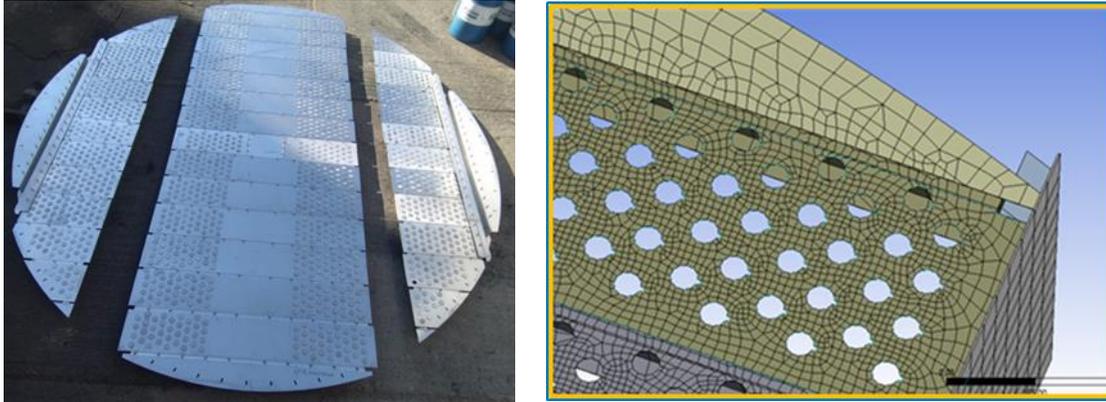
## Ресурс элементов регенератора амина (десорбера) CO1 АГПЗ

Тарелка	Скорость коррозии, мм/год		Ресурс элемента, лет	
	ОЭ (сталь20)	Полотно тарелок (сталь 08X13)	ОЭ	Полотно тарелок
33				
32				
31				
30				
29				
28				
27				
26				
25				
24				
23				
22	0,2487	0,0623	16,1	16,1
21	0,2487	0,0624	16,1	16
20	0,2312	0,0449	17,3	> 20
19	0,2266	0,0403	17,7	> 20
18	0,2244	0,038	17,8	> 20
17	0,2226	0,0363	18	> 20
16	0,2212	0,0349	18,1	> 20
15	0,2144	0,0281	18,7	> 20
14	0,2078	0,0214	19,2	> 20
13	0,207	0,0207	19,3	> 20
12	0,2064	0,0201	19,4	> 20
11	0,2059	0,0196	19,4	> 20
10	0,2055	0,0192	19,5	> 20
9	0,2054	0,0191	19,5	> 20
8	0,2059	0,0195	19,4	> 20
7	0,208	0,0217	19,2	> 20
6	0,2172	0,0308	18,4	> 20
5	0,2496	0,0632	16	15,8
4	0,2904	0,1041	13,8	9,6
3	0,3236	0,1372	12,4	7,3
2	0,3353	0,149	11,9	6,7
1	0,3438	0,1575	11,6	6,3

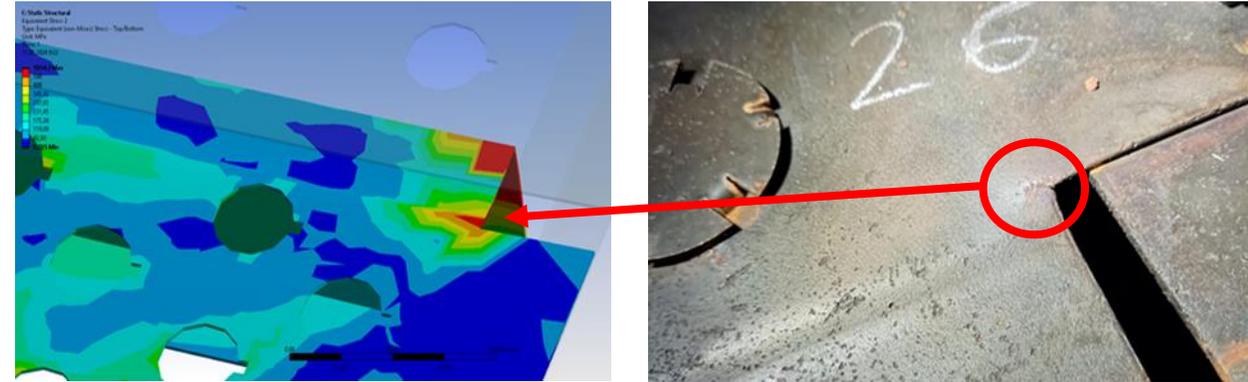
Критерии отбраковки по СТО-СА-03-004-2009: полотно - уменьшение толщины 50% и менее от проектных (толщина полотна – 2 мм, отбраковочная 1 мм); опорный элемент (ОЭ) - уменьшение толщины 25% и более от проектной толщины (толщина ОЭ – 10 мм, отбраковочная 6 мм)

## Расчеты на прочность элементов ВКУ (тарелки)

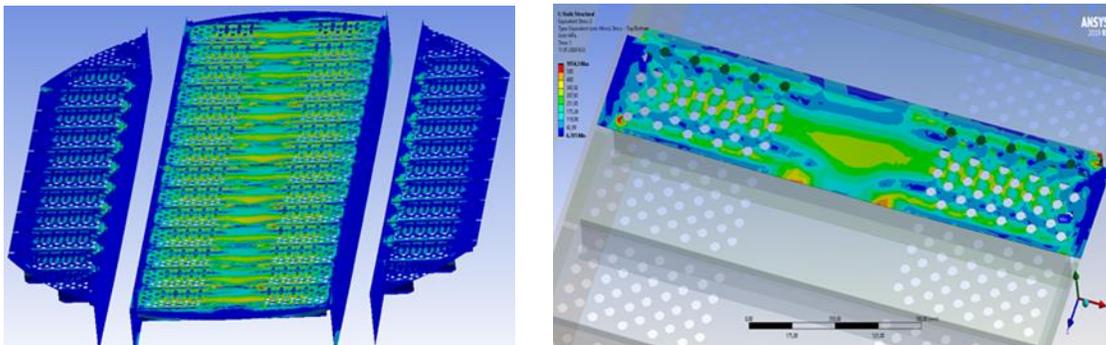
Вид тарелки перед сборкой и конечно-элементная модель участка тарелки



Концентрация напряжений в области резкого изменения формы по результатам МКЭ-расчёта и фактическое расположение трещины в данной области



Деформированная под нагрузкой модель тарелки и распределение эквивалентных напряжений в отдельном полотне



### Повышение достоверности МКЭ-моделирования:

- фактическая толщина стенки элементов, радиусы скругления геометрии элементов в местах изменения форм, геометрические особенности ВКУ
- характер закрепления и места сварных, болтовых, заклепочных соединений
- фактические механические свойства элементов неразрушающими методами контроля или разрушающими методами в случае возможности замены части ВКУ
- фактические показатели по внутреннему давлению, составу газа и температуре

# Расчеты остаточного ресурса элементов ВКУ (тарелки) на основе физической модели прочности и разрушения

Образец для статических и усталостных испытаний

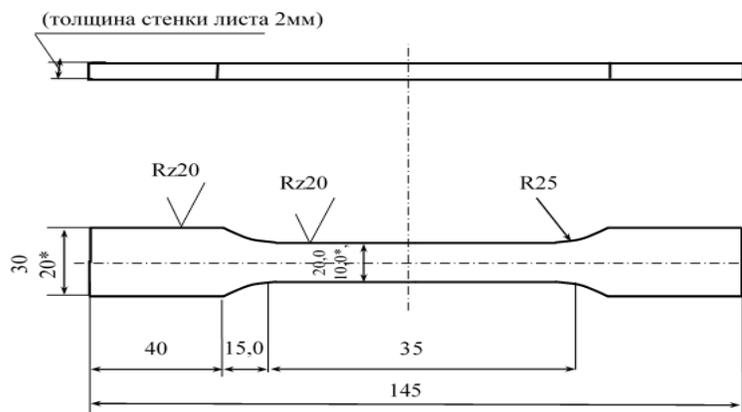
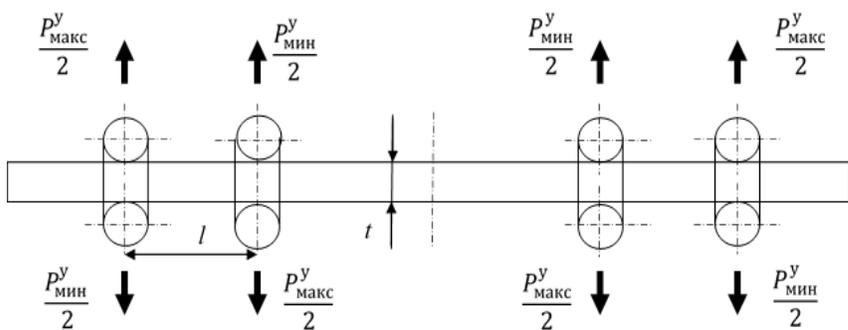


Схема испытаний на чистый изгиб



$$\overline{NC}_{И} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{И}^{уст}} NC_{И}(i)}{N_{И}^{уст}}, \quad \overline{NC}_{Э} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{Э}^{уст}} NC_{Э}(i)}{N_{Э}^{уст}}$$

- среднее число циклов до разрушения отожженных и эксплуатационных образцов

$$C_c = \frac{\overline{NC}_{И} - t_э \cdot NC_{Г}}{\overline{NC}_{Э}}$$

- степень деформационного старения

$$\overline{\sigma}_{В}^{И} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{И}^{ст}} \sigma_{В}^{И}(i)}{N_{И}^{ст}}, \quad \overline{\sigma}_{В}^{Э} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{Э}^{ст}} \sigma_{В}^{Э}(i)}{N_{Э}^{ст}}$$

- средний предел прочности металла ВКУ по результатам испытаний отожженных  $\overline{\sigma}_{В}^{И}$  и не отожженных  $\overline{\sigma}_{В}^{Э}$  образцов

$$K_y = \frac{\overline{\sigma}_{В}^{Э}}{\overline{\sigma}_{В}^{И}}, \quad C_d = \frac{K_y}{C_c}$$

- коэффициенты упрочнения и деформационного старения металла ВКУ

$$T_{ост} = \frac{\overline{t}_и - t_э}{C_d}$$

средний остаточный ресурс ВКУ по результатам испытаний образцов

$t_э$ - исходная наработка	15 лет	20 лет	25 лет
$C_d = K_y / C_c$	1,4	2,3	5,5
$T_{ост} = \frac{\overline{t}_и - t_э}{C_d}$	9,3 года	3,5 года	0,55 года (7 месяцев)

## Постановка задачи экстраполяционной модели

Исходные данные: выборка план-факт ремонтов ВКУ

Варианты:

- выборка «план/факт» единая
- отдельные выборки плановые и фактические

Время / дата / номер	$t_1$	$t_2$	...	$t_N$	$t_{N+1}$
Плановое значение	$x_1$	$x_2$	...	$x_N$	$x_{N+1}$
Фактическое значение	$y_1$	$y_2$	...	$y_N$	$y_{N+1}$

Основная итерационная зависимость метода экспоненциального сглаживания (ЭС)

$$\check{y}_{k+1} = Ay_k + (1 - A)\check{y}_k$$

Коэффициент  $A$  рекомендуется выбирать в интервале 0,2 – 0,5

Алгоритм экстраполяции в линейной постановке с равномерным взвешенным учетом «дальних» значений выборки (ВЭ)

$$\check{y}_{k+1} = \check{y}_k + A(y_k - y_{k-1}) \quad A = \frac{\sum_{i=2}^N [(y_i - y_1)(y_{i-1} - y_1)]}{\sum_{i=2}^N (y_i - y_1)^2}$$

Коэффициент  $A$  оценивается МНК

Алгоритм экстраполяции при наличии плановых  $x_k$  и фактических (реализованных)  $y_k$  значений

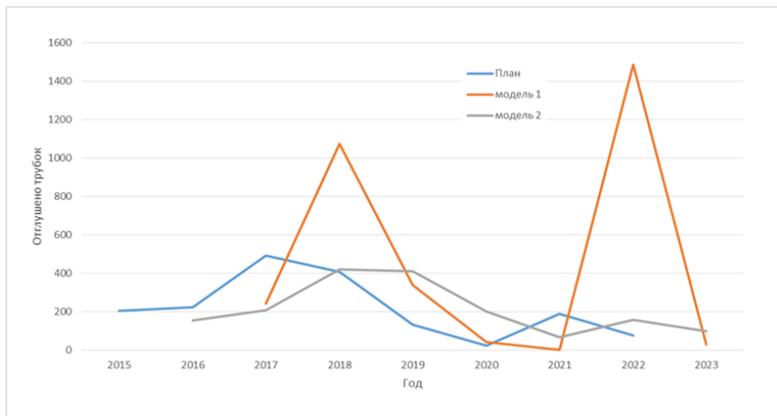
$$\Delta y_k = y_k - x_k$$

$$\Delta \check{y}_{k+1} = B \Delta y_k + (1 - B) \Delta \check{y}_{k-1}$$

Коэффициент  $B$  оценивается МНК

$$\check{y}_{k+1} = \tilde{y}_k + \Delta \check{y}_{k+1}$$

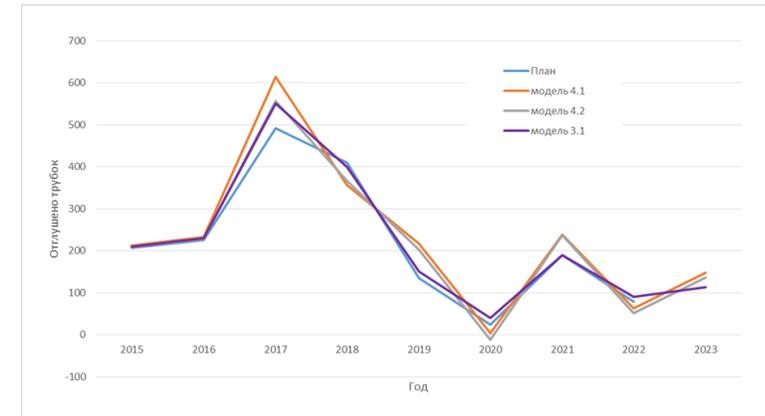
Моделирование прогноза ремонта трубок по моделям 1 и 2 (параметр  $A = 0.75$ )



Моделирование прогноза ремонта трубок по модели 3 (параметр  $A = 0.75$ )



Моделирование прогноза ремонта трубок по моделям 4.1 и 4.2



- ❑ Прогнозные значения в точке «2023» различаются между моделями 4.1 и 4.2 на 8%. Учитывая виртуальную фактическую выборку, ЛПР может не имея точных данных выбрать параметр  $A$  достаточно субъективно. Более состоятельным следует считать прогноз по модели 4.2, поскольку прогноз по модели 4.1 неявно скрывает зависимость от виртуальных данных (через оценку оптимального коэффициента  $B$  при минимизации отклонений «план – факт»). Сравнение с расчетом по модели 3.1 с моделью 4.1 дает в прогнозе большее расхождение – 24%. Расхождения прогноза с виртуальным фактом по моделям 3.1 и 4.1 составляют 0% и 44%.
- ❑ Общий вывод по применению моделей ЭС различного типа: оптимальна модель 3.1. Отметим также, что данный способ прогнозирования показан на примере сводных данных по «отглушенным трубкам», но он применим аналогичным образом для любой отдельной выборки по индивидуальному объекту или типу ремонтов.

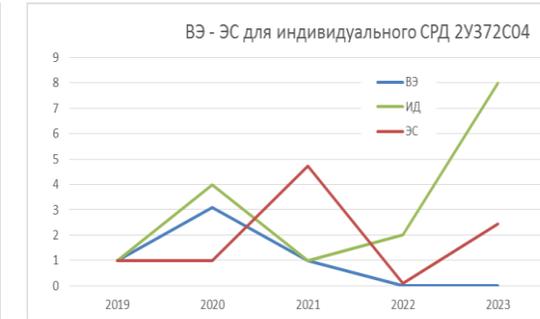
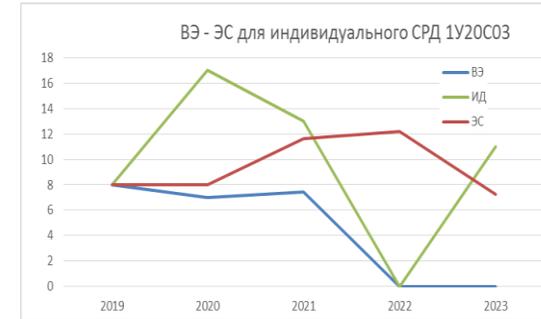
## Моделирование прогноза ремонта трубок

- взвешенная  $A = 0,41$
- оптимальная  $A = 0,21$

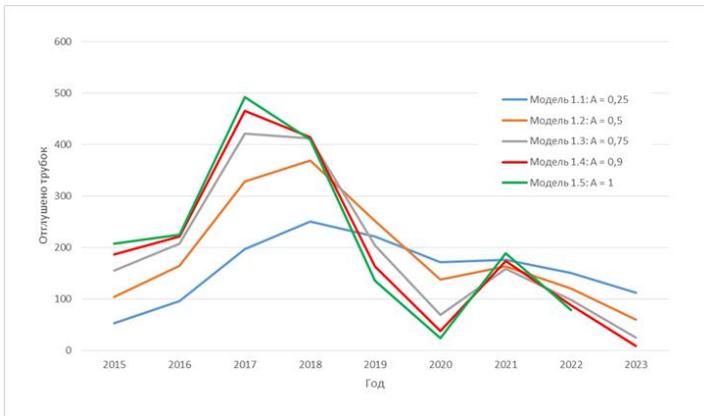
Модель	Год									
	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	
ИД	207	225	492	409	135	24	189	78	-	
ВЭ	207	214	325	291	177	131	200	153	121	
ЭС	207	207	211	271	300	265	214	208	181	



## Сравнительные экстраполяционные оценки методами ВЭ и ЭС-1 для СРД 741К-01 (а) и 2У372С04 (б)



## Сводные диаграммы расчетов по модели ЭС при различных значениях параметра А



- ❑ среди методов экстраполяции оптимальным является наиболее простой метод экстраполяции с взвешенным учетом предшествующих значений выборки (ВЭ)
- ❑ при большей полноте исходной информации (данные об отклонениях плановых значений от фактических) следует оценить возможность применения методов ЭС и ВЭ
- ❑ ожидаемый даже с учетом выбора наиболее оптимального значения коэффициента оптимизации (веса коэффициента) разброс прогнозных значений может слабо коррелировать с физическими оценками объемов ремонта на предстоящий период для сводных исходных данных по всему множеству однотипных объектов (все однотипные СРД) переработки
- ❑ возможна более высокая достоверность оценок экстраполяционных методов для выборок по индивидуальным объектам (индивидуальный СРД, группы ВКУ индивидуального СРД) - в отличие от преимущества модели ВЭ для сводных данных ремонтов ВКУ перед моделью ЭС, для индивидуальных аппаратов колонного типа дисперсия отклонений метода ВЭ от 30 до 50 % выше, чем для метода ЭС

# Точечное и интервальное оценивание параметров распределения отказов

Точечные и интервальные оценки для интенсивности отказов (сводная)

№	Параметр	Вариант суммарной наработки $T^*$ , год	
		8	38
1	Интенсивность отказов $\hat{\lambda}$	0,006214845	0,001308
2	Средняя наработка до отказа $\hat{m}$ , год	161	764
3	Нижняя граница доверительного интервала для интенсивности $\lambda_{L1}$	0,00603	0,00108
4	Верхняя граница доверительного интервала для интенсивности $\lambda_{U1}$	0,00641	0,02096
5	Нижняя граница доверительного интервала для средней наработки $m_{L1}$	20	48
6	Верхняя граница доверительного интервала для средней наработки $m_{U1}$	1206	925
7	Левая граница предикционного интервала $r_{L2}$	71	18
8	Правая граница предикционного интервала $r_{U2}$	9520	171
9	Ожидаемое количество отказавших элементов на следующий год $r_1$	219	46

Точечные и интервальные оценки для интенсивности отказов (тарелки сосуда колонного типа)

№	Параметр	Вариант суммарной наработки $T^*$ , год	
		8	38
1	Интенсивность отказов $\hat{\lambda}$	0,049242424	0,010367
2	Средняя наработка до отказа $\hat{m}$ , год	20	96
3	Нижняя граница доверительного интервала для интенсивности $\lambda_{L1}$	0,03253	0,00685
4	Верхняя граница доверительного интервала для интенсивности $\lambda_{U1}$	0,06716	0,01414
5	Нижняя граница доверительного интервала для средней наработки $m_{L1}$	15	71
6	Верхняя граница доверительного интервала для средней наработки $m_{U1}$	31	146
7	Левая граница предикционного интервала $r_{L2}$	1	1
8	Правая граница предикционного интервала $r_{U2}$	3	6
9	Ожидаемое количество отказавших элементов на следующий год $r_1$	2	0

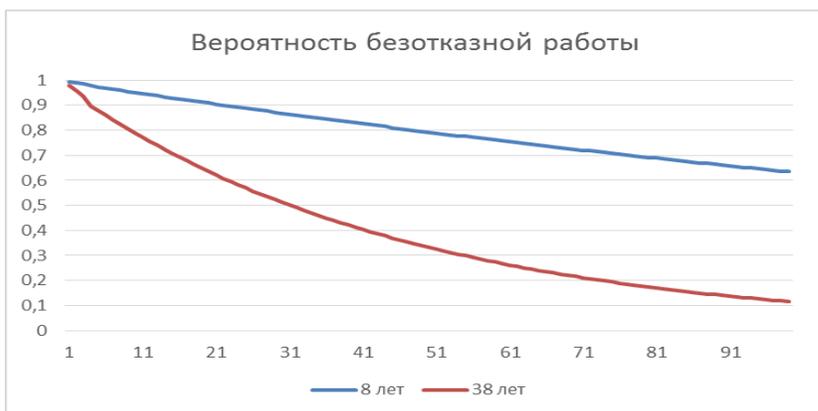
Доверительные и предикционные интервалы

$$\lambda_{L1} = \frac{\chi_{\alpha}^2(2r)}{2NT^*}$$

$$\lambda_{U1} = \frac{\chi_{1-\alpha}^2(2r+2)}{2NT^*}$$

$$\frac{w_f}{r_{L2} + 1} \leq \left(\frac{w_p}{r}\right) F_{1-\frac{\alpha}{2}}(2r_{L2} + 2; 2r)$$

$$\frac{r_{U2}}{w_f} \geq \left(\frac{r + 1}{w_p}\right) F_{1-\frac{\alpha}{2}}(2r + 2; 2r_{U2})$$



Исходные данные по отказам тарелок

Элемент (позиция отчета)	Тип ремонта (ТР, КР) и результат воздействий на оборудование								Сумма отказов	Всего тар-к
	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022		
Колонна 372С03 Регенерация насыщенного водного раствора Новоамина, 33 клапанные тарелки Материал: 12Х18Н10Т	-	-	-	-	3	1	5	4	13	33

Ожидаемое число отказов

$$r_t = \left(1 - e^{-\frac{t}{\hat{m}}}\right) N$$

## Сравнительные оценки частоты ремонта, средней наработки до ремонта и ожидаемого числа ремонтов тарелок колонных аппаратов (объекты ОГПЗ)

№	Наименование устройства, СРД	Количество тарелок	Частота по СРД, 1/год	Сред. наработка, год	Ожидаемое число отказов тарелок за 1 год
1	1У-70 20С01 (тарелки)	11	0,1636	6,1	2
2	1У-70 20С01 (насадки)	8	0,2250	4,4	2
3	1У-70 20С03	21	0,1905	5,3	4
4	1У-70 20С04	21	0,2976	3,4	5
5	3У-70 20С03	21	0,2143	4,7	4
6	У-730 741К-01	30	0,3267	3,1	8
7	У-730 741К-02	20	0,1900	5,3	20
8	2У-370 372С03	33	0,1515	6,6	5
9	2У-370 372С04	33	0,1030	9,7	3
10	3У-370 372С03	33	0,2121	4,7	6



- 1) единичный отказ элемента (например, вследствие потери герметичности трубки или потери несущей способности тарелки);
- 2) отказ сборки по причине отказов к моменту времени  $t$  не менее  $\omega_*$  отказов 1-го типа;
- 3) полный отказ устройства вследствие отказа  $\omega_{**}$  составляющих его сборок (отказов 2-го типа);

## Основные модели оценки вероятности отказа элемента:

- статистическая на основе обработки эксплуатационных данных об отказах;
- физическая на основе оценки вероятности отказа по результатам физико-механического расчета образования и развития дефекта в элементе до образования критической течи, разрушения или потери несущей способности, использующая экспериментальные данные испытаний элементов в условиях приближенных к реальным нагрузок и воздействий;
- расчетная на основе численного статистического моделирования физико-механического процесса разрушения (отказа) элемента

*вероятность времени до отказа 1-го типа*

$$F(h, t) = 1 - \exp \left[ -\frac{1}{N_s} \left( \frac{t - x_0}{x_c} \right)^\alpha \right]$$

*вероятность недопустимости отказов 2-го типа*

$$p_0(h, t) = \exp[-\mu_0 F(h, t)]$$

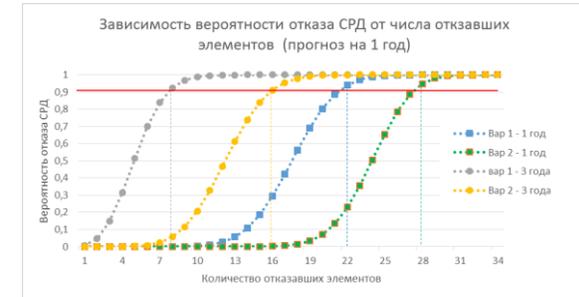
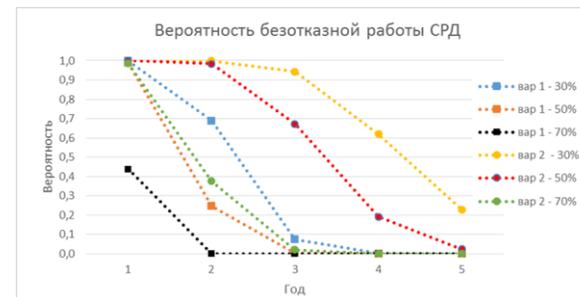
*вероятность отказа  $\omega_{**}$  из  $t$  сборок*

$$P(t) = \sum_{k=0}^{\omega_{**}} C_m^k p(t)^{m-k} q(t)^k$$

*функция надежности сборки*

$$p(t) = \sum_{k=0}^{\omega_*} C_m^k p_0(t)^{n-k} q_0(t)^k$$

*Вероятность безотказной работы СРД и зависимость вероятности отказа СРД от количества отказавших элементов в сборке*



- 1) единичный отказ элемента (например, вследствие потери герметичности трубки или потери несущей способности тарелки);
- 2) отказ сборки по причине отказов к моменту времени  $t$  не менее  $\omega_*$  отказов 1-го типа;
- 3) полный отказ устройства вследствие отказа  $\omega_{**}$  составляющих его сборок (отказов 2-го типа);

## Основные модели оценки вероятности отказа элемента:

- статистическая на основе обработки эксплуатационных данных об отказах;
- физическая на основе оценки вероятности отказа по результатам физико-механического расчета образования и развития дефекта в элементе до образования критической течи, разрушения или потери несущей способности, использующая экспериментальные данные испытаний элементов в условиях приближенных к реальным нагрузкам и воздействий;
- расчетная на основе численного статистического моделирования физико-механического процесса разрушения (отказа) элемента

*вероятность времени до отказа 1-го типа*

$$F(h, t) = 1 - \exp \left[ -\frac{1}{N_s} \left( \frac{t - x_0}{x_c} \right)^\alpha \right]$$

*вероятность недопустимости отказов 2-го типа*

$$p_0(h, t) = \exp[-\mu_0 F(h, t)]$$

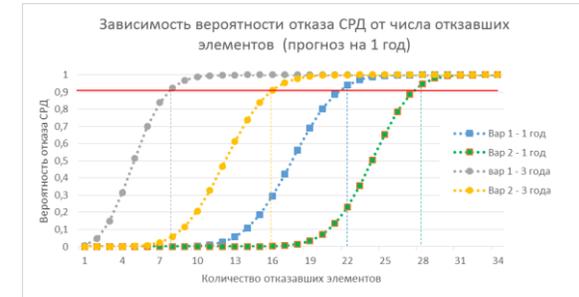
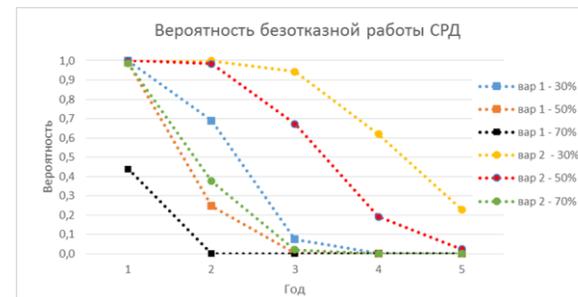
*вероятность отказа  $\omega_{**}$  из  $t$  сборок*

$$P(t) = \sum_{k=0}^{\omega_{**}} C_m^k p(t)^{m-k} q(t)^k$$

*функция надежности сборки*

$$p(t) = \sum_{k=0}^{\omega_*} C_m^k p_0(t)^{n-k} q_0(t)^k$$

*Вероятность безотказной работы СРД и зависимость вероятности отказа СРД от количества отказавших элементов в сборке*



- различные интенсивности отказов (износ) тарелок разного уровня
- групповые критерии отказа тарелок разного уровня (верхние/нижние)
- применение полиномиального распределения для оценки вероятности отказа СРД

### Расчет по группам элементов

$$\varphi_n(z_1, z_2, \dots, z_k) = \prod_{i=1}^n (p_{1i}z_1 + p_{2i}z_2 + \dots + p_{ki}z_k)$$

$P_{m_1, m_2, \dots, m_k; n}$  - коэффициент определяет вероятность, что среди  $n$  групп работоспособны в каждой группе ровно  $m_1, m_2, \dots, m_k$  элементов

$$P(0) = P_1^{гp} P_2^{гp} P_3^{гp} P_4^{гp}$$

$$P(1) = (1 - P_1^{гp})P_2^{гp} P_3^{гp} P_4^{гp} + P_1^{гp}(1 - P_2^{гp})P_3^{гp} P_4^{гp} + P_1^{гp} P_2^{гp}(1 - P_3^{гp})P_4^{гp} + P_1^{гp} P_2^{гp} P_3^{гp}(1 - P_4^{гp})$$

$$P(2) = (1 - P_1^{гp})(1 - P_2^{гp})P_3^{гp} P_4^{гp} + (1 - P_1^{гp})P_2^{гp}(1 - P_3^{гp})P_4^{гp} + (1 - P_1^{гp})P_2^{гp} P_3^{гp}(1 - P_4^{гp}) + P_1^{гp}(1 - P_2^{гp})(1 - P_3^{гp})P_4^{гp} + P_1^{гp}(1 - P_2^{гp})P_3^{гp}(1 - P_4^{гp}) + P_1^{гp} P_2^{гp}(1 - P_3^{гp})(1 - P_4^{гp})$$

$$P(3) = (1 - P_1^{гp})(1 - P_2^{гp})(1 - P_3^{гp})P_4^{гp} + (1 - P_1^{гp})(1 - P_2^{гp})P_3^{гp}(1 - P_4^{гp}) + (1 - P_1^{гp})P_2^{гp}(1 - P_3^{гp})(1 - P_4^{гp}) + P_1^{гp}(1 - P_2^{гp})(1 - P_3^{гp})(1 - P_4^{гp})$$

$$P(4) = (1 - P_1^{гp})(1 - P_2^{гp})(1 - P_3^{гp})(1 - P_4^{гp}).$$

### Расчет по всей совокупности элементов

$$\varphi_n(z) = \prod_{i=1}^n (q_i + p_i z)$$

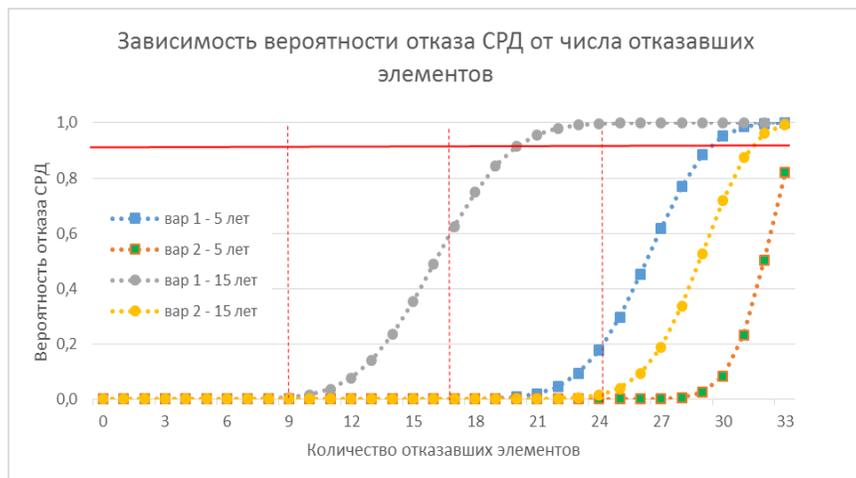
$q_i, p_i$  - вероятности отказа и безотказной работы тарелки уровня  $i$

$P_{m,n}$  - вероятность работоспособности  $m$  элементов из  $n$

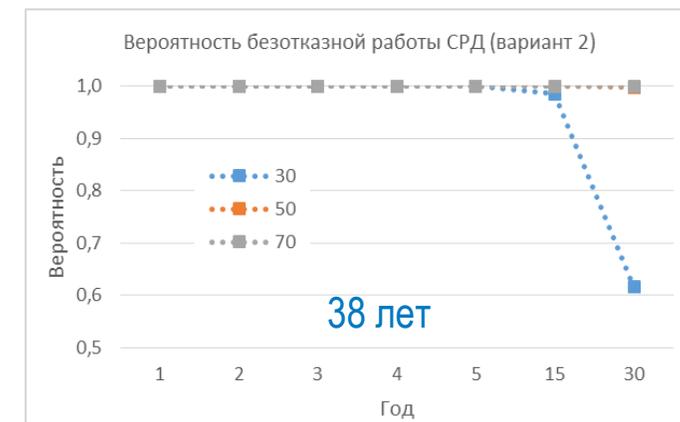
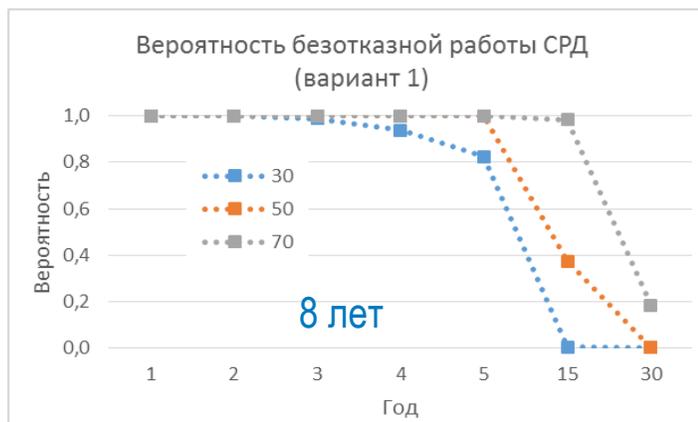
$$R_k = \sum_{m=k}^n P_{m,n} = 1 - \sum_{m=0}^{k-1} P_{m,n}$$

$R_k$  - вероятность, что из  $n$  элементов откажет более  $k + 1$  (не менее  $k$  элементов работоспособны)

# Моделирование надежности для планирования ремонта ВКУ колонных аппаратов по сводным данным о ремонтах СРД



Расчет по всей совокупности элементов в зависимости от накопленной наработки

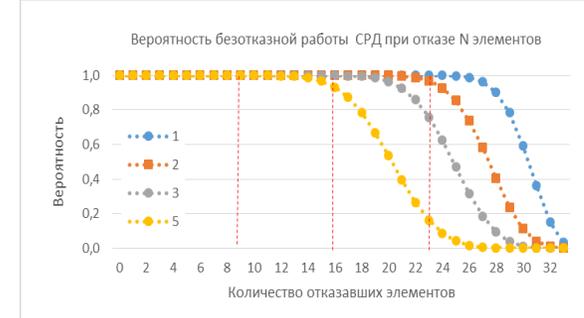
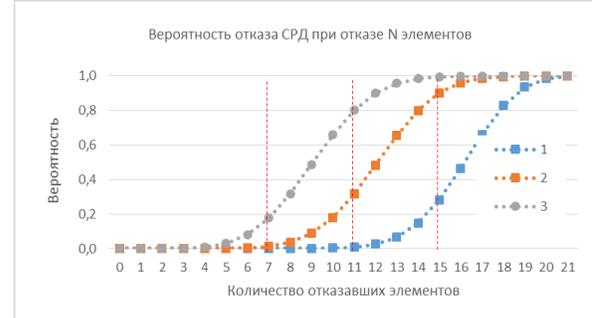


- ❑ чем более мягкий критерий принятия решения об отказе (необходимости ремонта) СРД в целом при отказе заданного количества ВКУ (30%, 50%, 70%), тем выше вероятность безотказной работы СРД
- ❑ вероятность отказа при более жестком критерии (30%) наступает раньше и существенно отлична от 0 после 15 лет эксплуатации (для ИД к данному СРД)
- ❑ учет накопленного срока эксплуатации (вариант 1 - 8 и вариант 2 - 38 лет) существенно различается в зависимостях вероятностей отказов от числа отказавших ВКУ при различных сроках эксплуатации (5 и 15 лет): в варианте 1 отказ СРД с уровнем доверия 90% достигается при отказе более 19 ВКУ (при сроке эксплуатации 15 лет), в варианте 2 в тех же условиях требуется отказ не менее 30 ВКУ

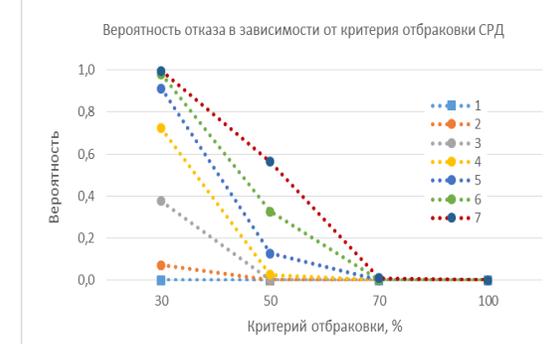
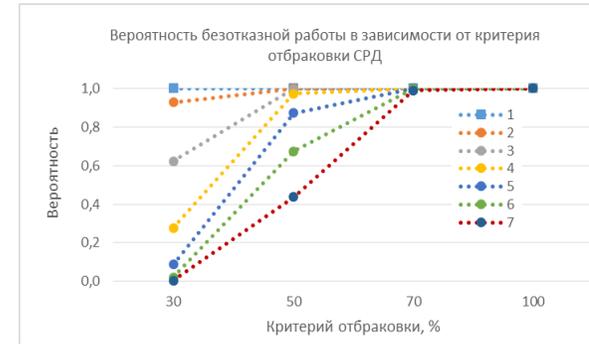
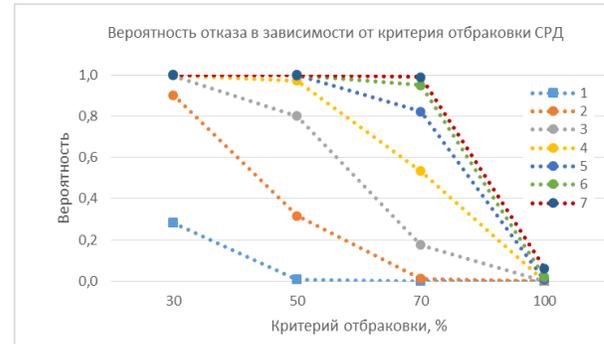
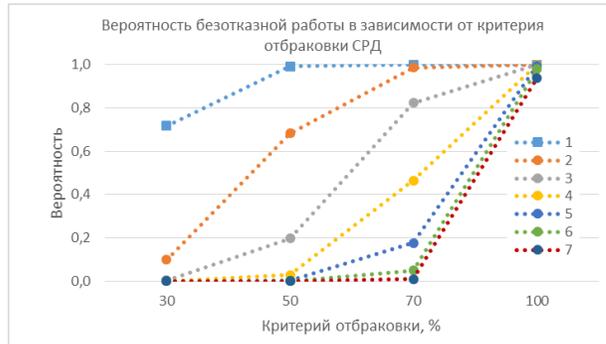
Результаты расчета надежности для 1У-70 20С04

Результаты расчета надежности для 2У-370 372С04

Зависимость вероятности безотказной работы (а) и вероятности отказа (б) СРД от количества отказавших элементов в сборке



Зависимость вероятности безотказной работы (а) и вероятности отказа (б) СРД от критерия отбраковки ВКУ



# Моделирование надежности для планирования ремонта СРД колонных аппаратов с учетом 4-х групп ВКУ. Расширенные результаты расчета надежности для 1У-70 20С01

Две основные группы ВКУ:

- верхняя – 8 насадок Петон
- нижняя – 11 клапанных тарелок

Разбиение на 4 подгруппы:

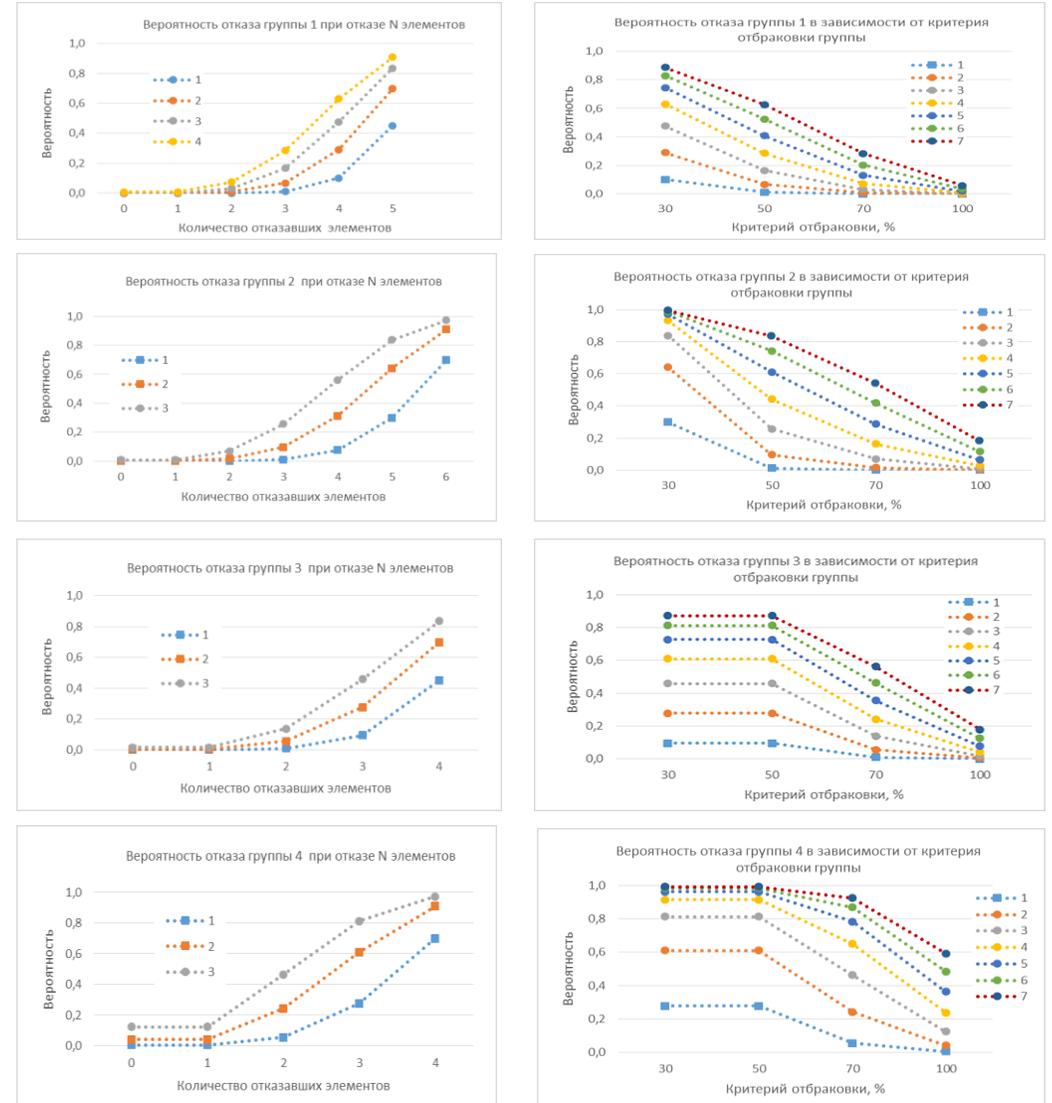
- 1, 2 – тарелки
- 3, 4 – насадки

Интенсивности отказов (ремонтов) оценивались индивидуально для каждой тарелки / насадки

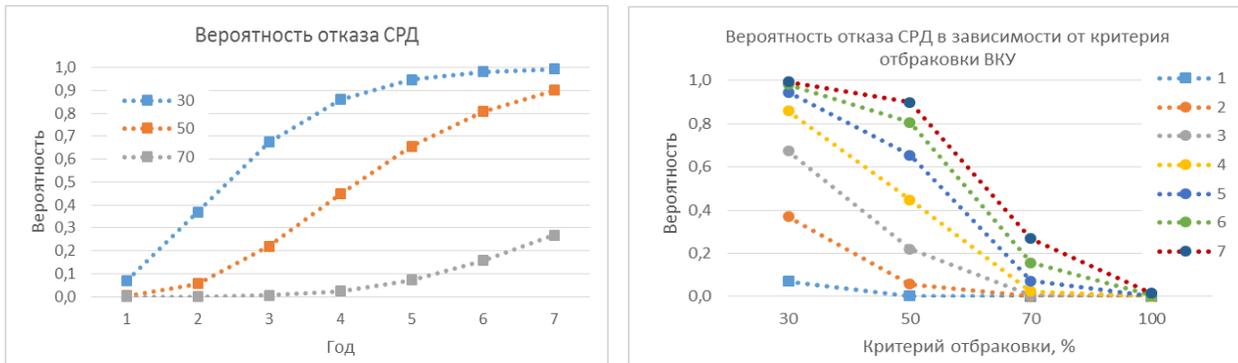
Биномиальные вероятности безотказной работы для 1, 3 и 5 лет календарной наработки



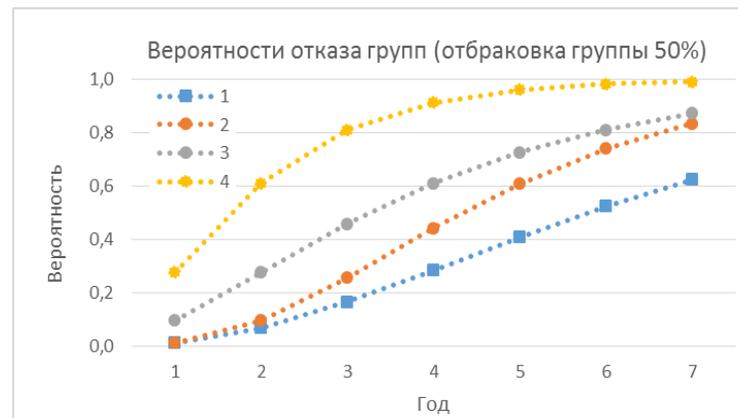
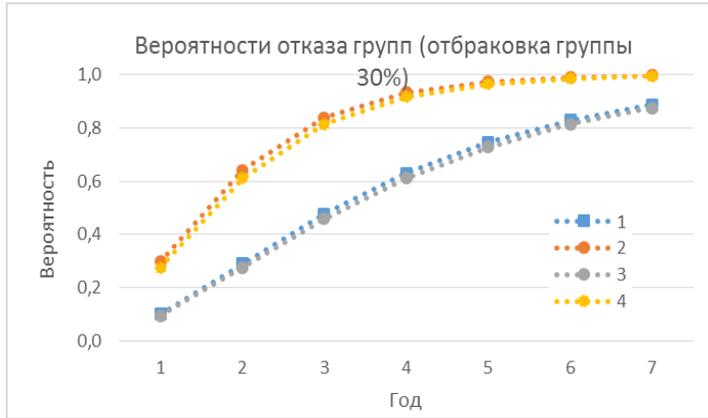
Расчет индивидуально по группам 1 - 4



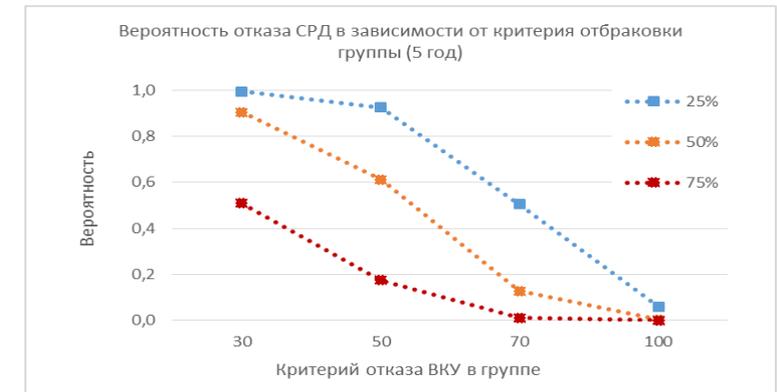
Вероятность отказа СРД сводным расчетом только по тарелкам



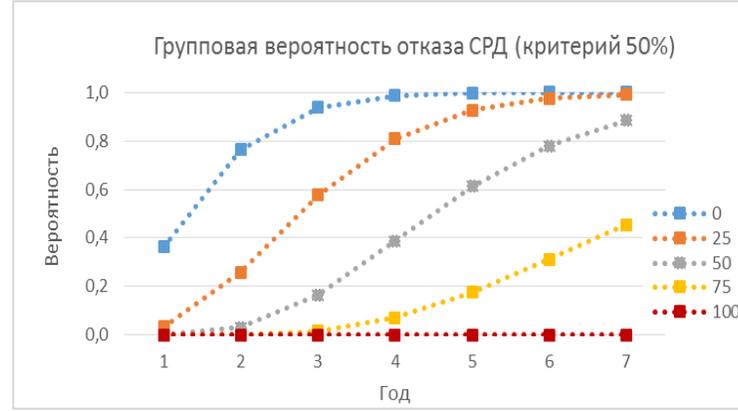
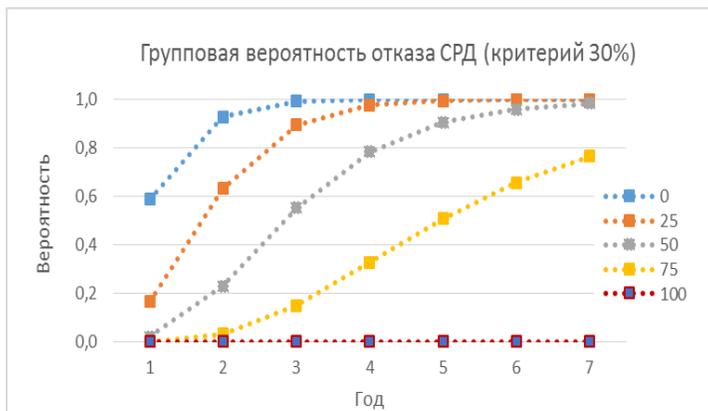
Зависимость вероятности отказа групп от количества отказавших элементов в группе



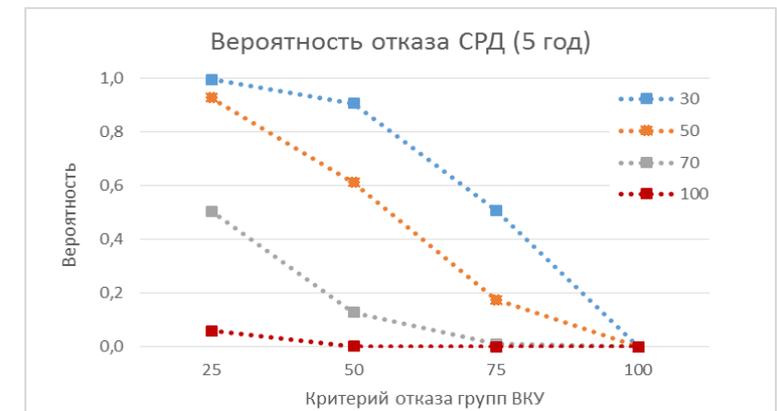
Зависимость от критерия отказа ВКУ в группе



Зависимость вероятности отказа СРД по годам при заданных критериях отбраковки групп



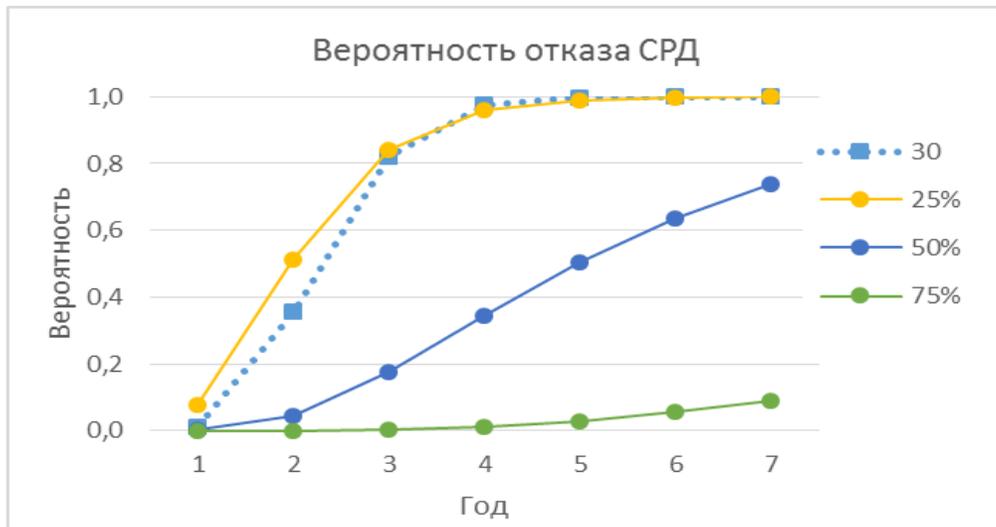
Зависимость от критерия отказа группы ВКУ



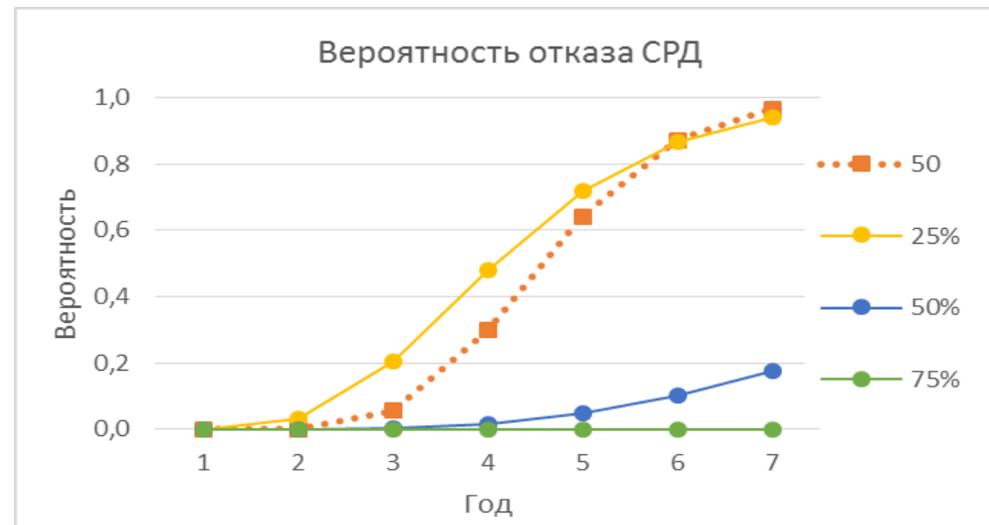
## Сравнение оценок индивидуальных и групповых для СРД колонного аппарата 2У-370 372С03

Зависимость вероятности отказа СРД при заданных критериях отбраковки групп ВКУ и СРД в целом.

Критерий отказа ВКУ 30%



Критерий отказа ВКУ 50%



Модель надежности применима для прогнозирования срока эксплуатации (назначения срока ремонта) СРД при заданных критериях отказа СРД. Предпочтительность применения моделей МН, основанных на исходной средней наработке ВКУ (МН-1) в целом для СРД и на групповом оценивании отказов ВКУ (МН-2), может быть рекомендована следующим образом:

- ❑ МН-1 следует применять для обобщенного прогнозирования отказов СРД с определением срока возможного отказа и планированием (назначением) капитального ремонта СРД;
- ❑ МН-2 предпочтительна для индивидуального прогнозирования отказа СРД с определением групповых отказов ВКУ внутри СРД по срокам и объемам требуемого выборочного ремонта.

- ❑ Модель прогнозирования на основе экстраполяции требует изменения процедуры планирования и контроля ремонтов; в текущем состоянии применение ЭС-ВЭ не достаточно достоверно
- ❑ Во всех расчетах при различных исходных данных Модель надежности демонстрирует адекватность поведения зависимостей вероятностей теоретическим ожиданиям (как в варианте с единой средней наработкой для СРД в целом, так и в групповом варианте); устойчивость модели проявляется и в отношении различной групповой зависимости отказов для различных критериев отказа группы и СРД в целом *(особенно в примере с расчетом аппарата 1У-70 20С01, для которого характерно совпадение количества бракуемых элементов для критериев 30% и 50%)*
- ❑ Общая тенденция: увеличение критериев отказов от более «жестких» (30% и 25%) к более «мягким» (от 50% и выше) вероятности отказов уменьшаются *(для достижения таких критериев требуется отказ большего количества ВКУ или групп ВКУ одновременно)*
- ❑ Применение метода расчета, основанного на средней наработке ВКУ для всего СРД, в сравнении с методом групповых (парциальных) вероятностей показывает большую консервативность первого при критерии отказа группового выше 25%; в случае критерия группового отказа 25% для критерия отказа ВКУ около 30% вероятности близки
- ❑ Сравнение расчетов для СРД ОГПЗ и АГПЗ показывает сопоставимость оценок вероятностей и тенденций влияния критериев отбраковки СРД при отказе ВКУ
- ❑ Метод надежности обуславливает адекватный выбор (назначение) критериев отказа ВКУ и групп для прогнозирования и планирования ремонтов в короткой и долгосрочной перспективе

**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!**

**Нефедов Сергей Васильевич**

Главный научный сотрудник КНТЦ УТСЦ ПО