

Комплекс показателей для оценки надежности газоперекачивающих агрегатов

Игорь Р. Байков, ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», Уфа, Россия
Сергей В. Китаев, ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», Уфа, Россия
Ольга В. Смородова, ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», Уфа, Россия



Игорь Р. Байков



Сергей В. Китаев



Ольга В. Смородова

Резюме. Работа посвящена совершенствованию методов оценки одной из важнейших эксплуатационных характеристик газоперекачивающего агрегата (ГПА) – его надежности – в условиях снижения загрузки магистральных газопроводов. В настоящее время надежность агрегатов характеризуется комплексом параметров, основанных на определении времени нахождения агрегата в том или ином эксплуатационном состоянии. Представлены основные результаты исследования коэффициентов надежности для ГПА-Ц-18 в количестве 41 агрегат, эксплуатируемых на многоцеховых компрессорных станциях (КС) одного из Дочерних Обществ ПАО «Газпром». Приведены установленные в процессе исследований коэффициенты надежности – коэффициент технического состояния, коэффициент готовности, коэффициент оперативной готовности. Выполнено структурирование ГПА по группам в зависимости от значений коэффициентов. Рассмотрена возможность применения интегральных показателей для анализа уровня надежности ГПА в группах. Предложено использование доверительных интервалов для идентификации интегрального уровня надежности эксплуатируемого парка ГПА и определения направлений для поддержания работоспособности агрегатов в условиях сниженной загрузки магистральных газопроводов. Для обобщенной оценки уровня надежности ГПА по группам предложен показатель Джини. Показано, что преимущество показателя Джини перед средним значением показателей надежности заключается в возможности учета рангов анализируемых признаков в группах. Графическая интерпретация результатов выполнена с помощью кривой Лоренца. В работе реализовано правило сигм, характеризующее вероятность попадания фактического значения коэффициента в доверительный интервал – границы прогноза (верхняя и нижняя), в которые с заданной вероятностью попадут фактические значения. Доверительные интервалы определены по виду распределения коэффициентов и σ -среднеквадратическому отклонению, в качестве примера приведена гистограмма интервального ряда распределения коэффициента технического использования. Проверка гипотезы о виде закона распределения на уровне значимости 0,95 показала, что распределение коэффициентов является нормальным. Методом моментов было установлено математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение для распределения значений коэффициентов надежности каждого вида. Исключение из массива первичной информации всех резко выпадающих ГПА по уровню факторного признака произведено по правилу «сигм». При этом исключены все агрегаты, у которых значение признака-фактора не попадает в интервал. По правилу «трех сигм» в доверительный интервал ($\mu \pm 3\sigma$) не попали 3 ГПА по коэффициенту технического использования, 2 ГПА по коэффициенту готовности. Проведенный анализ причин низких значений коэффициентов надежности указанных ГПА показал, что агрегаты длительно находились в ремонте. В работе приведены сводные данные по максимально допустимому значению показателей дифференциации Джини коэффициентов надежности ($K_{тн}$, K_r , $K_{ог}$) в зависимости от объема выборки (полная выборка агрегатов – 41 шт. и выборка с интервалом 1, 2, 3 «сигма»). При большем значении показателя Джини рекомендовано принимать меры к отдельным агрегатам для повышения уровня надежности эксплуатируемого фонда ГПА.

Ключевые слова: газоперекачивающий агрегат, надежность, отказ, показатель, работоспособность, правило «трех сигм».

Формат цитирования: Китаев С.В., Байков И.Р., Смородова О.В. Комплекс показателей для оценки надежности газоперекачивающих агрегатов // Надежность. 2018. Т. 18, № 4. С. 16-21. DOI: 10.21683/1729-2646-2018-18-4-16-21

Введение

Одной из важнейших характеристик газоперекачивающих агрегатов (ГПА) является надежность. Надежность ГПА как единого целого определяется надежностью его элементов, обслуживающих его систем и характером их взаимодействия [1-3].

В работе выполнено исследование комплексных коэффициентов для оценки надежности и разработка показателей дифференциации ГПА по их значению. Разрабатываемые коэффициенты могут оказаться полезными при исследовании работоспособности ГПА в компрессорных цехах или групп ГПА на многоцеховых компрессорных станциях (КС).

Анализ объема проведенного исследования

Выбор объекта исследования обоснован необходимостью обеспечения работоспособности газоперекачивающей системы при наступлении аварийного режима. Известно, что перекачка магистрального газа агрегатами средней и малой единичной мощности способствует повышению маневренности системы на основе гарантированного резервирования. При этом выход одного из агрегатов в аварийный останов сопровождается минимальным технологическим ущербом.

Гораздо большие негативные последствия могут быть вызваны аварийным отключением крупного агрегата. В Дочерних обществах ПАО «Газпром» эксплуатируются 5 типов агрегатов высокой единичной мощности (таблица 1).

Из таблицы 1 видно, что максимальную суммарную мощность несут агрегаты ГПА-Ц-18 – более 27% в группе мощных агрегатов (рисунок 1). Более 77% их общего количества – 79 агрегатов – эксплуатируются в ДО «Газпром трансгаз Югорск».

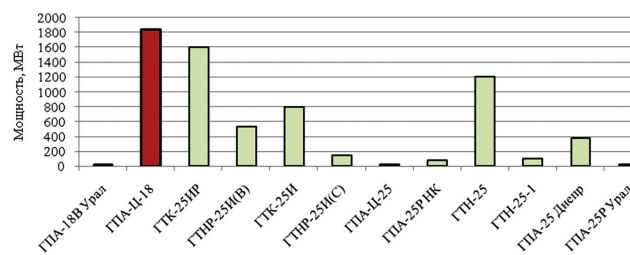


Рисунок 1 – Суммарная мощность ГПА ПАО «Газпром» по типам привода

В соответствии с выявленной структурой парка ГПА объектом исследования были определены газоперекачивающие агрегаты типа ГПА-Ц-18, установленные на многоцеховой (9 компрессорных цехов) КС в количестве 41 агрегат. Это конвертированный тип ГПА с авиационным газотурбинным двигателем. Общая наработка агрегатов на момент исследований составила от 20 тыс. ч до 136 тыс. ч (в среднем 113 тыс. ч).

Определение коэффициентов для оценки надежности ГПА

В настоящее время оценка надежности газотурбинных установок (ГТУ) осуществляется системой показателей [4, 5], основанных на определении времени нахождения агрегата в том или ином эксплуатационном состоянии: суммарном времени нахождения агрегата в работе T_p за отчетный период T_k ; времени нахождения агрегата в резерве $T_{рез}$; времени нахождения агрегата в плановом ремонте $T_{прп}$; времени вынужденного простоя T_v газоперекачивающего агрегата за отчетный период T_k :

- коэффициент технического использования агрегата – $K_{тн}$;
- коэффициент готовности агрегата – K_g ;
- коэффициент оперативной готовности – $K_{ог}$;

Таблица 1. Основные сведения по газоперекачивающим агрегатам высокой единичной мощности, ПАО «Газпром»

№	Тип ГПА	Количество ГПА	Единичная мощность	Доля суммарной мощности в группе крупных агрегатов
			МВт	%
1	ГПА-18В Урал	1	18	0,3
	ГПА-Ц-18	102	18	27,3
2	ГТК-25ИР	72	22,2	23,8
	ГТНР-25И(В)	24	22,2	7,9
3	ГТК-25И	33	24	11,8
4	ГТНР-25И(С)	6	24,5	2,2
5	ГПА-Ц-25	1	25	0,4
	ГПА-25Р НК	3	25	1,1
	ГТН-25	48	25	17,8
	ГТН-25-1	4	25	1,5
	ГПА-25 Днепр	15	25	5,6
	ГПА-25Р Урал	1	25	0,4
	ИТОГО	310		

- средняя наработка агрегата на отказ в отчетном отрезке времени – T_0 ;

- коэффициент времени восстановления работоспособности агрегата – K_v .

В работах многих авторов было показано [1, 2], что в первую очередь интенсивность отказов, определяющая надежность эксплуатации оборудования, связана с процессом старения ГПА. Вместе с тем, техническое состояние ГПА может не только поддерживаться, но и корректироваться мероприятиями предупредительных ремонтов и диагностического обслуживания. Временной режим нахождения ГПА в каждом эксплуатационном состоянии не связан напрямую с общей наработкой агрегата и является дополнительным показателем определения его надежности. Взаимная их независимость подтверждается значением коэффициента взаимной корреляции: его величина находится в диапазоне $(-0,094; 0,126)$ для разных коэффициентов, что подтверждает отсутствие корреляционной связи на значимом уровне.

На рисунке 2 приведено распределение значений показателей надежности для ГПА-Ц-18. Анализ выполнен по результатам эксплуатации агрегатов за период времени 2 года.

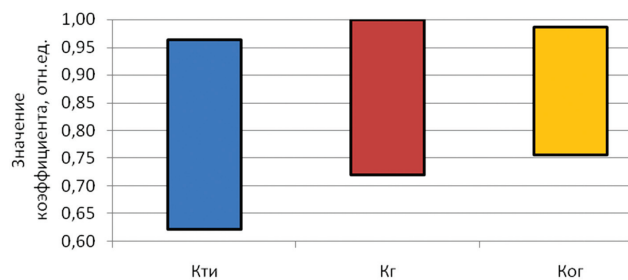


Рисунок 2 – Распределение значений коэффициентов надежности для ГПА

На рисунке 3 приведены структурные диаграммы распределения коэффициентов надежности по интервалам. Интервальная оценка коэффициентов надежности, приведенная на графиках, использовалась для разработки и обоснования показателей дифференциации.

Как показывают проведенные исследования, для агрегатов ГПА-Ц-18 коэффициент технического использования находится на уровне $0,621 \div 0,963$; коэффициент готовности – $0,719 \div 1,0$; коэффициент оперативной го-

товности – $0,755 \div 0,986$. Нарботка на отказ находится в среднем на уровне $T_0 = 2900$ час; коэффициент, характеризующий время восстановления, в среднем составляет $K_v = 70$ часов.

Значения коэффициента технического использования для конвертированных ГПА должны составлять не менее 0,94, коэффициентов готовности – не менее 0,98, наработка на отказ – не менее 3500 ч [6].

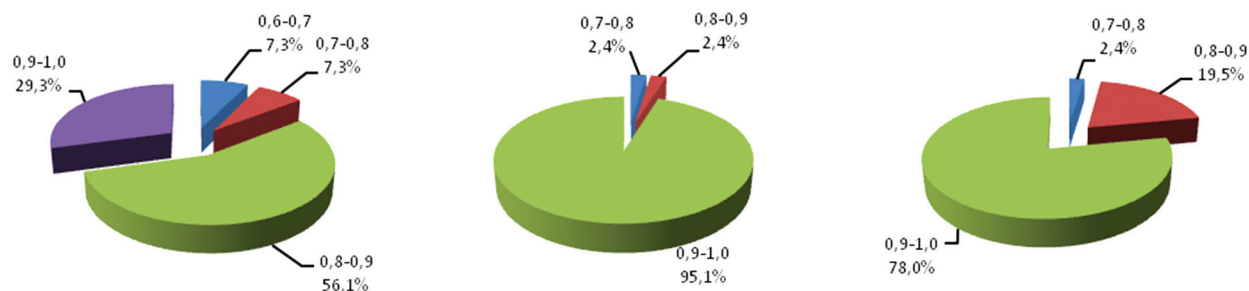
Таким образом, подавляющее количество ГПА из рассматриваемой группы имеет значения коэффициентов ниже значений, установленных ГОСТ [6]: по коэффициенту технического использования – 93% агрегатов, по коэффициенту готовности – 10%, по коэффициенту оперативной готовности – 95%, по наработке на отказ – 76%.

Определение обобщенных показателей надежности ГПА

Отклонение коэффициентов от нормативных величин связано с пониженной загрузкой магистральных газопроводов ниже проектного значения и перекачкой газа меньшим количеством ГПА. В таких осложненных условиях существует потребность в дополнительных методах идентификации уровня надежности ГПА эксплуатируемого парка.

Для принятия решения о надежности ГПА обобщенно по предприятию для планирования ремонтных мероприятий разного уровня и оптимизации режимов работы выполнена интегральная оценка показателей надежности парка газоперекачивающего оборудования как единого целого. В качестве обобщенного показателя использован индекс Джини.

Первоначально коэффициент Джини был введен в экономической отрасли как индекс концентрации доходов населения [7] для оценки степени неравенства между отдельными группами общества. Применение показателя в нефтегазовой отрасли было реализовано авторами [8, 9] для дифференциации оборудования по техническому состоянию и режимным параметрам в добыче, трубопроводном транспорте и переработке углеводородов. Теоретически величина коэффициента Джини может находиться в пределах от 0 до 1. Чем ближе значение к единице, тем сильнее дифференциация оборудования по изучаемому показателю.



а – коэффициент технического использования б – коэффициент готовности в – коэффициент оперативной готовности

Рисунок 3 – Интервальная структура коэффициентов оценки надежности ГПА

Применительно к оценке различия в уровне надежности ГПА, показатель Джини будет характеризовать дифференциацию ГПА по уровню надежности, характеризуемой коэффициентами технического использования, готовности и оперативной готовности. Коэффициент Джини определяется по формуле (рисунок 4а):

$$K_L = 1 - 2 \sum_i X_i \text{cum} Y_i + \sum_i X_i Y_i,$$

где X_i – доля ГПА в i -ой группе; Y_i – доля i -й группы в совокупном уровне коэффициентов; $\text{cum} Y_i$ – кумулятивная (вычисленная нарастающим итогом) доля коэффициентов.

Для расчета показателя Джини используются данные о распределении ГПА по уровню показателей надежности. Вся совокупность разделена на N групп с равным количеством ГПА, и определена доля каждой группы в общей сумме коэффициентов. По накопленным итогам удельных весов (частот) по численности ГПА и удельных весов в общей сумме показателей построена кривая концентрации (кривая Лоренца).

Вертикальная ось графика отражает доли групп в общей сумме показателя (от 0% до 100% или от 0 до 1). Горизонтальная ось – накопленные доли групп ГПА в общем количестве (также от 0% до 100% или от 0 до 1). При равномерном распределении показателя каждая процентная группа ГПА имела бы точно такую же часть от всей суммы показателя. На графике это отображается диагональю, называемой линией равномерного распределения.

Фактическое распределение показателя отображается вогнутой вниз линией концентрации. Чем больше эта линия отклоняется от диагонали, тем сильнее неравномерность в распределении показателя (выше уровень концентрации). По результатам расчета построены графические зависимости кривых концентрации значений коэффициентов: технического использования (рисунок 4б), готовности и оперативной готовности.

Теоретически характеристика концентрации значений коэффициента может совпасть с линией равномерного распределения, в этом случае показатель дифференци-

ции (Джини) будет равен нулю и тогда уровень надежности ГПА в группе будет равномерным.

Как видно (рисунок 4а), расчетные значения показателей дифференциации (Джини) невысоки, что свидетельствует о незначительном различии ГПА по уровню надежности. Однако для основной доли ГПА значения коэффициентов ниже нормативных величин. При этом остается неопределенность в принятии решения по выбору стратегии к способу эксплуатации фонда ГПА в условиях пониженной загрузки МГ.

Статистическая оценка уровня надежности ГПА

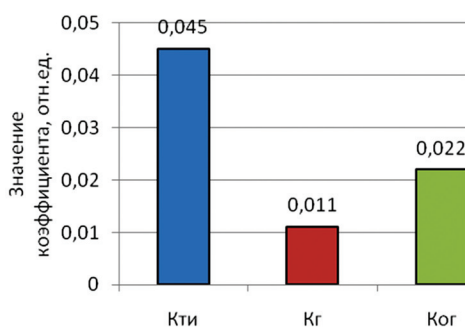
В теории надежности существует правило сигм, характеризующее вероятность попадания очередного фактического значения в доверительный интервал. С помощью доверительного интервала можно выделить направления, на которые следует обратить внимание для изменения тенденции, принять взвешенное решение (например, определить стратегию проведения ремонтно-технического обслуживания ГПА). Для коэффициентов надежности доверительный интервал – это границы прогноза (верхняя и нижняя), в рамки которых с заданной вероятностью попадут фактические значения.

Если доверительный интервал будет равен:

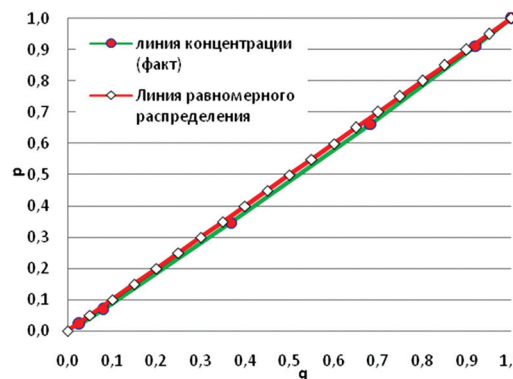
- 3 сигма – существует 0,3% вероятности выхода показателя за границы интервала;
- 2 сигма – существует 4,5% вероятности выхода показателя за границы интервала;
- 1 сигма – существует 31,7% вероятности выхода показателя за границы интервала.

Доверительный интервал определен по виду распределения коэффициента технического использования и σ – среднеквадратическому отклонению. На рисунке 5а приведена гистограмма интервального ряда распределения коэффициента технического использования.

Проверка гипотезы о виде закона распределения на уровне значимости 0,95 показала, что распределение коэффициентов является нормальным (рисунок 5). Для интервального ряда их значений методом моментов были



а – значения коэффициентов концентрации



б – кривая Лоренца распределения коэффициента технического использования

Рисунок 4 – Показатель дифференциации для выборки ГПА (41 шт.)

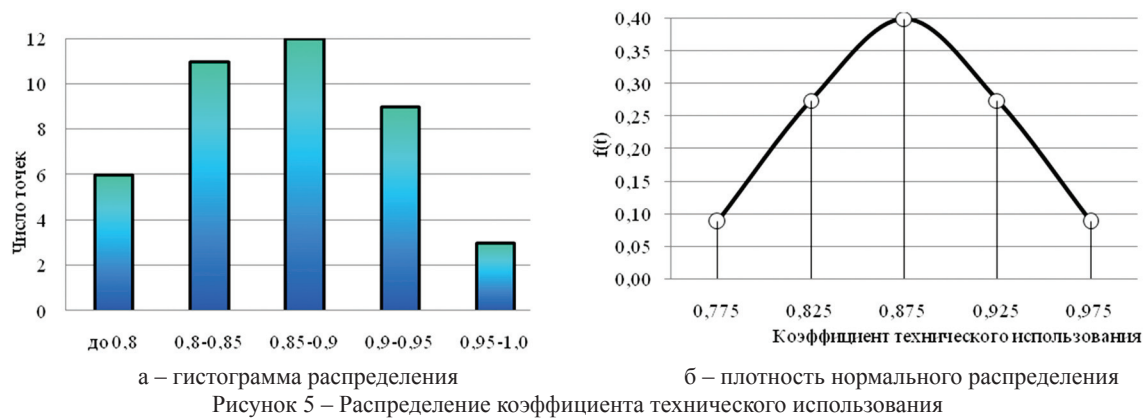


Рисунок 5 – Распределение коэффициента технического использования

Таблица 2 – Оценка массива данных коэффициентов $K_{тн}$, K_r , $K_{ор}$ по правилу «сигм»

Наименование коэффициента	Интервалы для массива данных коэффициентов	Интервалы значений признака фактора	Число единиц, входящих в интервал	Удельный вес единиц, входящих в интервал, в общем их числе, %
1	2	3	4	5
$K_{тн}$	$\bar{y} - \sigma \leq y_i \leq \bar{y} + \sigma$	$0,817 \leq y_i \leq 0,933$	30	73,2
	$\bar{y} - 2\sigma \leq y_i \leq \bar{y} + 2\sigma$	$0,760 \leq y_i \leq 0,990$	37	90,2
	$\bar{y} - 3\sigma \leq y_i \leq \bar{y} + 3\sigma$	$0,702 \leq y_i \leq 1,048$	38	92,7
K_r	$\bar{y} - \sigma \leq y_i \leq \bar{y} + \sigma$	$0,977 \leq y_i \leq 0,993$	12	29,3
	$\bar{y} - 2\sigma \leq y_i \leq 2\bar{y} + 2\sigma$	$0,970 \leq y_i \leq 1,0$	39	95,1
	$\bar{y} - 3\sigma \leq y_i \leq \bar{y} + 3\sigma$	$0,962 \leq y_i \leq 1,008$	39	95,1
$K_{ор}$	$\bar{y} - \sigma \leq y_i \leq \bar{y} + \sigma$	$0,889 \leq y_i \leq 0,962$	28	68,3
	$\bar{y} - 2\sigma \leq y_i \leq 2\bar{y} + \sigma$	$0,852 \leq y_i \leq 0,998$	39	95,1
	$\bar{y} - 3\sigma \leq y_i \leq \bar{y} + 3\sigma$	$0,716 \leq y_i \leq 1,035$	41	100

установлены математические ожидания среднеквадратические отклонения (рисунок 5б).

Исключение из массива первичной информации всех выпадающих ГПА по уровню факторного признака произведено по правилу «сигм» (таблица 2). При этом исключаются все агрегаты, у которых значение признака-фактора не попадает в интервал.

В таблице 3 приведены расчетные значения показателя дифференциации (Джини) для выборок с разбросом 1σ , 2σ , 3σ .

Таблица 3 – Расчетные значения показателя дифференциации (Джини) для выборок с интервалом 1σ , 2σ , 3σ

Интервал значений	Показатель дифференциации Джини		
	для $K_{тн}$	для K_r	для $K_{ор}$
1 сигма	0,016	0	0,006
2 сигма	0,029	0	0,016
3 сигма	0,032	0	0,019

В соответствии с теоремой Чебышева в технике принято придерживаться правила «трех сигм», что по-

зволяет с достаточной степенью вероятности обеспечить надежность эксплуатации фонда оборудования. В интервал ($\mu \pm 3\sigma$) попадают не все значения – можно исключить три ГПА с наименьшими значениями коэффициента технического использования 0,621 (ГПА №3 КЦ-10), 0,663 (ГПА №1 КЦ-2) и 0,681 (ГПА №4 КЦ-7).

По правилу «трех сигм» в доверительный интервал не попали значения коэффициента готовности 0,816 (ГПА №1 КЦ-2) и 0,719 (ГПА №4 КЦ-7).

Проведенный анализ причин низких значений коэффициентов надежности выбранных ГПА, оказавшихся вне доверительного интервала, показал, что агрегаты длительно находились в ремонте по причине отказа и задержки поставки запасных частей.

На рисунке 6 приведены сводные данные по показателю дифференциации Джини коэффициентов надежности ($K_{тн}$, K_r , $K_{ор}$) в зависимости от объема выборки (полная выборка агрегатов – 41 шт. и выборок с интервалом 1σ , 2σ , 3σ).

Таким образом, в соответствии с проведенными исследованиями для конвертированных агрегатов ГПА-Ц-18 значения показателей Джини согласно правилу «трех сигм» должны составлять для коэффициента техниче-

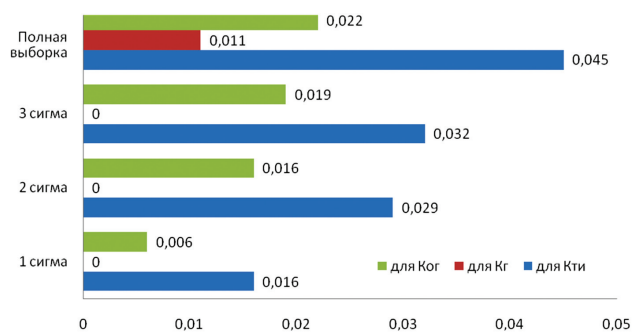


Рисунок 6 – Гистограмма распределения показателя дифференциации Джини

ского использования – не более 0,032, коэффициента готовности – не более 0, коэффициент оперативной готовности – не более 0,019.

Преимущество показателей Джини перед среднеарифметическим значением коэффициентов для анализируемых групп заключается в более адекватном расчете показателей. Достоинством индекса Джини является возможность учета рангов анализируемых признаков в группах (с исключением влияния единичных ГПА) и выявление степени дифференциации групп ГПА по показателям надежности.

Заключение

1. Определены значения коэффициентов надежности (на примере ГПА-Ц-18, выборка составила 41 ГПА): коэффициент технического использования – $0,621 \div 0,963$; коэффициент готовности – $0,719 \div 1,0$; коэффициент оперативной готовности – $0,755 \div 0,986$. При этом преобладающее количество ГПА из рассматриваемой группы имеет значения коэффициентов ниже допустимых по ГОСТ, причиной является сниженная нагрузка магистральных газопроводов.

2. Предложены показатели дифференциации групп ГПА по уровню надежности (Джини) для коэффициентов технического использования, готовности и оперативной готовности. Преимущество показателя Джини заключается в более адекватной оценке уровня различия, позволяющей учесть ранги анализируемых признаков в группах.

3. В соответствии с правилом «трех сигм» для ГПА-Ц-18 с наработкой до 136 тыс. ч значения коэффициента Джини составляют (не более) для коэффициента технического использования – 0,032, коэффициента готовности – 0, коэффициента оперативной готовности – 0,019. При большем значении показателя Джини рекомендовано предпринимать меры к отдельным агрегатам для повышения уровня надежности эксплуатируемого фонда ГПА.

4. Для других типов агрегатов, эксплуатируемых в группах на КС, необходимо проведение дополнительных исследований с учетом индивидуальных технических характеристик ГПА, технических и климатических условий эксплуатации.

Библиографический список

1. Байков И.Р., Смородова О.В., Китаев С.В. Оценка параметров надежности агрегатов перекачки магистрального газа // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. – 2017. – № 1. – С. 95-107. URL: http://ogbus.ru/issues/1_2017/ogbus_1_2017_p95-107_BaikovIR_ru.pdf

2. Китаев С.В., Кузнецова М.И. Статистическое моделирование показателей надежности газотурбинных установок методом «Монте-Карло» // Газовая промышленность. 2014. №5. С.101–103.

3. Смородов Е.А., Китаев С.В. Методы расчета коэффициентов технического состояния ГПА // Газовая промышленность. – 2000. – № 8. – С. 29-31.

4. ГОСТ 27.002-2015. Надежность в технике. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2015. – 28 с.

5. ГОСТ Р 52527-2007 (ИСО 3977-9:1999). Установки газотурбинные. Надежность, готовность, эксплуатационная технологичность и безопасность. – М.: Стандартинформ, 2006. – 32 с.

6. ГОСТ Р 54404. Агрегаты газоперекачивающие с газотурбинным приводом. Общие технические условия. – М.: Стандартинформ, 2012. – 16 с.

7. Харченко Л.П., Ионин В.Г., Глинский В.В. и др. Статистика. Под ред. канд. эконом. наук, проф. В.Г. Ионина. -3 изд., перераб. и доп. – М.: Инфра-М, 2008. – 445 с.

8. Байков И.Р., Китаев С.В., Валиев А.Н., Зуев А.С., Старостин В.В. Энергосбережение при эксплуатации фонда центробежных электронасосов на нефтяных промыслах // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2011. – №4. – С. 23-26.

9. Смородова О.В., Китаев С.В., Сергеева К.В. Ранжирование технологических установок нефтепереработки по обобщенному критерию промышленной безопасности // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. – 2017. – № 4. – С. 165-179. URL: http://ogbus.ru/issues/4_2017/ogbus_4_2017_p165-179_SmorodovaOV_ru.pdf

Сведения об авторах

Игорь Р. Байков, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Промышленная теплоэнергетика», факультет трубопроводного транспорта, Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия, e-mail: pte@rusoil.net

Сергей В. Китаев, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Транспорт и хранение нефти и газа», факультет трубопроводного транспорта, Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия, e-mail: svkitaev@mail.ru

Ольга В. Смородова, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Промышленная теплоэнергетика», факультет трубопроводного транспорта, Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия, e-mail: olga_smorodova@mail.ru

Поступила: 30.03.2018