

## ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ НАДЕЖНОСТЬ ТУРБОКОМПРЕССОРОВ СИСТЕМ НАДДУВА СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ

*Б. П. Башуров, д.т.н., проф., нач. кафедры эксплуатации судовых механических установок, Новороссийская государственная морская академия, В. В. Шарик, мех. наст., инж. ОАО «НОВОШИП»*

Устойчивая и экономичная работа главного судового дизеля на долевых и малых скоростных режимах во многом определяется надежностью системы наддува. На долю этой системы приходится наибольшее количество отказов.

Приводятся результаты статистического исследования функциональной надежности турбокомпрессоров систем наддува судовых дизелей и нормативная база диагностических показателей по оценке их технического состояния в процессе эксплуатации.

Показано, что обеспечение надежности турбокомпрессора является наиболее важным эксплуатационным фактором эффективной и надежной работы главного судового дизеля.

Stability and fuel efficiency of marine engine operation on partial load and/or at partial speed is largely dependent on supercharge system reliability. It is supercharge system that accounts for the biggest share of engine faults.

This article discusses stochastic analysis of marine engine turbocharger in terms of reliability; also discussed are operating values used as reference basis in condition monitoring.

Turbocharger reliability is demonstrated as being a key factor in efficient and safe operation of a marine diesel engine.

Основным средством повышения удельной мощности судовых дизелей (СД) является наддув. Анализ экспериментальных данных современных мощных СД с наддувом, созданных различными фирмами, показывает [1], что эффективный удельный расход топлива их при полной нагрузке ниже по сравнению с СД того же типа, но без наддува. Однако СД с наддувом должен иметь надежный пуск и устойчивую работу на режиме самых малых чисел оборотов гребного винта и при частичных нагрузках. Успешное решение такой задачи зависит от правильного сочетания располагаемой энергии уходящих газов на этих режимах работы, характеристики турбокомпрессоров (ТК), системы наддувно-продувочных устройств и конструктивной схемы выпускного трубопровода между цилиндром и турбиной. Вопрос о путях получения минимального удельного расхода топлива при наддуве СД является проблемой достижения наибольшей экономичности.

Одной из обслуживающих систем СД является система наддува. Она оказывает существенное влияние на эффективность его работы, позволяет снизить массу и габариты при одновременном уменьшении расхода топлива. В то же время на ее долю приходится наибольшее количество отказов [2], что оказывает значительное влияние на удельный расход топлива, стоимость ремонта и технического обслуживания (ТО), а также на готовность СД к работе.

Основным элементом, определяющим уровень функциональной надежности (ФН) системы наддува, является турбокомпрессор (ТК). По данным [3], применительно к СД типа SKL на долю ТК приходится более 6% общего количества отказов. В целом отказы ТК СД связаны с интенсивным разрушением подшипников, низкой надежностью лабиринтовых уплотнений, повреждением проточных частей турбин вследствие попадания обломков после обрыва выпускных клапанов, а также повреждений деталей цилиндрико-поршневой группы (ЦПГ), отказами масляных насосов и фильтров. Анализ результатов статистических исследований применительно к дизельным энергетическим установкам (ДЭУ) сухогрузных и нефтеналивных судов показывает, что на каждые 1000 часов работы в среднем приходится до семи остановок СД из-

за отказов ТК, что составляет ~3,5% общего числа остановок СД. Поэтому информация по их ФН представляет практический интерес как для обслуживающего персонала, так и для эксплуатационных и проектных организаций.

В течение последних десятилетий КПД ДЭУ возрастает, увеличивается термическая нагрузка на главный двигатель (ГД) и комплектующее оборудование, а надежность ТК снижается [4]. Это обусловлено тем, что принципы проектирования ТК частично определяются методом проб и ошибок при технической эксплуатации (ТЭ). Основными факторами, определяющими уровень ФН, является использование морского воздуха, низкое качество топлива, развитие коррозионных процессов и загрязнение проточной части. Значительная доля отказов, связанных с разрушением лопаток компрессора и турбины, обусловлена человеческим фактором (по вине обслуживающего персонала, отступления от инструкции по ТЭ). Другая причина — это конструктивное несовершенство ТК и несоответствие используемого материала деталей реальным условиям ТЭ.

В настоящей работе приводятся результаты статистических исследований ФН ТК различных типов, используемых в составе систем наддува СД судов типа «Маршал Буденный», «Борис Бутрома», «Ашхабад», «Победа», «Художник Моор» (типы ГД: 8КМ90, 9ДКРН 84/180-3, 6ДКРН 74/160-3, 7ДКРН 80/160-4; типы ТК: VTR 631/1, T680G, T540E, T680).

Для оценки ФН использовались [5] параметр потока отказов  $\omega(t)$ , наработка на отказ  $T_{отк}$ , вероятность безотказной работы  $P(t)$ , среднее время  $T_{в}^{cp}$  и трудоемкость восстановления  $\gamma_{в}^{cp}$  после отказа, коэффициент готовности (действительный)  $\bar{k}_{ГД}$  и критерий, характеризующий запас ФН,  $\Delta \bar{k}_r$ . Динамика потока отказов приведена на рис. 1.

Полученные данные свидетельствуют о том, что зависимость  $\omega(t)$  с течением ТЭ в пределах исследуемой

наработки имеет неоднородный характер. Наибольшее количество отказов наблюдается в процессе работы ТК при  $t \approx 10 \cdot 10^3$  ч ( $\omega(t)_{max}$ ). Стабилизация функции  $\omega(t)$  наступает при  $t \approx 15 \cdot 10^3$  ч и далее (в области  $t \approx (15 \div 40) \cdot 10^3$  ч) поток отказов практически не изменяется ( $\omega_{ст} \approx const$ ). Таким образом в исследованном диапазоне наработки ТК имеют два режима работы (с повышенным числом отказов и стабилизированный). Характеризуя эти периоды ТЭ количественной величиной  $\omega(t)$ , можно сказать, что в первом случае  $\omega(t)$  примерно в 2 раза выше по сравнению со вторым. Такое несоответствие можно объяснить количеством и природой отказов элементов ТК, причинами которых являются факторы технологического, монтажного и эксплуатационного характера (в частности, уровень технологии изготовления, качество монтажа узлов, нарушение режима приработки и т. п.).

Результаты вероятностной оценки ФН представлены на рис. 2.

Результаты расчета показателей ФН различных типов ТК приведены в табл.1 [4].

Из анализа полученной информации следует, что худшие показатели безотказности и ремонтнопригодности имеют ТК типа T680 ( $T_{отк}^{min}$ ,  $\omega(t)_{max}$ ,  $\bar{\gamma}_{max}^{cp}$ ). Для них характерны меньший коэффициент готовности и запаса ФН ( $\Delta \bar{k}_r^{max}$ ). Максимальную наработку на отказ имеют ТК типа T540E, примерно в 3 раза большую по сравнению с ТК типа T680. При этом запасы надежности соотносятся примерно как 5:1. Осредненная наработка на отказ рассмотренных типов ТК составляет 19,3 тыс. ч, а затраты на восстановление отказов 4,6 чел. ч/тыс. ч.

Обобщенная информация по ФН отдельных узлов обследованных типов ТК (применительно к судам, эксплуатируемым в ОАО «НОВОШИП») и причинам их отказов приведена в табл. 2.

Из анализа полученной информации следует, что половина отказов приходится на газовыпуск-

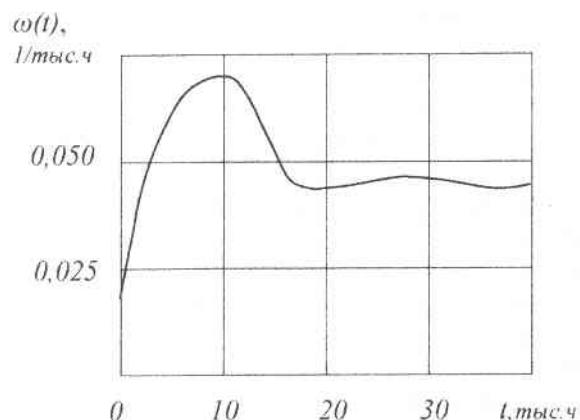


Рис. 1. Динамика потока отказов ТК типа VTR 631/1, T680G, T540E, T680

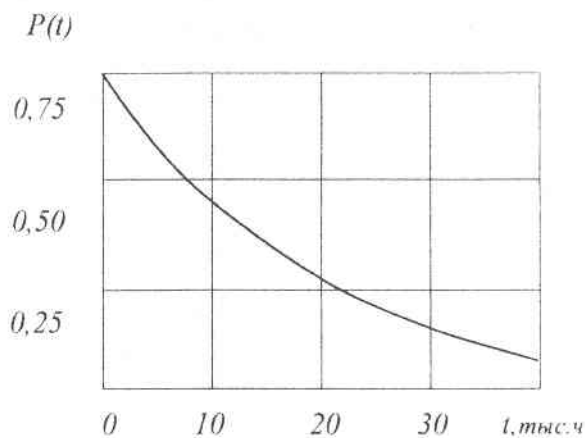


Рис. 2. Вероятность безотказной работы ТК типа VTR 631/1, T680G, T540E, T680

ПОКАЗАТЕЛИ ФН ТК

Тип ТК	$T_{\text{отк.}}$ , тыс. ч	$\omega(t)$ , 1/тыс. ч	$\gamma$ , ч	$\bar{\gamma}^{\text{ср}}$ , чел.-ч/тыс. ч	$\bar{K}_{\text{ГД}}$	$\Delta \bar{K}_{\text{Г}}$
T680	11,36	0,088	16	8,42	0,9986	0,0014
VTR631/1	20,83	0,048	11	2,11	0,9995	0,0005
T540E	31,25	0,032	9	1,39	0,9997	0,0003
T680G	13,89	0,072	16	6,65	0,9998	0,0012

ной корпус, что является следствием образования трещин и развития коррозионных процессов. Опыт ТЭ показывает, что образование свищей в основном происходит в верхней части корпуса по направлению движения охлаждающей воды. В некоторых случаях эрозионное разъедание приводило к утонению стенки корпуса до 2 мм. В процессе ТЭ ТК (т/х «Иван Тевосян») имело место образование сквозного свища  $\varnothing 10$  мм в верхней части газовыпускного корпуса, что сопровождалось большим расходом охлаждающей пресной воды. Одной из причин свищеобразования являются технологические дефекты литья. Трещинообразование характерно для нижней и верхней частей корпуса. Таким образом, к типичным отказам корпусов турбин ТК относятся эрозионные разъедания, свищи и трещины, являющиеся следствием пороков литья, развития эрозионно-коррозионных процессов и местных перегревов из-за нарушения циркуляции охлаждающей воды и образования масляных и шламовых отложений на поверхностях охлаждения. К причинам появления трещин можно отнести частое изменение режима работы СД до номинального и возможные тепловые перегрузки. Свищи эрозионного характера чаще всего имеют место в чугунных корпусных частях ТК, охлаждаемых заборной водой, очевидно, из-за недостаточной эффективности защиты от воздействия электрохимической коррозии. По опыту ТЭ ТК типа АТЛ-5 сухогрузных судов типа «Андижан» свищи появлялись через 11 тыс. ч работы, а на т/х «Монгуай» — через 4,8 тыс. ч. При этом на момент аварии защитные цинковые протекторы корпусов были из-

ношены на 70–80% первоначальной массы. Однако разрушения эрозионного характера и свищеобразование возможны в чугунных и силуминовых корпусах ТК, охлаждаемых и пресной водой. Причинами появления трещин и разрушений могут быть: совокупность наличия масляных и шламовых отложений в полости охлаждения и больших нагрузок по среднему индикаторному давлению при сравнительно низкой частоте вращения СД; ографичивание материала; естественное старение; неравномерная затяжка крепежных болтов при проведении сборочных операций; разрушение резиновых уплотнений охлаждаемой вставки газовойпускной части корпуса.

Второе место по значимости занимает проточная часть ТК (лопатки соплового аппарата и рабочие лопатки турбины), на долю которой приходится 39% отказов. Здесь, в отличие от газовойпускного корпуса, преобладают отказы, связанные с образованием трещин в основном на внутренней части соплового аппарата, очевидно, являющиеся следствием скрытых дефектов изготовления и допускаемых напряжений при сборочных операциях. Коррозионные разрушения свойственны посадочным буртам соплового аппарата. В процессе ТЭ ТК наблюдались обрывы лопаток, приводящие к дисбалансу ротора, появлению повышенной вибрации и постороннему шуму. Такой вид повреждений является следствием попадания в проточную часть турбин обломков поршневых колец (чаще всего), экранных стаканов выпускных клапанов, а также защитных решеток (в меньшей степени). Возможно попадание в проточную часть турбины ТК об-

Таблица 2

ОБОБЩЕННАЯ ИНФОРМАЦИЯ ОТКАЗОВ ПО ОТДЕЛЬНЫМ УЗЛАМ ТК

Характер отказа	Основные узлы				
	Газовыпускной корпус	Сопловой аппарат	Лопатки ротора	Подшипники скольжения	Лабиринтовое уплотнение
Величина $K^{\text{вз}}$	0,44	0,23	0,16	0,11	0,06
Трещины, % <sup>отк</sup>	40	65	13	5	—
Износ, %	—	—	—	95	100
Поломки, %	—	—	77	—	—
Коррозия, %	60	35	—	—	—

ломков газовой заслонки утилизационного котла. Другой причиной выхода из строя сопловых и рабочих лопаток турбин ТК могут быть явления вибрационного и усталостного характера как следствие колебаний температуры газа и пускового воздуха при частых реверсах СД. При этом могут возникнуть и резонансные напряжения в лопатках турбин, особенно при работе ТК на неустойчивых режимах, в результате чего возможны вырывы и выкрашивания (прежде всего на выходных кромках).

Опыт ТЭ ТК показывает, что одним из узлов, определяющих их ФН, являются подшипники, условия работы которых зависят от особенностей работы СД. Для подшипников качения характерны увеличенный износ в желобах, поломка элементов сепарации, смятие и срез шариков, натяги и надеры металла сепарации и шариков. Причинами этих повреждений являются несоответствие ресурса подшипника действительным условиям работы, плохое качество смазочного масла, ухудшение его эксплуатационных качеств (например, высокая температура масла, контакт с газами), неравномерная и недостаточная подача смазочного масла, загрязнение лабиринтовых уплотнений, низкое качество сборки ТК и подшипниковых узлов. Срок работы подшипников в зависимости от типа ТК изменяется в пределах от 7,87 до 19,6 тыс. ч. Отказы подшипников скольжения ТК составляют 11%. Основная причина — износ. В меньшей степени проявляются трещины и задиры на рабочих поверхностях. Выходы из строя таких подшипников являются следствием заниженных установочных масляных зазоров, повышенной динамической неуравновешенности ротора, недоброкачественной смазки и неудовлетворительного состояния системы смазки. В некоторых случаях причиной образования трещин и выкрашивания металла подшипников в местах касания ротора его рабочей шейкой является повышенная вибрация.

На долю отказов лабиринтовых уплотнений ТК приходится наименьшее количество отказов. Основная причина их выхода из строя — износ. Повреждения лабиринтовых уплотнений подразделяются на две группы: механические и физические. Первые выражаются в виде стачивания гребешков при задевании роторных частей ТК о статорные. Причинами таких повреждений являются: просадки в подшипниках; осевые сдвиги роторов; неправильная установка зазоров в процессе ремонта ТК; прогибы и изгибы вала; повреждения при сборочно-разборочных операциях.

При механических повреждениях происходит разрушение материала элементов уплотнений, а при физических — ухудшается способность уплотнений задерживать протечки воздуха, газов и масла. При-

чинами таких повреждений могут быть износ гребешков, проходного сечения, засорения трубопровода или канала, подводящего воздух на уплотнения. Опыт ТЭ показывает, что большие отрицательные последствия имеют место при ухудшении задерживающей способности лабиринтового уплотнения со стороны турбины. Повреждения лабиринтовых уплотнений в основном происходят из-за нарушений в работе опорных и опорно-упорных подшипников. Признаком, указывающим на износ уплотнений, является выход воздуха и унос вместе с ним масла через вентиляционные отверстия в торцевой крышке. Из опыта ТЭ следует, что после 6–8 тыс. ч работы по причине загрязнения ТК давление продувочного воздуха снижается в среднем на 0,006–0,008 МПа, а температура выхлопных газов возрастает на 15–25 °С. При этом удельный расход топлива увеличивается на 2–4 г/э.л.с · ч.

В целях определения нормативной базы диагностических показателей (ДП) для оценки технического состояния (ТС) ТК проведены натурные испытания на судах типа т/х «Художник Моор» в соответствии с методическими указаниями, разработанными ЦНИИМФ. Результаты представлены ниже. Количественная информация по изменению виброскорости ТК в зависимости от их частоты вращения и оценки ТС приведены на рис. 3 и табл. 3.

Информация по оценке ТС отдельных узлов ТК с использованием ДП представлена в табл. 4–9 и на рис. 4–8.

В том случае, когда измеренная температура наддувочного воздуха будет отличаться от принятой на графике ( $t_{im} = 30$  °С), рекомендуется откладывать температуру, вычисленную по формуле:  $t'_r = t'_r + (30 - t'_{im}) \cdot 2$ , где  $t'_r$  и  $t'_{im}$  — замеренные значения температур.

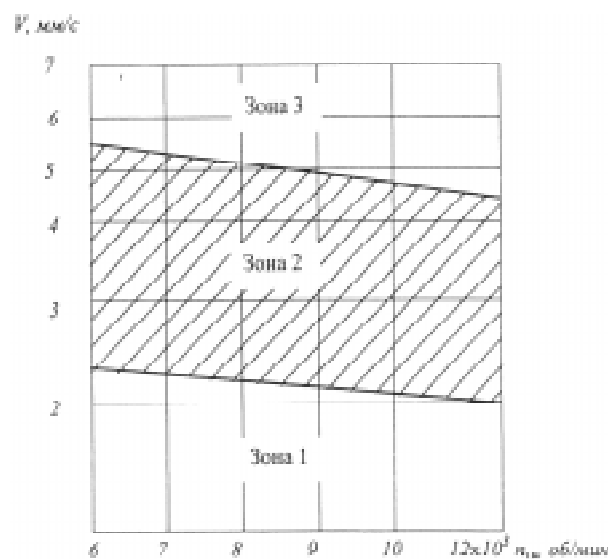


Рис. 3. Значения виброскорости ТК60 в зависимости от частоты вращения

Таблица 3

## ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ВИБРАЦИИ РОТОРА

Значение виброскорости, мм/с (рис. 3)	Категория технического состояния	Периодичность контроля диагностического показателя, тыс. ч
Зона 1	Хорошо	2,0
Зона 2	Удовлетворительно	1,0
Зона 3	Неудовлетворительно	Проведение ТО или ремонта

Таблица 4

## ОЦЕНКА ТС ПОДШИПНИКОВ

Диагностический показатель	Норма диагностического показателя	Категория технического состояния	Периодичность контроля диагностического показателя
Масляный зазор, мм	0,12–0,20	Хорошо	2,0
	0,21–0,30	Удовлетворительно	1,0
	Более 0,30	Неудовлетворительно	Проведение ТО или ремонта
Осевой разбег ротора, мм	0,30–0,40	Хорошо	2,0
	0,41–0,55	Удовлетворительно	1,0
	Более 0,55	Неудовлетворительно	Проведение ТО или ремонта
Температура нагрева смазочного масла, °С*	Менее 30	Хорошо	0,50
	30–40	Удовлетворительно	0,25
	Более 40	Неудовлетворительно	Проведение ТО или ремонта

\* Нагрев смазочного масла в подшипнике ТК определяется по разности температуры масла на входе и выходе из него.

Таблица 5

## ОЦЕНКА ТС ПОЛОСТЕЙ ОХЛАЖДЕНИЯ КОРПУСА

Температура нагрева* (перепад) охлаждающей воды в корпусе, °С	Категория технического состояния	Периодичность контроля диагностического показателя, тыс.ч
11–15	Хорошо	0,50
7–10	Удовлетворительно	0,25
Менее 7	Неудовлетворительно	Проведение ТО или ремонта

\* Уменьшение температуры нагрева охлаждающей воды в корпусе (разность температуры воды на входе и выходе из него) свидетельствует о наличии отложений (накипи, ржавчины и т. д.) в водяных полостях корпуса.

Таблица 6

## ОЦЕНКА ТС ФИЛЬТРА-ГЛУШИТЕЛЯ

Перепад давления на фильтре-глушителе, мм вод. ст. (рис. 4)	Категория технического состояния	Периодичность контроля диагностического показателя, тыс. ч
Зона 1	Хорошо	0,50
Зона 2	Удовлетворительно	0,25
Зона 3	Неудовлетворительно	Проведение ТО или ремонта

Таблица 7

## ОЦЕНКА ТС ВОЗДУШНОГО ТРАКТА ВОЗДУХООХЛАДИТЕЛЯ

Перепад давления воздуха в охладителе, мм вод. ст. (рис. 4)	Категория технического состояния	Периодичность контроля диагностического показателя, тыс. ч
Зона 1	Хорошо	2,0
Зона 2	Удовлетворительно	1,0
Зона 3	Неудовлетворительно	Проведение ТО или ремонта

$\Delta P_{\phi}$ , мм вод.ст.

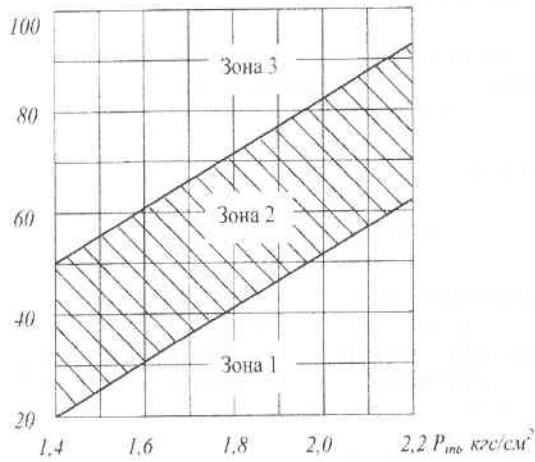


Рис. 4. Значения перепада давления на фильтрах-глушителях в зависимости от давления наддувочного воздуха

$P_{об}$ , кгс/см<sup>2</sup>

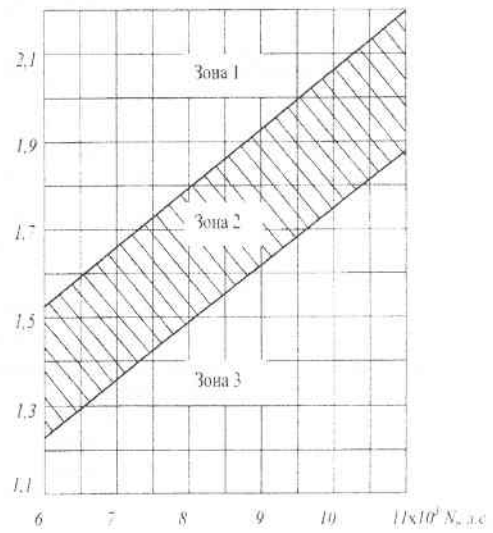


Рис. 6. Значения давления наддувочного воздуха в зависимости от индикаторной мощности

$\Delta P_{охл}$ , мм вод.ст.

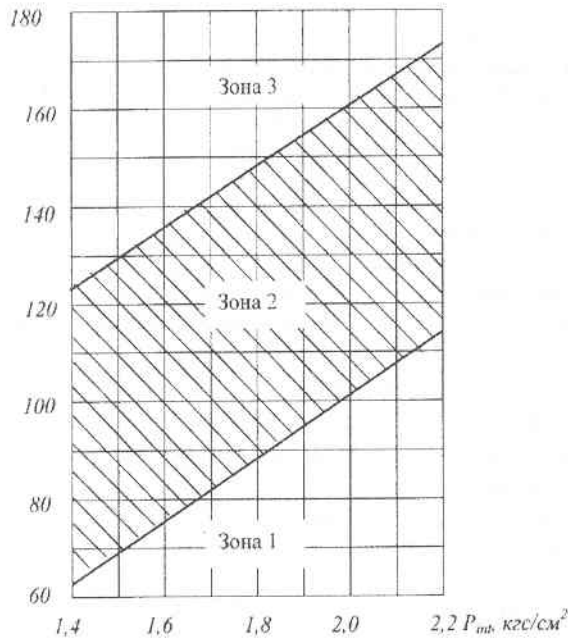


Рис. 5. Значения перепада давления в охладителе воздуха в зависимости от давления наддувочного воздуха

$t_2$ , °C

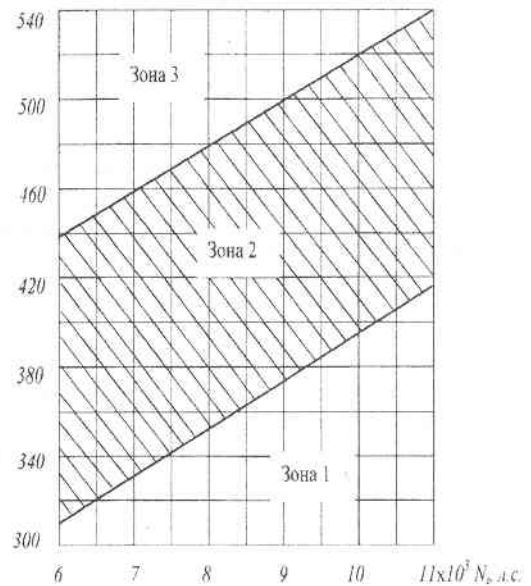


Рис. 7. Значения температуры газов перед турбиной в зависимости от индикаторной мощности СД (температура воздуха после охладителя 30 °C)

ОЦЕНКА ТС ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ТК

Таблица 8

Давление наддувочного воздуха, кгс/см <sup>2</sup> (рис. 6)	Температура газа перед турбиной, °C (рис. 7)	Частота вращения ТК, об/мин (рис. 8)	Категория технического состояния	Периодичность контроля диагностических показателей, тыс. ч
Зона 1			Хорошо	2,0
Зона 2			Удовлетворительно	1,0
Зона 3			Неудовлетворительно	Проведение ТО или ремонта

ОЦЕНКА ТС ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ТК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВИЗУАЛЬНОГО СПОСОБА

Элементы проточной части (колесо компрессора, лопатки диффузора, рабочие и сопловые лопатки, демпферная проволока турбины, стенки корпуса)	Категория технического состояния	Периодичность контроля диагностических показателей, тыс. ч
Отсутствие повреждений и отложений	Хорошо	2,0
Незначительные загрязнения, отсутствуют повреждения	Удовлетворительно	1,0
Значительные загрязнения лопаточного аппарата (имеются повреждения)	Неудовлетворительно	Проведение ТО или ремонта

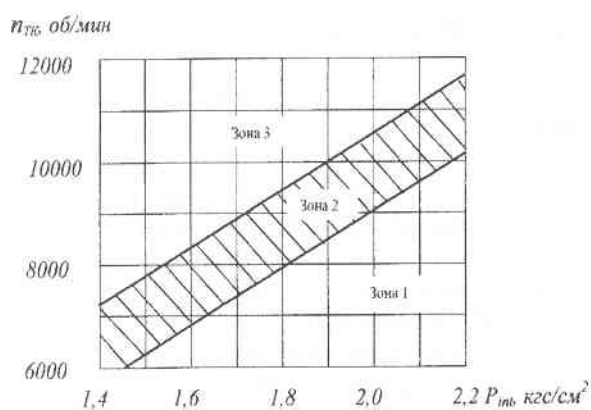


Рис. 8. Значения частоты вращения ТК в зависимости от давления наддувочного воздуха

### Выводы

1. Работоспособность СД в значительной степени определяется уровнем ФН систем наддува, основным элементом которых является ТК.

2. Для исследованного диапазона наработки ТК характерны два режима (приработочный, стабилизированный). Несоответствие отказов при работе на этих режимах объясняется количеством и их природой, обусловленных факторами технологического, монтажного и эксплуатационного характера.

3. Худшие показатели безотказности и ремонтнопригодности имеют ТК типа Т680. Для них характерны меньший коэффициент готовности и запаса ФН.

4. Наименее надежным узлом ТК является газоразборный корпус. Отказы этого элемента являются следствием возникновения трещин, обусловленных частым изменением режима работы СД, тепловыми перегрузками, наличием масляных и

шламовых отложений в полости охлаждения, и развития эрозионно-коррозионных процессов из-за нарушения циркуляции охлаждающей воды.

5. Второе место по значимости влияния элементов ТК на уровень их ФН занимает проточная часть (лопатки соплового аппарата, рабочие лопатки турбины). Одной из причин выхода ее из строя является возникновение в процессе ТЭ явлений вибрационного и усталостного характера, а также резонансных напряжений как следствие колебаний температуры газа и пускового воздуха при частых реверсах СД и работе на неустойчивых режимах.

6. Обеспечение ФН ТК систем наддува является одним из наиболее важных факторов повышения эффективности эксплуатации СД. При этом определяющей является оценка текущего технического состояния с использованием нормативной базы диагностических показателей.

### Литература

1. Петровский Н. В. Газотурбинный наддув мощных двухтактных судовых дизелей. — Л.: Судостроение, 1970. — 254 с.
2. Моек Е., Штрикерт Х. Техническая диагностика судовых машин и механизмов: пер. с нем. — Л.: Судостроение, 1986. — 232 с.
3. Овсянников М. К., Петухов В. А. Эксплуатационные качества судовых дизелей. — Л.: Судостроение, 1982. — 208 с.
4. Lutzen C., Moller A.P., Christensen C. «Turbocharger failures, a law of nature or neglect» CIMAC 2001, Hamburg. — Vol. 3. — P. 796–801.
5. Башуров Б. П., Балахнин Ю. Н., Бурак П. П. Эксплуатационные качества газотурбоагрегатов судовых дизелей // Морской транспорт. Сер. «Техническая эксплуатация флота»: Экспресс-информация. — М.: В/О «Мортехинформреклама», 1987. — Вып. 10 (654).