

ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ ДВУХТОПЛИВНЫХ ДИЗЕЛЕЙ MAN L51/60DF

А.А. Иванченко, д.т.н., проф., Д.С. Ватолин, аспирант
Государственный университет морского и речного флота
имени адмирала С.О. Макарова

В качестве одного из наиболее привлекательных решений для российских судовладельцев рассматривается оснащение судов двухтопливными двигателями, способные работать на жидком и газовом топливах. Рассмотрены особенности конструкции двухтопливных двигателей компании «MAN Diesel & Turbo» типа 51/60DF, работающие в составе дизель-генераторов на судах проекта S1910 с системой электродвижения. Выполнен анализ опыта эксплуатации и возникающих отказов дизелей за время наработки около 18 000 часов. В рассмотрение принимались особенности процессов пуска, перевода на различные виды топлива (жидкое топливо–газ–жидкое топливо) и возникающие при этом отказы. Анализ возникающих отказов показал, что их основной причиной является нестабильность рабочего процесса в зоне режимов, преобладающих в условиях эксплуатации.

Введение

Принятое в 2010 г. на 58 сессии ИМО пересмотренное Приложение VI к МАРПОЛ 73/78, вступившее в силу 01.01.2011, наметило план поэтапного снижения выбросов окислов азота (NO_x) от судовых энергетических установок. Согласно этому плану к 01.01.2016 предусмотрено сокращение выбросов NO_x на 80 % за счет введения нормы выбросов NO_x для судовых дизелей на уровне ИМО Tier-3 (3,4–2,0 г/кВт·ч) при условии, что этот технический норматив будет действовать только в областях контроля выбросов (NECA) [1]. К областям NECA относятся Североамериканское побережье Канады и США, а также в перспективе Балтийское и Северное моря (рис. 1).

В настоящее время нормативы ИМО Tier-3 вступили в силу с 2016 г. в районах, прилегающих к Североамериканскому побережью Канады и США. Сроки введения норматива ИМО Tier-3 в районах Северного и Балтийского морей перенесены на 2021 г., т. к. анализ состояния разработок технологий в Европе по сокращению выбросов NO_x показал неготовность изготовителей

двигателей к выпуску продукции, соответствующей заявленным нормативам.

В связи с изложенным внимание изготовителей судовых силовых установок сосредоточено на разработке двухтопливных двигателей, способных работать как на жидком, так и на газовом топливе. Это обусловлено во-первых, необходимостью выполнения вступающих в силу требований ИМО Tier-3, во-вторых — относительной дешевизной и перспективностью газового топлива.

В России применение газа в качестве моторного топлива все больше рассматривается как серьезная альтернатива флотскому мазуту (HFO) и дизельному топливу (MDO). Об этом свидетельствует содержание принятой Государственной программы «Развитие транспортной системы» [2], которая предусматривает создание условий для использования сжиженного природного газа (СПГ) в целях обеспечения работы судовых энергетических установок на морском и речном транспорте; развитие объектов газозаправочной инфраструктуры для хранения и бункеровки судов СПГ в морских портах и на внутренних водных путях; стимулирование исследований по разработке и производству морских и речных судов, использующих СПГ для обеспечения работы энергетических установок. Программу планируется реализовать в один этап в период с 2018 по 2022 гг.

В развитие этой программы ПАО Газпром рассмотрел следующие сценарии спроса на бункер СПГ в Балтийском и Северном морях в 2011–2030 гг. [3] (рис. 2).



Рис. 1. Расположение зон ECA

Таблица 1

Технические данные дизеля фирмы «MAN Diesel&Turbo» типа 51/60DF

Количество цилиндров, шт.	6–9
Частота вращения, об/мин	514/500
Диаметр цилиндра, мм	510
Ход поршня, мм	600
Среднее эффективное давление, бар	20,0/20,6
Цилиндровая мощность, кВт	1050
Расход топлива/газа при нагрузке 85 %, г/(кВт·ч)/кДж/(кВт·ч)	180,2/7,265

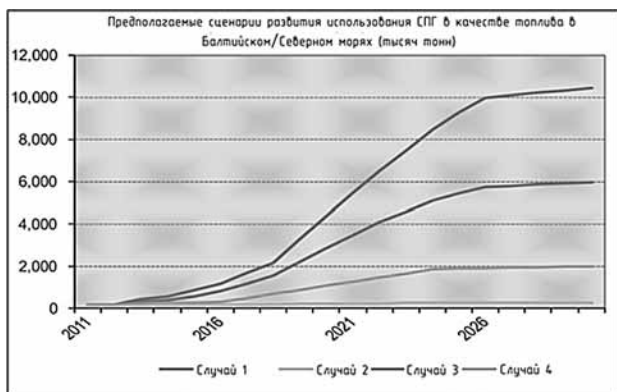


Рис. 2. Предполагаемые сценарии развития использования СПГ в качестве топлива в Балтийском/Северном морях

Случай 1: LNG \$ 15,73/ММВтu* — эквивалентная цена использования НФО с системой очистки скрубберами.

Случай 2: СПГ \$ 20,25 / ММВтu — эквивалентная цена использования МДО. (Поставка СПГ слишком дорогостоящая, пределы серы принимаются только на основе регулирования).

Случай 3: СПГ \$ 13,62 / ММВтu — эквивалентная цена использования НФО. (СПГ сильно стимулируется, топливный переключатель производится на основе лучшей экономики).

Случай 4: СПГ \$ 15,73 / ММВтu — эквивалентная цена использования НФО из-за отстающей экономики и снижения спроса.

Все вышеприведенные факторы послужили толчком к началу производства двухтопливных дизелей и их большому распространению на мировом рынке. Несмотря на то что конструктивные схемы рассматриваемых дизелей уже не раз рассматривались в настоящем журнале и современной технической литературе [4–6], работы, посвященные анализу особенностей эксплуатации современных судовых двухтопливных дизелей, их рабочих процессов и отказов, практически отсутствуют.

Общий анализ показателей работы и безотказности двухтопливных дизелей

Настоящий анализ выполнен по итогам наблюдения за эксплуатацией двухтопливных дизелей компании MAN Diesel & Turbo типа 51/60DF. Производство двигателей начато компанией с 2011 г. Основные характеристики двигателей приведены в табл. 1 [7]. Двигатели используются на судах проекта S1910 в составе двигатель-генераторов на судах с системой электродвижения. За время наблюдения наработка двигателей составила около 18 000 часов, что соответствует периоду с 2015 г. по настоящее время.

* ММВтu — один миллион британских тепловых единиц (1000 м³ природного газа = 35,8 ММВтu).

В рассмотрение принимались особенности эксплуатации двухтопливных дизелей, вопросы их пуска, перевода с топлива на топливо, контролируемые показатели рабочего процесса и отказы.

Двигатели эксплуатируются в составе судовой электроэнергетической установки, состоящей из четырех дизель-генераторов (2-х MAN 8L51/60DF; 2-х MAN 9L51/60DF) и турбогенератора. Двигатель работает на двух видах топлива: дизельном и газовом. При использовании газового топлива газ подается в рабочие цилиндры через газовый клапан (Solenoid Gas Admission Valve — SOGAV) вместе с продувочным воздухом. Для воспламенения газа используется система «Micro Pilot», которая подает в цилиндры дизельное топливо (МДО) через пилотные форсунки. В качестве жидкого топлива предусмотрено использование в основном тяжелого топлива (НФО), и МДО при заходе в зоны ЕСА и при обкатке двигателя после моточистки. При работе на жидком топливе оно подается через основные форсунки, причем система «MicroPilot» остается в работе. Двигатель способен перейти на газовое топливо, начиная с нагрузки 20 % от номинальной, и поддерживать работу при нагрузке не ниже 15 %. Контроль сгорания газа в цилиндрах осуществляется с помощью пьезометрических датчиков, контролирующих предотвращение детонации. Выход из режима детонации осуществляется микропроцессорной системой управления и защиты SaCoSone, разработанной компанией «MAN Diesel & Turbo». При этом система с помощью программно-логического аппарата, изменяет угол опережения воспламенения топлива и уменьшает подачу газа в цилиндр. В случае длительной работы двигателя в режиме неуправляемого сгорания газа система SaCoSone начинает его автоматический перевод на жидкое топливо, продолжительность которого составляет ~5 мин, а в случае возникновения слишком сильной детонации при сгорании в цилиндре — инициирует быстрый переход на жидкое топливо (практически мгновенный).

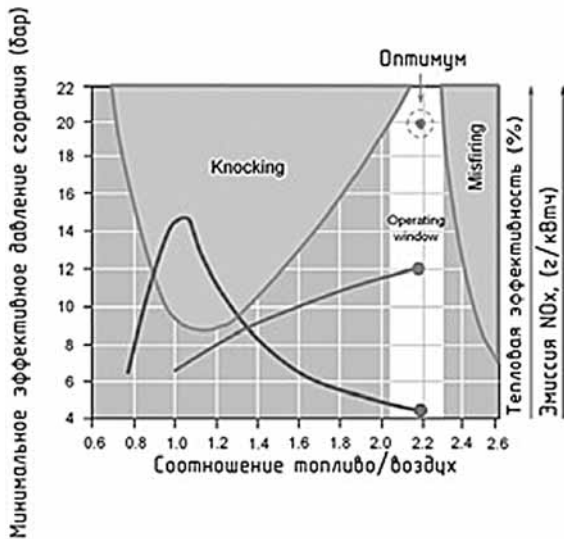


Рис. 3. Определение соотношения топливо/воздух при работе дизеля на газовом топливе

Рабочий процесс при работе на газовом топливе организован по принципу использования обедненной газозвушной смеси. А именно сгорание обедненной газозвушной смеси в рабочих цилиндрах происходит при поддержании соотношения топливо/воздух $\lambda \sim 2,2$ (рис. 3). Для поддержания оптимального коэффициента избытка воздуха используется специальный перепускной клапан, который стравливает избыточный воздух с нагнетательной части турбокомпрессора в атмосферу через глушитель. Указанный клапан приводится в действие только при работе двигателя на газовом топливе, при работе на жидком топливе он остается закрытым.

Изменение основных контролируемых параметров рабочего процесса двигатель-генераторов № 1–4 по нагрузочной характеристике в при их работе на газовом и тяжелом топливе представлены на рис. 4–5.

Измерения рабочих параметров двигателей выполнялись ежедневно в 12:00 по местному времени на всех работающих двигателях.

Из представленных данных следует, что не все контролируемые параметры подчиняются

строгим закономерностям во всем диапазоне рабочих режимов. Относительно стабильны характеристики давления надвучного воздуха и частоты вращения ротора турбокомпрессора на всех двигателях при работе на газовом топливе. Это является следствием автоматического регулирования давления наддува при работе на газовом топливе. При работе на топливе НФО наблюдаются колебания и давления наддува и частоты вращения ротора турбокомпрессора. Причем особенно нестабильно агрегат наддува работает на долевых режимах. Это следствие нестабильности рабочего процесса, о чем свидетельствует разброс наблюдаемых данных по температуре отработавших газов перед турбиной и после турбины. Причиной нестабильности рабочего процесса при работе на газовом топливе могут быть колебания в наполнении цилиндров зарядом воздуха в результате волновых процессов в ресивере. При работе на жидком топливе нестабильность

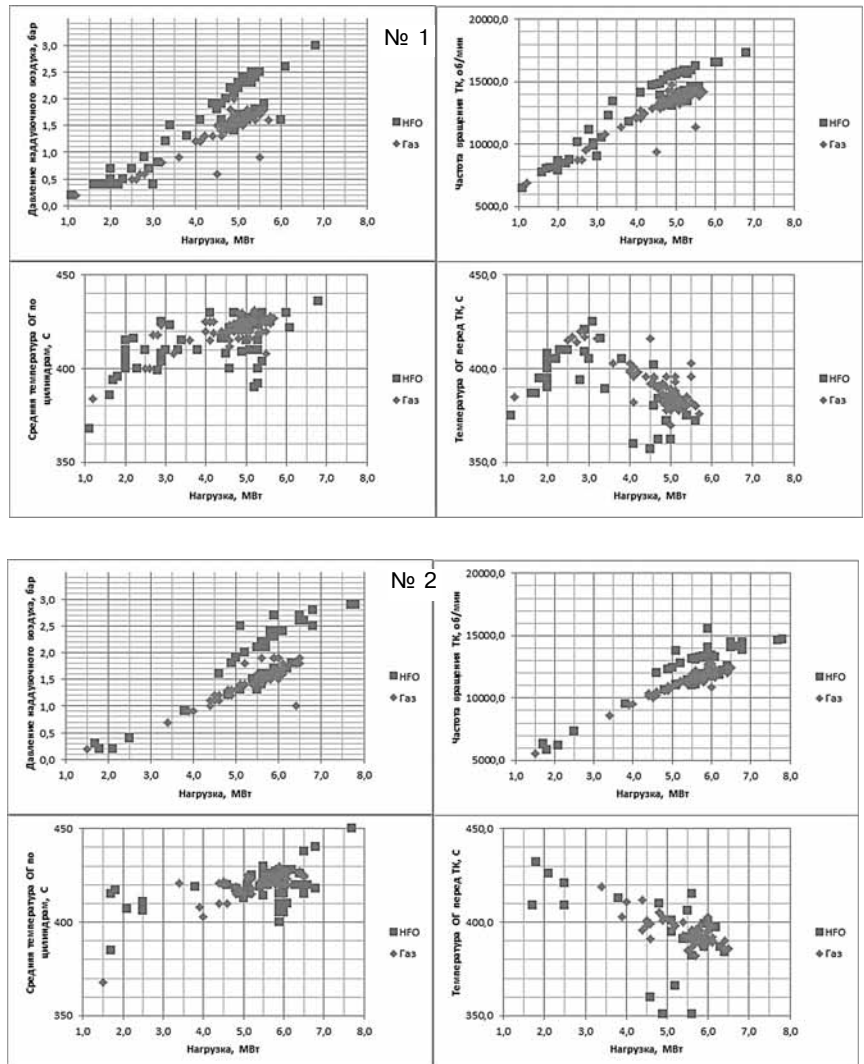


Рис. 4. Зависимость значений рабочих параметров от нагрузки главного двигателя № 1–2

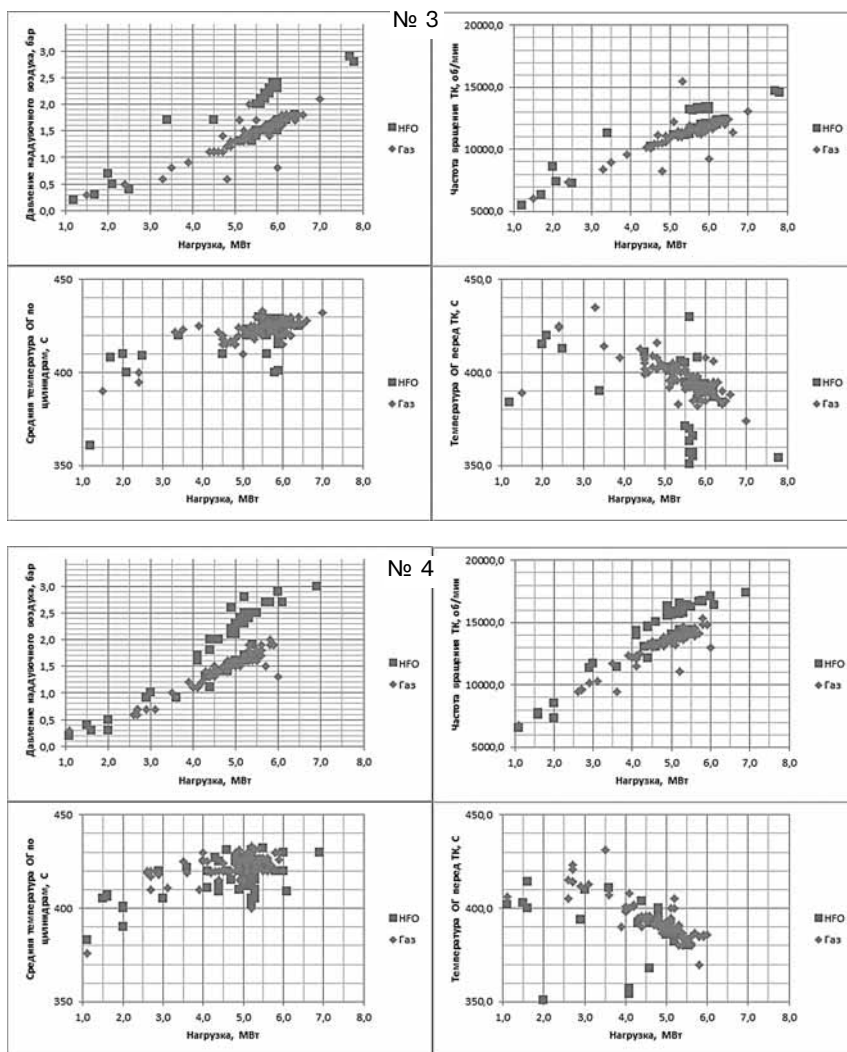


Рис. 5. Зависимость значений рабочих параметров от нагрузки главного двигателя № 3–4

Для исключения неоднозначности в оценке влияния различных факторов на показатели рабочего процесса дополнительно рассмотрено изменение основных контролируемых параметров рабочего процесса дизеля MAN 9L51/60DF мощностью 8,8 МВт при его работе на газовом топливе (метан) и на жидком топливе IFO 380 соответственно на режимах приблизительно схожей нагрузки. Рассматриваемые параметры представлены в табл. 2 и 3.

Анализ данных этих таблиц позволяет отметить особенно сильные различия в давлении наддувочного воздуха (~0,3–0,5 бар) и частоте вращения ротора турбокомпрессора (~1000 об/мин). Большие значения рассматриваемые параметры имеют при работе на жидком топливе. При работе на газовом топливе несколько увеличивается температура газов на выпуске из цилиндра.

Важными параметрами, характеризующими надежность двухтопливных двигателей, является безотказность его элементов. Во время эксплуатации двигателей типа MAN L51/60DF зафиксированы относительно частые случаи заклинивания плунжеров топливных насосов высокого давления (ТНВД) во время пуска

Таблица 2

Рабочие параметры дизеля при работе на газовом топливе

Дата	Нагрузка, МВт	Давление наддувочного воздуха, бар	Средняя температура ОГ по цилиндрам, °С	Температура ОГ за ТК, °С	Частота вращения ТК, об/мин
03.11.2015	6,1	1,7	420	390,0	11 840,0
04.11.2015	5,4	1,4	420	400,0	11 080,0
05.11.2015	5,1	1,4	425	400,0	11 070,0
06.11.2015	4,8	1,3	415	405,0	10 560,0
07.11.2015	5,6	1,9	420	387,0	12 220,0
08.11.2015	5,6	1,4	420	396,0	11 380,0
09.11.2015	5,7	1,6	425	396,0	11 670,0
10.11.2015	5,6	1,6	425	395,0	11 540,0
11.11.2015	5,5	1,5	420	392,0	11 640,0
12.11.2015	5,6	1,5	420	391,0	11 640,0
13.11.2015	6,0	1,9	420	402,0	10 900,0
14.11.2015	5,0	1,3	415	402,0	10 940,0
15.11.2015	5,2	1,4	418	398,0	11 200,0
16.11.2015	4,9	1,3	416	401,0	10 950,0

Таблица 3

Рабочие параметры дизеля при работе на тяжелом топливе (НФО)

Дата	Нагрузка, МВт	Давление наддувочного воздуха, бар	Средняя температура ОГ по цилиндрам, °С	Температура ОГ за ТК, °С	Частота вращения ТК, об/мин
04.10.2015	5,9	1,7	422	392,0	11 950,0
05.10.2015	6,0	1,6	425	390,0	12 010,0
06.10.2015	6,0	1,6	426	390,0	12 070,0
07.10.2015	6,0	1,6	427	394,0	11 870,0
08.10.2015	6,0	2,4	427	394,0	11 760,0
09.10.2015	6,2	1,7	427	390,0	12 040,0
10.10.2015	7,8	2,8	460	354,0	14 540,0
11.10.2015	5,6	2,1	425	351,0	13 140,0
12.10.2015	7,7	2,9	456	344,0	14 700,0
13.10.2015	5,7	2,1	423	355,0	13 250,0
14.10.2015	5,6	2,1	423	357,0	13 180,0
15.10.2015	5,7	2,1	426	357,0	13 320,0
16.10.2015	5,7	2,0	427	370,0	13 240,0
17.10.2015	5,5	2,0	428	371,0	13 190,0
18.10.2015	5,7	1,7	422	392,0	11 950,0
19.10.2015	5,6	1,6	425	390,0	12 010,0
20.10.2015	5,8	1,6	426	390,0	12 070,0
21.10.2015	5,8	1,6	427	394,0	11 870,0



Рис. 6. Повреждения турбинной части ТК

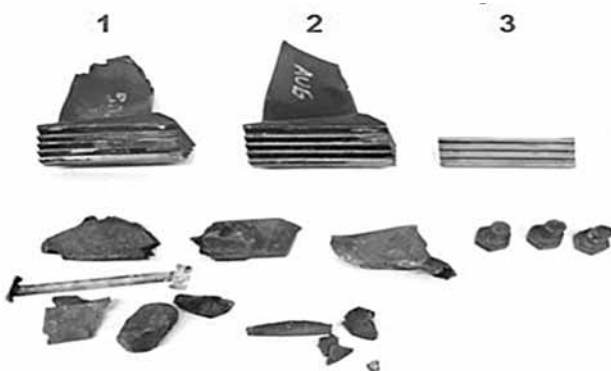


Рис. 7. Компоненты ТК, доставленные в Аугсбург

заклинивание 8 плунжеров ТНВД из 9. Причем рассматриваемые систематические отказы имели место на трех из четырех судов с главными двигателями MAN L51/60DF, находящихся в эксплуатации ПАО «Совкомфлот». Собранная по ре-

зультатам отказов статистика по всей серии судов передана производителю двигателей для анализа и решения данной проблемы.

Отдельно стоит отметить случай отказа турбокомпрессора (ТК) двигателя MAN 9L51/60DF марки TCA 66 [8]. Аварийная остановка главного дизель-генератора № 3 при работе на топливе НФО во время морского перехода произошла по сигналу низкого давления масла в системе смазки ТК (нормальное значение — 1,5 бар; аварийное значение — 0,9 бар). Сразу же после аварийной остановки при внешнем осмотре были обнаружены повреждения изоляции турбинной части ТК и протечки охлаждающей воды. После вскрытия турбинной части были обнаружены 40 поврежденных турбинных лопаток, и одна лопатка, оторвавшаяся от хвостовика (рис. 6). Нарботка двигателя на момент аварии составляла всего 600 часов.

Фрагменты турбинных лопаток и других поврежденных компонентов (рис. 7) были отправлены в Аугсбург заводу-производителю для выяснения причин произошедшей аварии.

В ходе расследования аварии были проведены проверки и анализ поврежденных поверхностей, качества материала турбин-

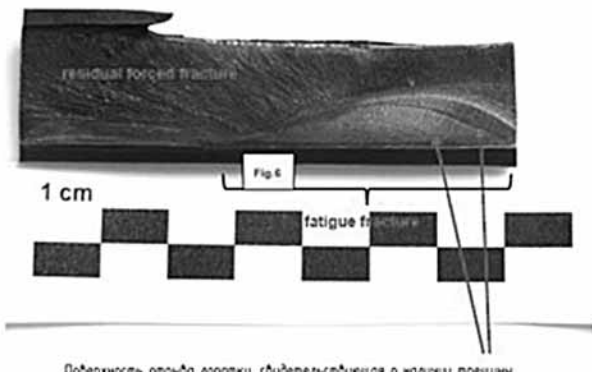
ных лопаток и исследованы условия эксплуатации (на основании данных машинного журнала).

В результате анализа поврежденных поверхностей турбинных лопаток на поверхности разрушения лопатки № 3 обнаружены следы развившейся трещины, приведшей к отрыву лопатки от хвостовика (рис. 8).

На поврежденной поверхности турбинной лопатки № 1 найдены следы ударных повреждений (рис. 9).

На поврежденной поверхности турбинной лопатки № 2 были обнаружены следы повреждения передней кромки (рис. 10).

Анализ поврежденных поверхностей лопаток показал, что наиболее вероятной причиной произошедшей аварии было образование микротрещины в турбинной лопатке № 3, которая развилась во время эксплуатации ТК, и спонтанный обрыв которой привел к повреждению всей



Поверхность отрыва лопатки, свидетельствующая о наличии трещины

Рис. 8. Фото поверхности отрыва лопатки

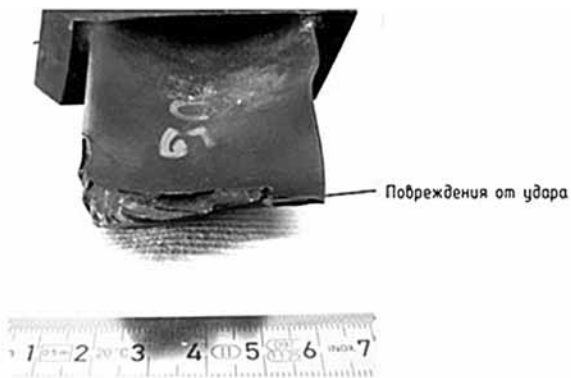


Рис. 9. Повреждения лопатки № 1



Рис. 10. Повреждения турбинной лопатки № 2

турбинной части. Дефектов материала в месте отрыва обнаружено не было.

Причиной разрушения турбинной лопатки № 3 стала усталостная микротрещина, появившаяся в зоне наибольшей концентрации напряжений (рис. 11), соответствующих 4-й частоте автоколебаний. Корень лопатки подвержен наибольшему влиянию усталостных напряжений вызываемых автоколебаниями 4-й частоты.

Резонанс 4-й собственной частоты автоколебаний соответствует 13 400–14 500 об/мин

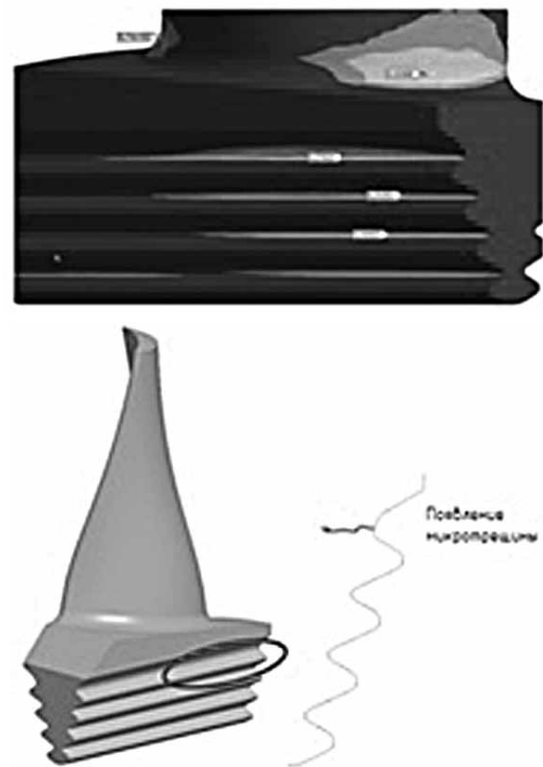


Рис. 11. Распределение усталостных напряжений в турбинной лопатке

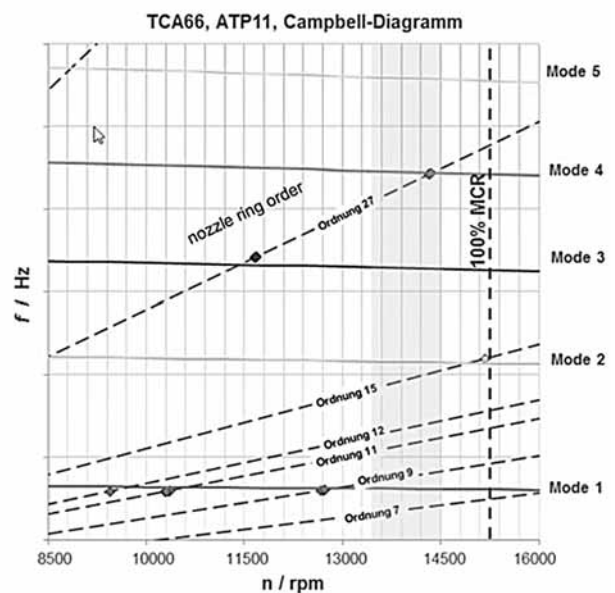


Рис. 12. Диаграмма Кемпбела для ТК ТСА 66

(рис. 14) (что соответствует работе дизеля при нагрузке 72–80 % на НФО).

Все другие собственные частоты автоколебаний лопаток, возбуждаемые в пределах рабочего диапазона, не приводили к появлению предельных напряжений в корне турбинных лопаток и могут быть исключены в качестве причины появления усталостной трещины.

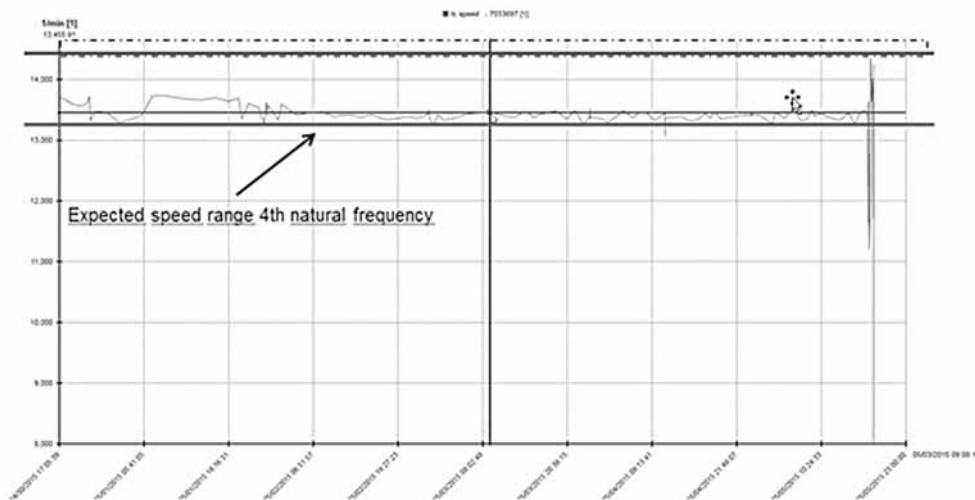


Рис. 13. Условия работы ТК в течение недели предшествующей аварии

По данным, зафиксированным в машинном журнале, были восстановлены условия работы ТК в течение последней недели, предшествующей аварии. Анализ показал, что ТК работал без каких-либо замечаний в основном в диапазоне скоростей ~13500 об/мин (рис. 15), соответствующем диапазону возбуждения 4-й частоты собственных автоколебаний.

Для исключения зафиксированных отказов компания «MAN Diesel & Turbo» произвела замену соплового аппарата турбины ТК на всех двигателях рассматриваемой серии и тем самым изменила критическую частоту вращения на основном эксплуатационном режиме.

Заключение

Современные экологические требования к силовым установкам судов инициировали повышение интереса судовладельцев к двухтопливным двигателям. Ответом промышленности на этот вызов стало начало производства двухтопливных двигателей всеми ведущими производителями, контролирующими большую часть мирового рынка. Российские судовладельцы, эксплуатирующие суда проекта S1910 с системой электродвижения, на которых двухтопливные двигатели компании «MAN Diesel & Turbo» типа 51/60DF используются в качестве привода генераторов, познакомились и столкнулись с проблемами при эксплуатации этих двигателей. Однако опыт эксплуатации двигателей этого типа еще

слишком мал. Причины возникших отказов наиболее вероятно состоят в нестабильности рабочего процесса в зоне режимов, преобладающих в эксплуатации. И хотя фирмы-производители постоянно занимаются улучшением конструкции и решением проблем в эксплуатации, разработчикам двухтопливных дизелей предстоит еще очень долгий путь до получения оптимальной надежной конструкции.

Литература

1. Международная конвенция по предотвращению загрязнения морской среды МАРПОЛ 73/78 // СПб. : ЦНИИМФ. — 2012. — 762 с.
2. Паспорт государственной программы Российской Федерации «Расширение использования природного газа в качестве моторного топлива на транспорте и техникой специального назначения» // <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc;base=PNPA;n=26650#0>
3. GAZPROM G4T. LNG bunker supply and infrastructure development by Gazprom // <http://slideplayer.com/slide/5801252/>
4. Кристен К., Бранд Д. IMO Tier 3: Газовые и двухтопливные двигатели — экологически чистое и эффективное решение (материалы конгресса CIMAC 2013) // Двигателестроение. — 2013. — № 4. — С. 42–55.
5. Милло Ф., Лаврино Г. Детонация в газодизеле: сопоставление различных методов обнаружения и контроля (материалы конгресса CIMAC 2010) // Двигателестроение. — 2013. — № 1. — С. 42–53.
6. Мельник Г.В. Новые дизели и газовые двигатели // Двигателестроение. — 2011. — № 1. — С. 40–50.
7. MAN L51/60 DF Propulsion // <http://marine.man.eu/docs/default-source/shopwaredocumentsarchive/man-l51-60df.pdf?sfvrsn=7>
8. Investigation Report. Turbocharger breakdown TCA66 — 42289 // MAN | PrimeServ Augsburg. — 2015. — 9 с.