

Р.А. Варбанец, Е.В. Белоусов, В.П. Савчук, В.И. Кырнац

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА И ДИАГНОСТИКА ГЛАВНЫХ СРЕДНЕОБОРОТНЫХ ДИЗЕЛЕЙ Т/Х «GREIFSWALD»

Диагностика четырех главных дизелей т/х «Greifswald» была произведена в условиях рейса Одесса-Стамбул-Одесса в январе 2015. Погодные условия позволили произвести индицирование всех цилиндров четырех главных дизелей 6VDS48/42AL-2U, в том числе произведена диагностика топливной аппаратуры (ТА) высокого давления, механизма газораспределения (МГР) и цилиндропоршневой группы (ЦПГ). Для определения параметров рабочего процесса была использована система компьютерного диагностирования D4.0H, разработанная на кафедре СЭУ и ТЭОНМУ.

Введение

В связи с используемым в системе D 4.0H [1] методом алгоритмической синхронизации данных и виброакустическим определением параметров топливоподачи и газораспределения, она является удобным средством для диагностики среднеоборотных дизелей, на которых отсутствуют механические приводы для снятия индикаторных диаграмм. Полученные диагностические данные дают возможность осуществлять контроль состояния ЦПГ и устранять дефекты ТА и МГР. Определение с помощью D4.0H и последующее равномерное распределение мощности между цилиндрами позволяет выровнять тепловые и механические нагрузки. Весь комплекс проведенных мероприятий способствует снижению общего уровня вибрации и теплонапряженности деталей ЦПГ, уменьшению удельного расхода топлива, повышению моторесурса и снижению риска возникновения аварийных ситуаций в процессе эксплуатации судна.

Определение основных параметров рабочего процесса

Система D4.0H позволяет определить следующие основные параметры рабочего процесса двигателя:

- p_b , N_b – среднее индикаторное давление и индикаторную мощность цилиндра;
- p'_c – давление и угол поворота коленчатого вала (ПКВ) в начале воспламенения топлива в рабочем цилиндре;
- p_c (p_{comp}) – давление в конце сжатия;
- p_z (p_{max}) – максимальное давление сгорания топлива и соответствующий угол ПКВ;
- p_{EXP} – давление на линии расширения (36° ПКВ за верхней мертвой точкой, ВМТ);
- фазы газораспределения (по углам закрытия впускных и выпускных клапанов газораспределительного механизма, МГР);
- геометрические (по ТНВД) и действительные (по ходу иглы форсунки) фазы топливоподачи;

- τ_D – угол и время задержки самовоспламенения топлива (расчетным путем).

Определение фаз топливоподачи и газораспределения, а также диагностика топливной аппаратуры высокого давления и механизма газораспределения МГР производится с помощью анализа виброакустических сигналов соответствующих узлов. Для этой цели в составе системы имеется высокочастотный вибродатчик VS-20m на магнитной платформе, обеспечивающей надежный контакт датчика со стальной площадкой диагностируемого узла на работающем дизеле. Использование виброакустического метода полностью соответствует современной идеологии «неразрушающего диагностического контроля». VS-20m используется для получения информации о начале подачи/отсечке топлива (геометрические фазы топливоподачи) и подъеме/посадке иглы форсунки (действительные фазы топливоподачи).

Традиционная диагностика топливной аппаратуры высокого давления связана с получением диаграмм давления топлива (рис. 1). Безусловно, их анализ дает самую точную информацию о техническом состоянии топливного насоса высокого давления (ТНВД) и форсунки. Величины максимальных давлений впрыскивания топлива (p_{max} , рис. 1) в современных ТА достаточно велики: от 240 МПа на современных высокооборотных и среднеоборотных дизелях (ВОД и СОД) до 120 МПа на малооборотных (МОД) дизелях. При этом фаза впрыскивания составляет $10...20^\circ$ ПКВ, что при больших частотах вращения коленчатого вала характеризует резкий динамический процесс с большими амплитудами и скоростями нарастания давления. Несколько фирм в мире выпускают специфические датчики давления, работающие в таких жестких условиях (kistler.com, imes.de, oprand.com).

Понятно, что при таких высоких давлениях установка нештатных датчиков в ТА и мониторинг процесса впрыскивания топлива могут проводиться только лишь в лабораторных условиях. На практике, на транспортном судне запрещены любые

включения нештатного оборудования в топливную систему высокого давления, так как при разгерметизации велика вероятность пожара. В этом случае чуть ли не единственной альтернативой является анализ виброакустических сигналов узлов ТА. В системе D4.0H так анализируются фазы топливоподачи и осуществляется диагностика ТНВД и форсунки.

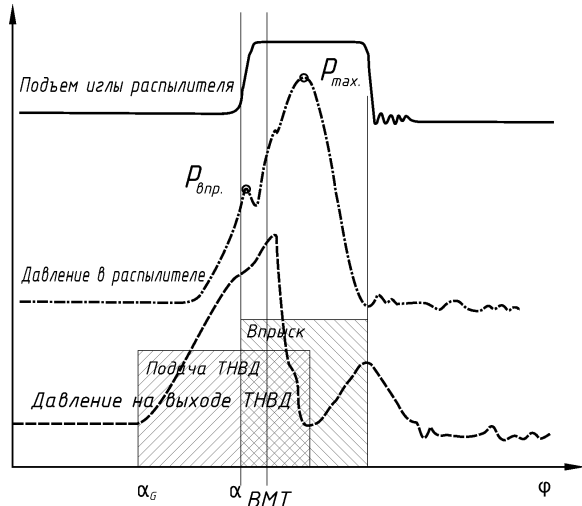


Рис. 1. Диаграммы давления в топливной системе при впрыскивании

Для определения геометрических фаз топливоподачи датчик VS-20m устанавливается на заглушку напротив отсечного окна плунжерной пары ТНВД. В этом месте датчик регистрирует вибросигналы, возникающие при начале подачи топлива ТНВД и отсечке.

Для определения действительных фаз топливоподачи и диагностирования общего состояния ТА высокого давления вибродатчик VS-20m устанавливается на торец форсунки, перпендикулярно ходу иглы. В этом случае датчик регистрирует вибросигналы, возникающие при подъеме и посадке иглы форсунки.

При установке вибродатчика на форсунку, он дополнительно регистрирует удары от посадки (закрытия) клапанов газораспределения. Если амплитуда сигналов закрытия клапанов недостаточно велика, при установке датчика на торец форсунки, выбирается место на крышке цилиндра, в непосредственной близости от клапанов.

Определение задержки самовоспламенения топлива

Задержкой самовоспламенения топлива считается угловой промежуток цикла между началом впрыскивания топлива в цилиндр и началом его воспламенения. На рис. 2 это соответствует фазам α и φ_{pc'}.

$$\varphi\tau_D = |\alpha - \varphi_{pc'}|, [^\circ \text{ ПКВ}]$$

Связь между углом ПКВ и временем задержки самовоспламенения:

$$\tau_D = \frac{\varphi\tau_D}{6 \times RPM}, [\text{мс}]$$

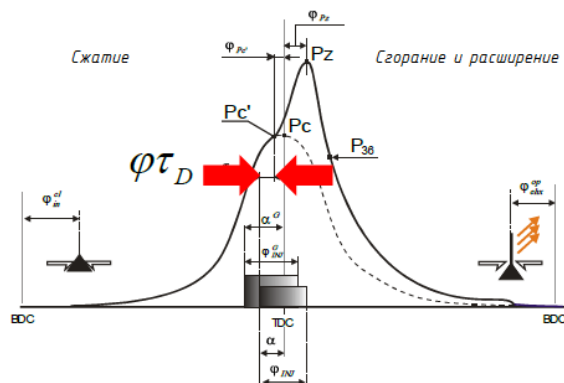


Рис. 2. Задержка самовоспламенения топлива

Задержка самовоспламенения происходит вследствие параллельно-последовательных физических и химических процессов:

- распыливание, прогрев и испарение капель топлива, смешивание паров топлива с воздухом в камере сжатия;
- химическая задержка, связанная с развитием предпламенных реакций.

Общий вид формулы, для оценки задержки самовоспламенения [5]:

$$\tau_D = \frac{C}{p^n} \exp\left(\frac{E}{RT}\right),$$

где p, T – давление и температура газов в цилиндре в момент впрыска топлива;

E – энергия активации топлива;

R – газовая постоянная;

C, n – эмпирические коэффициенты.

Для повышения качества сгорания топлива, увеличения экономичности рабочего цикла и уменьшения динамических нагрузок на кривошипно-шатунный механизм и подшипники необходимо уменьшать задержку самовоспламенения. Основные мероприятия, направленные на уменьшение задержки самовоспламенения:

- повышение давления впрыскивания топлива и улучшение качества смесеобразования;
- впрыск в цилиндр предварительной небольшой порции топлива, для создания очага горения перед впрыском основной порции топлива (см. wartsila.com).

Результаты диагностирования ГД парама «Greifswald»

Автомобильно-железнодорожный / пассажирский паром «Greifswald» (рис. 3) – современное грузо-пассажирское судно, находится под класси-

фикационным надзором Германского Ллойда. Обладает сертификатом книги рекордов Гиннеса, как самое большое судно в мире в классе автомобильно-железнодорожных пассажирских паромов. Высокая мореходность судна и его значительные размеры (длина более 190 м, ширина – 28 м.) позво-

ляют минимизировать качку в штормовых условиях. Две грузовые палубы могут одновременно принимать на борт 50 универсальных железнодорожных вагонов и 50 большегрузных автомобилей TIR" [2]. Пассажирский комплекс рассчитан на 150 пассажирских мест в каютах со всеми удобствами.

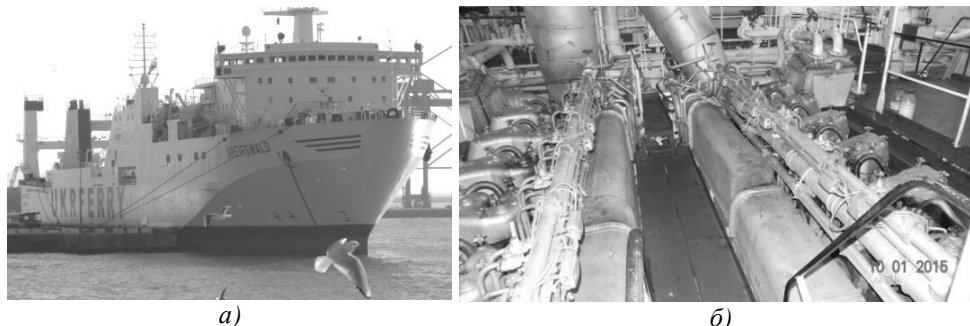


Рис. 3. Паром «Greifswald»: а – стоянка у причала в порту Самбул
б – вид с верхней платформы главных среднеоборотных дизелей 6VDS48/42AL-2U;
в – индцирование главных дизелей системой D4.0H

На судне установлены четыре главных среднеоборотных дизеля 6VDS48/42AL-2U, производства «SKL MOTOREN UND SYSTEMTECHNIK GmbH»[3].

В процессе эксплуатации дизелей происходит естественный процесс разрегулирования узлов ТА и МГР, а также износ основных узлов ЦПГ. Эти не критические в межремонтный период изменения тем не менее, снижают качество рабочего процесса в цилиндрах и, соответственно, повышают удельный расход топлива и общий уровень вибрации двигателей. Кроме того, при этом увеличивается неравномерность распределения тепловых и механических нагрузок между цилиндрами, что повышает риск возникновения аварийных ситуаций.

Серьезные проблемы возникают и при эксплуатации судовых энергетических установок. Основной причиной этого является динамическая нестабильность частоты вращения двигателей. В значительной мере она обусловлена нестабильностью рабочих процессов и крутящих моментов отдельных цилиндров двигателей. В сочетании с автоколебаниями в системе регулирования частоты вращения это приводит к существенным обменным колебаниям активной мощности при параллельной работе нескольких двигателей на один общий редуктор.

Периодическое индцирование позволяет выявлять и устранять причины дисбаланса мощностей цилиндров и устранять перечисленные выше проблемы.

На рис. 4 приведены сводные индикаторные диаграммы ГД парома «Greifswald», снятые на ос-

новном эксплуатационном режиме. Общие выводы по результатам диагностирования ГД следующие:

- ГД 1, цилиндр 2 – сниженная мощность и низкий уровень всех параметров рабочего цикла. Машинной команде рекомендовано проверить состояние ЦПГ и МГР;

- отклонения в процессе сгорания являются следствием некачественного распыливания топлива на ГД 2, в цилиндрах 3, 5, 6; ГД 3, в цилиндре 3; ГД 4, в цилиндре 4. Машинной команде рекомендовано проверить ТА этих цилиндров;

- ГД 2 цилиндр 2 и ГД 3 цилиндр 2 – «жесткая работа», вследствие раннего впрыска топлива;

- на ГД 1 цилиндр 3 и на ГД 2 цилиндр 2 перегружены относительно других цилиндров. Машинной команде рекомендовано проверить регулировку ТА;

- наибольшая разбалансировка мощностей по цилиндрам – ГД 1 и ГД 2. После ревизии ГД 1 цилиндр 2 и устранения на ГД 2 дефектов ТА необходима регулировка цикловых подач;

- удовлетворительная балансировка мощностей цилиндров на ГД 3 и ГД 4.

На рис. 5 приведены сравнительные индикаторные диаграммы двух цилиндров с нормальным (а) и поздним (б) углами опережения впрыска топлива. На рис. 5.б поздний угол опережения вызван нарушениями регулировки топливной аппаратуры. В результате очевиден некачественный процесс сгорания, сопровождающийся двумя волнами изменения давления, и как результат, снижение значения p_{max} .

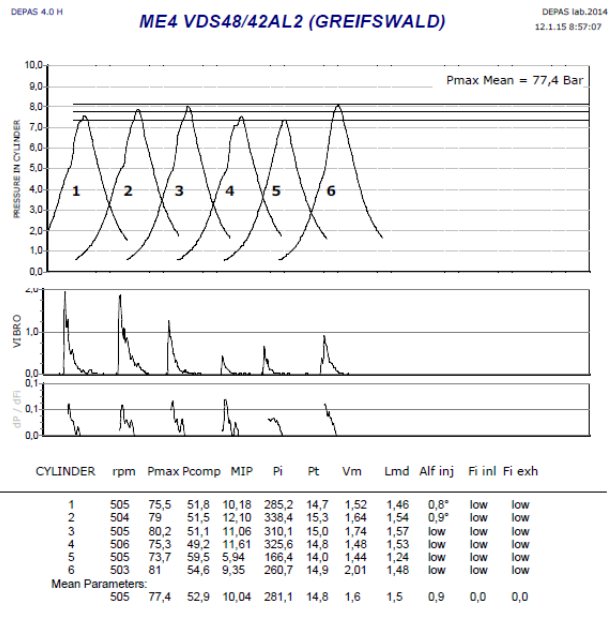
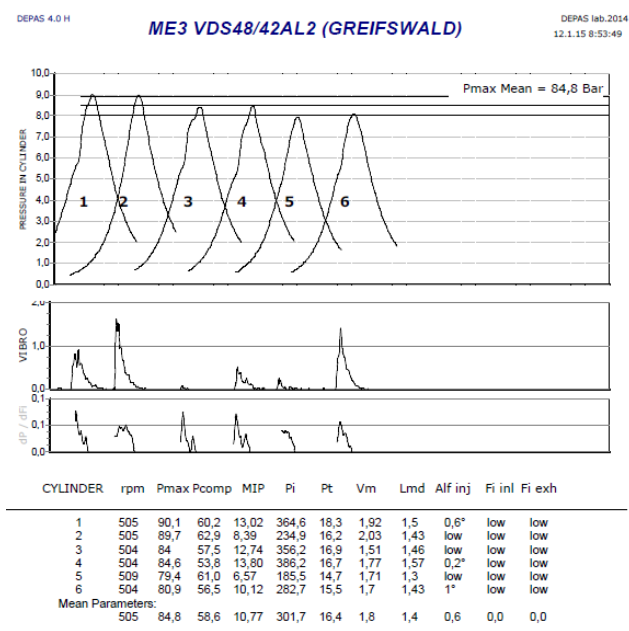
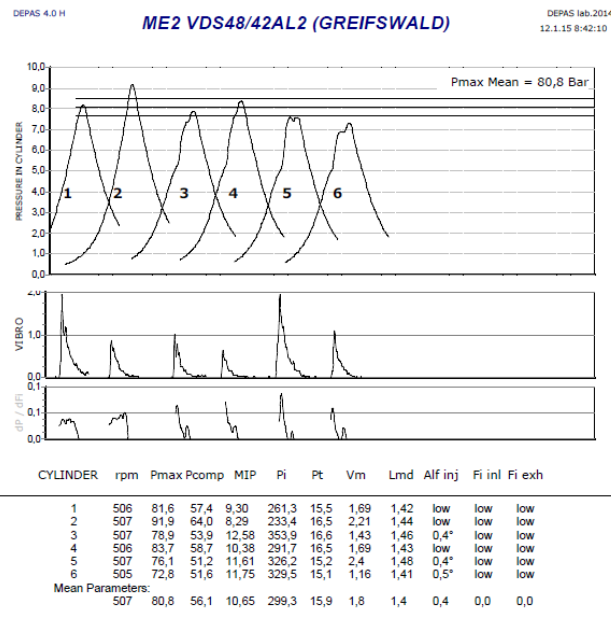
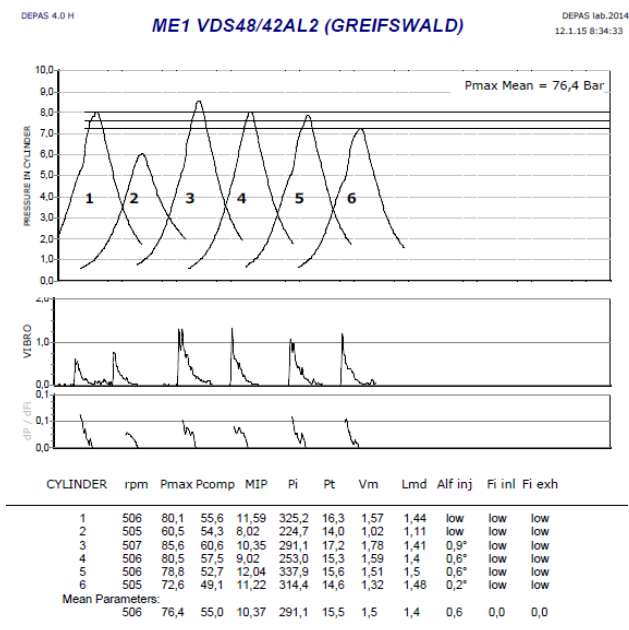


Рис. 4. Сводные индикаторные диаграммы ГД 6VDS48/42AL-2U m/x «Greifswald»

Заключение

Выполненная диагностика показала, что главные двигатели судна требуют выполнения текущего ремонта ЦПГ с последующей регулировкой МГР и ТПА.

После определения параметров рабочего процесса и построения сводных индикаторных диаграмм на основном эксплуатационном режиме машинной команде были представлены следующие рекомендации:

- устранить выявленные дефекты ЦПГ, ТА и МГР;

- выровнять цилиндровые мощности регулировкой цикловых подач по цилиндрам;

- после балансировки мощностей произвести контрольное индицирование. Выравнивание мощностей по цилиндрам при условии, что дефекты ЦПГ, ТА и МГР устранены, приводит к равномерному распределению тепловых и механических напряжений в элементах ЦПГ, как следствие, повышению резерва мощности, уменьшению общего уровня вибрации, снижению удельного расхода топлива и повышению моторесурса двигателя [4].

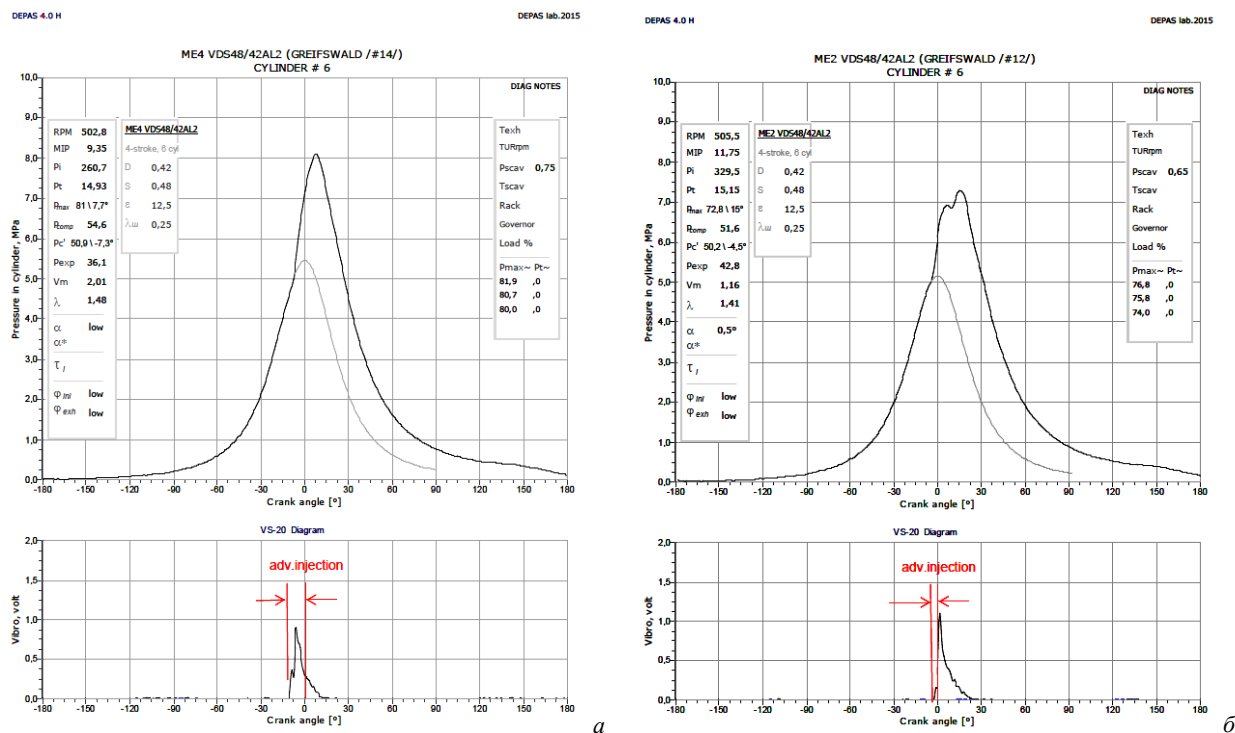


Рис. 5. Сводные индикаторные диаграммы двух цилиндров 2 и 4 ГД 6VDS48/42AL-2U с нормальным (а) и поздним (б) углами опережения впрыска топлива

Список литературы:

1. Diesel Engine Performance Analyzing System D4.0H: depas.odessa.ua, <http://depas.od.ua/> pdf /DEPAS_Handy_brochure_rus_Print.pdf. 2. Автомобильно-железнодорожный / пассажирский паром «Грейфсвальд»: <http://www.ukrferry.com/vessels/vessel-greifswald>. 3. Operating manual of diesel engine 6VDS48/42AL-2U / Neue Maschinenbau Halberstadt GmbH. 48-04029/E. – 271 с. 4. Varbanets R. Analyse of marine diesel engine performance / R. Varbanets, A. Karianskiy // Journal of Polish CIMAC. Energetic Aspects. – Gdansk: Faculty of Ocean Engineering and Ship Technology Gdansk University of Technology, 2012. – Vol. 7, No. 1. – C. 269-275.

Bibliography (transliterated):

1. Diesel Engine Performance Analyzing System D4.0H: depas.odessa.ua, <http://depas.od.ua/> pdf /DEPAS_Handy_brochure_rus_Print.pdf. 2. Avtomobilno-zheleznodorozhny / passazhirskiy parom "Greifswald": <http://www.ukrferry.com/vessels/vessel-greifswald>. 3. Operating manual of diesel engine 6VDS48/42AL-2U / Neue Maschinenbau Halberstadt GmbH. 48-04029/E. – 271 с. 4. Varbanets R. Analyse of marine diesel engine performance / R. Varbanets, A. Karianskiy // Journal of Polish CIMAC. Energetic Aspects. – Gdansk: Faculty of Ocean Engineering and Ship Technology Gdansk University of Technology, 2012. – Vol. 7, No. 1. – C. 269-275.

Поступила 02.06.2015 г.

Варбанец Роман Анатольевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Судовые энергетические установки и техническая эксплуатация», Одесский национальный морской университет, Одесса, Украина, e-mail: roman.varbanets@gmail.com.

Белоусов Евгений Викторович – кандидат технических наук, доцент, декан факультета судовой энергетики, Херсонская государственная морская академия, Херсон, Украина, e-mail: ewbelousov@yandex.ru.

Савчук Владимир Петрович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Эксплуатация судовых энергетических установок и общетехнической подготовки», Херсонская государственная морская академия, Украина, e-mail: postsavchuk@gmail.com.

Кырнац Владислав Иванович – аспирант кафедры «Судовые энергетические установки и техническая эксплуатация», Одесский национальный морской университет, Одесса, Украина, e-mail:vladislavus1313@rambler.ru.

ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ ТА ДІАГНОСТИКА ГОЛОВНИХ СЕРЕДНЬООБОРОТНИХ ДИЗЕЛІВ Т/Х «GREIFSWALD»

Р.А. Варбанец, Є.В. Білоусов, В.П. Савчук, В.І. Кырнац

Діагностика чотирьох головних дизелів т/х «Greifswald» була проведена в умовах рейсу Одеса-Стамбул-Одеса в січні 2015. Погодні умови дозволили провести індиціювання всіх циліндрів чотирьох головних дизелів 6VDS48/42AL-2U, у тому числі проведена діагностика паливної апаратури високого тиску, механізму газорозподілу і циліндро-поршневої

групи. Для визначення параметрів робочого процесу була використана система комп'ютерного діагностування D4.0H, розроблена на кафедрі СЕУ і ТЕ ОНМУ.

DETERMINATION OF WORKING PROCESS PARAMETERS AND DIAGNOSIS OF MEDIUM-SPEED MAIN ENGINES OF M/V «GREIFSWALD»

R.A. Varbanets, E.V. Belousov, V.P. Savchuk, B.I. Kyrnats

Diagnosis of the four main engines of m/v "Greifswald" was produced during the voyage Odessa-Istanbul-Odessa in January 2015. The weather conditions allowed producing parametric diagnosis of all cylinders main engines at the same load, including diagnostics of high pressure fuel equipment, the valves timing and units of the cylinder group. The working process parameters was determining with the help of computer diagnostic system D4.0H, developed in marine engineering department of Odessa national maritime university.

УДК 621.452.3.037.015.2

С.А. Алёхин, Д.Ю. Бородин, В.П. Герасименко, В.А. Опалев

РАСШИРЕНИЕ ДИАПАЗОНА УСТОЙЧИВЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТУРБОПОРШНЕВОГО ДИЗЕЛЯ

Рассмотрены основные проблемы обеспечения газодинамической устойчивости турбопоршневых дизелей с высоким наддувом. Изучены условия возникновения помпажа и вращающегося срыва – наиболее часто встречающихся форм неустойчивости центробежных компрессоров агрегатов газотурбинного наддува. Предложены рекомендации по предотвращению срывных процессов путём локального воздействия на поток в области срывных зон с помощью целевых устройств с присоединёнными объёмами.

Введение

Обеспечение газодинамической устойчивости поршневых двигателей с турбонаддувом во всём диапазоне эксплуатационных режимов за счет совершенствования агрегатов турбонаддува (АТН) – одна из основных задач, возникающих при создании высокофорсированных дизелей [1, 2]. Эта проблема особенно актуальна для центробежных компрессоров (ЦБК) АТН с высокими степенями повышения давления $\pi_k^* > 3,0$ и числом цилиндров дизеля $Z \leq 5$.

Формулирование проблемы

Нарушение газодинамической устойчивости компрессорных систем, как правило, приводит к аварийным ситуациям в результате возникновения значительных гидродинамических нагрузок на элементы проточной части компрессоров и примыкающих трубопроводов. К подобным системам относятся авиационные и судовые газотурбинные двигатели и энергетические установки, АТН поршневых двигателей, приводы газоперекачивающих агрегатов и их центробежные нагнетатели природного газа, центробежные компрессорные машины химических предприятий, шахтные вентиляционные системы и др. Столь обширные области перечисленных систем требуют изучения причин нарушения газодинамической устойчивости компрессоров и путей устранения или предотвращения неустойчивости. Однако, большое разнообразие форм газодинамической неустойчивости, сложность физических процессов, вызывающих эту неустойчи-

вость, а также большое количество факторов, влияющих на развитие их в реальных ситуациях, требуют дополнительных исследований для разработки мероприятий по её устранению.

Целью данной статьи является изучение условий нарушения устойчивости центробежного компрессора АТН пятицилиндрового поршневого двигателя наземной транспортной машины и возможности его предотвращения.

Результаты исследования

Предотвращение нарушения устойчивости ЦБК АТН является одной из задач согласования характеристик системы газотурбинного наддува и двухтактного транспортного дизеля [2]. Если при сравнительно невысоких степенях повышения давления $\pi_k^* \leq 1,8...2,0$ компрессора АТН согласование его характеристики и поршневой части дизеля для получения требуемых нагрузочных и внешних характеристик обычно не вызывает затруднений, то при $\pi_k^* > 3,0$ требуются специальные меры по расширению диапазона устойчивой работы ЦБК [3 - 8]. Однако, чтобы то или иное мероприятие оказалось эффективным средством предотвращения помпажа, необходимо глубокое понимание срывных явлений, которые вызывают его возникновение. Помпаж и вращающийся срыв – наиболее частые формы неустойчивой работы компрессоров в различных гидравлических системах с осевым или центробежным компрессорами. Их основное отличие в том, что вращающийся срыв является