

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА

DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-122-131
УДК 621.436

**В. А. Жуков,
О. К. Безюков,
М. М. Махфуд**

МОТОРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ МОДИФИЦИРОВАННОГО ДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА

Использование присадок – распространенный метод обеспечения требуемых эксплуатационных свойств дизельного топлива, которое является основным для водного транспорта. Статья посвящена моторным испытаниям дизельного топлива, модифицированного многофункциональной присадкой «Nagroboost», оказывающей влияние на протекание процессов смесеобразования и сгорания в цилиндре двигателя, полноту сгорания топлива и обеспечивающей повышение топливной экономичности двигателя. Испытания, проведенные на нескольких моделях четырехтактных высокооборотных дизелей, включали снятие винтовых и нагрузочных характеристик в соответствии со стандартными методиками испытаний. Полученные результаты позволили установить, что применение присадки отечественного производства «Nagroboost» обеспечивает снижение удельного эффективного расхода топлива на 3 – 7 %. При проведении испытаний не были зафиксированы нарушения работы двигателей и увеличение дымности отработавших газов. На основании результатов испытаний сделан вывод о перспективности использования присадок такого типа с целью повышения топливной экономичности двигателей внутреннего сгорания. Статья содержит рекомендации по проведению дальнейших исследований с целью внедрения присадки «Nagroboost» на водном транспорте.

Ключевые слова: двигатели внутреннего сгорания, дизельное топливо, присадки, моторные испытания, винтовая и нагрузочная характеристики, расход топлива.

Введение

Анализ динамики потребления человечеством энергетических ресурсов свидетельствует о неуклонном повышении доли, потребляемой транспортом, которая составляет в настоящее время около 30 % [1]. Основным видом топлива для судовых энергетических установок в настоящее время является дизельное топливо. Ввиду того, что расходы на топливо составляют от 40 до 70 % общих эксплуатационных расходов, повышение топливной экономичности судовых дизелей остается одной из важнейших научно-технических задач.

Основными направлениями повышения топливной экономичности судовых дизелей являются оптимизация протекания рабочего цикла, прежде всего, за счет совершенствования процессов топливоподачи и смесеобразования в результате повышения давления впрыска топлива и применения электронных систем управления, а также утилизации вторичных энергетических ресурсов (теплоты, уносимой отработавшими газами и охлаждающей жидкостью).

Повышение топливной экономичности дизелей не должно сопровождаться увеличением вредных выбросов с отработавшими газами или снижением ресурсных показателей двигателей внутреннего сгорания (ДВС) в связи с увеличением тепловых и механических нагрузок на детали цилиндро-поршневой группы. Поэтому исследование влияния свойств топлив ДВС на их эксплуатационные показатели представляется перспективным.

Применяемые материалы и методы решения задачи

Физико-химические и эксплуатационные свойства дизельного топлива определяются качеством углеводородного сырья, применяемой технологией производства, свойствами и массой введенных в его состав присадок и добавок и определяются на основе таких квалификационных

признаков, как вязкость и плотность, низкотемпературные свойства, температура застывания, химическая стабильность, коррозионная активность, противоизносные свойства, способность к самовоспламенению.

Вязкость и плотность определяют процессы испарения и смесеобразования в двигателе.

Низкотемпературные свойства характеризуются такими показателями, как температура помутнения T_n , предельная температура фильтруемости T_ϕ и температура застывания T_z . Для дизельных топлив ГОСТ 305-82 [2] регламентирует температуру застывания летних дизельных топлив на уровне не выше минус 10 °С, а температура помутнения –5 °С.

Температура застывания зимних дизельных топлив регламентируется ГОСТом 305-82 [2] на уровне не выше –35 °С.

Химическая стабильность дизельного топлива — это способность противостоять окислительным процессам при хранении.

Коррозионная активность дизельных топлив характеризуется наличием в нем соединений серы.

Противоизносные свойства. Дизельное топливо является смазочным материалом для движущихся деталей топливной аппаратуры, пар трения плунжерных насосов, запорных игл, штифтов и других деталей. Для улучшения смазывающих свойств дизельных топлив должны применяться специальные противоизносные присадки.

Способность к самовоспламенению — это показатель, оказывающий влияние на режим воспламенения и сгорания дизельного топлива в камере сгорания двигателя и как следствие оказывающий непосредственное влияние на динамику рабочего процесса, вибрацию и шум двигателя, на его мощностные показатели и экономичность, а также токсичность отработавших газов.

Следует отметить, что от качества топлива, показатели которого устанавливаются ГОСТом 305-82 [2], в значительной степени зависят экономические, экологические и ресурсные показатели двигателей внутреннего сгорания. При производстве дизельного топлива, представляющего собой смесь дистиллятов (солярового, газойля и керосинового) с продуктами каталитического и гидрокрекинга, требуемые свойства дизельного топлива получаются за счет введения многофункциональных присадок [3]. Активно ведутся исследования по разработке присадок к дизельному топливу, которые могут быть использованы в процессе эксплуатации с целью совершенствования физико-химических свойств топлива и улучшения показателей работы двигателя [4] – [6]. К таким присадкам относится модификатор дизельного топлива «Nagroboost», разработанный под руководством А. С. Новикова. Состав модификатора, его свойства и механизм действия описаны в работе [7].

Целью проведенных исследований была оценка влияния модификации дизельного топлива присадкой «Nagroboost» при работе судовых высокооборотных дизелей. Объектами испытаний являлись дизельные двигатели, приведенные в табл. 1

Таблица 1

Двигатели, участвовавшие в испытаниях

Марка двигателя	Мощность, кВт		Частота вращения коленчатого вала, мин ⁻¹	Среднее эффективное давление, МПа	Тип охлаждения
	номинальная	литровая			
2Ч 11/13	18,5	8,2	1500	0,67	Жидкостное
4Ч 8,5/11	12,6	7,8	1500	0,6	Жидкостное
DD4000E	2,8	9,3	3000	0,4	Воздушное
2Ч 8/7,9	8	10	3000	0,4	Жидкостное

Испытательные стенды, созданные на базе указанных двигателей, обеспечили возможность изменить нагрузочный и скоростной режимы работы двигателей, измерить расход топлива

и контролировать температуру моторного масла, охлаждающей жидкости и отработавших газов. В качестве устройств для изменения нагрузки использовались гидравлический и электрический тормоза, расход топлива определялся весовым методом. Для определения температуры в системах смазки и охлаждения использовались лабораторные термометры, установленные в трубопроводах систем смазки, охлаждения, впуска и выпуска.

Испытания проводились в два этапа. Целью первого этапа было определение эффективности действия присадок к дизельному топливу при работе дизелей по винтовой и нагрузочной характеристикам, являющимся наиболее значимыми для них. Целью второго этапа явилось определение влияния концентрации присадки на эффективность ее действия.

Проведение испытаний и обработка их результатов осуществлялись по ГОСТ Р ИСО 3046-1-99 [8] с учетом указаний и рекомендации источников [9] – [11].

Результаты

Винтовая характеристика представляет собой зависимость показателей работы двигателя от частоты вращения коленчатого вала при работе на гребной винт. Определяющим фактором для этих условий является собственно характеристика гребного винта как нагрузочного устройства дизеля. Специфика винта состоит в том, что для водоизмещающих судов поглощаемые винтом момент и мощность изменяются, соответственно, по квадратичной и кубической параболам, следовательно, ввиду малых механических потерь в передаче и эффективных энергетических показателей дизеля, будут иметь место квадратичные и кубические зависимости от частоты вращения коленчатого вала [12]:

$$M_e = c_1 \cdot n^2;$$

$$p_e = c_2 \cdot n^2;$$

$$N_e = c_3 \cdot n^3.$$

При проведении исследований винтовая характеристика снималась на стенде, включающем следующие устройства:

- двухцилиндровый четырехтактный двигатель 2Ч 11/13 с объемно-пленочным смесеобразованием в камере сгорания в поршне;
- гидротормоз, позволяющий моделировать работу двигателя по винтовой характеристике с измерением крутящего момента;
- двухконтурную систему охлаждения с водо-водяным охладителем;
- комплекс измерительной аппаратуры, обеспечивающей замеры частоты вращения коленчатого вала двигателя, крутящего момента, часового расхода топлива, температур отработавших газов, охлаждающей жидкости и моторного масла.

Условия проведения испытаний: топливо дизельное летнее [2], контрольная порция топлива 100 г, количество параллельных измерений — 3 ... 5, атмосферное давление 771 мм рт. ст., относительная влажность 78 %, температура в лаборатории +20 °С, концентрация присадки к топливу — 0,15 % (по массе).

Эффективная мощность дизеля N_e , кВт, при проведении испытаний определялась по формуле

$$N_e = K_T P_T n, \quad (1)$$

где $K_T = 0,00901$ — постоянная гидротормоза, кВт / (Н·мин⁻¹); P_T — показание гидротормоза, ед.; n — частота вращения коленчатого вала, мин⁻¹.

На первом этапе при массовом определении расхода топлива часовой расход топлива G_T , кг/ч, рассчитывался по формуле

$$G_T = 3600 \frac{\Delta G_T}{\Delta \tau_T}. \quad (2)$$

При использовании объемного метода определения расхода топлива использовалась формула

$$G_T = 3600 \frac{\Delta G_T}{\Delta \tau_T} . \quad (3)$$

Для определения удельного эффективного расхода топлива g_e , г/(кВт·ч), используется выражение

$$g_e = \frac{G_T}{N_e} 10^3 . \quad (4)$$

Результаты испытания двигателя 2Ч 11/13 по винтовой характеристике представлены в табл. 2 и 3.

Таблица 2

Испытания дизеля 2Ч11/13 по винтовой характеристике

№ пп.	Частота вращения, мин ⁻¹	Мощность двигателя		Время расходования контрольной порции топлива, с	Часовой расход топлива, кг/ч	Температура отработавших газов, °С	Температура охлаждающей жидкости, °С
		%	кВт				
Топливо без присадки							
1	940	25	4,6	228,3	1,58	160	60
2	1200	50	9,2	145	2,48	270	69
3	1360	75	13,9	95,7	3,76	360	72
4	1500	100	18,5	74,6	4,82	400	78
Модифицированное топливо							
1	940	25	4,6	238	1,51	170 (+6 %)	65 (+8,3 %)
2	1200	50	9,2	151	2,51	270	75 (+8,6 %)
3	1360	75	13,9	100	3,60	370 (+3 %)	82 (+13,8 %)
4	1500	100	18,5	78,3	4,60	450 (+12,5 %)	85 (+9 %)

Таблица 3

Изменение удельного эффективного расхода топлива при работе двигателя 2Ч11/13 по винтовой характеристике

Эффективная мощность двигателя N_e , %	Удельный эффективный расход топлива g_e , кг/(кВт·ч)		Изменение удельного эффективного расхода топлива, %
	базовое топливо	модифицированное топливо	
25	0,350	0,330	-5
50	0,270	0,260	-3
75	0,270	0,260	-3
100	0,260	0,250	-3

Полученные в результате испытаний данные свидетельствуют о том, что введение в топливо присадки в количестве 0,15 % приводит к снижению его расхода на 4,0 ... 4,5 % во всем диапазоне мощностных нагрузок при работе двигателя 2Ч11/13 по винтовой характеристике. При испытаниях двигателя, работающего на топливе, содержащем присадку, было зафиксировано увеличение температуры отработавших газов на 3 ... 12 % (максимальное увеличение имело место на режиме номинальной мощности) и температуры охлаждающей жидкости на 8 ... 14 % (максимальное увеличение также имело место на режимах близких к номинальной мощности). Данные изменения

температур свидетельствуют о перераспределении составляющих теплового баланса, анализ которого может быть произведен с использованием информации, приведенной в работах [13], [14].

Испытания по нагрузочной характеристике, которая представляет собой зависимость показателей работы двигателя от нагрузки, проводилась на стендах, включающих:

- двигатели 4 Ч8,5/11, DENZEL DD4000E, 2Ч 8/7,9;
- электрические генераторы, обеспечивающие изменение нагрузки на дизель;
- комплекс измерительной аппаратуры, обеспечивающий замеры частоты вращения коленчатого вала двигателя, крутящего момента, часового расхода топлива, температур отработавших газов, охлаждающей жидкости, моторного масла.

Нагрузочная характеристика является основной для судовых вспомогательных двигателей, работающих в составе генераторных станций, обеспечивающих постоянство частоты тока при переменных нагрузках. Обязательным условием снятия нагрузочной характеристики является постоянство частоты вращения коленчатого вал двигателя.

Условия проведения испытаний: топливо дизельное летнее [2], контрольная порция топлива 200, 300 г, количество параллельных измерений — 3 ... 5, атмосферное давление 771 мм рт. ст., относительная влажность 78 %, температура в лаборатории +20 °С, концентрация присадки к топливу — 0,15 % (по массе).

Расчет часового и удельного эффективного расхода топлива выполнялся по формулам (1) – (4). Результаты испытаний двигателей указанных марок по нагрузочной характеристике представлены в табл. 4 – 6.

Таблица 4

Результаты испытаний дизеля 4 Ч8,5/11 по нагрузочной характеристике

Мощность двигателя		Время расходования контрольной порции топлива, с	Часовой расход топлива, кг/ч	Температура отработавших газов, °С	Температура охлаждающей жидкости, °С
%	кВт				
Топливо без присадки					
25	3,0	347	2,07	185	82
50	6,9	240,5	2,99	280	84
75	9,9	185,3	3,89	410	82
100	12,6	145,7	4,94	450	82
Модифицированное топливо					
25	3,0	355	2,03	180 (-2,7 %)	80
50	6,9	257	2,80	250 (-10,7 %)	80
75	9,9	191	3,77	380 (-7,3 %)	80
100	12,6	154	4,67	480 (+6,7 %)	80

Таблица 5

Изменение часового и удельного эффективного расхода топлива при работе двигателя 4Ч8,5/11 по нагрузочной характеристике

Эффективная мощность двигателя N_e , %	Удельный эффективный расход топлива g_e , кг/(кВт·ч)		Изменение часового расхода топлива, %	Изменения удельного эффективного расхода топлива, %
	базовое топливо	модифицированное топливо		
25	0,690	0,680	-1	-2 %
50	0,440	0,410	-6	-6,4 %
75	0,400	0,380	-5	-3,1 %
100	0,400	0,370	-7	-5,5 %

Таблица 6

Результаты испытаний двигателей по нагрузочной характеристике

Эффективная мощность двигателя N_e , %	Время расходования контрольной порции топлива Δt , с		Часовой расход топлива G_m , кг/ч		Удельный эффективный расход топлива g_e , г/(кВт·ч)		Изменение удельного эффективного расхода топлива, %
	базовое топливо	модифицированное топливо	базовое топливо	модифицированное топливо	базовое топливо	модифицированное топливо	
Двигатель DENZEL DD4000E							
25	554	567	0,545	0,533	778	762	-2,1
50	437	455	0,692	0,664	494	474	-4,1
75	346	365	0,873	0,828	416	394	-5,3
100	282	292	1,072	1,035	382	370	-3,2
Двигатель 2 Ч8/7,9							
25	638	654	1,422	1,387	710	693	-2,4
50	556	576	1,636	1,575	408	394	-3,5
75	458	476	1,981	1,906	330	318	-3,7
100	381	395	2,381	2,297	298	287	-3,7

Второй этап исследований проводился на стенде, созданном на базе двигателя 4Ч8,5/11 при его работе по нагрузочной характеристике, контрольная порция топлива составила 100 г. Концентрация присадки в топливе составила 0,15; 0,175; 0,20; 0,25 %. Результаты испытаний приведены в табл. 7.

Таблица 7

Результаты испытаний двигателя 4Ч8,5/11 при его работе по нагрузочной характеристике

№ пп.	Мощность двигателя		Время расходования контрольной порции топлива, с	Часовой расход топлива, кг/ч	Температура отработавших газов, °С	Температура охлаждающей жидкости, °С	Изменение часового расхода топлива, %
	%	кВт					
1	2	3	4	5	6	7	8
Концентрация присадки — 0,15 %							
1	25	3,2	172	2,07	185	82	-1
2	50	6,45	121	2,99	280	84	-6
3	75	9,7	92	3,89	410	82	-5
4	100	12,9	73	4,94	450	82	-7
Концентрация присадки — 0,175 %							
1	25	3,2	170,3	2,12	185	76	+1,0 %
1	2	3	4	5	6	7	8
2	50	6,45	127,7	2,82	250	77	-6,0 %
3	75	9,7	94	3,83	360	74	-1,0 %
4	100	12,9	74	4,87	480	64	-2,0 %

Таблица 7
 (Окончание)

Концентрация присадки — 0,2 %							
1	25	3,2	172,6	2,09	180	79	-1,0 %
2	50	6,45	120	3,00	240	79	-9,0 %
3	75	9,7	92,3	3,90	380	75	-7,0 %
4	100	12,9	72,5	4,97	510	72	-6,0 %
Концентрация присадки — 0,25 %							
1	25	3,2	171,3	2,11	185	79	+1,0 %
2	50	6,45	128,3	2,81	245	82	-6,0 %
3	75	9,7	95	3,79	350	80	-2,0 %
4	100	12,9	75,5	4,77	480	77	-4,0 %

При испытаниях двигателя 4Ч8,5/11 по нагрузочной характеристике установлено, что изменение концентрации присадки оказывает влияние на эффект от ее использования:

- при концентрации 0,15 % снижение расхода топлива на всех режимах работы от 2 до 6 %;
- при концентрации 0,175 % изменения расхода топлива составляет от увеличения на 1 % до снижения на 6 %, на большинстве режимов изменения близки к погрешности измерений;
- при концентрации 0,20 % снижение расхода топлива на всех режимах работы от 1,0 до 9 %, на большей части режимов снижение расхода топлива составляет 6 ... 7 %;
- при концентрации 0,25 % изменения расхода топлива находились в пределах от -6 до +1 %, на большинстве экспериментальных режимов снижение расхода топлива составило 2 ... 4 %.

На температуру отработавших газов и охлаждающей жидкости изменение концентрации присадки существенного и направленного влияния не оказывает.

Обсуждение полученных результатов

По результатам испытаний можно сделать следующие выводы:

- введение в топливо присадки в количестве 0,15 % приводит к снижению часового расхода топлива на 2,0 ... 6,5 % во всем диапазоне скоростных и мощностных режимов при работе двигателей как по винтовой, так и по нагрузочной характеристике;
- при испытаниях двигателей, работающих на топливе, содержащем присадку, было зафиксировано увеличение температуры отработавших газов на 6,7 % на режиме номинальной мощности и снижение температуры отработавших газов на 3 ... 10 % на долевых нагрузках;
- температура охлаждающей жидкости на всех режимах понизилась на 3 ... 5 %.

Результаты моторных испытаний подтверждают, что введение в топливо присадки «Nagroboost» оказывает влияние на протекание рабочего процесса в цилиндре дизеля. Увеличение цетанового числа в результате введения присадки приводит к сокращению периода задержки воспламенения, смещению процесса сгорания к верхней мертвой точке и перераспределению тепловых потоков.

Выводы и практические рекомендации

1. Полученные результаты испытаний позволяют сделать вывод, что наиболее целесообразным является применение присадки в концентрации 0,2 % от массы топлива. При увеличении или уменьшении концентрации присадки наблюдается ослабление положительного эффекта ее применения.

2. В процессе проведения испытаний было отмечено снижение дымности работы двигателей. Для количественной оценки влияния присадки на экологические показатели работы дизелей необходимо использование специальных приборов и оборудования.

3. Проведенные моторные испытания дизельного топлива, модифицированного присадкой «Nagoboost» свидетельствуют о перспективности ее применения на водном транспорте, так как малые концентрации присадки обеспечивают снижение расхода топлива при работе судовых дизелей как по винтовой, так и по нагрузочной характеристикам.

4. С целью разработки рекомендаций по применению универсальной комплексной присадки для топлив «Nagoboost» на речном и морском флоте необходимо продолжить исследования и провести комплекс испытаний, включающий:

- индентификация рабочего процесса дизеля, работающего на топливе, содержащем присадку;
- определение составляющих теплового баланса при использовании модифицированного присадкой топлива;
- измерение токсичности и дымности отработавших газов при использовании топлива, содержащего присадку;
- определение влияния угла опережения впрыска топлива на эффективность присадки.

5. Для внедрения присадки на водном транспорте целесообразно провести испытания присадки «Nagoboost» под надзором Российского речного регистра и Российского морского регистра судоходства при участии разработчиков присадки и организаций, заинтересованных в ее использовании.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Безюков О. К.* Динамика потребления энергетических ресурсов и повышение эффективности их использования / О. К. Безюков, Е. В. Ерофеева, В. А. Жуков // Справочник. Инженерный журнал с приложением. — 2015. — № 1 (214). — С. 41–48. DOI: 10.14489/hb.2015.01.pp.041-048.
2. ГОСТ 305-82. Топливо дизельное. Технические условия. — М.: Изд-во стандартов, 1982. — 12 с.
3. *Данилов А. М.* О производстве дизельных топлив в соответствии с регламентом таможенного союза / А. М. Данилов, Е. Б. Шевченко // Двигателестроение. — 2012. — № 4. — С. 42–44.
4. *Халикова Д. А.* Актуальность проблемы разработки цетаноповышающих присадок к дизельному топливу / Д. А. Халикова, Т. С. Меньшикова // Вестник Казанского технологического университета. — 2011. — № 2. — С. 110–112.
5. *Зинина Н. Д.* Депрессорно-диспергирующая присадка для гидроочищенного экологически чистого дизельного топлива / Н. Д. Зинина, К. Ю. Симанская, М. В. Павловская, Д. Ф. Гришин // Нефтепереработка и нефтехимия. Научно-технические достижения и передовой опыт. — 2014. — № 8. — С. 37–40.
6. *Спиркин В. Г.* Моюще-диспергирующая присадка для дизельного топлива / В. Г. Спиркин, И. Р. Татур, В. А. Лазарев [и др.] // Труды Российского государственного университета нефти и газа им. И. М. Губкина. — 2014. — № 1 (274). — С. 86–97.
7. *Безюков О. К.* Современные присадки к дизельному топливу / О. К. Безюков, В. А. Жуков, М. М. Маад // Вестник Астраханского государственного технического университета. — 2016. — № 1 (61). — С. 28–33.
8. ГОСТ Р ИСО 3046-1-99 Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Характеристики. Ч. 1. Стандартные условия, объявленная мощность, расходы топлива и смазочного масла. Методы испытаний. — М.: ИПК Изд-во стандартов, 2000. — 24 с.
9. *Райков И. Я.* Испытания двигателей внутреннего сгорания / И. Я. Райков. — М.: Высш. шк., 1975. — 320 с.
10. *Прокопенко Н. И.* Экспериментальные исследования двигателей внутреннего сгорания / Н. И. Прокопенко. — СПб.: Изд-во «Лань», 2010. — 592 с.
11. *Гаврилов В. В.* Испытания дизеля 2Ч 11/13 по нагрузочной и винтовой характеристикам / В. В. Гаврилов. — СПб.: СПГУВК, 2011. — 50 с.
12. *Возницкий И. В.* Судовые двигатели внутреннего сгорания / И. В. Возницкий, А. С. Пунда. — М.: Моркнига, 2008. — Т. 2. — 470 с.

13. Жуков В. А. Система автоматизированного сбора информации при испытаниях двигателей внутреннего сгорания / В. А. Жуков, Е. Н. Николенко // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П. А. Соловьева. — 2011. — № 1. — С. 172–177.

14. Жуков В. А. Автоматизация теплосбалансных испытаний двигателей внутреннего сгорания / В. А. Жуков, Е. Н. Николенко // Двигатели внутреннего сгорания. — 2011. — № 2. — С. 50–52.

MOTOR TESTS OF DIESEL ENGINE'S FUEL WITH MODIFICATION

The using of additives is one of the most wide-spread method of provide of diesel fuel's properties which are required. Now diesel fuel is the main type of fuel for water transport. The article is devoted to motor tests of diesel engine's fuel with modification. This modification was made by polyfunctional additive "Nagroboost" which have influence on processes of air and fuel mixed and combustion in engine's cylinder, completeness of fuel combustion, and ensuring a fuel economy. The test, which was conducted on a few models of four-stroke high-rotation diesel engines, included receipt of screw and load characteristics according standard methods of engine's tests. Results of tests shown that using of native additive «NagroBoost» ensure lowering of fuel consumption by 3-7 per cent. During the test breach of engine's working and increase of emission of toxic components with outlet gases were not fixed. The conclusion about perspective of using this additive at fuel in the aim of lower fuel consumption is done. The article contains recommendation to conduct future investigation for application addition «Nagroboost» on water transport.

Keywords: internal combustion engines, diesel fuel, additive, motor tests, screw and load characteristics, fuel consumption.

REFERENCES

1. Bezukov, O. K., E. V. Erofeeva, and V. A. Zhukov. "The dynamic of consumption of energy resources and increase of effectiveness of it's using." *Handbook. An engineering journal with appendix* 1(214) (2015): 41–48. DOI: 10.14489/hb.2015.01.pp.041-048.
2. Russian Federation. GOST 305-82. Topливо dizelnoe. Tehnicheskie uslovija. M.: Izdatelstvo standartov, 1982.
3. Danilov, A. M., and E. B. Shevchenko. "Diesel Fuel To Be Produced in Compliance with Customs Union's Regulations." *Dvigatolestroyeniye* 4 (2012): 42–44.
4. Halikova, D. A., and T. S. Menshikova. "Aktualnost problemy razrabotki cetanopovyshajushhih prisadok k dizelnomu toplivu." *Vestnik Kazanskogo tehnologicheskogo universiteta* 2 (2011): 110–112.
5. Zinina, N. D., K. Yu. Simanskaya, M. V. Pavlovskaya, and D. F. Grishin. "Depressor-dispersing additive for hydrocleared ecologically pure diesel fuel." *Neftepererabotka i neftehimija. Nauchno-tehnicheskie dostizhenija i peredovoj opyt* 8 (2014): 37–40.
6. Spirkin, Vladimir G., Igor R. Tatur, Vladimir A. Lazarev, Yuri L. Shishkin, and Alexei V. Leontiev. "Detergent-dispersant additive for diesel fuel." *Trudy Rossijskogo gosudarstvennogo universiteta nefti i gaza im. I.M. Gubkina* 1(274) (2014): 86–97.
7. Bezyukov, Oleg Konstantinovich, Vladimir Anatolievich Zhukov, and Makhfud Mohhamed Maad. "Modern additives for diesel fuel." *Vestnik of Astrakhan state technical university* 1(61) (2016): 28–33.
8. Russian Federation. GOST R ISO 3046-1-99 Dvigateli vnutrennego sgoranija porshnevye. Harakteristiki. Chast 1. Standartnye uslovija, objavlenaja moshhnost, rashody topliva i smazochnoogo masla. Metody ispytanij. M.: IPK Izdatelstvo standartov, 2000.
9. Rajkov, I. Ja. *Ispytanija dvigatelej vnutrennego sgoranija*. M.: Vyssh. shkola, 1975.
10. Prokopenko, N. I. *Jeksperimentalnye issledovanija dvigatelej vnutrennego sgoranija*. SPb.: Izd. "Lan", 2010.
11. Gavrilov, V. V. *Ispytanija dizelja 2Ch 11/13 po nagruzochnoj i vintovoj harakteristikam*. SPb.: SPGUVK, 2011.
12. Voznickij, I. V., and A. S. Punda. *Sudovye dvigateli vnutrennego sgranija*. Vol. 2. M.: Morkniga, 2008.
13. Zhukov, V. A., and E. N. Nikolenko. "Sistema avtomatizirovannogo sbora informacii pri ispytaniyah dvigatelej vnutrennego sgoranija." *Vestnik Rybinskoj gosudarstvennoj aviacionnoj tehnologicheskaj akademii im. P.A. Soloveva* 1 (2011): 172–177.
14. Zhukov, V.A., and Y. N. Nikolenco. "Automation of heat balance tests of internal combustion engines." *Internal Combustion Engines* 2 (2011): 50–52.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Жуков Владимир Анатольевич —
доктор технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С.О. Макарова»
va_zhukov@rambler.ru, zhukovva@gumrf.ru
Безюков Олег Константинович —
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С.О. Макарова»
okb-nayka@yandex.ru, kaf_sdvs@gumrf.ru
Махфуд Маад — аспирант.
Научный руководитель:
Безюков Олег Константинович.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С.О. Макарова»
kaf_sdvs@gumrf.ru, maad_mahfood@yahoo.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Zhukov Vladimir Anatoljevich —
Dr. of Technical Sciences, associate professor.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
va_zhukov@rambler.ru, zhukovva@gumrf.ru
Bezjukov Oleg Konstantinovich —
Dr. of Technical Sciences, professor.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
okb-nayka@yandex.ru, kaf_sdvs@gumrf.ru
Makhfud Maad — postgraduate.
Supervisor:
Bezjukov Oleg Konstantinovich.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
kaf_sdvs@gumrf.ru, maad_mahfood@yahoo.com

Статья поступила в редакцию 20 июня 2016 г.

DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-131-137
УДК 621.43: 629.12.004.62

**Ю. Н. Цветков,
Е. О. Горбаченко**

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ
ПРИ ИСПЫТАНИИ МАТЕРИАЛОВ ВТУЛОК ЦИЛИНДРОВ
СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ НА КАВИТАЦИОННОЕ ИЗНАШИВАНИЕ**

Проведены испытания серого чугуна СЧ24 и стали 38ХМ на кавитационное изнашивание. Эксперименты осуществляли в пресной воде на магнитострикционном вибраторе при частоте и амплитуде колебаний торца концентратора равных, соответственно, 22 кГц и 28 мкм. В процессе испытаний производили периодическое взвешивание образцов и измерение шероховатости их поверхности. Построены зависимости потерь массы и среднего арифметического отклонения профиля поверхности образцов от времени. Зависимость высоты неровностей от продолжительности кавитационного воздействия имеет вид ломаной линии, которая делится точками перелома на три участка. Сопоставительный анализ зависимости износа от времени и зависимости среднего арифметического отклонения профиля от времени для каждого из испытанных материалов позволил установить, что указанные переломы свидетельствуют о смене ведущих процессов, ответственных за образование неровностей на поверхности. Показано, что по точке перелома, отделяющей первый участок от второго, можно судить о продолжительности инкубационного периода изнашивания.

Ключевые слова: судовой дизель, втулка цилиндра, кавитационный износ, шероховатость поверхности, инкубационный период изнашивания

Введение

Кавитационный износ является распространённым видом повреждений охлаждаемых водой поверхностей втулок и блоков цилиндров судовых дизелей [1] – [6]. Причиной износа является вибрация стенок втулок, возникающая при ударах поршня по втулке в момент его перекадки, приводящая к возникновению вибрационной кавитации в охлаждающей жидкости. Так, например, кавитационные разрушения часто происходили в двигателях 3Д6 [1], [2] (рис. 1), в результате чего