

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И МАШИНО-ДВИЖИТЕЛЬНЫЕ КОМПЛЕКСЫ

DOI: 10.24143/2073-1574-2020-2-54-61
УДК 621.436.001.63

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ТОПЛИВОПОДАЧИ ПРИ РАБОТЕ СУДОВОГО ДИЗЕЛЯ НА ВОДОТОПЛИВНОЙ ЭМУЛЬСИИ

Г. Б. Горелик, О. Н. Мозолев

*Тихоокеанский государственный университет,
Хабаровск, Российская Федерация*

Представлены результаты математического моделирования процессов топливоподачи судового дизеля при использовании дизельного топлива и водотопливной эмульсии с водосодержанием 30 % в качестве альтернативного топлива. Выявлены особенности процессов топливоподачи и влияние альтернативного топлива на рабочие характеристики впрыскивания серийной топливной аппаратуры при работе на номинальных режимах. При оценке качества работы топливной аппаратуры на водотопливной эмульсии учитывались изменения характеристики подачи топлива, параметров впрыскивания, особенности распыливания топлива в начальной и конечной фазах впрыскивания и сокращение доли топлива, поданного за период посадки иглы, повышение стабильности последовательных циклов впрыскивания за счет увеличения активного хода плунжера на 25–30 %, особенности процессов распыливания за счет влияния эффекта теплового взрыва. Получено телеграфное уравнение нестационарного движения топлива в трубопроводе высокого давления. Рассматриваются параметры работы судового дизеля 6ЧСПН2А 18/22 (ДРА-300) на номинальном режиме по винтовой характеристике на дизельном топливе и водотопливной эмульсии: ход плунжера топливного насоса высокого давления; максимальное давление установившегося режима в штуцере; среднее интегральное давление установившегося режима в форсунке, определяющее качество распыливания, скорость посадки иглы распылителя на седло; количество топлива, поданного за период посадки иглы; цикловая подача топлива; продолжительность основного впрыскивания; критерий стабильности процессов топливоподачи в последовательных циклах и др. Сделаны выводы о том, что водотопливные эмульсии могут занять отдельное место в списке альтернативных топлив, что способствует улучшению качества традиционных топлив, продуктивному выгоранию углеводородных, азотоводородных, спиртовых и других смесей за счет рационального введения присадок в топливо, увеличению показателей надежности деталей цилиндропоршневой группы и т. д.

Ключевые слова: водотопливная эмульсия, критерий стабильности, рабочие процессы дизельной топливной аппаратуры, математическое моделирование процессов топливоподачи дизеля, характеристика подачи топлива.

Для цитирования: *Горелик Г. Б., Мозолев О. Н.* Особенности моделирования гидродинамических процессов топливоподачи при работе судового дизеля на водотопливной эмульсии // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2020. № 2. С. 54–61. DOI: 10.24143/2073-1574-2020-2-54-61.

Введение

В последние годы активно обсуждается проблема внедрения газомоторного топлива на судах [1], особенно после выхода директивы ИМО о запрете использования топлива с содержанием серы более 0,5 %. Несмотря на это, жидкое топливо будет еще долго использоваться, особенно топливо с улучшенными экологическими показателями процесса сгорания, например водотопливная эмульсия (ВТЭ) [2]. Таким образом, работы по исследованию процессов с ВТЭ в настоящее время актуальны. Проведенные научно-исследовательские работы свидетельству-

ют, что из всех способов предотвращения образования вредных веществ в дизелях наиболее универсальным является сжигание топлива в виде ВТЭ и этот способ хорошо подходит для судовых условий. При работе двигателя на ВТЭ с содержанием воды в топливе от 15 до 40 % дымность отработавших газов снижается в 2–3 раза и на 20–30 % сокращаются выбросы оксидов азота в результате улучшения полноты сгорания. Однако на холостом ходу и при малых нагрузках дизеля применение ВТЭ может создавать и отрицательный эффект. Так, опыт использования ВТЭ в ОАО «Северное морское пароходство» проиллюстрировал интенсивное коррозионное разрушение газоразводящего тракта.

Материалы исследования

Применение ВТЭ приводит к определенным деформациям процесса впрыскивания, поэтому следует учитывать ряд специфических особенностей топливоподачи. Так, основываясь на фундаментальных работах А. Д. Альшуля для затопленных струй при турбулентном характере потока (каким является, например, поток ВТЭ в каналах дизельной топливной аппаратуры (ТА)), возможно гипотетически предположить, что элементарные струйки эмульгированного топлива отделяются (дистанцируются) друг от друга за счет действия электростатических сил отталкивания одноименных зарядов, а между ними имеет место движение элементарных струек чистого топлива. Физическим аналогом этого явления можно считать идеальный подшипник скольжения, в котором силы трения существенно снижены за счет разделяющего слоя, а эпюра скорости потока имеет более полную форму, в отличие от скорости потока чистого топлива [3, 4].

Следовательно, коэффициенты истечения через щели, наполнительные и отсечные окна и отверстия согласно данным представлениям и результатам опытов будут иметь величины на 5–8 % больше, чем при работе на чистом топливе (при этом с учетом качества эмульсии, а оно повышается по мере перемещения топлива к распылителю, коэффициенты расхода будут возрастать). Следует иметь в виду (согласно экспериментальным работам Ю. И. Воржева), что дробление капель усилится по мере прохождения ВТЭ через щели в нагнетательном клапане и форсунке. Соппротивление (потери) в нагнетательном трубопроводе высокого давления (ТВД) будет снижаться на величину порядка 10–15 %.

Таким образом, коэффициенты расхода со стороны топливного насоса высокого давления (ТНВД) следует принимать больше опытных значений на 4–5 %, для форсунки – на 7–8 %. Аналогично при движении ВТЭ в ТВД снижаются потери на трение, что следует учитывать при расчетах в гидродинамической модели ТА при выборе коэффициента трения потока о стенки трубопровода. При постоянстве скорости распространения волны давления в течение процесса впрыскивания (это является вполне допустимым упрощением математической модели процессов топливоподачи) получим телеграфное уравнение нестационарного движения топлива в ТВД в конечно-разностном виде

$$P_{i,j+1} = P_{i+1,j} + P_{i-1,j} - P_{i,j-1} + \frac{\lambda \Delta t}{d} |U_{i,j}| (P_{i,j} - P_{i,j-1}),$$

где p – давление топлива, орты i и j характеризуют номер расчетного сечения по координате длины ТВД и по времени (номер временного слоя); λ – коэффициент трения потока о стенки трубопровода; $U_{i,j}$ – скорость волны в соответствующий момент времени в соответствующем месте трубопровода; d – диаметр трубопровода; Δt – шаг интегрирования.

Последний член уравнения учитывает потери в ТВД, при работе на ВТЭ его следует уменьшать на 5–15 %. Вязкость ВТЭ особенно сильно влияет на величины утечек через плунжерную пару по ее уплотняющей части, а также на утечки по золотниковой части плунжера. Безусловно, при этом происходит деформация гидродинамических процессов. Следовательно, вязкостью ВТЭ нельзя пренебрегать.

Разумеется, параметры ВТЭ необходимо определять в зависимости от водосодержания ВТЭ с учетом температурных условий работы ТА. В математической модели процессов топливоподачи также следует учитывать свойства ВТЭ (плотность, сжимаемость и скорость распространения волны давления в ТВД). Следует иметь в виду, что при движении элементарных струек тока в каналах скажется «эффект» влияния микрокапель воды на эпюру скорости. В ТВД изменится эпюра скорости, она станет более полной при некотором увеличении скорости по оси, что уменьшит потери при движении волны скорости λ на 10–15 % [5, 6].

Приняты следующие обозначения (табл.): h_w – ход плунжера ТНВД до начала отсечки; $P'_{н\max}$ – максимальное давление установившегося режима в штуцере ТНВД; $P_{к\max}$ – максимальное давление установившегося режима в месте установки датчика давления в ТВД; $P_{ф\max}$ – максимальное давление установившегося режима в объеме распылителя форсунки; $P_{ф\text{int}}$ – среднее интегральное давление установившегося режима в форсунке, определяющее качество распыливания; $V_{иг}$ – скорость посадки иглы распылителя на седло, определяющая работоспособность распылителя; $G_{пп}$ – количество топлива, поданного за период посадки иглы; g_b – цикловая подача топлива; g_1 – подача топлива в течение первого повторного впрыскивания; g_2 – подача топлива в течение второго повторного впрыскивания; $\varphi_{вп}$ – продолжительность основного впрыскивания; $\varphi_{повдп}$ – продолжительность повторных впрыскиваний; X – критерий стабильности процессов топливоподачи в последовательных циклах.

Параметры работы судового дизеля 6ЧСПН2А 18/22 (ДРА-300) на номинальном режиме работы по винтовой характеристике на дизельном топливе и водотопливной эмульсии

№ варианта	h_w , см	$P'_{н\max}$, МПа	$P_{к\max}$, МПа	$P_{ф\max}$, МПа	$P_{ф\text{int}}$, МПа	$V_{иг}$, см/с	$G_{пп}$, %	g_b , г/цикл	g_1 , г/цикл	g_2 , г/цикл	$\varphi_{вп}$, град	$\varphi_{повдп}$, град	X , отн. ед.
1	0,872	52,9	56,8	56,8	39,0	83,4	2,30	0,366	0,357	0,0094 (2,6 %)	16,1	42,3–43,5	0,48
2	0,952	55,4	59,2	60,2	42,5	112	2,31	0,470	0,482	0,012 (2,55 %)	18,5	40,8–42,1 48,4–49,0	0,49
3	0,947	50,6	54,8	55,0	38,0	166	2,57	0,472	0,472	0	19,4	–	0,31
4	0,944	51,2	54,3	54,6	37,8	76	2,61	0,470	0,470	0	19,2	–	0,51

Процессы топливоподачи при работе на дизельном топливе (ДТ) проиллюстрированы на рис. 1. (вариант № 1 для сопоставления результатов расчетного исследования с вариантами работы на ВТЭ).

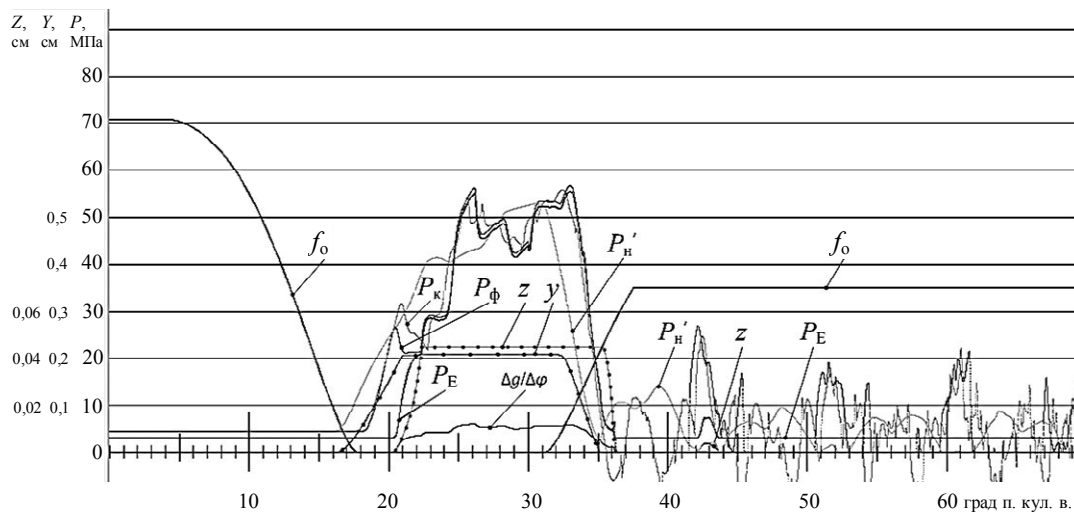


Рис. 1. Вариант № 1. Работа на ДТ с вязкостью 3 сСт (коэффициенты расхода в элементах ТА: $\mu_c = 0,7$; $\mu_k = 0,8$; $\mu_o = 0,7$; $\mu_w = 0,65$ при соответствующих значениях плотности, сжимаемости и скорости звука в ДТ):
 f_o – площадь проходного сечения дополнительных и отсечных окон;
 P_k – давление в месте установки датчика давления в ТВД; $P'_н$ – давление в штуцере ТНВД;
 $P_ф$ – давление в объеме распылителя форсунки; P_E – давление в объеме под иглой распылителя;
 $\Delta g/\Delta \varphi$ – характеристика подачи топлива; y – высота подъема нагнетательного клапана;
 z – высота подъема иглы распылителя; град п. кул. в. – градус поворота кулачкового вала насоса высокого давления

В основу дальнейшего сравнительного анализа положен вариант № 1 (табл., рис. 1), характеризующий работу дизеля на ДТ для номинального режима работы. Имеет место повторное впрыскивание 0,0094 г/цикл (2,57 %) в интервале 42,3–43,2 град п. кул. в. при продолжительности основного впрыскивания 16,1 град п. кул. в.

Безусловно, повторные впрыскивания (2,6 %) снижают эффективность рабочего процесса дизеля, т. к. до 70 % этой доли топлива подвергается крекингу в условиях дефицита кислорода в камере сгорания, переходят в сажу и твердые коксовые частицы без превращения в эффективную работу цикла. Твердые частицы приводят к сокращению работоспособности масла, повышенному износу цилиндропоршневой группы, к снижению показателей надежности дизеля, снижению топливной экономичности.

Перевод ТА на ВТЭ с учетом ее параметров, но без изменений коэффициентов расхода и снижения потерь в ТВД (т. е. без учета вышеприведенных теоретических предпосылок) представлен на рис. 2.

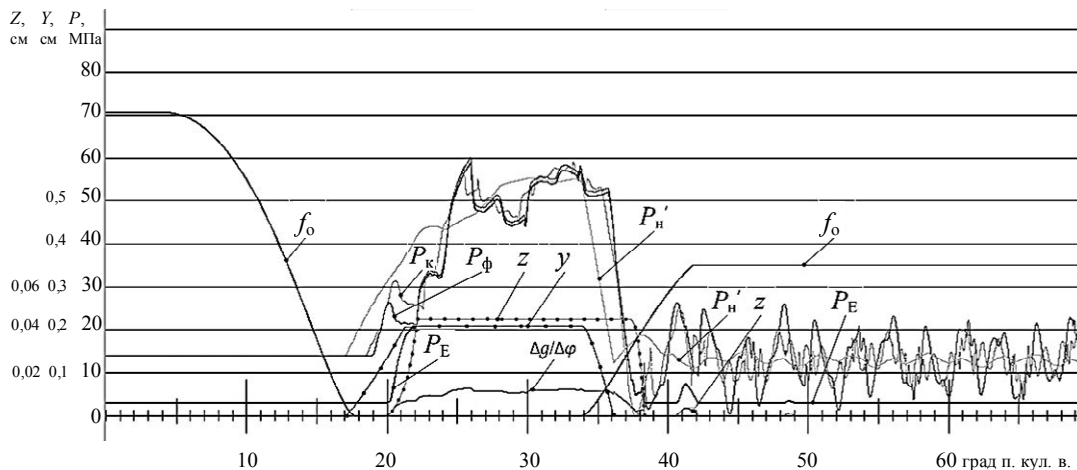


Рис. 2. Вариант № 2. Работа на ВТЭ с вязкостью 10 сСт без учета потерь в ТВД (коэффициенты расхода в элементах ТА: $\mu_c = 0,7$; $\mu_k = 0,8$; $\mu_o = 0,7$; $\mu_w = 0,65$ при соответствующих значениях плотности, сжимаемости и скорости звука в ВТЭ)

Имеется двойное подвпрыскивание суммарной величиной 2,55 % при угле поворота кулачкового вала 40,8–42,1 и совсем незначительное – при 48,4–49,0 град п. кул. в. Следует отметить некоторое увеличение максимальных давлений впрыскиваний. Рост среднего интегрального давления у форсунки $P_{\phi int}$ свидетельствует о повышении эффективности процессов топливоподачи при переводе ТА на ВТЭ. Усиливается жесткость завершения подачи при переходе на ВТЭ, т. к. скорость посадки иглы на седло увеличивается с 83,4 до 112 см/с. Стабильность последовательных впрысков остается высокой, что характерно для близноминальных режимов.

На рис. 3 приведены процессы топливоподачи с учетом теоретических представлений о характере течения ВТЭ в каналах ТА и в ТВД.

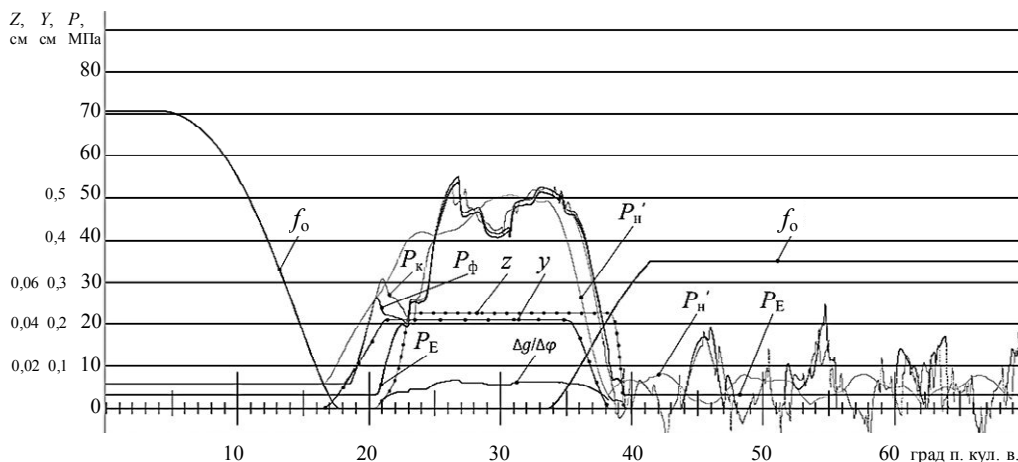


Рис. 3. Вариант № 3. Работа на ВТЭ с вязкостью 10 сСт с учетом 15 %-го снижения потерь в ТВД (с увеличенными коэффициентами расхода в элементах ТА: $\mu_c = 0,76$; $\mu_k = 0,84$; $\mu_o = 0,76$; $\mu_w = 0,7$ при соответствующих значениях плотности, сжимаемости и скорости звука в ВТЭ)

Продолжительность впрыскивания увеличилась с 16,1 до 19,4 град п. кул. в. при снижении давлений в ТВД на 2–4 %. Скорость посадки иглы увеличилась до 166 см/с. Стабильность последовательных впрыскиваний сохранилась. Это объясняется тем, что количество подаваемой ВТЭ возросло пропорционально водосодержанию. Вследствие необходимого увеличения активного хода плунжера процессы топливоподачи смещаются в сторону увеличенной скорости плунжера, а завершаются при его меньшей скорости. При этом количество топлива, поданного за период посадки иглы, такое же, как и для работы на ДТ. Это свидетельствует о сохранении качества настройки процессов топливоподачи, но при этом повторные впрыскивания отсутствуют. Можно надеяться на существенное повышение эффективности работы ТА при переводе ТА на ВТЭ.

На рис. 4 проиллюстрировано влияние реальной вязкости ВТЭ на протекание процессов топливоподачи с учетом теоретических представлений, приведенных выше.

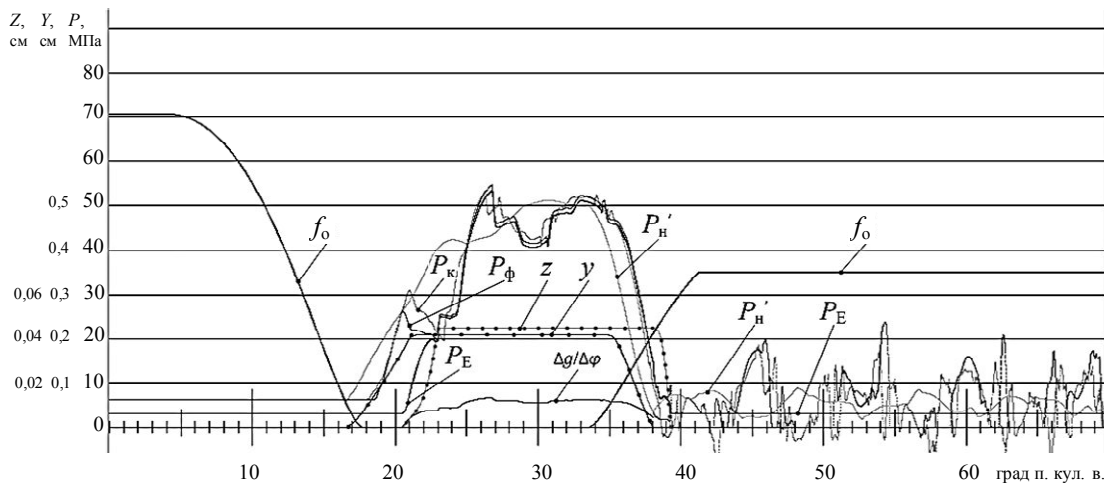


Рис. 4. Вариант № 4. Работа на ВТЭ с вязкостью 15 сСт с учетом 15 %-го снижения потерь в ТВД (с увеличенными коэффициентами расхода в элементах ТА: $\mu_c = 0,76$; $\mu_k = 0,84$; $\mu_o = 0,76$; $\mu_w = 0,7$ при соответствующих значениях плотности, сжимаемости и скорости звука в ВТЭ)

Анализ свидетельствует, что повышение вязкости ВТЭ с 10 до 15 сСт практически не деформирует процессы впрыскивания. Для 30 % ВТЭ вязкость находится в расчетных пределах. Рабочий же процесс дизеля при этом определяется совокупностью взаимосвязанных процессов впрыскивания и распыливания топлив.

Что касается работы ТА дизелей на дизельном или тяжелом топливе и последующих процессах смесеобразования в цилиндре двигателя, вопросы эти достаточно исследованы. В настоящее время имеются детально разработанные инженерные и научные методы оценки этих процессов, моделирования гидродинамических явлений при факелообразовании и последующем смесеобразовании (работы А. Пишенгера, В. А. Кутового, А. П. Чиркина, И. И. Астахова, Т. Ф. Кузнецова, Б. Н. Файнлейба, Н. Н. Патрахальцева, Р. В. Русинова, Б. П. Пугачева, А. С. Лышевского, А. И. Исаева, Л. Н. Голубкова, Ю. Я. Фомина и многих других).

Изучением свойств и применением ВТЭ в эксплуатации занимался сравнительно небольшой круг инженеров и ученых (В. А. Сомов, О. Н. Лебедев, Ю. И. Воржев, В. Д. Сисин, Д. Н. Желудков, Окода Хироши и др.).

При использовании ВТЭ, имеющих иные физико-механические свойства (температурные и вязкостные характеристики, о которых имеется недостаточно полная информация), возникает целый круг частных вопросов и задач, решение которых должно предшествовать практической реализации ВТЭ в рядовой эксплуатации. Отличия в протекании рабочих процессов топливоподачи, факелообразования и последующего смесеобразования при работе на ВТЭ связаны в первую очередь с параметрами эмульсии (плотность, сжимаемость, скорость распространения волны давления в эмульсии, вязкость [2–7]). Далее следует заниматься особенностями распада струи в канале распылителя, при выходе ее в полость камеры сгорания и, наконец, непосредственно процессами сгорания топливоздушнoй смеси в основных фазах горения.

Геометрические размеры ТА, свойства топлива и конструктивное исполнение элементов определяют качество рабочего процесса ТА, которое характеризуется такими свойствами, как точное отмеривание цикловой подачи, своевременное впрыскивание топлива в камеру сгорания двигателя, обеспечение устойчивой (стабильной от цикла к циклу) подачи и равномерное распределение топлива по секциям во всем рабочем диапазоне.

Перемещение плунжера под действием кулачковой шайбы и иглы распылителя, изменение проходных сечений наполнительных и отсечных окон втулки плунжера, в щели под нагнетательным клапаном и под запорным конусом иглы распылителя, аккумулярование топлива в объемах элементов, скорости перетекания и соответствующие объемные расходы, движение нагнетательного клапана, иглы и топлива в ТВД описываются с достаточной степенью точности уравнениями механики и гидродинамики. Это совокупное физико-математическое описание происходящих в ТА процессов, отображающее их физическую природу, известно в виде математической модели ТА и отражено в многочисленных исследованиях.

Увеличение содержания воды в эмульсии приводит к значительному повышению вязкости приготовленной эмульсии из-за значительного влияния гидродинамического взаимодействия между каплями воды в топливе, что уменьшает значение коэффициента внутреннего трения и изменяет структуру эмульсии.

Водотопливные эмульсии должны занять отдельное место в общем списке альтернативных топлив [7]. Это путь улучшения качества и глубины использования традиционных топлив, более того, ВТЭ позволяют вводить рациональным путем присадки в топливо, обеспечивать качественное выгорание углеводородных, азотоводородных, спиртовых и бензометанольных смесей и топлив. Также ВТЭ обеспечивают «моточистку» двигателя, снижение выбросов оксидов азота NO_x в отработавших газах до 2–2,5 раз, что позволяет отказаться от применения дорогостоящих нейтрализаторов (при затратах примерно в 100 тыс. долл. на 1 МВт мощности дизеля).

Появляется новое свойство эмульсии – накопление подводимой энергии при приготовлении независимо от способа (эмульсия представляет собой как бы аккумулятор энергии). При вводе ВТЭ в камеру сгорания дизеля эта энергия идет на совершение эффективной работы.

Процессы топливоподачи протекают при ВТЭ при повышенных значениях активного хода плунжера пропорционально водосодержанию эмульсии, что также способствует улучшению работы ТА (повышение давления впрыскивания, стабилизация последовательных циклов впрыскивания) и самого рабочего процесса дизеля, все это ведет к повышению эффективности использования топлива.

Одно из главных положительных воздействий при применении ВТЭ – существенное снижение оксидов азота в отработавших газах и нагарообразования в камере сгорания и в выпускном тракте. Последнее позволяет значительно уменьшить износы цилиндропоршневой группы и обеспечить повышение количественных показателей надежности. Работа дизеля на ВТЭ позволяет отказаться от сложных и дорогостоящих установок для снижения эмиссии оксидов азота. Применение ВТЭ обеспечивает возможность снижения минимально устойчивых оборотов под нагрузкой и на режиме холостого хода и выполнение требований ГОСТ 10150-88, существенно повышая эффективность работы судового дизеля.

Таким образом, из всех возможных способов решения задачи снижения выбросов оксидов азота наиболее приемлемым остается способ, связанный с использованием ВТЭ. Не зря фирма MAN приступила к расширению работ по использованию транзитных модулей приготовления ВТЭ. При этом агрегатная мощность дизеля уже превышает 10 000 кВт.

Первые модели тренажеров машинного отделения учитывали только использование тяжелого и дизельного топлива [8]. В последнее время появились модели, учитывающие работу на газомоторном топливе, но недостаточно моделей, работающих на ВТЭ. В связи с этим полученные модели гидродинамических процессов могут быть использованы при дальнейшей модернизации тренажеров машинного отделения с целью совершенствования тренажерной подготовки.

Заключение

Предложенные гипотезы деформации процесса впрыскивания при использовании ВТЭ с оценкой степени влияния их на протекание параметров топливоподачи позволяют более качественно и надежно использовать математическое моделирование при проектировании ТА и проведении опытно-конструкторских исследований в этой области.

Результаты проведенного в работе анализа влияния ВТЭ на деформацию рабочего процесса впрыскивания позволяют более качественно проводить оценку расчетного исследования на математической модели и выходить на оптимальные рекомендации подбора параметров ВТЭ и самой ТА для внедрения результатов в практику эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Соболенко А. Н., Воробьев Б. Н.* Проблемы внедрения газомоторного топлива в судовых дизелях // Науч. тр. Дальрыбвтуза. 2018. Т. 44. № 1. С. 73–78.
2. *Горелик Г. Б., Коньков А. Ю., Кончаков Е. И.* Возможности и перспективы применения водотопливных эмульсий в судовых дизелях в качестве альтернативного топлива // Мор. интеллектуал. технологии. 2017. Т. 2. № 3 (37). С. 97–102.
3. *Кича Г. П.* Экономичная эксплуатация дизелей // Мор. флот. 1984. № 11. С. 47–49.
4. *Кича Г. П.* Имитационная модель трибодиагностики двигателей внутреннего сгорания // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2009. № 3. С. 6–14.
5. *Горелик Г. Б.* «Перетекание» электрической мощности при параллельной работе дизель-генераторов и обеспечение качества режимов малых нагрузок. Хабаровск: Изд-во ТОГУ, 2016. 250 с.
6. *Кича Г. П.* Новые стохастические модели процесса очистки горюче-смазочных материалов в ДВС // Двигателестроение. 1989. № 11. С. 18–23.
7. *Горелик Г. Б.* Водотопливная эмульсия – топливо XXI века. Хабаровск: Изд-во ТОГУ, 2019. 200 с.
8. *Соболенко А. Н., Корнейчук Ю. А., Глазюк Д. К.* Обобщение опыта эксплуатации тренажеров машинного отделения морского судна // Вестник Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Морская техника и технология. 2016. № 2. С. 59–69.

Статья поступила в редакцию 06.02.2020

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Горелик Геннадий Бенцианович – Россия, 680035, Хабаровск; Тихоокеанский государственный университет; д-р техн. наук, профессор; профессор кафедры двигателей внутреннего сгорания; ggorelik@mail.ru.

Мозолев Олег Николаевич – Россия, 680035, Хабаровск; Тихоокеанский государственный университет; старший преподаватель кафедры двигателей внутреннего сгорания; oleg19793@yandex.ru.



CHARACTERISTICS OF MODELING HYDRODYNAMIC PROCESSES OF FUEL SUPPLY IN OPERATION OF MARINE DIESEL USING WATER-FUEL EMULSION

G. B. Gorelik, O. N. Mozolev

*Pacific National University,
Khabarovsk, Russian Federation*

Abstract. The article presents the results of mathematical modeling of the fuel supply process of a marine diesel working on diesel fuel and water-fuel emulsion with a water content of 30% as an alternative fuel. There have been found the specific features of fuel supply and the influence of the alternative fuel on the injection characteristics of standard fuel supply equipment during operation in nominal and partial modes. In evaluating the quality of fuel equipment operation on a water-fuel emulsion there were taken into account the following facts: changing of the fuel supply characteristics; changing injection parameters; type of fuel spraying in the initial and final phases

of injection and reduction of fuel proportion supplied during the needle landing period; greater stability of successive injection cycles by increasing the active stroke of the plunger by 25-30%; features of injection processes due to thermal explosion effect. The telegraph equation for the unsteady fuel motion in a high pressure pipeline is obtained. The operation parameters of a marine diesel engine 6CHSPN2A 18/22 (DRA-300) are considered in nominal mode according to the screw characteristic for diesel fuel and water-fuel emulsion: plunger stroke of the high-pressure fuel pump; maximum pressure of the steady state in the connecting pipe; average integral pressure of the steady state in the nozzle, which determines the quality of spraying, the speed of landing of the sprayer needle on the saddle; amount of fuel supplied during the needle landing period; cyclic fuel supply; duration of the main injection; stability criterion of fuel supply processes in successive cycles, etc. It has been inferred that water-fuel emulsions can take a separate place in the list of alternative fuels, which will contribute to improving the quality of traditional fuels, productive burnout of hydrocarbon, nitrogen-hydrogen mixture, spirit mixtures, etc. due to the rational introducing additives into fuel, increasing the reliability indicators of cylinder-piston parts, etc.

Key words: water-fuel emulsion, stability criterion, operation processes of diesel fuel equipment, mathematical modeling of fuel supply processes for marine diesel, fuel supply characteristic.

For citation: Gorelik G. B., Mozolev O. N. Characteristics of modeling hydrodynamic processes of fuel supply in operation of marine diesel using water-fuel emulsion. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies*. 2020;2:54-61. (In Russ.) DOI: 10.24143/2073-1574-2020-2-54-61.

REFERENCES

1. Sobolenko A. N., Vorob'ev B. N. Problemy vnedreniya gazomotornogo topliva v sudovyh dizelyah [Problems of introducing gas engine fuel in marine diesels]. *Nauchnye trudy Dal'rybvтуza*, 2018, vol. 44, no. 1, pp. 73-78.
2. Gorelik G. B., Kon'kov A. Yu., Konchakov E. I. Vozможности i perspektivy primeneniya vodotoplivnyh emul'sij v sudovyh dizelyah v kachestve al'ternativnogo topliva [Possibilities and prospects for using water-fuel emulsions in marine diesels as alternative fuel]. *Morskie intellektual'nye tekhnologii*, 2017, vol. 2, no. 3 (37), pp. 97-102.
3. Kicha G. P. Ekonomichnaya ekspluatatsiya dizelej [Economic operation of diesel engines]. *Morskoj flot*, 1984, no. 11, pp. 47-49.
4. Kicha G. P. Imitatsionnaya model' tribodiagnostiki dvigatelej vnutrennego sgoraniya [Simulation model of tribodiagnosics of internal combustion engines]. *Trenie i smazka v mashinah i mekhanizmah*, 2009, no. 3, pp. 6-14.
5. Gorelik G. B. «Peretekanie» elektricheskoy moshchnosti pri parallel'noj rabote dizel'-generatorov i obespechenie kachestva rezhimov malyh nagruzok [Overflow of electric power during parallel operation of diesel generators and ensuring quality of low-load modes]. Habarovsk, Izd-vo TOGU, 2016. 250 p.
6. Kicha G. P. Novye stohasticheskie modeli processa ochistki goryuche-smazochnyh materialov v DVS [New stochastic models of purifying fuels and lubricants in internal combustion engines]. *Dvigatelsestroenie*, 1989, no. 11, pp. 18-23.
7. Gorelik G. B. *Vodotoplivnaya emul'siya – toplivo XXI veka* [Water-fuel emulsion as fuel of the XXI century]. Habarovsk, Izd-vo TOGU, 2019. 200 p.
8. Sobolenko A. N., Kornejchuk Yu. A., Glazyuk D. K. Obobshchenie opyta ekspluatatsii trenazherov mashinnogo otdeleniya morskogo sudna [Generalization of operating experience of engine room simulators of sea-going vessel]. *Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2016, no. 2, pp. 59-69.

The article submitted to the editors 06.02.2020

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Gorelik Gennady Bentsianovich – Russia, 680035, Khabarovsk; Pacific National University; Doctor of Technical Sciences, Professor; Professor of the Department of Internal Combustion Engines; ggorelik@mail.ru.

Mozolev Oleg Nikolaevich – Russia, 680035, Khabarovsk; Pacific National University; Senior Lecturer of the Department of Internal Combustion Engines; oleg19793@yandex.ru.

