

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ СНИЖЕНИЯ ВЫБРОСОВ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ ЭКСПЛУАТИРУЕМЫМИ СДЭУ

Г.Е. Живлюк, к.т.н., А.П. Петров, к.т.н., доцент
ФГБОУ ВПО ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова

Выполнен анализ существующих технологий снижения выбросов вредных веществ применительно к судовым дизелям традиционной конструкции, установленным на действующих судах. Показано, что сокращение вредных выбросов NO_x при незначительных материальных затратах может быть обеспечено за счет организации двухступенчатого впрыска топлива форсунками механического типа, установленными вместо штатных, без изменения базовой конструкции дизеля. Дополнительный экологический эффект достигается за счет каталитической обработки топлива в корпусе распылителя, обеспечивающей сокращения периода задержки самовоспламенения.



К основным тенденциям совершенствования технического уровня современных судовых дизельных энергетических установок (СДЭУ), наряду с улучшением массогабаритных, мощностных и ресурсных показателей, относятся два важнейших направления — повышение топливной экономичности и снижение вредного воздействия на окружающую среду, в том числе за счет сокращения вредных выбросов с отработавшими газами. При этом необходимо отметить, что если расход топлива не ограничивается никакими условиями, то экологические характеристики установки подлежат контролю и предельные вредные выбросы с отработавшими газами жестко регламентируются [1].

Как правило, все технические решения, направленные на снижение расхода топлива, возможны только за счет повышения термодинамической эффективности цикла дизельного двигателя, которая связана с ростом максимальной температуры цикла. Вследствие этого происходит рост эмиссии оксидов азота. Негативного последствия этой объективной зависимости можно избежать за счет управления процессом тепловыделения, т. е. смесеобразования и сгорания.

Накопленный опыт конструирования, эксплуатации и доводки рабочего процесса дизельных двигателей, а также бурное развитие микропроцессорной техники позволили обеспечить управ-

ление законом подачи топлива в цилиндр, который определяет протекание процесса тепловыделения. При этом впрыск топлива производится дискретно отдельными порциями, что позволяет задать практически любой закон подачи топлива и получить соответственно оптимальный процесс тепловыделения для всех режимов работы. Так, в последнее десятилетие широкое распространение получили электронно-управляемые насос-форсунки и более совершенная электронно-управляемая аккумуляторная система топливоподачи common rail. Кроме того, выпускные системы современных двигателей с электронным управлением впрыска топлива оснащаются каталитическими устройствами и сажевыми фильтрами, работа которых контролируется электронным блоком управления (ЭБУ). ЭБУ по сигналам обратной связи от различных датчиков управляют как работой этих устройств, так и показателями рабочего процесса двигателя. Поэтому в современных дизельных установках достигаются весьма высокие экологические показатели.

На автотранспортных силовых установках, срок эксплуатации которых редко превышает 10 лет, что в условиях массового производства обеспечивает быструю окупаемость затрат производителя, конструкция двигателя с системой common rail стала практически безальтернативной.

В отличие от автомобильного, водный транспорт более дорогой и поэтому должен иметь существенно больший срок эксплуатации. Так, до настоящего времени в эксплуатации находятся суда, построенные более 30–40 лет тому назад. Судовые энергетические установки (СЭУ) уком-

плектованы дизелями с традиционными плунжерными топливными насосами высокого давления (с механическим управлением законом подачи топлива), на которые в случае модернизации судна распространяются современные требования по вредным выбросам. Очевидно, замена топливной системы, находящейся в эксплуатации СЭУ, на системы с электронным управлением топливоподачей связано со сложной и достаточно дорогостоящей модернизацией всей энергетической установки.

Другим известным способом сокращения вредных выбросов с отработавшими газами для дизельных двигателей предыдущих поколений является использование водо-топливных эмульсий (ВТЭ). Положительный эффект использования может быть достигнут за счет понижения максимальной температуры в цилиндре двигателя. Однако внедрение в существующую конструкцию систем СЭУ комплекта оборудования для подготовки и использования водо-топливных эмульсий связано с серьезными изменениями в конструкции топливной системы судна. Кроме того, использование ВТЭ требует от машинной команды аккуратного и безукоризненного выполнения регламента управления и обслуживания топливной системы во избежание серьезных аварий топливной аппаратуры. Известно, что использование ВТЭ может негативно повлиять на ресурсные показатели аппаратуры ввиду ускоренного износа плунжерных пар топливного насоса высокого давления и распылителей форсунок. Поэтому технически оправданное использование ВТЭ не может рассматриваться как бюджетный, легкодоступный и экономически оправданный способ сокращения вредных выбросов в СЭУ, находящихся в эксплуатации.

Известен и широко используется способ сокращения вредных выбросов с отработавшими газами за счет использования системы рециркуляции отработавших газов или системы EGR (Exhaust Gas Recirculation). Действительно, частичное повторное использование в цикле в качестве рабочего тела отработавших газов в смеси со свежим воздухом способно сократить эмиссию оксидов азота как за счет уменьшения массы отработавших газов, так и за счет изменений в протекании процессов смесеобразования и сгорания, связанных с изменением кинетики горения. Вместе с тем необходимо констатировать, что весомый положительный эффект от использования систем EGR достигается только на режимах частичных нагрузок дизельного двигателя, а на режимах, близких к номинальным, система должна быть выключена из работы по совершенно очевидной причине — достижения минимально допустимых коэффициентов избытка кислорода.

Поэтому задействование таких систем уместно и эффективно в двигателях автотранспортного назначения, основная работа которых происходит на режимах частичных нагрузок. Главная судовая энергетическая установка, работающая по винтовой характеристике, напротив, использует, в основном, режимы работы, близкие к номинальным. Кроме того, системы EGR оказываются достаточно «капризными» в эксплуатации, особенно при использовании низкокачественных сортов топлива. А внедрение в конструкцию эксплуатируемого двигателя системы рециркуляции отработавших газов сопряжено с серьезными изменениями существующей системы газо-воздушных трактов энергетической установки, разработки алгоритма работы и установки дополнительного оборудования в виде клапанов EGR и блока управления с определенной номенклатурой первичных датчиков.

В этой связи требуется разработка и применение таких методов сокращения вредных выбросов, которые были бы связаны с минимальными доработками конструкции и позволили бы достичь требуемого результата.

Для проведения дальнейшего анализа возможных путей сокращения эмиссии оксидов азота у дизелей, находящихся в длительной эксплуатации, выделим те из внутрицилиндровых процессов, рабочего цикла дизеля, которые оказывают решающее влияние на образование вредных выбросов. В первую очередь, это период задержки самовоспламенения, поскольку он определяет динамичность цикла и динамику процесса тепловыделения в целом, т. е. скорость достижения максимальной температуры цикла и ее абсолютное значение. Из анализа процесса тепловыделения следует, что сокращение периода задержки самовоспламенения приводит к уменьшению количества подготовленной к сгоранию топливовоздушной смеси и, как следствие, — к сокращению количества топлива, сгорающего на этапе быстрого (кинетического) сгорания, который, в основном, и определяет эмиссию оксидов азота. Достаточно много работ посвящено исследованию параметров, влияющих на период задержки самовоспламенения [2, 3].

Так, в работе [2] предлагается определять время периода задержки самовоспламенения топлива из уравнения

$$\tau = (0,36 + 0,22 \cdot c_m) \exp \left[E_a \left(\frac{1}{RT_2} - \frac{1}{17,19} \right) \cdot \left(\frac{21,2}{P_2 - 12,4} \right)^{0,63} \right]$$

Похожая зависимость предлагается в работе [3]:

$$\tau = B \cdot 10^{-2} \sqrt{C} \sqrt{\frac{T_k}{p_k}} \cdot e^{\frac{E_a \cdot C^{0,34}}{R \cdot T_k}},$$

где: p , T — давление и температура в камере сгорания к моменту впрыска топлива; E_a — энергия активации; c_m — скорость поршня; B , C — константы, зависящие от частоты вращения коленчатого вала и кинематики кривошипно-шатунного механизма (КШМ) соответственно.

Анализируя эти полуэмпирические зависимости, следует выделить две группы параметров:

- к первой можно отнести такие, воздействие на которые в конструкции эксплуатируемой энергетической установки невозможно. Это частота вращения коленчатого вала, скорость поршня и конструкционные параметры КШМ;

- вторая группа параметров допускает некоторые изменения в условия эксплуатации: это температура в камере сгорания и энергия активации.

Влияние температурного состояния заряда камеры сгорания на протекание последующих внутрицилиндровых процессов рассматривалось и ранее [4]. Самым простым и доступным способом повышения температуры начала топливоподачи является изменение угла опережения подачи топлива. Однако непосредственное воздействие на температуру за счет уменьшения угла опережения подачи топлива неизбежно приводит к ряду негативных последствий. В частности, изменение оптимальных настроек двигателя приводит к повышению расхода топлива из-за смещения сгорания на линию расширения и, возможно, к возникновению дымления.

Изменение температурного состояния заряда цилиндра к моменту впрыска топлива может быть обеспечено введением элементов тепловой изоляции рабочего объема цилиндра двигателя. Это может быть достигнуто как за счет повышения температуры охлаждающей жидкости (создание теплового «подпора»), что характерно для систем высокотемпературного охлаждения, так и за счет использования в конструкции деталей, формирующих камеру сгорания, низкотеплопроводных теплоизоляционных материалов, как, например, керамику [5]. Очевидно, что такие мероприятия влекут за собой некоторые изменения конструкции основных деталей и систем двигателя, что может оказаться малорентабельным.

Вместе с тем увеличение температуры заряда камеры сгорания к моменту подачи в цилиндр основной порции топлива можно достичь, организовав рабочий процесс при наличии так называемого «предвпрыска». Первые попытки реализации этой идеи были связаны с изменением профиля кулака привода топливного насоса высокого давления, что, как правило, приводило к возникновению недопустимо высоких скоростей ускорений в механизме привода и снижению ресурса. Впоследствии была разработана доста-

точно простая конструкция двухпружинной форсунки [6], которая в полной мере реализует идею двухкаскадного впрыска топлива. В двухпружинной гидроуправляемой форсунке, представленной на рис. 1, происходит ступенчатый подъем иглы распылителя: первый — при давлении 18–20 МПа с ограничением высоты подъема иглы величиной 0,02–0,05 мм; второй — под давлением 32–38 МПа и обеспечивает впрыск основной части цикловой подачи топлива. Необходимо отметить, что форсунка — сменный элемент конструкции — «расходный материал» — в соответствии с рекомендациями заводов-изготовителей подлежит замене через каждые 3–4 тыс. ч работы.

Установка на двигателе таких форсунок не связана с существенными экономическими затратами, но при этом достигается значительное снижение выбросов оксидов азота, а также уменьшается шумность работы дизельного двигателя. Такие конструкции апробированы и используются на автотранспортных установках с достижением хороших показателей рабочего процесса. Именно поэтому такое решение может быть рекомендовано к использованию в СЭУ, находящихся в эксплуатации.

К важнейшим параметрам, определяющим период задержки воспламенения топлива, относится энергия активации E_a , изменение которой также способно повлиять на первый этап процесса сгорания-тепловыделения. Очевидно, что энергия активации подводится к распыленному топливу из окружающей среды (т. е. из внутренней энергии рабочего тела). В этом плане повышение температуры рабочего тела сокращает время накопления энергии активации. Однако на энер-

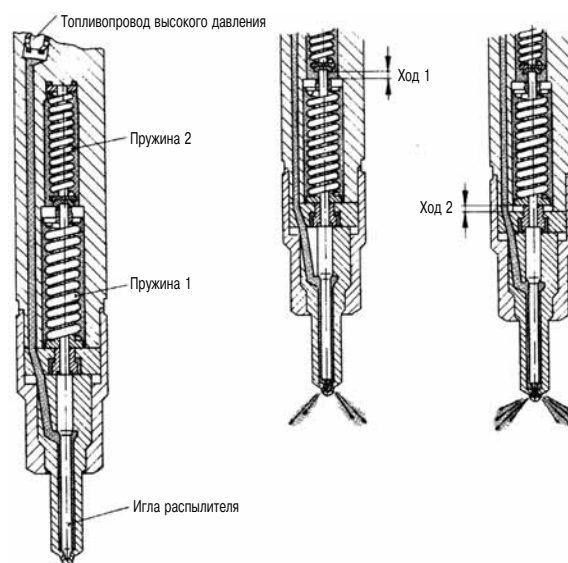


Рис. 1. Принцип действия и конструкция двухпружинной форсунки

гию активации можно повлиять и непосредственно за счет изменения свойств топлива.

В работе [7] предлагается оригинальный способ предварительной обработки топлива непосредственно перед подачей его в камеру сгорания цилиндра. Автор предлагает производить обработку топлива путем взаимодействия турбулентного потока последнего с катализатором, в качестве которого выступает покрытие из металла семейства платины. Таким образом, по утверждению автора, изменяются свойства топлива, что способствует сокращению периода самовоспламенения. В частности, в парафиновых углеводородах (наиболее распространенной группы среди дизельного топлива) парафин подвергается дегидрированию в присутствии катализатора и превращается в вольфеины C_nH_{2n} с выделением молекул водорода, которые, обладая высокой скоростью диффузии, высокой воспламеняемостью и высокой скоростью горения, уменьшают время процесса самовоспламенения топлива в камере сгорания дизельного двигателя. Исходя из этого предлагается нанесение электролегирующим катализатора на наиболее высокотемпературную часть поверхности иглы распылителя, располагающуюся под дифференциальной площадкой. Турбулизация потока и увеличение поверхности контакта с катализатором топлива, подаваемого в цилиндр, обеспечивается дообработкой шлифованием иглы распылителя в указанной зоне с созданием специальных наклонных канавок-завихрителей в виде ромбовидной накатки (рис. 2).

Предложенная технология была апробирована для ряда двигателей. Положительные результаты

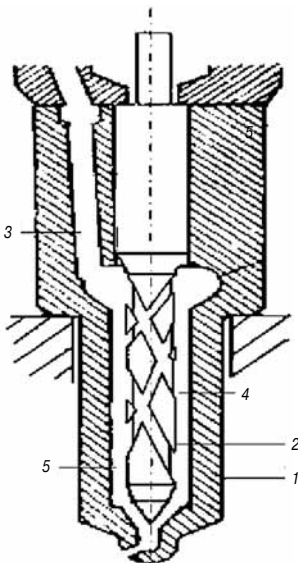


Рис. 2. Дообработанный распылитель форсунки:

1 — корпус распылителя; 2 — дообработанная игла распылителя; 3, 5 — канал подачи топлива высокого давления; 4 — канавки для завихрения топлива

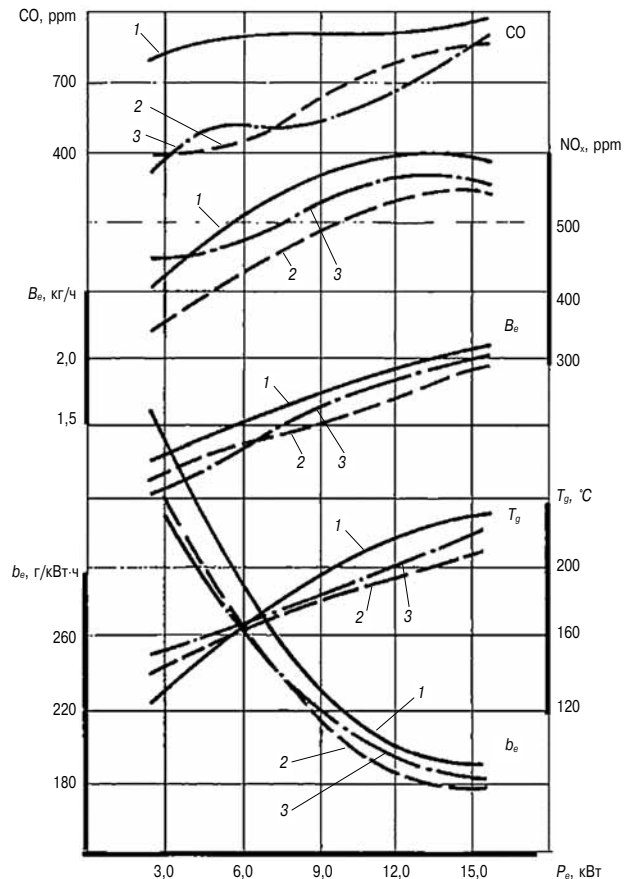


Рис. 3. Нагрузочная характеристика дизеля NVD24:

1 — параметры двигателя со штатной форсункой; 2 — параметры двигателя с предварительной обработкой топлива; 3 — параметры двигателя с предварительной обработкой топлива и увеличенным углом опережения впрыска

внедрения предварительной обработки топлива показаны на примере нагрузочной характеристики двигателя NVD24 (рис. 3).

Как следует из предоставленной информации, внедрение предлагаемых мероприятий позволило сократить вредные выбросы с отработавшими газами при одновременном повышении топливной экономичности на всех режимах работы по нагрузочной характеристике.

Таким образом, из проведенного анализа следует, что существуют достаточно простые и доступные способы повышения технического уровня эксплуатируемых ДЭУ с достижением нормативных параметров выбросов вредных веществ с отработавшими газами.

Литература

1. Новиков Л.А. Новые технологии для достижения перспективных норм вредных выбросов дизелей // Двиглестроение. — 2009. — № 2. — С. 58 — 59.
2. Heywood J.B. Internal combustion engines fundamentals // McCraw — Hill Book Co., NY. 1988.
3. Файнлейб Б.Н. Топливная аппаратура автотракторных дизелей. — Л.: Машиностроение, 1989. — 352 с.
4. Живлюк Г.Е. Анализ влияния температурного состояния заряда цилиндра дизеля на протекание процесса

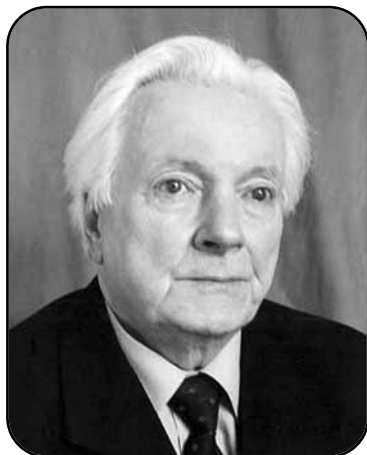
смесеобразования // Двигателестроение. — 1990. — № 5. — С. 58–60.

5. Огородников В.Б., Бордуков В.В., Живлюк Г.Е. Анализ тепловыделения в камере сгорания двигателя с ограниченным теплоотводом // М. : ЦНИИТЭИТЯЖМАШ. Экспресс-информация (отечественный опыт). — Серия 4, Вып. 9. 1987. — 5 с.

6. Казедорф Ю., Войзетилегер Э. Системы впрыска дизельных двигателей // перевод с нем. ООО «СтарСПб». — М. : Книжное издательство «За рулем», 2012. — 320 с.

7. Klyus O. Simultaneous reduction of fuel consumption and toxic emission of exhaust gases of fishing fleet engines// Full_Paper_№ 13. CIMAC Congress 2013, Shanghai.

ПАМЯТИ М.А. САЛТЫКОВА



31 января 2015 года ушел из жизни крупный ученый, специалист в области прочности дизелей, доктор технических наук, профессор, заслуженный конструктор Российской Федерации, лауреат Государственной премии СССР, бывший начальник отдела прочности ОАО «Коломенский завод»
Михаил Алексеевич Салтыков

Михаил Алексеевич родился 18 августа 1927 г. в г. Камышлове Свердловской области. После окончания в 1948 г. механического отделения судостроительного техникума в г. Зеленодольске Татарской АССР продолжил образование в Ленинградском кораблестроительном институте (ЛКИ), который окончил с отличием в 1954 г. по специальности «Судовые ДВС и установки». Лучшему выпускнику было предложено место в аспирантуре. Однако Михаил Алексеевич предпочел начать свою трудовую деятельность на заводе. В мае 1954 г. он приступил к работе на «Коломенском заводе» в конструкторском бюро по машиностроению, занимавшимся проектированием дизелей. В 1958 г. Михаил Алексеевич возглавил созданную на заводе по его инициативе лабораторию усталостной прочности (в дальнейшем отдела прочности), которым бессменно руководил почти 50 лет — до 2005 г.

Многие из разработок отдела имели научную новизну, приоритетность на мировом уровне, стали предметом изобретений и темами защищенных диссертаций, начало которым положила защита в 1967 г. Михаилом Алексеевичем кандидатской диссертации в ЛКИ. В последующем сотрудниками лаборатории были защищены еще десять кандидатских диссертаций, выполненных под фактическим руководством Михаила Алексеевича.

В процессе формирования лаборатории прочности тесно сотрудничала с рядом ведущих институтов (ИМАШ им. Благоднарова, ЦИАМ им. Баранова, ЦНИИТМАШ, ВНИИНМАШ и др.) и оказывала практическую помощь ряду дизелестроительных предприятий в повышении надежности выпускаемых изделий.

По итогам выполненных теоретических разработок, а также практических работ Михаилом Алексеевичем была подготовлена и защищена в МГТУ им. Баумана в 1988 г. докторская диссертация, которая положила начало развитию нового и перспективного направления — построение «инженерной технологии проектирования».

Михаил Алексеевич имеет более 100 печатных трудов в виде статей, сборников и книг, а также учебных и методических пособий. Он автор многих внедренных изобретений и участник разработки мощного ряда дизелей ЧН26/26 (Д49), за что в составе коллектива конструкторов Коломенского завода он стал лауреатом Государственной премии СССР. За заслуги в совершенствовании техники в отрасли дизелестроения в 1993 г. ему присвоено почетное звание заслуженный конструктор Российской Федерации. Многолетняя и плодотворная научно-педагогическая деятельность Михаила Алексеевича отмечена медалями СССР и Российской Федерации.

Всегда находясь на передовой линии науки и техники, Михаил Алексеевич передавал свой обширный опыт и знания ученикам и коллегам. Созданная профессором Салтыковым научная школа по обеспечению прочности двигателей получила национальное и международное признание и включает плеяду кандидатов и докторов наук, которые своим трудом вносят весомый вклад в развитие двигателестроения в России.

*Светлую память о Михаиле Алексеевиче на долгие годы сохраняют его ученики и коллеги.
Более подробно о творческом пути д.т.н., проф. Салтыков М.А. и его основных работах можно узнать на сайте www.saltykov.pro.*