

ПОВЫШЕНИЕ ЭКОНОМИЧНОСТИ РЕЖИМОВ МАЛЫХ НАГРУЗОК СУДОВОГО ДИЗЕЛЯ, РАБОТАЮЩЕГО НА ВИНТ РЕГУЛИРУЕМОГО ШАГА

*Н.Н. Патрахальцев, д.т.н, проф., И.С. Мельник, магистр, И.А. Петруня, магистр
Российский университет дружбы народов*

С использованием универсальных характеристик судового дизеля 12ДН23/30 (40ДМ), в координатах «удельная работа двигателя—частота вращения», выполнен анализ ожидаемого повышения экономичности дизеля, работающего на винт регулируемого шага. Повышение экономичности на малых нагрузках достигается за счет отключения части цилиндров. Показано, что снижение удельного эффективного расхода топлива на режимах малой нагрузки может составить около 18%.

В условиях эксплуатации дизели практически всех назначений длительное время работают на режимах малых нагрузок (МН), на которых топливная экономичность двигателя существенно снижается. Исключение могут составить только линейные крупные суда, в то время как для балкеров, буксиров, большинства речных судов и т. д. характерна длительная работа с нагрузками ниже 40–50 % от полной [1]. Для обеспечения эффективной работы в условиях маневров, движения в узкостях, швартовках, прохождении шлюзов и т. д. в качестве движителя применяется винт регулируемого шага (ВРШ). Режимы малой нагрузки в этом случае реализуются уменьшением шагового отношения винта (H/D), что конечно удобно с точки зрения управляемости судна, но дизель при этом работает на режимах низкой удельной экономичности. В ограниченном количестве случаев нагрузка может быть несколько повышена увеличением H/D , но при снижении частоты вращения двигателя для сохранения исходной скорости судна проблему повышения экономичности решить удается не всегда.

Известно [2], что снижение индикаторного КПД (η_i) дизеля на режимах МН и ХХ можно проиллюстрировать характером регулировочной характеристики дизеля по составу смеси ($\eta_i = f(\alpha)$). А одним из методов повышения экономичности таких режимов является метод отключения цилиндров или циклов, называемый также методом регулирования двигателя изменением его рабочего объема [3]. В простейших случаях метод реализуется выключением подачи топлива в часть цилиндров, причем на время вплоть до времени

реализации одного цикла (без изменения фаз газообмена, что повышает эффективность метода, но усложняет конструктивно его реализацию). При отключении части цилиндров увеличивается подача топлива в активные (работающие) цилиндры для поддержания заданного нагрузочного режима, вследствие чего наблюдается рост (до определенного уровня) индикаторных КПД (η_i) циклов.

Применение метода предполагает решение ряда задач, а именно: определение рационального количества цилиндров, которые должны оставаться активными (не выключенными) для поддержания заданного режима; оценка ожидаемого выигрыша в расходе топлива, который можно получить, применяя данный метод. Следует отметить, что обычно отключению подвергается одно и то же количество одних и тех же цилиндров. Это определяется конструкцией топливной системы и устройств для отключения цилиндров. Но поскольку уже существуют электронные системы и средства для отключения произвольного числа разных цилиндров, причем на время вплоть до одного цикла и в любой последовательности [4], то возникает вопрос о целесообразности управления работой дизеля изменением числа активных цилиндров или циклов.

Для оценки возможного повышения экономичности двигателя на малых нагрузках путем отключения части цилиндров или циклов, иначе говоря, для оценки ожидаемого выигрыша в расходе топлива при применении того или иного метода, используется универсальная характеристика двигателя по удельному расходу топлива, перестроенная в координаты: «удельная работа двигателя—частота вращения».

Существо метода такой оценки заключается в следующем. Традиционная универсальная характеристика двигателя строится в координатах: среднее эффективное давление p_e (или эффективный момент M_e)— n и в этом поле наносятся параметрические кривые постоянных значений $g_e = \text{const}$, $N_e = \text{const}$ и т. д. При этом показатель M_e является функцией положения рейки (h_p , при данном n) и относится ко всему полноразмерному двигателю, а показатель среднего эффективного давления p_e — как ко всему полноразмер-

ному двигателю, так и к каждому цилиндру полноразмерного двигателя, причем $p_e = f(h_p)$ при данном n . По этой характеристике невозможно оценить экономичность двигателя, который регулируется изменением числа активных цилиндров, т. е. изменением рабочего объема двигателя. Тогда может быть применен следующий подход.

Полноразмерный двигатель, т. е. работающий на всех k цилиндрах (рабочий объем равен $k \cdot V_h$), и тот же двигатель, но с уменьшенным рабочим объемом ($z \cdot V_h$), реализуют заданный нагрузочный режим (МН), выполняя одинаковую для этих случаев полезную работу ($L_{полн}$). Изменение числа активных цилиндров меняет величину удельной работы, которая равна $L_{уд} = L_{полн}/(k \cdot V_h)$ для полноразмерного двигателя или $L_{уд} = L_{полн}/(z \cdot V_h)$ — для двигателя с числом активных цилиндров z . Поскольку традиционная универсальная характеристика приведена в координатах $M_e - n$ или $p_e - n$, то ее нужно перестроить в координаты $L_{уд} - n$, так как регулируемым параметром является уже не только положение рейки, но и рабочий объем двигателя (рис. 1).

Пусть известен момент M_e [Н·м] полноразмерного дизеля (двухтактного в данном исследовании), работающего с некоторой пониженной нагрузкой. При этом полная работа, совершаемая двигателем, равна

$$L_{полн} = 2 \cdot \pi \cdot M_e \text{ [Дж]}. \quad (1)$$

Тогда при полном рабочем объеме двигателя $k \cdot V_h$ [дм³] его удельная работа равна

$$L_{уд} = 2 \cdot \pi \cdot M_e / (k \cdot V_h) \text{ [Дж/(дм}^3\text{)]}. \quad (2)$$

Если число активных цилиндров равно z , то удельная работа такого дизеля при выполнении той же полной работы равна

$$L_{уд} = 2 \cdot \pi \cdot M_e / (z \cdot V_h). \quad (3)$$

Пусть режим полноразмерного дизеля задан через среднее эффективное давление p_e [МПа]. Тогда (для двухтактного двигателя)

$$L_{полн} = 1000 \cdot p_e \cdot k \cdot V_h. \quad (4)$$

Для полноразмерного двухтактного дизеля

$$L_{уд} = 1000 \cdot p_e. \quad (5)$$

Для дизеля с числом активных цилиндров z получаем

$$L_{уд} = 1000 \cdot p_e \cdot k / z \text{ [Дж/(дм}^3\text{)]}. \quad (6)$$

Проанализируем эту методику с использова-

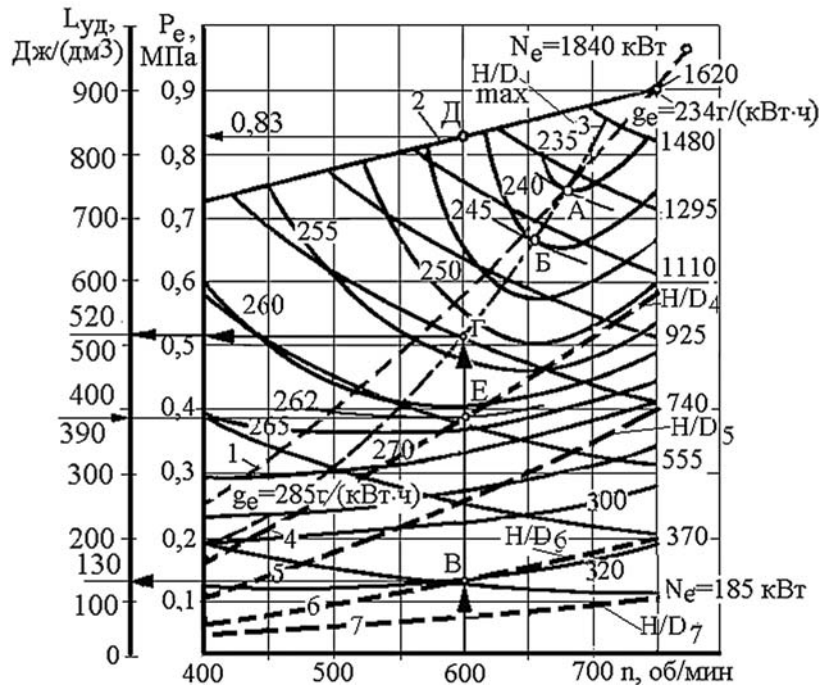


Рис. 1. Универсальная (комбинированная) характеристика судового двухтактного дизеля 12ДН23/30 (40 ДМ):

1 — винтовая характеристика с полным (максимальным) шаговым отношением, равным шаговому отношению ВФШ ($H/D_{вфш}$); 2 — ограниченная характеристика; 3 — экономическая характеристика; 4, 5, 6, 7 — винтовые характеристики при шаговых отношениях соответственно $H/D_4 > H/D_5 > H/D_6 > H/D_7$

нием универсальной характеристики дизеля 12ДН23/30 (40ДМ) [2], на которую дополнительно нанесены винтовые характеристики двигателя с ВРШ с разным шаговым отношением H/D (рис. 1).

Точками А и Б показаны примеры минимальных расходов топлива при данных постоянных мощностях (точки касания кривых $g_e = \text{const}$ и $N_e = \text{const}$). Точками В и Г показаны соответственно режимы малой нагрузки при работе полноразмерного дизеля ($z = k$) и дизеля с z работающими цилиндрами (при $z < k$). Причем это число z пока нам не известно. Известно только условие, что нужно получить минимальный индикаторный и эффективный расходы топлива. На режиме, обозначенном точкой В, т. е. при $n = 600$ об/мин и $p_e = 0,13$ МПа полноразмерный дизель выполняет полную работу $L_{полн} = 1000 \cdot p_e \cdot k \cdot V_h = 1000 \cdot 0,13 \cdot 12 \cdot 12,458 = 19\,434$ Дж. При этом его удельная работа равна $L_{уд} = 1000 \cdot p_e = 1000 \cdot 0,13 = 130$ Дж/(дм³). Для того чтобы выйти на режим максимальной экономичности, выполняя ту же нагрузку и при той же частоте вращения, дизель должен выполнять удельную эффективную работу, равную $L'_{уд} = 520$ Дж/(дм³) (см. рис. 1). Следовательно, число работающих цилиндров должно составлять $z = L_{уд} \cdot k / L'_{уд} =$

= 130·12/520 ≈ 3 цилиндра. Полноразмерный дизель на исходном режиме имел $g_e = 320$ г/(кВт·ч), а после изменения рабочего объема — ~253 г/(кВт·ч). Следовательно повышение экономичности (выигрыш в расходе топлива) может составить

$$\Delta g_e = [(g_{e,k} - g_{e,z}) / g_{e,k}] 100 \approx 21\%. \quad (7)$$

Очевидно, что удельный расход топлива определяется не только индикаторным КПД, но и механическим, который при снижении нагрузки существенно снижается. Поэтому возникает вопрос, а может ли данный дизель работать на трех цилиндрах, как соотносятся его механические потери с учетом выключенных цилиндров, с развиваемым индикаторным моментом, мощностью.

Отметим, что все приведенные рассуждения выполнены при допущении, что абсолютные значения механических потерь сохраняют свои значения как для полноразмерного, так и для дизеля с выключением части цилиндров, и зависят только от частоты вращения (при условии поддержания теплового состояния, примерного сохранения параметров наддува, что вполне вероятно для пониженных нагрузок), но без изменения фаз газообмена. Такое допущение представляется приемлемым в связи с тем, что надежными методами определения, например, момента механических потерь, являются методы прокрутки вала от постороннего источника при выключенных подачах топлива во все цилиндры, поочередного отключения отдельных цилиндров, а также выбега после отключения всех цилиндров [4]. Зная экспериментальную характеристику изменения p_m , получим, например, для случая работы по винтовой характеристике H/D_6 следующие показатели (рис. 2).

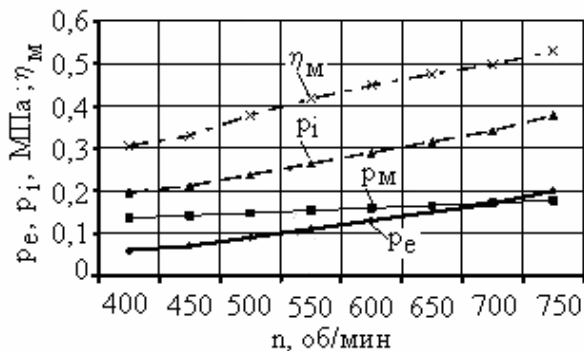


Рис. 2. Среднее эффективное и индикаторное давления (p_e и p_i), среднее давление механических потерь (p_m) и механический КПД (η_m) при работе дизеля по винтовой характеристике с шаговым отношением H/D_6 (см. рис. 1)

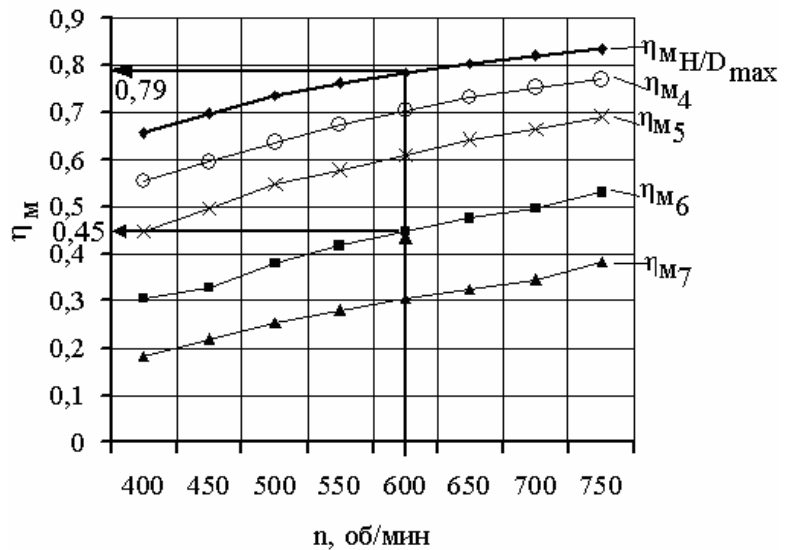


Рис. 3. Изменение механического КПД ($\eta_{мех}$) дизеля при работе с разными нагрузками, определяемыми шаговыми отношениями винта регулируемого шага (ВРШ) в соответствии с рис. 1:

H/D_{max} — максимальное шаговое отношение винта

Известно, что механический КПД (η_m) изменяется с изменением нагрузки (рис. 3).

Так, на рассмотренном исходном режиме малой нагрузки он составлял $\eta_m = \sim 0,45$ (рис. 3). При этом индикаторные показатели активных цилиндров соответственно должны быть повышенными. С учетом принятых допущений на том же нагрузочном режиме и той же частоте вращения, но с числом работающих цилиндров $z = 3$ механический КПД не изменяется. Поскольку очевидно, что $L_{уд,i} = L_{уд}/\eta_m$ ($L_{уд,i}$ — удельная индикаторная работа) и, следовательно, для активного цилиндра дизеля получаем $p_i = 520 / (0,45 \cdot 1000) = \sim 1,16$ МПа. Однако в соответствии с ограничительной характеристикой 2 (см. рис. 1) ($p_e = 0,83$, точка Д на рис. 1) и при $\eta_m = 0,79$ (рис. 3) среднее индикаторное давление активного цилиндра p_i не может составить более $0,83/0,79 = 1,05$ МПа. Следовательно на данном режиме отключать можно не более восьми цилиндров ($z \geq 4$). Тогда удельная работа $L_{уд}$ будет равна 390 Дж/(дм³), g_e составит 262 г/(кВт·ч) (точка Е на рис. 1), а выигрыш в удельном расходе топлива будет составлять около 18 %.

Следует отметить, что данный анализ проводится при допущении, что отключение (а затем включение) цилиндров происходят мгновенно. Реально существуют различные ограничения на проведение таких операций, например, ограничения, связанные с неравномерностью вращения вала, условиями возникновения крутильных колебаний и т. д. Для автомобильного дизеля (где важным показателем является комфортность поездки) считается, что с учетом ограничений на реализацию метода регулирования нагрузки за

счет изменения рабочего объема дизеля ожидаемый результат может быть на 25–50 % ниже расчетного. Кроме того, важна доля режимов малых нагрузок в реальном эксплуатационном цикле режимов работы двигателя. Очевидно, что чем эта доля ниже, т. е. чем выше коэффициент загрузки двигателя, тем меньше будет и выигрыш в расходе топлива.

Однако для оперативной оценки возможностей повышения экономичности дизеля при работе на малых нагрузках, рассмотренный метод анализа эффективности регулирования рабочего объема может быть достаточно эффективен, не трудоемок и не требует значительных затрат времени.

Литература

1. Николаев Н.И., Гинда О.П., Зиненко Н.Н. Повышение эксплуатационной топливной экономичности главных двигателей на частичных нагрузках // Двигателестроение. — 2010. — № 4 (242). — С. 22–24.
2. Двигатели внутреннего сгорания: Теория поршневых и комбинированных двигателей: Учебник для вузов по специальности «Двигатели внутреннего сгорания» / Д.Н. Вырубов, Н.А. Иващенко, В.И. Ивин

и др.; под ред. А.С. Орлина, М.Г. Круглова. — 4-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1983. — 372 с.

3. Патрахальцев Н.Н., Страинов С.В., Корнев Б.А., Мельник И.С. Регулирование дизеля методом отключения–включения цилиндров или циклов // Двигателестроение. — 2011. — № 3 (245). — С. 7–12.

4. Сороко-Новицкий В.И. Испытания автотракторных двигателей. — М.: МАШГИЗ. — 1995. — 542 с.

ПАМЯТИ В.И. СУРКИНА

**15 марта 2013 г. на 75 году жизни
скоропостижно скончался заслуженный работник высшей
школы РФ, доктор технических наук, профессор, заведующий
кафедрой «Тракторы и автомобили» Челябинской
государственной агроинженерной академии**

Суркин Вячеслав Иванович

В.И. Суркин родился 16.06.1938 г. После окончания Куйбышевского сельскохозяйственного института в 1962 г. работал старшим инженером совхоза Ростовского отделения сельскохозяйственной техники, а уже в 1963 г. стал главным инженером совхоза Бектышево Ярославской области. В 1964 г. Вячеслав Иванович продолжил трудовую деятельность в качестве преподавателя Бугурусланского сельскохозяйственного техникума и в 1970 г. после окончания аспирантуры успешно защитил кандидатскую диссертацию на тему «Исследование параметров масляного слоя коренных подшипников тракторных дизелей» в ЧИМЭСХ, г. Челябинск. Вся дальнейшая научно-техническая и педагогическая деятельность В.И. Суркина была связана с кафедрой «Тракторы и автомобили» ЧИМЭСХ (ЧГАУ, ЧГАА). В 1989 г. Вячеслав Иванович защитил докторскую диссертацию на тему «Повышение технического уровня тракторных дизелей оптимизацией пар трения» в ЛПИ (Ленинград), а в 1991 г. ему присвоили ученое звание профессора. Начиная с 1995 г. Вячеслав Иванович был бессменным заведующим кафедрой «Тракторы и автомобили».

В.И. Суркин был талантливым ученым и педагогом. Он внес значительный вклад в развитие научной школы по повышению технического уровня тракторных дизелей. Им было подготовлено 12 кандидатов наук и 1 доктор наук.

Вячеслав Иванович известен как автор монографии «Смазка пар трения дизелей», более 180 научных работ, 12 свидетельств на изобретение.

Долгие годы Вячеслав Иванович активно участвовал в различных научных, профессиональных и общественных организациях. Был действительным членом академии аграрного образования (Москва), членом научно-технического совета ЧТЗ, членом диссертационного совета Д212.298.09 при Южно-Уральском государственном университете.

За многолетнюю деятельность в подготовке высококвалифицированных специалистов В.И. Суркин был награжден грамотой Министерства сельского хозяйства и продовольствия РФ (1999 г.), орденом Дружбы (2001 г.) и премией Губернатора Челябинской области.

*Коллективы кафедр «Тракторы и автомобили» (ЧГАА)
и «Автомобильный транспорт и сервис автомобилей» (ЮУрГУ), друзья и коллеги приносят свои
соболезнования семье и близким.*

Светлая память о нем останется в наших сердцах.

