

## МЕТОД ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОТКЛЮЧЕНИЯ ЦИЛИНДРОВ АВТОМОБИЛЬНОГО ДИЗЕЛЯ

Г.Д. Драгунов, д.т.н., Южно-Уральский государственный университет;  
А.Н. Медведев,

Челябинское высшее военное автомобильное инженерно-командное училище

При кажущейся очевидной целесообразности отключения части цилиндров двигателя для улучшения топливной экономичности эффективность этого мероприятия для разных дизелей оказывается не однозначной. Авторами разработан метод оценки эффективности отключения цилиндров и определения оптимального количества отключаемых цилиндров автомобильного дизеля на основе зависимости индикаторного КПД цикла от нагрузки и частоты вращения коленчатого вала.

Экономичность поршневых двигателей в значительной степени зависит от режимов их работы. Известно, что на номинальном или близком к нему режимах показатели экономичности обычно достигают оптимальных или близких к ним значений. На частичных нагрузках с приближением к режиму холостого хода эффективность работы дизелей заметно снижается. Вместе с тем среди эксплуатационных режимов большинства транспортных средств существенную долю составляют именно режимы холостого хода и малых нагрузок.

Особенности эксплуатации транспортных двигателей при низких температурах таковы, что многие водители вынуждены вообще не останавливать двигатель в течение рабочей смены. Это приводит к значительному перерасходу топлива, увеличению выброса вредных веществ в атмосферу и снижению моторесурса двигателя. В связи с этим очевидна актуальность решения проблемы экономии топлива на автомобильной и транспортной технике при работе двигателей на режимах малых нагрузок и холостого хода [1].

Улучшение экономичности дизеля при отключении цилиндров достигается либо повышением механического КПД (при использовании средств прекращения газообмена), либо индикаторного КПД вследствие улучшения качества рабочего процесса с ростом нагрузки.

В настоящее время исследованы следующие способы отключения цилиндров:

- прекращение подачи топлива в отдельные цилиндры;
- одновременное прекращение подачи топлива и воздуха в отключаемые цилиндры;



- подача в неработающие (отключенные) цилиндры отработавших газов из работающих цилиндров;
- остановка поршней в отключаемых цилиндрах.

Отключение цилиндров можно осуществить блоком для V-образных дизелей или по одному цилиндру. Последний способ оценивается как наиболее эффективный, существенно расширяющий зону рабочих нагрузок. Однако средства реализации этого способа в значительной степени усложняют конструкцию дизеля, что исключает целесообразность развития данного направления.

Повышение экономичности дизелей связано в основном со снижением тепловых и механических потерь. Поскольку методы снижения механических потерь в дизелях остаются общими для всех поршневых двигателей и уже рассмотрены, остановимся лишь на снижении тепловых потерь [2].

Возможности снижения тепловых потерь в дизелях в основном связаны с улучшением полноты сгорания топлива и ростом индикаторного КПД [3].

При отключении подачи топлива в часть цилиндров, когда оставшиеся работающие цилиндры вынуждены совершать большую работу, цикловые подачи топлива в этих цилиндрах возрастают. Это приводит к улучшению распыливания топлива, распределения его по объему камеры сгорания, уменьшению неравномерности подачи топлива по секциям топливного насоса высокого давления и снижению нестабильности подач топлива в последовательности циклов, что благоприятно сказывается на индикаторном КПД и других показателях работы дизеля [4].

Совокупное влияние всех факторов приводит к тому, что с увеличением среднего индикаторного

давления  $p_i$  индикаторный КПД  $\eta_i$  сначала растет, а затем уменьшается [1].

Таким образом, для зависимости индикаторного КПД  $\eta_i$  от нагрузки характерно наличие максимума  $\eta_{i\max}$ . Это позволяет в зоне малых нагрузок (пока среднее индикаторное давление  $p_i$  в отдельных цилиндрах не превышает среднего индикаторного давления при  $\eta_{i\max}$ ) повышать общее среднее индикаторное давление  $p_{\Sigma}$  путем отключения части цилиндров и повышения среднего индикаторного давления в работающих цилиндрах  $p_{ip}$  до  $p_{i\eta}$ . Баланс мощностей можно выразить через среднее индикаторное давление и среднее давление механических потерь  $p_M$  отдельных цилиндров. Выразим эффективную нагрузку в виде среднего эффективного давления  $p_{me}$ , среднего индикаторного давления работающих цилиндров  $p_{ip}$ , количества работающих цилиндров  $z_p$ , давления механических потерь  $p_M$  и общего числа цилиндров  $z$  дизеля:

$$p_{me} \cdot z = p_{ip} \cdot z_p - p_M \cdot z; \quad (1)$$

$$p_{ip} = \frac{p_{me} \cdot z + p_M \cdot z}{z_p} = \frac{(p_e + p_M)z}{z_p}.$$

Для режима холостого хода, когда  $p_{me} = 0$ ,  $p_{ip} = p_M \cdot z/z_p$ .

Среднее индикаторное давление  $p_i$  возрастает обратно пропорционально числу работающих цилиндров или пропорционально отношению  $z/z_p$ .

Например, при отключении половины цилиндров  $z/z_p = 2$  среднее индикаторное давление  $p_{ip}$  возрастет вдвое. Для получения более общей зависимости  $\eta_{ip}$  от  $p_i$  и числа отключенных цилиндров необходимо выразить аналитически зависимость  $\eta_i = f(p_i)$ . Вид этой зависимости для дизелей характеризуется следующими свойствами: функция непрерывна; функция гладкая; функция имеет один явно выраженный максимум  $\eta_{i\max}$  при  $p_{i\eta}$ ; наименьшее значение  $p_{i\min}$  равно мощности механических потерь  $p_M$  и при этом  $\eta_i = \eta_{i\min}$ .

Характеристика  $\eta_i = f(p_i)$  может быть аппроксимирована параболой (рис.1).

Для простоты анализа величины индикаторного КПД  $\eta_i$  и среднего эффективного давления  $p_{me}$  целесообразно представить в безразмерном виде как отношение  $p_i$  к  $\eta_i$  при максимальном КПД

$$\eta_{i\max} \cdot \bar{p}_i = \frac{p_i}{p_i \eta_i}.$$

Представим аналитически эту зависимость в виде квадратичной параболы:

$$\eta_i = a - b(\bar{p}_i - 1)^2. \quad (2)$$

Значение коэффициентов  $a$  и  $b$  уравнения (2) найдем из начальных условий:

при  $\bar{p}_i = \bar{p}_{i\min}$ ,  $p_{me} = 0$  и  $\bar{p}_i = \bar{p}_M$ ,  $\eta_i = \eta_{i\min}$ ;

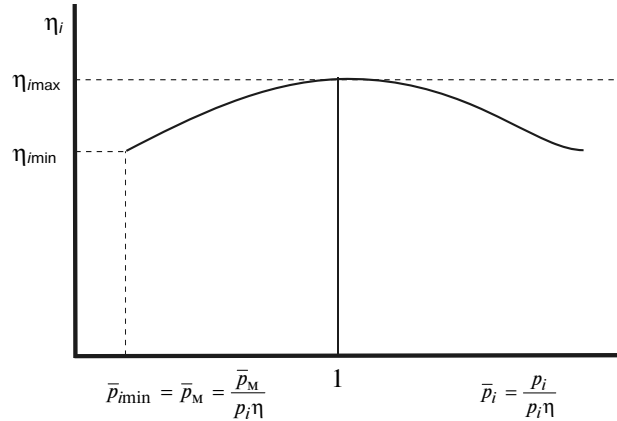


Рис. 1. Зависимость  $\eta_i$  от относительного  $p_i$

при  $p_i = p_i \eta_i$ ,  $p_i = 1$ ,  $\eta_i = \eta_{i\max}$ .

Подставляя эти условия в (2), получим

$$\eta_i = \eta_{i\max} - \frac{\eta_{i\max} - \eta_{i\min}}{(\bar{p}_M - 1)^2} (\bar{p}_i - 1)^2; \quad (3)$$

$$\eta_i = \eta_{i\max} - \frac{\eta_{i\max} - \eta_{i\min}}{(\bar{p}_M - 1)^2} \left( \bar{p}_{ip} \frac{z}{z_p} - 1 \right)^2. \quad (4)$$

Для определения числа работающих или отключенных цилиндров, при которых обеспечивается максимальный индикаторный КПД, продифференцируем уравнение (4) по  $z/z_p$ . Будем считать, что при отключении части цилиндров зависимость  $\eta_i = f(p_i)$  для работающих цилиндров не меняется и, следовательно,  $\eta_{i\max}$ ,  $\eta_{i\min}$ ,  $p_M$  являются при дифференцировании величинами постоянными:

$$\frac{\partial \eta_i}{\partial \left( \frac{z}{z_p} \right)} = - \frac{\eta_{i\max} - \eta_{i\min}}{(\bar{p}_M - 1)^2} \frac{1}{2} \left( \bar{p}_{ip} \frac{z}{z_p} - 1 \right) \cdot \bar{p}_{ip}. \quad (5)$$

Приравняв левую часть уравнения (5) к нулю, получим условие достижения максимального индикаторного КПД в работающих цилиндрах и при отключении части цилиндров:

$$- \frac{\eta_{i\max} - \eta_{i\min}}{(\bar{p}_M - 1)^2} \frac{1}{2} \left( \bar{p}_{ip} \frac{z}{z_p} - 1 \right) \cdot \bar{p}_{ip} = 0 \quad (6)$$

или  $\left( \bar{p}_{ip} \frac{z}{z_p} - 1 \right) = 0,$

так как другие случаи  $\bar{p}_{ip} = 0$ ,  $\eta_{i\max} - \eta_{i\min} = 0$  для данной задачи не имеют смысла.

Из уравнения (6) следует, что максимальный индикаторный КПД и, следовательно, топливная экономичность дизеля на режимах холостого хода и близким к ним режимам малых нагрузок достигается при отключении части цилиндров при соблюдении:

$$\frac{z}{z_p} = \frac{1}{\bar{p}_{ip}}, \quad (7)$$

а так как  $\bar{p}_i = \frac{p_i}{p_i \eta}$ , то  $\frac{z}{z_p} = \frac{p_i \eta}{p_i}$  или  $\frac{z_p}{z} = \frac{p_i}{p_i \eta}$ .

Для режима холостого хода

$$p_i = p_M, \frac{z_p}{z} = \frac{p_M}{p_i \eta} = p_M.$$

Величину максимально достижимого значения  $\eta_i$  при отключении части цилиндров определим из уравнения (4), подставив в него значение (7):

$$\eta_i = \eta_{i \max} - \frac{\eta_{i \max} - \eta_{i \min}}{(\bar{p}_M - 1)^2} \left( \bar{p} \frac{1}{\bar{p}_i} - 1 \right)^2.$$

Если число отключенных цилиндров будет меньше, чем определенное по условию (7), то достигнутый  $\eta_i$  всегда будет меньше максимально возможного.

В том случае, когда  $\eta_{i \min} \approx \eta_{i \max}$ , то есть функция  $\eta_i = f(p_i)$  не имеет явно выраженного максимума, отключение цилиндров будет сопровождаться меньшим эффектом.

Для проверки адекватности метода были выполнены исследования эффективности отключения цилиндров на двигателе КамАЗ 740.10-20. Были получены зависимости  $\eta_i$  от  $p_i$ , ( $\eta_i = f(p_i)$ ) при частоте вращения  $n = 1000, 1200, 1400, 2600$  об/мин. Для примера зависимость  $\eta_i$  от  $p_i$  при  $n = 1000$  об/мин приведена на рис. 2, где показано, что максимальное значение  $\eta_{i \max}$  достигается при  $p_{ni} = 0,577$ . В этом случае расчеты показали, что целесообразно отключение четырех цилиндров. При этом топливная экономичность улучшается на 15%. Соответственно при  $n = 1200$  об/мин максимальный КПД достигается при  $z/z_p = 2$ , а при  $n = 2600$  об/мин — при  $z/z_p = 1/7$ , при этом улучшение экономичности составляет 3–4 %.

Негативные явления резкого изменения крутящего момента при включении цилиндров опасны для машин, у которых включение цилиндров происходит при больших значениях приведенных моментов инерции, т. е. при малых скоростях движения тяжелой транспортной техники (тракторы, тепловозы и т. п.). Поэтому при исследованиях процессов отключения–включения цилиндров в этих машинах такие явления, как потеря управляемости не замечены и не исследовались.

Для автомобильных дизелей большое значение имеет процесс включения цилиндров в рабочее состояние. Это связано со скачкообразным изменением (повышением) среднего индикаторного и среднего эффективного давлений и, соответственно, крутящего момента, даже если включение цилиндров происходит вблизи режимов холостого хода.

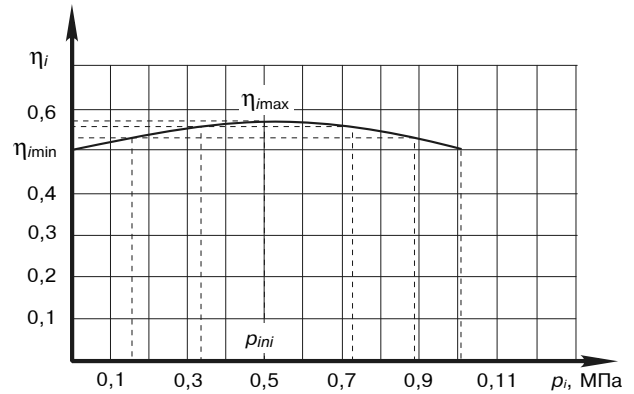


Рис. 2. Зависимость  $\eta_i$  от  $p_i$  при  $n = 1000$  об/мин

Дизель автомобиля работает на режимах малых частот вращения коленчатого вала и нагрузках, близких к холостому ходу, в технологических операциях связанных с малыми перемещениями автомобиля: подруливание, перестановка, парковка в условиях стесненного и ограниченного пространства, при которых требование высокой управляемости является особенно важным, а нарушение управляемости может привести к аварийным ситуациям и несчастным случаям.

На этих режимах работы скачкообразное приращение  $p_i$  и соответствующее возрастание крутящего момента дизеля приводят к увеличению частоты вращения коленчатого вала и скорости автомобиля. Это происходит неожиданно для водителя и не соответствует управляющему воздействию на подачу топлива. Возникает эффект, эквивалентный неосторожной, неадекватной ситуации случайного нажатия на педаль управления топливopодачи. Таким образом, ухудшится управляемость дизелем и автомобилем на переходном режиме включения цилиндров в работу.

Поскольку изменяется зависимость величины цикловой подачи топлива от хода рейки, изменяются условия работы центробежного регулятора частоты вращения, осуществляющего перемещение рейки топливного насоса, при этом возможно появление еще одного неприятного явления — потери устойчивости работы контура регулирования, при которой процессы отключения–включения цилиндров могут периодически повторяться.

Правильная организация процесса включения цилиндров в работу имеет для автомобильного дизеля большое значение, а сложность процесса — специального исследования. Требование сохранения управляемости и устойчивости работы может войти в противоречие с рекомендациями по отключению цилиндров по условиям повышения топливной экономичности, а в некоторых случаях сделать отключение нерациональным.

**Литература**

1. *Архангельский В.М., Вихерт М.М., Воинов А.Н., Степанов Ю.А., Трусов В.И., Ховах М.С.* Автомобильные двигатели — М. : Машиностроение, 1977. — С. 575.

2. *Березный В.В.* Теоретическое обоснование возможности повышения экономичности дизелей при отключении части цилиндров // Двигателестроение. — 1982. — № 9. — С. 24–26.

3. *Валеев Д.Х., Гергенредер В.А., Олесов И.Ю., Патрахальцев Н.Н.* Возможности улучшения экономических и экологических свойств дизелей КамАЗ-740 отключением цилиндров и циклов на режимах холостых ходов и малых нагрузок — // Двигателестроение. — 1991. — № 8–9. — С. 62, 69.

4. *Горбунов В.В., Олесов И.Ю.* Отключатели цилиндров и циклов дизеля // Грузовик α. — 1999. № 9. — С. 26–29.

**НОВОСТИ ВУЗОВ**

### К 70-ЛЕТИЮ СУДОМЕХАНИЧЕСКОГО ФАКУЛЬТЕТА САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА ВОДНЫХ КОММУНИКАЦИЙ



В феврале 2008 г. Судомеханический факультет Санкт-Петербургского Государственного университета водных коммуникаций (СПГУВК) отмечает свое 70-летие. Факультет, как самостоятельное структурное подразделение, был создан приказом ректора 10 февраля 1938 г.

Гарантией качественного образования на факультете является высокая квалификация профессорско-преподавательского состава кафедр. За эти годы факультет сохранил основную направленность своей деятельности — подготовку инженеров по энергетическому, технологическому и судостроительному направлениям.

Ученые факультета принимали и принимают участие в решении задач по развитию водного транспорта, созданию новых типов судов, переходу на современные формы организации производства. Большое влияние на развитие теории и конструкции энергетических установок оказали работы профессоров Л.В. Арнольда, В.Л. Сурвило, З.А. Хандова, И.А. Чиняева, В.М. Селиверстова, В.А. Сомова, Л.В. Тузова и других. По их классическим учебникам изучало специальность не одно поколение студентов вузов нашей отрасли. В создание новых типов судов, в совершенствование их гидродинамических комплексов внесли вклад профессора Н.К. Дормидонтов, А.М. Басин, В.Н. Анфимов, П.А. Малый, В.Ф. Бавин, А.Д. Гофман и многие другие ученые. Совершенствованию технологии и организации судостроения и судоремонта способствовали работы профессоров М.Н. Гусева, Ю.П. Бирюкова, Н.К. Лопырева, Ю.В. Сумеркина, В.Б. Чистова, И.М. Гуревича, Ф.Ф. Бенуа, В.М. Заморюева, Л.И. Погодаева.

За 70 лет выпускники факультета вписали немало славных страниц в историю нашей страны и отрасли, многие из них занимали высокие посты на водном транспорте и смежных отраслях промышленности. Их деятельность на благо государства является предметом нашей заслуженной гордости.

В составе Судомеханического факультета работает восемь кафедр и три их филиала на ОАО «Балтийский завод», ОАО «Канонерский завод» и в Северо-Западной инспекции Российского Речного Регистра.

Выпускающие кафедры: теории и конструкции судовых двигателей внутреннего сгорания, судовых энергетических установок, эксплуатации судового электрооборудования и систем автоматики, судостроения, технологии судоремонта, технологии материалов и материаловедения и другие располагают необходимой лабораторной и экспериментальной базой для подготовки специалистов. На факультете имеются лаборатория двигателей внутреннего сгорания и судовых энергетических установок, лаборатория материаловедения и ТКМ, один из лучших в стране двадцатиметровый опытовый бассейн и аэродинамическая труба для испытаний моделей судов, специализированные компьютерные классы.

Это позволяет кафедрам поддерживать высокий уровень профессиональной подготовки студентов. В составе факультета работают 6 академиков и членов-корреспондентов Российской Академии Транспорта, заслуженные деятели науки России, 15 докторов и 34 кандидата наук. Только за последние годы специалистами факультета опубликовано около 250 учебно-методических изданий. Коллектив факультета принял активное участие в подготовке энциклопедии «Машиностроение» по теме «Корабли и суда», издаваемый по инициативе и под патронажем Президиума Российской Академии Наук.

В учебных программах учитываются требования международных конвенций и стандартов. Уровень подготовки специалистов нашёл отражение в международном признании факультета. Все специальности были аккредитованы в ведущей международной организации — Институте Морских Инженеров со штаб-квартирой в Лондоне. Это дало возможность студентам воспользоваться всем комплексом его бесплатных услуг для получения наивысшей квалификации и профессионального роста.

Осуществляя подготовку студентов по специальностям «Судовые энергетические установки», «Эксплуатация судовых энергетических установок», «Эксплуатация судового электрооборудования и средств автоматики», «Кораблестроение», факультет помогает решать кадровые вопросы судоходных компаний, исследовательских институтов и конструкторских бюро, предприятий отрасли. Их высокая оценка выпускников позволяет на пороге семидесятилетнего юбилея профессорско-преподавательскому составу и сегодняшним студентам гордиться своей причастностью к славной истории факультета.

*А.А.Кузьмин, к.т.н., проф.,  
декан судомеханического факультета СПГУВК*