

ОЦЕНКА ЖЁСТКОСТИ СГОРАНИЯ ПРИ ТЕПЛОВОМ РАСЧЁТЕ РАБОЧЕГО ЦИКЛА ДВИГАТЕЛЯ С САМОВОСПЛАМЕНЕНИЕМ

А.Б. Стефановский

На основе опубликованных опытных данных предложена статистическая зависимость между средней и максимальной скоростями роста давления заряда при сгорании в дизелях. Представлена математическая модель для приближённого определения этих скоростей с учётом рекомендаций Д.А. Портнова, которая может служить дополнением теплового расчёта рабочего цикла дизеля.

Дизель, скорость роста давления, сгорание, зависимость.

Недостатки известного метода теплового расчёта (ТР) параметров рабочего цикла двигателя внутреннего сгорания (ДВС) обусловлены, в основном, значительной идеализацией процесса сгорания в ДВС, заменяемого «видимым сгоранием» - комбинацией участков изохорного и изобарного подвода теплоты к рабочему телу или заряду. Это «видимое сгорание» занимает участок от верхней мёртвой точки (ВМТ) до объёма V_z , который лишь на 10...35% больше минимального объёма заряда V_c (в термодинамическом цикле со смешанным подводом теплоты), и потому оно намного короче реального сгорания в двигателе с самовоспламенением (дизеле). Из этого вытекают две трудности.

Принимаемое в ТР значение коэффициента использования теплоты при «видимом сгорании» намного выше, чем подсчитанное, исходя из реальной динамики тепловыделения, для объёма заряда при его максимальном давлении [1]. Принятая в ТР идеализация сгорания не позволяет оценить его жёсткость на базе значений средней и максимальной скоростей роста давления (СРД) заряда по углу поворота кривошипа, достигнутых в первой части сгорания: для «видимого сгорания» в ТР характерны бесконечно большая СРД на изохорном участке и нулевая – на изобарном. Далее предполагается, что СРД исчисляется в зависимости от этого угла, если не указано иное. Желательно, не усложняя существенно ТР, дополнить его зависимостями, позволяющими оценить жёсткость сгорания. Это увеличит научно-познавательную ценность ТР, до сих пор сохраняющего своё место в подготовке специалистов в области ДВС [2]. Чтобы исключить влияние состава топлива на жёсткость сгорания, ниже предполагается, что в цилиндрах дизеля сгорает нефтяное дизельное топливо.

Для оценки средней СРД $\Delta p/\Delta \varphi$ (МПа/град) пригоден способ, изложенный Д.А. Портновым [3]:

$$\frac{\Delta p}{\Delta \varphi} = \frac{p_z - p_{c'}}{\varphi_{pz} + \varphi_{c'}}, \quad (1)$$

где $p_{c'}$ – давление заряда в начале сгорания, МПа; φ_{pz} и $\varphi_{c'}$ – угловые положения кривошипа (град), когда, соответственно, достигнут максимум давления заряда p_z (после ВМТ) и началось сгорание (до ВМТ).

В ТР рабочего цикла дизеля определяются давление заряда в ВМТ при сжатии p_c и, пропорциональное последнему, максимальное давление заряда p_z , входящее в числитель формулы (1). При этом последнее давление вычисляется приближённо, на базе рекомендаций о величине степени повышения давления p_z/p_c . Для использования формулы (1), как дополнения к ТР, её нужно, в свою очередь, дополнить рядом вспомогательных формул. Угол φ_{pz} , входящий в знаменатель формулы (1), можно считать приближённо соответствующим объёму V_z заряда в конце «видимого сгорания». Полагая движение поршня в этот период близким к гармоническому, можно найти указанный угол по формуле

$$\varphi_{pz} \approx \arccos\left(1 - \frac{2(\rho - 1)}{\varepsilon - 1}\right), \quad (2)$$

где ρ – степень предварительного расширения (вычисляемая в ТР на базе значений температуры заряда при положении поршня в ВМТ сжатия и максимальной); ε – заданная геометрическая степень сжатия.

Угол $\varphi_{c'}$ (град) зависит от заданного фактического угла опережения впрыска топлива (УОВТ) θ и угловой продолжительности задержки воспламенения φ_{ign} , которая в свою очередь пропорциональна частоте вращения коленчатого вала n (1/мин) и времени этой задержки t_{ign} (с):

$$\varphi_{c'} = \theta - 6nt_{ign}. \quad (3)$$

Величину t_{ign} можно определить с помощью одной из известных формул, предложенной, например, А.И. Толстовым или А.А. Гавриловым и А.Н. Гоцом [4; 5]. Углу $\varphi_{c'}$ соответствует объём заряда $V_{c'}$, относительную величину которого можно найти в предположении, что движение поршня в этот период цикла близко к гармоническому:

$$V_{c'} / V_c \approx 1 + 0,5(\varepsilon - 1)(1 - \cos \varphi_{c'}). \quad (4)$$

Наконец, на базе этого объёма и принятого в ТР значения среднего показателя политропы сжатия n_1 можно вычислить давление заряда $p_{c'}$:

$$p_{c'} = p_c (V_{c'} / V_c)^{-n_1}. \quad (5)$$

Таким образом, оценка средней СРД в ходе ТР может быть выполнена, если дополнить ТР формулами (1) – (5) и формулой для расчёта времени t_{ign} . В последней могут использоваться значения параметров заряда в точке c' (начала сгорания) или в другой характерный момент цикла.

Д.А. Портновым [3] приведена эмпирическая формула, полученная А.И. Толстовым и позволяющая вычислить среднюю временную скорость

роста давления (ВСРД) $\Delta p/\Delta t$ по известным значениям фактора динамичности цикла σ_d и времени t_{ign} . Однако эта формула не может быть использована для дополнения ТР, так как в нём не задаётся закон подачи топлива, без которого возможна лишь грубая оценка σ_d . Кроме того, для ВСРД нет общих рекомендаций, увязывающих её величину с уровнем жёсткости сгорания в дизелях.

Также А.И. Толстовым [3] предложена эмпирическая формула, позволяющая вычислить максимальную ВСРД $(dp/dt)_{max}$ по известным значениям фактора динамичности цикла σ_d и времени t_{ign} . Этой формуле свойственны указанные выше недостатки; в ней есть член, содержащий показательную функцию времени t_{ign} , который может принимать большие значения и излишне завышать расчётную величину максимальной ВСРД.

Упрощённая оценка максимальной СРД может быть выполнена на базе зависимости, непосредственно связывающей среднюю и максимальную СРД. Она должна быть простой и отражать основные свойства массива опытных данных о СРД, опубликованных рядом авторов для различных дизелей при УОВТ, близком к оптимальным значениям [3, 4, 6–10]. Эти данные были разделены на две почти одинаковые части, относившиеся к двигателям без наддува и с наддувом; практически все данные относились к дизелям с неразделёнными камерами сгорания (КС). Исследованные диапазоны: частоты вращения коленчатого вала 1000...3000 1/мин; коэффициента избытка воздуха 1,35...4,4; давления наддува 0,1...0,6 МПа.

Графическое представление массива опытных точек в логарифмических координатах, отражающих предполагаемую зависимость максимальной СРД от средней СРД, показано на рис. 1. Наблюдается разброс значений максимальной СРД при малом изменении средней СРД. Так, для опытных данных А.С. Хачияна и соавторов [6] (точки х), полученных для дизеля без наддува, оборудованного различными топливными системами, в диапазоне средней СРД 0,3...0,37 МПа/град максимальная СРД изменялась в пределах 0,6...1,8 МПа/град. Крайняя левая точка с, удалённая от других, соответствует опытным данным Б.Н. Семенова и др. [7] для вихрекамерного дизеля. Нижняя точка ∇ соответствует опытным данным В.Г. Дьяченко [10] для более быстроходного вихрекамерного дизеля.

Несмотря на этот разброс точек, график на рис. 1 позволяет получить простую регрессионную зависимость между максимальной и средней СРД в форме степенной функции:

$$\left(\frac{dp}{d\phi}\right)_{max} \approx a \left(\frac{\Delta p}{\Delta \phi}\right)^b, \quad (6)$$

где значения коэффициентов a и b установлены методом наименьших квадратов (МНК): без наддува $a = 4,8$; $b = 1,6$; с наддувом $a = 1,5$; $b = 0,9$.

Прямые, изображающие эти функции в логарифмических координатах, пересекаются при значениях средней СРД несколько ниже 0,2 МПа/град и максимальной СРД около 0,3 МПа/град. При более высоких значениях средней СРД жёсткость сгорания ниже у дизелей с наддувом. Показатели точности регрессионной зависимости (6): для дизелей без наддува – коэффициент корреляции опытных и расчётных значений максимальной СРД 0,80, относительное среднее квадратичное отклонение 0,33; для дизелей с наддувом – соответственно 0,88 и 0,20. При этом ряд точек, наиболее удалённых от основного их массива, условно считался «промахами» и не обрабатывался МНК. Нужно учитывать, что СРД по опытным данным определяется с меньшей точностью, чем сами по себе давление заряда и угол поворота кривошипа.

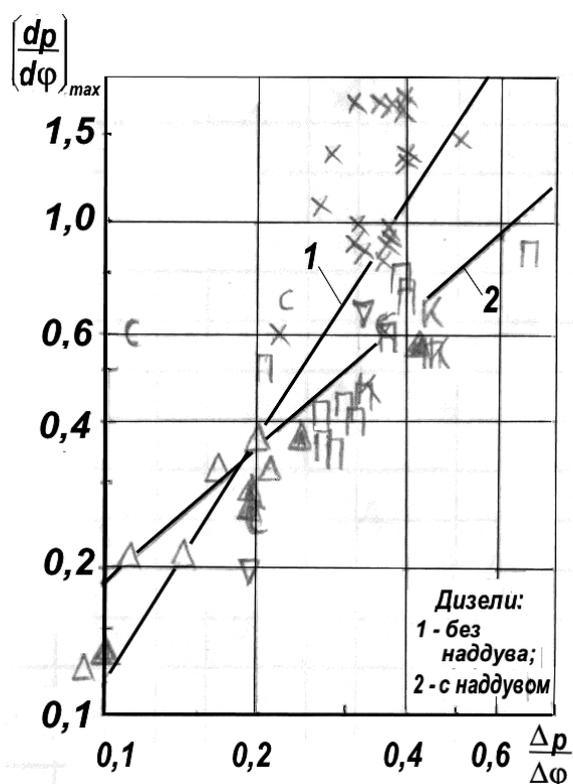


Рис. 1. Регрессионная зависимость между максимальной и средней скоростями роста давления (МПа/град) при сгорании в дизелях, исследованных рядом авторов [3, 4, 6-10]

Значения коэффициентов зависимости (6) будут уточняться по мере увеличения массива анализируемых опытных данных. Благодаря своей простоте, она вместе с формулами (1) – (5) и формулой для расчёта времени t_{ign} образует математическую модель, позволяющую упрощённо оценить жёсткость сгорания в рабочем цикле дизеля, как дополнение к ТР. Для завершения такой оценки нужно иметь числовой ориентир – значение

максимальной СРД, выше которого сгорание можно с уверенностью считать жёстким.

Опубликованные Г.Р. Рикардо [11] и другими авторами результаты экспериментальных исследований рабочего процесса дизелей позволяют выбрать такое значение. Так, дизель 1Ч 14/17,8 (имевший неразделённую КС, выполненную в головке цилиндра, и гильзовое газораспределение) работал довольно мягко, когда средняя СРД была около 0,17 МПа/град, но жёстко, когда она была около 0,31 МПа/град. Согласно приведенным Г.Р. Рикардо индикаторным диаграммам для этого дизеля, во втором случае значение максимальной СРД было близким к 0,42 МПа/град. Вихрекамерный дизель 4Ч 9,5/11,4 работал вполне мягко при значениях максимальной СРД около 0,08 МПа/град.

По данным [1], дизели с разделёнными КС, а также с неразделёнными КС и М-процессом работали мягко при максимальной СРД до 0,5 МПа/град. Б.А. Шароглазов и соавторы [12] рекомендуют считать последнюю величину условной границей жёсткого сгорания.

Учитывая заметный разброс опытных точек около линий регрессии на рис. 1, можно принять условной границей жёсткого сгорания расчётное значение $(dp/d\phi)_{\max} = 0,4$ МПа/град при использовании зависимости (6).

Целесообразно проверить, насколько эта зависимость согласуется с эмпирическими формулами для средней и максимальной ВСРД, полученными А.И. Толстовым [3]. Так как в обе эти формулы входит время задержки воспламенения t_{ign} , то, выразив его из них и приравняв правые части полученных выражений, можно получить зависимость между средней и максимальной ВСРД (МПа/с) по А.И. Толстову:

$$\left(\frac{dp}{dt}\right)_{\max} \approx D_{\sigma} + b_{\sigma} \cdot \exp \left[1800 \left(\frac{\frac{\Delta p}{\Delta t} - d_{\sigma}}{1,1 \cdot 10^5} \right)^{1/0,6} \right], \quad (7)$$

где b_{σ} , d_{σ} , D_{σ} – коэффициенты, зависящие от фактора динамичности цикла $\sigma_d = 0,2 \dots 0,9$, значения которых приведены в [3].

Как видно, в правой части этой формулы средняя ВСРД должна задаваться большей, чем коэффициент d_{σ} , который изменяется в пределах $(1,4 \dots 10) \cdot 10^3$ МПа/с, практически линейно возрастая с увеличением фактора динамичности цикла σ_d . Поэтому при исследовании формулы (7) значения средней ВСРД $\Delta p/\Delta t$, для удобства записи результатов выраженные в гигапаскалях за секунду (ГПа/с), задавались не ниже d_{σ} .

Результат исследования формулы (7) представлен графически на рис. 2. Видно, что между значениями максимальной и средней ВСРД (ГПа/с), взаимосвязанными согласно этой формуле, есть регрессионная зависимость, коэффициенты которой найдены МНК:

$$\left(\frac{dp}{dt}\right)_{\max} \approx 0,7 \left(\frac{\Delta p}{\Delta t}\right)^{1,4}. \quad (8)$$

Для неё коэффициент корреляции исходных и приближённо рассчитанных значений максимальной ВСРД 0,90; относительное среднее квадратичное отклонение 0,21.

При наибольшей заданной величине средней ВСРД 10 ГПа/с наблюдался разброс значений расчётной максимальной ВСРД, которая при $\sigma_d < 0,7$ резко, практически неограниченно, возрастала. Поскольку маловероятно, что значения максимальной ВСРД 100 ГПа/с и выше могли наблюдаться А.И. Толстовым, то при средней ВСРД, равной 10 ГПа/с, зависимостью (8) обеспечивается небольшое превышение минимальных значений максимальной ВСРД 14...18 ГПа/с, вычисленной по формуле (7).

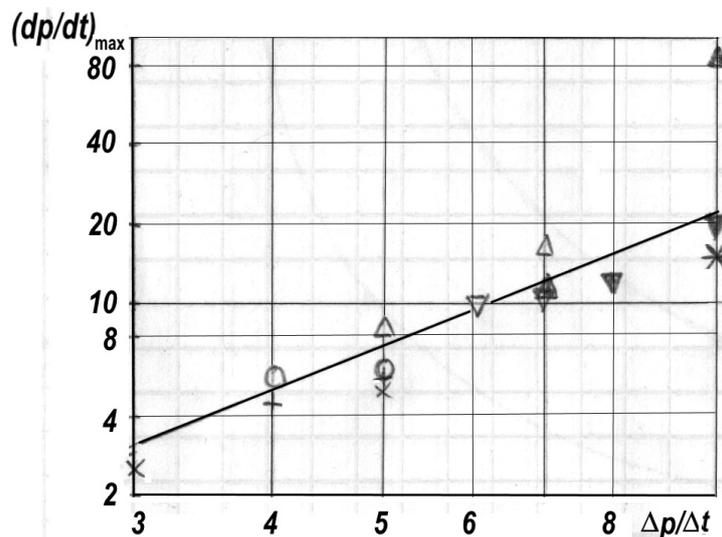


Рис. 2. Регрессионная зависимость между значениями максимальной и средней временных скоростей роста давления (ГПа/с), взаимосвязанными согласно эмпирическим формулам, полученным А.И. Толстовым (значения σ_d для точек:

x 0,2; + 0,25; o 0,3; Δ 0,4; ▽ 0,5; ▲ 0,6; ▼ 0,7; * 0,8 и 0,9)

Для сопоставления полученной зависимости (8), вытекающей из эмпирических формул А.И. Толстова, с регрессионной зависимостью (6), в первой из этих зависимостей необходимо время t заменить на угол поворота кривошипа $\varphi = \omega t$ (град). Кроме того, при переходе от гигапаскалей в секунду к мегапаскалям на градус обе ВСРД, входящие в (8), умножаются на 0,001. Тогда формула (8) приводится к виду:

$$\left(\frac{dp}{d\varphi}\right)_{\max} \approx 0,7 \cdot (0,006n)^{0,4} \left(\frac{\Delta p}{\Delta \varphi}\right)^{1,4}, \quad (9)$$

где при частоте вращения $n = 1500 \dots 2500$ 1/мин (что, вероятно, соответствует скоростному режиму дизеля, исследованного А.И. Толстовым), множитель $0,7(0,006n)^{0,4}$ изменяется в пределах около $1,7 \dots 2,1$, то есть незначительно. На рис. 3, аналогичному рис. 1, изображена заштрихованная полоса 3, соответствующая зависимости (9) с коэффициентом $1,7 \dots 2,1$.

Как видно, предложенные А.И. Толстовым эмпирические формулы для расчёта средней и максимальной ВСРД [3], рассмотренные совместно (вследствие чего получены зависимости (8) и (9)), качественно согласуются с опытными данными о СРД, полученными другими авторами на других двигателях. При этом количественное соответствие зависимости (9) лучше с опытными данными для дизелей с наддувом (точки п, к и др.). Однако, показатель степени 1,4 в формуле (9) по величине ближе к значению этого показателя в (6) для дизелей без наддува.

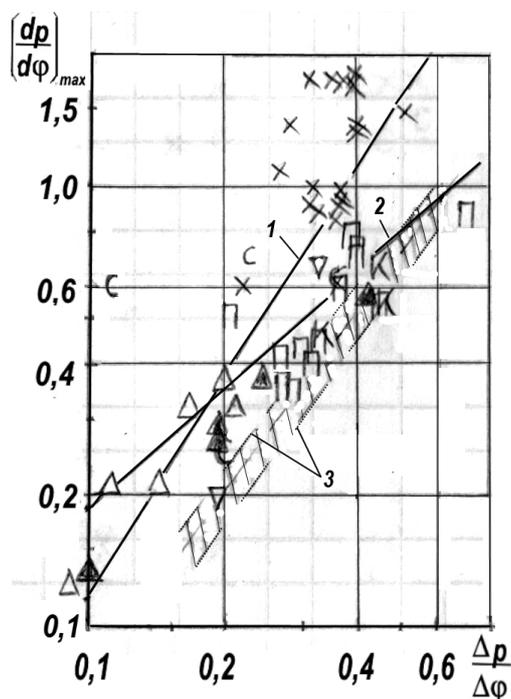


Рис. 3. Сопоставление регрессионной зависимости (6) между максимальной и средней скоростями роста давления (МПа/град) при сгорании в дизелях с зависимостью (9), вытекающей из эмпирических формул, полученных А.И. Толстовым

Таким образом, регрессионная зависимость (6) позволяет приближённо оценить жёсткость сгорания нефтяного дизельного топлива в двигателе с самовоспламенением. При этом точность такой оценки приемлема на первоначальном этапе его проектирования, когда оправданно использование ТР.

Список литературы

1. Тракторные дизели : Справочник / Б.А. Взоров [и др.]; под общей ред. Б.А. Взорова. – М.: Машиностроение, 1981. – 536 с.
2. Гаврилов А.А. Расчет циклов поршневых двигателей : Учебное пособие / А.А. Гаврилов, М.С. Игнатов, В.В. Эфрос; Владимирский государственный ун-т. – Владимир, 2003. – 125 с.
3. Портнов Д. А. Быстроходные турбопоршневые двигатели с воспламенением от сжатия. Теория, рабочий процесс и характеристики / Д. А. Портнов. – М.: Машгиз, 1963. – 640 с.
4. Кулешов А.С. Развитие методов расчета и оптимизация рабочих процессов ДВС : Дис... докт. техн. наук (05.04.02 – тепловые двигатели) / А.С. Кулешов; МГТУ им. Н.Э. Баумана. – М., 2011. – 235 с.
5. Гаврилов А.А. Продолжительность задержки воспламенения топливо-воздушной смеси в поршневых двигателях / А.А. Гаврилов, А.Н. Гоц // Фундаментальные исследования. – 2014. – №6. – С. 703–708.
6. Хачиян А.С. Доводка рабочего процесса автомобильных дизелей / А.С. Хачиян [и др.]. – М.: Машиностроение, 1976. – 104 с.
7. Семенов Б.Н. Рабочий процесс высокооборотных дизелей малой мощности / Б.Н. Семенов [и др.]. – Л.: Машиностроение, 1990. – 240 с.
8. Дьяченко Н.Х. Быстроходные поршневые двигатели внутреннего сгорания / Н.Х. Дьяченко [и др.]; под ред. Н.Х. Дьяченко. – М.; Л.: Машгиз, 1962. – 360 с.
9. Дьяченко Н.Х. Теплообмен в двигателях и теплонапряженность их деталей / Н.Х. Дьяченко [и др.]; под ред. С.Н. Дашкова. – Л.: Машиностроение, 1969. – 248 с.
10. Дьяченко В.Г. Теория двигателей внутреннего сгорания : Учебник для студентов вузов / В.Г. Дьяченко. – Харьков: ХНАДУ, 2009. – 500 с.
11. Рикардо Г.Р. Быстроходные двигатели внутреннего сгорания : Пер. с англ. / Г.Р. Рикардо. – М.: Машгиз, 1960. – 412 с.
12. Шароглазов Б.А. Двигатели внутреннего сгорания: теория, моделирование и расчёт процессов / Б.А. Шароглазов [и др.]; под ред. Б.А. Шароглазова; Южно-Уральский государственный ун-т. – Челябинск: изд. ЮУрГУ, 2005. – 404 с.

Стефановский Алексей Борисович, к.т.н., доцент, Украина, Мелитополь, Таврический государственный агротехнологический университет

*ASSESSMENT OF TOUGHNESS OF COMBUSTION AT THE CALCULATION
OF THE OPERATING CYCLE OF A COMPRESSION IGNITION ENGINE*

A. B. Stefanovsky

A correlation between average and maximum charge pressure increase rates at the combustion in diesel engines is obtained on basis of published experimental evidence. A mathematical model is proposed for approximate determination of these rates. The model takes account of D.A. Portnov's recommendations and can be a supplement to the calculation of the diesel engine operating cycle.

Diesel engine, pressure increase rate, combustion, correlation.

*Stefanovsky Alexey Borisovich, Candidate of Technical Sciences, Lecturer, Ukraine,
Melitopol, Tavriya State Agritechnical University*