

ВЗАИМОСВЯЗЬ СТЕПЕНИ ПОВЫШЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ ПРИ СГОРАНИИ И КОЭФФИЦИЕНТА ИЗБЫТКА ВОЗДУХА В МОДЕЛЬНЫХ И РАБОЧИХ ЦИКЛАХ ТРАНСПОРТНЫХ ДИЗЕЛЕЙ

Стефановский Алексей Борисович

канд. техн. наук, доц., Мелитопольский государственный университет, РФ, г. Мелитополь

INTERRELATION OF THE COMBUSTION PRESSURE INCREASE RATE AND THE AIR EXCESS COEFFICIENT IN MODEL AND OPERATING CYCLES OF VEHICLE DIESEL ENGINES

Alexei Stefanovsky

Candidate of Science, Associate Professor, Melitopol State University, Russia, Melitopol

Аннотация. На совокупности результатов моделирования рабочего цикла и экспериментальных исследований транспортных дизелей (всего около 70 случаев) показано, что степень повышения давления при сгорании (СПДС) и коэффициент избытка воздуха (КИВ), являющиеся постоянными параметрами теплового расчёта дизеля, взаимосвязаны с коэффициентом корреляции около 90%. Приведены параметры и показатели точности вариантов линейной регрессии СПДС на КИВ, а также альтернативных степенных функций.

Abstract. Based on the totality of the results of modeling the operating cycle and experimental studies of vehicle diesel engines (about 70 cases in total), it is shown that the combustion pressure increase rate (CPIR) and the air excess coefficient (AEC), which are constant parameters of the diesel engine thermal calculation, are interrelated with the correlation coefficient of about 90%. The parameters and accuracy indicators of variants of the linear regression of CPIR on AEC as well as alternative power functions are considered.

Ключевые слова: степень повышения давления при сгорании, коэффициент избытка воздуха, цикл, дизель.

Keywords: combustion pressure increase rate, air excess coefficient, cycle, diesel engine.

Степень достоверности классического теплового расчёта (ТР) дизеля зависит во многом от правильности выбора значений постоянных параметров, участвующих/используемых на разных стадиях этого расчёта. К этим параметрам, в частности, относятся коэффициент избытка воздуха (КИВ) $\alpha_{\text{ив}}$ и степень повышения давления при сгорании (СПДС) λ_z .

КИВ пропорционален отношению массовых расходов G воздуха и топлива, поступающих в цилиндры дизеля и участвующих в сгорании, или отношению масс m этих веществ, расходуемых в течение одного рабочего цикла:

$$\alpha_{\text{ив}} \sim G_{\text{возд}}/G_{\text{T}} = m_{\text{возд}}/m_{\text{T}}, \quad (1)$$

где масса топлива m_{T} называется «цикловой подачей топлива» (но топливный насос дизеля подаёт определённый *объём* топлива при каждом нагнетании). Чем ниже КИВ, тем выше при прочих равных условиях получается расчётная максимальная температура T_z рабочего тела (РТ) в цикле. В дизелях снижение КИВ ограничивается допустимым уровнем дымления отработавших газов, а номинальное значение КИВ (используемое в классическом ТР) обычно находится в пределах 1,5...2,0 [7, с. 31].

СПДС равна отношению двух характерных значений давления РТ: наибольшего p_z (или p_{max}), достигаемого в цикле, и давления p_c , достигаемого при положении поршня в верхней мёртвой точке (ВМТ) в том случае, когда сгорание не происходит или начинается поздно, когда поршень уже удаляется от головки цилиндра:

$$\lambda_z = p_z/p_c. \quad (2)$$

Этот параметр выбирается в несколько более широких пределах – около 1,2...2,5 [7, с. 39]. При этом может учитываться влияние на него других факторов – скоростного режима дизеля, угла опережения начала впрыскивания топлива форсункой, давления наддува [10, с. 23] и др. Известны способы увязать величину СПДС с продолжительностью периода задержки самовоспламенения и так называемым фактором динамичности цикла [8, с. 141-142], а также с другими параметрами ТР [5, с. 6-7]. В последнем случае достигнут предел абсолютной погрешности вычисления СПДС 0,06, что можно считать хорошей точностью, но используемое Кононенко С. Г. выражение излишне сложно для учебных расчётов. Согласно ему, с повышением КИВ расчётная СПДС должна уменьшаться, что подтвердила настоящая работа.

Цель работы – предложить простые выражения, увязывающие СПДС и КИВ на основе накопленных сведений о постоянных параметрах ТР, результатах уточнённого моделирования рабочих циклов и экспериментальных исследований транспортных дизелей.

О наличии линейной статистической связи – корреляции – между СПДС и КИВ, в рамках исследованного массива указанных сведений [9, с. 7-14], свидетельствует график (на рисунке).

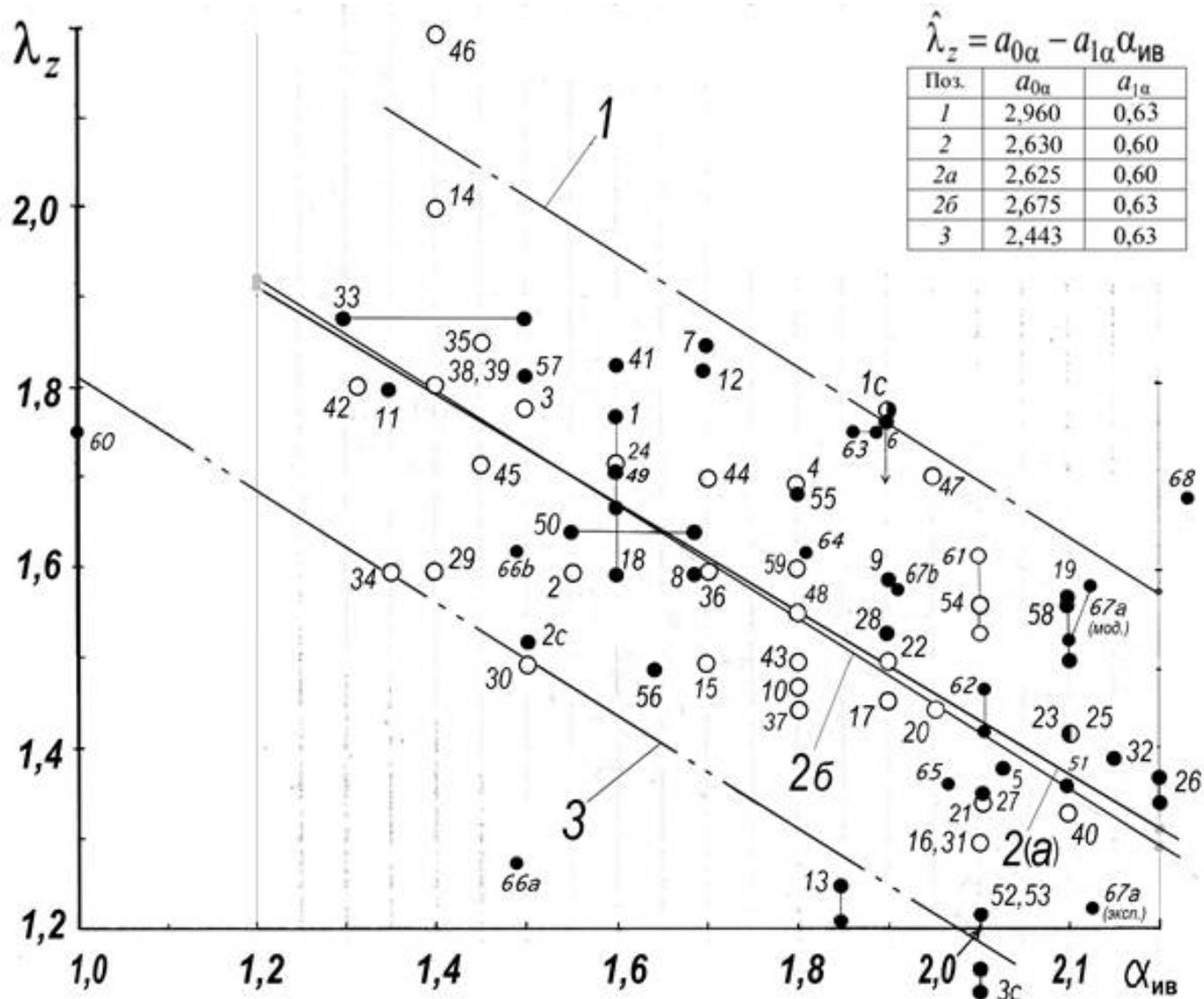


Рисунок 1. Варианты линейной регрессии СПДС на КИВ для совокупности сведений о транспортных дизелях: 1 и 3 - для повышенных и пониженных значений СПДС; 2 - для основной области точек (также а - кроме классического ТР, б - для классического ТР)

На графике светлые точки соответствуют известным случаям классического ТР, а тёмные - результатам уточнённого моделирования рабочего цикла и экспериментальным исследованиям различных транспортных дизелей. Номера точек соответствуют принятым в базе данных для различных дизелей и трёх рабочих циклов (точки 1с, 2с и 3с) [9, с. 7-14]. Почти 70% точек образуют основную подгруппу или так называемый «мейнстрим». Варианты значений коэффициентов уравнения линейной регрессии СПДС на КИВ указаны в табличке на поле графика. Хотя свободный коэффициент $a_{0\alpha}$ не является постоянным и отклоняется в пределах около $\pm 10\%$ от среднего значения 2,63, угловой коэффициент $a_{1\alpha}$ изменяется намного слабее - в пределах от 0,60 до 0,63, или около $\pm 2,5\%$. Показатели точности вариантов линейной регрессии, а также альтернативных форм степенной функции приведены в таблице.

Таблица 1.

Варианты линейной регрессии СПДС на КИВ, альтернативных степенных функций и их показатели точности

Номер линии на	Формула для линии	$10^2 \cdot$ КК	СКО σ	Пределы ОП, %	САОП, %	Отнош. макс.
----------------	-------------------	--------------------	--------------	------------------	------------	-----------------

графике	(зависимая переменная λ_{Σ} , независимая $X = \alpha_{\text{ив}}$)						АП к СКО
				от	до		
1	2,960 -0,63X	-91,8	0,0732	-8,0	+5,7	3,4	1,84
2	2,630 -0,60X	-87,4	0,0836	-10,6	+11,7	4,44	1,95
2а	2,625 -0,60X	-88,5	0,0881	-11,0	+11,3	4,6	1,9
2б	2,675 -0,63X	-87,9	0,0790	-9,3	+9,5	4,14	1,95
3	2,443 -0,63X	-97,8	0,0442	-5,4	+5,2	2,60	1,82
вм. 1	$2,58X^{-0,61}$	93,2	0,0653	-6,4	+5,2	3,0	-
вм. 2	$2,21X^{-0,65}$	86,7	0,0924	-11,0	+11,5	4,74	-
вм. 3	$1,90X^{-0,67}$	93,8	0,0754	-8,5	+8,6	4,04	-

Обозначения: АП – абсолютная погрешность (разность вычисленной и фактической СПДС); вм. – вместо; КК – коэффициент корреляции; ОП – относительная погрешность (вычисленной СПДС относительно фактической); САОП – средняя по абсолютной величине ОП; СКО – среднеквадратичное отклонение (для совокупности точек).

Параметр «Отнош. макс. |АП| к СКО» показывает, каково наибольшее вертикальное расстояние от линии регрессии до точки совокупности, выраженное в единице, равной СКО. Для всех вариантов регрессии расстояние от линий до наиболее удалённых сверху точек было немного больше, чем от линий до точек, наиболее удалённых вниз. В целом, точки подгрупп рассеивались около линий регрессии в пределах примерно плюс-минус два СКО. Для верхней подгруппы точек несколько лучшую точность описания даёт степенная функция с показателем функции -0,61. Для других подгрупп точек описание линейной функцией оказывается точнее, чем степенной. В тех случаях, когда значение СПДС не приводилось в первоисточниках сведений о дизелях, оно вычислялось с помощью формулы (2) на основе известных значений давления РТ. Вследствие их неопределённости, при этом в ряде случаев получался интервал возможных значений СПДС (например, для точек 1, 18, 19 и др.). Для точек 33 и 50, относившихся к дизелям Ч 8,5/11 и 11/13, наоборот, при известной СПДС имелась неопределённость КИВ. В области "мейнстрима" пары значений КИВ и СПДС, выбранные при классическом ТР дизелей, удовлетворительно согласуются с координатами точек для уточнённого моделирования циклов и испытаний транспортных дизелей.

Наиболее взаимно удалённые точки на графике, не относящиеся к случаям классического ТР, таковы. Точка 66а, не включённая в нижнюю подгруппу, соответствует уточнённому моделированию цикла малогабаритного дизеля 1Ч 8,5/8,0, давшему аномально низкое значение СПДС по сравнению с наблюдавшимся экспериментально (точка 66б) [3, с. 89]. Точка 60 относится к дизелю 1Ч 13/14,2, сведения о рабочем цикле которого опубликованы Кавтарадзе Р. З. на основе работы немецкого исследователя Augustin U. [4, с. 259]; согласно этим данным, двигатель, возможно, работал при необычно богатом составе рабочей смеси, $\alpha_{\text{ив}} \approx 1,0$. Положение точки 60 на графике позволило включить её в нижнюю подгруппу и косвенно свидетельствует о возможности данного случая. Точки 3с с наиболее низкими значениями СПДС (около 1,15) относятся к циклу экспериментального дизеля со специально сконструированным поршнем, наблюдавшемуся перед сбросом нагрузки [11, с. 340; в изд.

2005 г. – с. 376]. Наконец, крайняя правая точка 68 относится к моделированию цикла тепловозного дизеля 1А-5Д49 (16ЧН 26/26) при турбонаддуве средней интенсивности, а более интенсивный турбонаддув в аналогичном двигателе 2А-5Д49 приводил к заметному снижению СПДС – это точки 67а (при моделировании) и 67б (в эксперименте) [1, с. 71 и 78-84]. Анисимовым А. С. также опубликован график изменения давления РТ в цикле стационарного дизеля 8ЧН 13/14, работавшего при 0,76 номинальной мощности $N_{ен}$, но без указания значения КИВ [1, с. 87-90]. Согласно этому графику, СПДС равна примерно 1,15; если предположить, что при работе данного двигателя с недогрузкой 24% КИВ находится в пределах 2,0...2,1 [2, с. 191; 6, с. 98], то соответствующая пара точек оказалась бы на графике зависимости СПДС от КИВ вблизи точек 3с, попав в нижнюю подгруппу. Но если бы КИВ был выше 2,1, то точка попала бы уже в нижнюю зону «мейнстрима». Можно ожидать некоторого увеличения СПДС при номинальном режиме работы этого двигателя и возможного смещения соответствующей точки влево, вдоль линии 3, но график давления РТ для этого режима не опубликован.

Таким образом, для использования в тепловом расчёте (ТР) транспортных дизелей рекомендованы три варианта линейной регрессии СПДС на КИВ, обеспечивающие среднюю относительную погрешность вычисления СПДС около 3-5 % в пределах подгрупп точек. Альтернативные степенные функции КИВ, приведённые в таблице, позволяют корректировать СПДС при некотором изменении КИВ в пределах данной подгруппы точек. Если нет оснований относить исследуемый дизель (его действительный или моделируемый цикл) к верхней или нижней подгруппам, то следует использовать варианты линейной регрессии для «мейнстрима»: 2 – в целом для всех его случаев, 2а – для уточнённого моделирования цикла и экспериментальных исследований дизелей и 2б – для случаев ТР. При этом пределы относительной погрешности вычисления СПДС могут достигать 11-12 %, что допустимо в учебных расчётах. Главное здесь – исключить произвольный выбор значения СПДС, противоречащего практике моделирования циклов и экспериментальных исследований транспортных дизелей.

Список литературы:

1. Анисимов А.С. Разработка научных основ повышения эксплуатационных показателей тепловозов посредством применения смесового углеводородного топлива и управления эффективной мощностью энергетической установки : Дис... докт. техн. наук/ ОмГУПС (ОмИИТ). – Омск, 2024. – 313 с.
2. Двигатели внутреннего сгорания : Учеб. для вузов / А.С. Хачиян [и др.]; под ред. В.Н. Луканина. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Высшая школа, 1985. - 312 с.
3. Елагин М.Ю., Хмелев Р.Н. Основы математического моделирования рабочих процессов в двигателях внутреннего сгорания : учебное пособие. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2023. – 151 с.
4. Кавтарадзе Р.З. Теория поршневых двигателей. Специальные главы : Учеб. для вузов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 720 с.
5. Кононенко С.Г. Исследование рабочего процесса четырехтактного дизеля, имеющего поршень специальной конструкции, обеспечивающий автоматическое изменение степени сжатия, с целью ограничения наибольшего давления газов в цилиндре при наддуве : Автореферат дис... канд. техн. наук. / Горьк. ин-т инженеров водного транспорта. – Горький, 1969. – 25 с.
6. Костин А.К. Работа дизелей в условиях эксплуатации / А.К. Костин, Б. П. Пугачев, Ю.Ю. Кочинев; под общ. ред. А.К. Костина. – Л.: Машиностроение, Ленинградск. отд., 1989. – 286 с.
7. Николаенко А.В. Теория, конструкция и расчет автотракторных двигателей. - М.: Колос, 1984. - 336 с.
8. Портнов Д.А. Быстроходные турбопоршневые двигатели с воспламенением от сжатия.

Теория, рабочий процесс и характеристики. – М.: Машгиз, 1963. – 640 с.

9. Стефановский А.Б. Максимальная температура рабочего тела в результатах моделирования и экспериментальных исследований рабочего процесса транспортных дизелей. Справочное пособие. – 2-е изд., доп. – Мелитополь, 2025. – 32 с. – (Сведения о дизелях №66-68 помещены в дополнении к этому изданию.)

10. Стефановский А.Б. Расчёт параметров рабочего цикла, его показателей и номинальных показателей автотракторного дизеля. Расчётно-графическая работа : Учебное пособие по дисциплине «Тракторы и автомобили»... – 3-е изд., испр. – Мелитополь, 2024. – 99 с.

11. Шароглазов Б.А. Двигатели внутреннего сгорания: теория, моделирование и расчет процессов / Б.А. Шароглазов, М.Ф. Фарафонов, В.В. Клементьев; под ред. Б.А. Шароглазова. – Челябинск: изд. ЮУрГУ, 2004. – 344 с. – (Также изд. 2005 г. – 403 с.)