УДК 621.43

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЁТА КОЭФФИЦИЕНТОВ НАПОЛНЕНИЯ И ОСТАТОЧНЫХ ГАЗОВ ПРИ АНАЛИЗЕ РАБОЧЕГО ЦИКЛА ДИЗЕЛЯ С НАДДУВОМ И ПРОДУВКОЙ

А.Б. Стефановский

Продувка цилиндров форсированных дизелей сжатым воздухом, которая может улучшать показатели рабочего цикла, обычно не учитывается при упрощённом его анализе. Проанализированы известные расчётные формулы для абсолютного и относительного коэффициента наполнения, где учитываются параметры продувки и очистки цилиндра. Предложенная квадратичная зависимость коэффициента очистки от относительного коэффициента остаточных газов позволила аналитически выразить последний через коэффициент наполнения, найденный с учётом влияния продувки, и получить результат, хорошо согласующийся с опубликованным для дизеля типа ЧН 26/26. Рассмотрено совместное влияние степени сжатия и коэффициента продувки на коэффициент остаточных газов.

Ключевые слова: дизель, наддув, продувка, коэффициент наполнения, коэффициент остаточных газов, коэффициент продувки, экспоненциальная зависимость.

Наддув дизелей часто сопровождается продувкой надпоршневых объёмов цилиндров дополнительным количеством сжатого воздуха, когда открыты впускные и выпускные клапаны. Это происходит при определённом соотношении параметров сред во впускных и выпускных каналах, соединённых с цилиндром.

Улучшая очистку цилиндров от остаточных газов, продувка способствует также повышению коэффициента наполнения, что положительно влияет на показатели рабочего процесса форсированного дизеля [1]. Вместе с тем, чрезмерная интенсивность продувки ухудшает его показатели.

Количественно продувку характеризуют коэффициенты продувки $\varphi_п$ и избытка продувочного воздуха $\varphi_к$, причём последний пропорционален коэффициенту наполнения η_v [2]. В упрощённом методе расчёта рабочего процесса дизелей, изучаемом в вузах, влияние продувки не учитывается [3, 4, 5], что ухудшает его познавательную ценность применительно к форсированным дизелям.

Цель работы – используя опубликованные материалы, предложить приближённый способ учёта влияния продувки цилиндров форсированных дизелей при расчёте коэффициентов наполнения и остаточных газов.

Известна приближённая зависимость относительного коэффициента наполнения $\bar{\eta}_v$ (взятого по отношению к его величине η_{v0}, когда нет продувки) от степени сжатия ε и коэффициента продувки $\varphi_п$ [6; 7]:

$$\bar{\eta}_v \approx 1 + \frac{k_v}{\varepsilon - 1}\left(\bar{\bar{\eta}}_v \varphi_п - 1\right)^{n_v}, \qquad (1)$$

где числовые параметры (коэффициенты) находятся в следующих интервалах: k_v = 1.5… 2.5; $\bar{\bar{\eta}}_v$ = 1.05…1.1; $\varphi_п$ = 1.05…1.2; n_v = 0.3… 0.7. Желательно уменьшить хотя бы некоторые из этих интервалов, чтобы формулу (1) шире ввести в практику расчётов.

Видно, что значения параметра $\bar{\bar{\eta}}_v$ и коэффициента продувки $\varphi_п$ могут быть так близки, что их произведение можно приближённо заменить квадратом коэффициента продувки. Интервалы неопределённости параметров k_v и n_v можно затем немного уменьшить, рассматривая результаты исследования рабочего процесса форсированных дизелей.

Известны результаты моделирования рабочего процесса дизеля 16ЧН 26/26 (ε = 13.5), снабжённого турбонаддувом, при коэффициенте избытка продувочного воздуха $\varphi_к$ = 1.04 [2]. Для принятой там простой экспоненциальной зависимости коэффициента очистки $\zeta_{оч}$ от $\varphi_к$ получено $\zeta_{оч} = e^{-1.04} \approx 0.353$. Тогда коэффициент наполнения с учётом продувки цилиндров (но без учёта их дозарядки) $\eta_{vп}$ = 0.941; коэффициент продувки $\varphi_п$ = 1.04/0.941 ≈ 1.1. Здесь коэффициент наполнения был вычислен не по формуле (1), а по другой зависимости [2], куда входит коэффициент очистки (что рассмотрено ниже).

В то же время, без учёта влияния продувки коэффициент наполнения в данном примере был бы равен η_{v0} = 0.889. Поэтому при учёте этого влияния (но без учёта дозарядки) относительный коэффициент наполнения $\bar{\eta}_v$ = 0.941/0.889 ≈ 1.06. Увеличение η_v на 6% можно признать существенным и показывающим, что продувка цилиндров данного дизеля полезна в этом отношении.

Правая часть формулы (1) после подстановки значений степени сжатия и $\varphi_п$, с учётом сделанного упрощения $\bar{\bar{\eta}}_v \approx \varphi_п$, изменяется в пределах

$$1 + \frac{1.5...2.5}{12.5} 0.21^{0.3...0.7} \approx$$

$$\approx 1 + (0.12...0.20)(0.63...0.34) \approx 1.04...1.13$$

и близка к 1.06, если значение параметра k_v взять ближе к 1.5. Поэтому целесообразно принять k_v = 1.5 и уточнить значение показателя степени n_v в (1). Для рассмотренного примера оно составит

$$n_v = \frac{\lg \frac{(1.06-1)12.5}{1.5}}{\lg 0.21} \approx 0.5.$$

Таким образом, если было бы правомерно предположение [2] о простой экспоненциальной зависимости коэффициента очистки от $\varphi_к$, то формула (1) имела бы вид

$$\bar{\eta}_v \approx 1 + \frac{1.5}{\varepsilon - 1}(\varphi_п^2 - 1)^{n_v} \qquad (2)$$

при n_v = 0.5, справедливый, по меньшей мере, для рассмотренного примера с дизелем 16ЧН 26/26.

Однако в дальнейшем авторы [2] отказались от такого предположения. В более новом издании [8] рекомендуется вычислять коэффициент очистки $\zeta_{оч}$ с помощью более сложной функции $1/(e^{\varphi_к} - 1)$. Тогда, для рассмотренного выше примера, при $\varphi_к$ = 1.04 этот коэффициент равен не 0.353, а 0.547, вследствие чего при учёте продувки коэффициент наполнения снизится до 0.926. Соответственно, коэффициент продувки $\varphi_п$ = 1.04/0.926 ≈ 1.12, а относительный коэффициент наполнения $\bar{\eta}_v$ ≈ 1.04. Это соответствует ранее принятой величине k_v = 1.5, если показатель степени n_v в (1)

$$n_v = \frac{\lg \frac{(1.04-1)12.5}{1.5}}{\lg 0.21} \approx 0.7.$$

Следовательно, если выражать коэффициент очистки $\zeta_{оч}$ через $\varphi_к$ так, как принято в [8], то в формуле (2) лучше использовать показатель степени n_v = 0.7. Было также видно, что при увеличении коэффициента очистки для сохранения приемлемой величины $\eta_{vп}$ нужно несколько увеличить коэффициент продувки.

Значения двух функций коэффициента избытка продувочного воздуха $\varphi_к$, определяющих коэффициент очистки [2; 8], приведены в таблице 1. Из неё видно, что простая экспоненциальная зависимость [2] даёт существенно более низкие значения $\zeta_{оч}$, чем более сложная, особенно, при $\varphi_к$ < 1.

Таблица 1 – Сопоставление двух экспоненциальных функций коэффициента $\varphi_к$

$\varphi_к$	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2
$e^{-\varphi_к}$	0.50	0.45	0.41	0.37	0.33	0.30
$1/(e^{\varphi_к} - 1)$	0.97	0.82	0.68	0.58	0.50	0.43

По-видимому, такие низкие значения $\zeta_{оч}$ неправдоподобны, так как при отсутствии продувки и умеренных значениях коэффициента наполнения принимается $\zeta_{оч}$ = 1. В то же время, более сложная экспоненциальная зависимость [8] принимает значения, близкие к 1, при $\varphi_к$ ≈ 0.7, когда продувки нет ($\varphi_к = \eta_{v0}$).

Из общего выражения для коэффициента наполнения, которое учитывает возможности дозарядки и продувки [2], можно выразить коэффициент очистки $\zeta_{оч}$ через другие параметры:

$$\zeta_{оч} = \frac{1}{\zeta_{тепл}}\left(\zeta_{доз}\varepsilon\frac{p_a}{p_г} - \eta_{vп}(\varepsilon - 1)\frac{p_k}{p_г}\left(1 + \frac{\Delta T_{вп}}{T_k}\right)\right), \qquad (3)$$

где $\zeta_{тепл}$ ≈ 1.12 –0.04α – отношение удельных изобарных теплоёмкостей продуктов сгорания и свежего заряда (близкое к единице при значениях коэффициента избытка воздуха α, типичных для рабочих режимов дизелей); $\zeta_{доз}$ – коэффициент дозарядки, зависящий от скоростного режима и фазы закрытия впускных клапанов; p_a, $p_г$, p_k – давления заряда в конце наполнения, остаточных газов и среды во впускных каналах; $\Delta T_{вп}$ – подогрев заряда при впуске; T_k – температура среды во впускных каналах (сжатого воздуха – при наличии наддува).

Влияние на коэффициент очистки отношения $\zeta_{тепл}$, весьма близкого к 1, невелико. В то же время, вследствие большой величины степени сжатия ε у дизелей и соизмеримости

давлений p_a и p_r, можно ожидать значительного влияния коэффициента дозарядки $\zeta_{доз}$ на коэффициент очистки: при заданной величине коэффициента наполнения, даже незначительная дозарядка цилиндра приводит к повышению расчётной величины $\zeta_{оч}$. Поэтому можно предположить, что определение $\zeta_{оч}$ в виде функции $1/(e^{\varphi_к}-1)$ [8] позволяет учесть влияние на коэффициент наполнения не только продувки, но и возможности дозарядки цилиндра на расчётном режиме работы дизеля.

Так, для рассмотренного примера [2] о дизеле 16ЧН 26/26 повышения $\zeta_{оч}$ от 0.353 до 0.547, согласно (3), можно достичь при $\eta_{vп}$ = 0.941, если принять коэффициент дозарядки $\zeta_{доз} \approx 1.02$ и отношение $\zeta_{тепл}$ = 1.04. Отсюда видно, что: при известном коэффициенте наполнения $\eta_{vп}$ определять коэффициент очистки, не зная коэффициента дозарядки, весьма затруднительно; вычислять $\eta_{vп}$ только с учётом величины $\zeta_{оч}$, но без учёта возможности дозарядки не вполне корректно (хотя и допустимо в учебных расчётах).

При расчёте коэффициента наполнения $\eta_{vп}$ по параметрам среды во впускных каналах и заряда в цилиндре [2; 8] нужно знать величину коэффициента очистки $\zeta_{оч}$, который сам зависит от коэффициента наполнения посредством принятой экспоненциальной функции $1/(e^{\varphi_к}-1)$, где $\varphi_к$ пропорционален $\eta_{vп}$ через коэффициент продувки. Но при этом может расходиться численный итерационный процесс уточнения величины коэффициента наполнения.

С учётом сказанного, показатель степени n_v в формуле (1) не следует фиксировать. Для рассмотренного примера с дизелем 16ЧН 26/26 n_v = 0.5…0.7, то есть относительный коэффициент наполнения с учётом продувки можно вычислять по формуле (2), но с незафиксированным показателем степени, находящимся в указанных пределах. При этом базовая величина коэффициента наполнения η_{v0} без учёта влияния продувки и дозарядки (если неизвестен коэффициент $\zeta_{доз} \neq 1$) определяется по известной формуле [2 – 5, 8], где не требуется знать величину коэффициента очистки, так как принято $\zeta_{оч}$ = 1.

Кроме коэффициента наполнения, при учёте влияния продувки коэффициент $\zeta_{оч}$ влияет также на величину коэффициента остаточных газов (КОГ) $\gamma_{гп}$ [2 – 5, 8]:

$$\gamma_{гп} = \frac{T_к + \Delta T_{вп}}{T_r} \frac{\zeta_{оч} / \zeta_{доз}}{\varepsilon \frac{p_a}{p_r} - \zeta_{тепл}\zeta_{оч}}, \qquad (4)$$

где T_r – температура остаточных газов. В свою очередь, данный коэффициент влияет на расчётную температуру заряда в конце впуска T_a.

Разделив обе части формулы (4) на соответствующие части формулы для КОГ при отсутствии продувки, получим выражение для относительного КОГ:

$$\overline{\gamma_r} = \frac{\zeta_{оч}\left(\varepsilon \frac{p_a}{p_r} - \zeta_{тепл}\right)}{\varepsilon \frac{p_a}{p_r} - \zeta_{тепл}\zeta_{оч}}. \qquad (5)$$

Таким образом, последний не зависит от коэффициента дозарядки, но зависит от отношения $\zeta_{тепл}$, коэффициента очистки $\zeta_{оч}$, степени сжатия и отношения двух давлений – заряда в цилиндре в конце впуска (p_a) и остаточных газов (p_r). При этом влиянием отношения $\zeta_{тепл}$, близкого к 1, можно пренебречь.

Вследствие того, что численных рекомендаций для коэффициента очистки $\zeta_{оч}$ практически нет в литературе, а для КОГ их довольно много [2 - 5, 8], далее исследовано влияние на коэффициент очистки относительного КОГ и фактора $\varepsilon p_a/p_r$. Для этого из формулы (5) выражен коэффициент очистки $\zeta_{оч}$:

$$\zeta_{оч} = \frac{\varepsilon \frac{p_a}{p_r} \overline{\gamma_r}}{\varepsilon \frac{p_a}{p_r} - (1 - \overline{\gamma_r})\zeta_{тепл}}. \qquad (6)$$

Приняты следующие интервалы изменения параметров в (6): $\overline{\gamma_r}$ = 0.25…0.9; ε = 13…17; p_a/p_r = 0.8…1.1; $\varepsilon p_a/p_r \approx$ 10…19; отношение $\zeta_{тепл}$ зафиксировано на величине 1.04. Значения факторов и коэффициента очистки, полученные с помощью формулы (6) на персональном компьютере (ПК), приведены в таблице 2.

Видно, что коэффициент очистки, вычисленный по формуле (6), весьма близок по величине к относительному КОГ, причём влиянием фактора $\varepsilon p_a/p_r$ на $\zeta_{оч}$ можно пренебречь. С помощью регрессионного анализа данных табл. 1 получена квадратичная зависимость $\zeta_{оч}$ от относительного КОГ:

$$\zeta_{оч} \approx (1.07 - 0.067\overline{\gamma_r})\overline{\gamma_r}. \qquad (7)$$

Она немного занижает величину коэффициента очистки при минимальных значениях факторов и почти не искажает её в других случаях.

Теперь можно приравнять правую часть (7) экспоненциальной функции коэффициента избытка продувочного воздуха, принятой в [8]:

$$(1.07 - 0.067\overline{\gamma_r})\overline{\gamma_r} = \left(\exp(\eta_{v0}\overline{\eta_v}\varphi_п) - 1\right)^{-1}, \quad (8)$$

где относительный коэффициент наполнения $\overline{\eta}_v$ приближённо вычисляется по формуле (2) с незафиксированным показателем степени 0.5…0.7, а базовое значение коэффициента наполнения η_{v0} (без учёта продувки) – по общепринятой зависимости [2 - 5; 8]; коэффициентом продувки $\varphi_п$ следует задаться в пределах 1.05…1.2 [6].

Таблица 2 - Влияние ряда факторов на коэффициент очистки

$\varepsilon p_a/p_r$	$\overline{\gamma_r}$	$\zeta_{оч}$ по (6)	$\zeta_{оч}/\overline{\gamma_r}$
10	0.25	0.27	1.085
19	0.25	0.26	1.043
10	0.9	0.91	1.010
19	0.9	0.90	1.006
14.5	0.58	0.60	1.031
-	$1.07 - 0.067\overline{\gamma_r}$	$\zeta_{оч}$ по (7)	-
10	1.053	0.26	-
19	1.053	0.26	-
10	1.010	0.91	-
19	1.010	0.91	-
14.5	1.031	0.60	-

Тогда из (8) можно выразить относительный КОГ, решив квадратное уравнение относительно $\overline{\gamma_r}$ и взяв при этом правильный знак «минус»:

$$0.067\overline{\gamma_r}\overline{\gamma_r} - 1.07\overline{\gamma_r} + \left(\exp(\eta_{v0}\overline{\eta_v}\varphi_п) - 1\right)^{-1} = 0;$$

$$\overline{\gamma_r} = 8.04\left(1 - \sqrt{1 - 0.236\left(\exp(\eta_{v0}\overline{\eta_v}\varphi_п) - 1\right)^{-1}}\right). \quad (9)$$

Например, при значениях $\varphi_п = 1.1$ и $\eta_{v0}\overline{\eta}_v =$ = 0.941 по этой формуле получится относительный КОГ $\overline{\gamma_r} \approx 0.54$.

Вычислив затем базовое значение КОГ γ_{r0} без учёта продувки [2], как

$$\gamma_{r0} = \frac{p_r T_k}{\eta_{v0}(\varepsilon - 1)p_k T_r}, \quad (10)$$

можно найти значение КОГ при продувке, как $\gamma_{rп} = \gamma_{r0}\overline{\gamma_r}$. Так, для рассмотренного примера с дизелем 16ЧН 26/26 (T_r = 800 К; T_k = 344 К) [2] γ_{r0} = 0.040 и $\gamma_{rп}$ = 0.040*0.54 = 0.021. Последнее значение в 1.5 раза выше приведенного в [2] для $\zeta_{оч}$ = 0.353, так как формулой (9) учтена более корректная зависимость этого коэффициента от $\varphi_к$ [8].

В примере расчёта цикла дизеля типа ЧН 26/26 (ε = 13) [8] получено близкое значение КОГ $\gamma_{rп} \approx 0.022$ при коэффициенте очистки $\zeta_{оч}$ = 0.60, но без учёта дозарядки. Как видно из формулы (4), учёт дозарядки ($\zeta_{доз} > 1$) привёл бы к дополнительному снижению КОГ.

Для многих форсированных дизелей ограничивается величина степени сжатия ε, чтобы при повышенном давлении наддува p_k максимальное давление заряда p_z не становилось слишком высоким [1]. Согласно формуле (10), при уменьшении ε и прочих равных условиях повышается КОГ: так, при снижении ε от 17 до 12 КОГ может увеличиться в 16/11 ≈ 1.5 раза. Противодействовать этому можно, используя продувку цилиндров, так как при увеличении коэффициента $\varphi_п$, согласно формуле (9), снижаются и коэффициент очистки (экспоненциальная функция под знаком корня), и относительный КОГ.

Произведение $\gamma_{r0}\overline{\gamma_r}$, умноженное на безразмерный комплекс $\frac{p_k T_r}{8.04 p_r T_k}$ и далее обозначенное ψ, согласно формулам (9) и (10), зависит от трёх факторов – базовой величины коэффициента наполнения η_{v0}, коэффициента продувки $\varphi_п$ и степени сжатия ε:

$$\psi = \frac{1 - \sqrt{1 - 0.236\left(\exp(\eta_{v0}\overline{\eta_v}\varphi_п) - 1\right)^{-1}}}{\eta_{v0}(\varepsilon - 1)}, \quad (11)$$

где относительный коэффициент наполнения $\overline{\eta}_v$ зависит от $\varphi_п$, ε и показателя степени n_v, согласно формуле (2). Далее исследовано влияние перечисленных факторов на функцию ψ, пропорциональную величине КОГ при продувке.

Приняты следующие интервалы изменения параметров в (11) и показателя степени n_v: η_{v0} = 0.85…0.95; ε = 13…17; $\varphi_п$ = 1.05…1.2; n_v = 0.5…0.7. Значения факторов и функции ψ, полученные с помощью формулы (11) на ПК, приведены в таблице 3.

Как видно, величина n_v незначительно влияет на функцию ψ, поэтому ниже рассмотрен случай n_v = 0.5. При ε = 13 и $\varphi_п$ = 1.2

повышение η_{v0} от 0.85 до 0.95 ведёт к снижению ψ на 25%. К такому же снижению ψ приводит и повышение коэффициента продувки от 1.05 до 1.2 (при ε = 13 и η_{v0} = 0.85). В то же время, при отсутствии продувки снижение степени сжатия от 17 до 13 при прочих равных условиях ведёт к увеличению КОГ в 16/12 ≈ 1.3 раза. Поэтому из табл. 3 следует, что благодаря продувке цилиндров дизеля ($\varphi_п$ = 1.2) при ε = 13 возможно удержание КОГ примерно на исходной величине.

Таблица 3 - Влияние ряда факторов на функцию ψ, пропорциональную величине КОГ при продувке

η_{v0}	ε	$\varphi_п$	$10^3\psi$ при n_v	
			0.5	0.7
0.85	13	1.05	7.9	8.1
0.95	13	1.05	5.9	6.0
0.85	17	1.05	6.0	6.1
0.95	17	1.05	4.5	4.6
0.85	13	1.2	5.9	6.0
0.95	13	1.2	4.4	4.4
0.85	17	1.2	4.6	4.6
0.95	17	1.2	3.4	3.4
0.90	15	1.12	5.1	5.2

Величина КОГ $\gamma_{rп}$, кроме функции ψ (11), пропорциональна безразмерному комплексу, $\frac{8.04 p_r T_k}{p_k T_r}$, в который входят отношения давлений и температур заряда и среды во впускных каналах. Из опубликованных рекомендаций для выбора этих параметров и величин их отношений [1, 2, 8, 9] следует, что произведение отношений указанных давлений и температур $p_r T_k/(p_k T_r)$ при нагрузках, близких к номинальной, находится в пределах примерно 0.3…0.4. При этом, меньшее из этих значений соответствует наличию охлаждения наддувочного воздуха (ОНВ) и пониженным отношениям давлений $p_r/p_{выпк}$ и $p_k/p_{выпк}$ (где $p_{выпк}$ – среднее давление среды в выпускном коллекторе дизеля перед турбиной турбокомпрессора), близким к единице, а большее – противоположному случаю. После умножения $p_r T_k/(p_k T_r)$ на 8.04, как видно, указанный безразмерный комплекс может находиться в пределах около 2,5…3. Таким образом, применение ОНВ служит дополнительным резервом для снижения КОГ примерно на 20%.

Известно также о зависимости коэффициента продувки $\varphi_п$, входящего в формулы (2) и (11), от температуры T_k [6]. Так, для дизеля 6ЧН 21/21 прирост коэффициента наполнения, полученный вследствие продувки цилиндров, пропорционален функции $\sqrt{T_k - 0.51(T_k - 293)}$, которая изменяется в узких пределах – примерно 18…19 $K^{0.5}$, при T_k = 350…450 К. Поэтому, согласно данным [6], на указанный прирост $\eta_{vп}$ намного сильнее влияет скоростной режим дизеля 6ЧН 21/21, чем температура T_k.

Приведенный материал позволяет учесть влияние продувки при упрощённом расчёте рабочего цикла форсированного дизеля. Значения коэффициентов наполнения и остаточных газов, найденные без учёта продувки по известным зависимостям, необходимо умножить на относительные коэффициенты наполнения и остаточных газов, найденные с помощью формул (2) и (9) и учитывающие влияние продувки. В указанных формулах необходимо уточнение ряда числовых параметров с помощью опытных данных, полученных на различных дизелях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Портнов, Д.А. Быстроходные турбопоршневые двигатели с воспламенением от сжатия. Теория, рабочий процесс и характеристики. – М.: Машгиз, 1963. – 640 с.

2. Двигатели внутреннего сгорания. Теория рабочих процессов поршневых и комбинированных двигателей / Под ред. А.С. Орлина. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1971. – 400 с.

3. Колчин, А.М. Расчет автомобильных и тракторных двигателей / А.М. Колчин, В.П. Демидов. – М.: Высшая школа, 1971. – 344 с.

4. Двигатели внутреннего сгорания / Под ред. В.Н. Луканина. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1985. – 312 с.

5. Гаврилов, А.А. Расчет циклов поршневых двигателей: Учебное пособие / А.А. Гаврилов, М.С. Игнатов, В.В. Эфрос; Владимирский гос. ун-т. – Владимир, 2003. – 125 с.

6. Турбокомпрессоры для наддува дизелей. Справочное пособие / Б.П. Байков и др. – Л.: Машиностроение, 1975. – 200 с.

7. Дизели. Справочник / Под ред. В.А. Ваншейдта. – М.; Л.: Машиностроение, 1969. – 600 с.

8. Двигатели внутреннего сгорания. Теория поршневых и комбинированных двигателей / Под ред. А.С. Орлина, М.Г. Круглова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1983. – 372 с.

9. Брук, М.А. Агрегаты наддува ДВС: Учебное пособие / М.А. Брук; Северо-Западный заочный политехн. ин-т. – Л., 1972. – 176 с.

Стефановский Алексей Борисович, *к.т.н., доцент, Таврический государственный агротехнологический университет, e-mail: a19xt9@gmail.com.*