

## 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  $\varphi_n$  и избытка продувочного воздуха  $\varphi_k$ , причём последний пропорционален коэффициенту наполнения  $\eta_v$  [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

$\eta_v$  (взятого по отношению к его величине  $\eta_{v0}$ , когда нет продувки) от степени сжатия  $\varepsilon$  и коэффициента продувки  $\varphi_n$  [6; 7]:

$$\eta_v \approx 1 + \frac{k_v}{\varepsilon - 1} (\eta_{v0} \varphi_n - 1)^{n_v}, \quad (1)$$

где числовые параметры (коэффициенты) находятся в следующих интервалах:  $k_v = 1.5 \dots$

$2.5$ ;  $\eta_{v0} = 1.05 \dots 1.1$ ;  $\varphi_n = 1.05 \dots 1.2$ ;  $n_v = 0.3 \dots 0.7$ . Желательно уменьшить хотя бы некоторые из этих интервалов, чтобы формулу (1) шире ввести в практику расчётов.

Видно, что значения параметра  $\eta_v$  и коэффициента продувки  $\varphi_n$  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 ( $\varepsilon = 13.5$ ), снабжённого турбонаддувом, при коэффициенте избытка продувочного воздуха  $\varphi_k = 1.04$  [2]. Для принятой там простой экспоненциальной зависимости коэффициента очистки  $\zeta_{оч}$  от  $\varphi_k$  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  $\varphi_n = 1.04/0.941 \approx 1.1$ . 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  $\eta_{v0} = 0.889$ . Поэтому при учёте этого влияния (но без учёта дозарядки) относительный коэффициент наполнения  $\bar{\eta}_v = 0.941/0.889 \approx 1.06$ . Увеличение  $\eta_v$  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  $\varphi_n$ , с учётом сделанного упрощения  $\bar{\eta}_v \approx \varphi_n$ , изменяется в пределах

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

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

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

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

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

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

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  $1/(e^{\varphi_k} - 1)$ . Тогда, для рассмотренного выше примера, при  $\varphi_k = 1.04$  этот коэффициент равен не 0.353, а 0.547, вследствие чего при учёте продувки коэффициент наполнения снизится до 0.926. Соответственно, коэффициент продувки  $\varphi_n = 1.04/0.926 \approx 1.12$ , а относительный коэффициент наполнения  $\bar{\eta}_v \approx 1.04$ . Это соответствует ранее принятой величине  $k_v = 1.5$ , если показатель степени  $n_v$  в (1)

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

Следовательно, если выразить коэффициент очистки  $\zeta_{оч}$  через  $\varphi_k$  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  $\eta_{вп}$  нужно несколько увеличить коэффициент продувки.

Значения двух функций коэффициента избытка продувочного воздуха  $\varphi_k$ , 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  $\varphi_k < 1$ .

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

$\varphi_k$	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2
$e^{-\varphi_k}$	0.50	0.45	0.41	0.37	0.33	0.30
$1/(e^{\varphi_k} - 1)$	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  $\varphi_k \approx 0.7$ , когда продувки нет ( $\varphi_k = \eta_{v0}$ ).

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

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

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

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

впускных каналах (сжатого воздуха – при наличии наддува).

Влияние на коэффициент очистки отношения  $\zeta_{\text{тепл}}$ , весьма близкого к 1, невелико. В то же время, вследствие большой величины степени сжатия  $\varepsilon$  у дизелей и соизмеримости давлений  $p_a$  и  $p_r$ , можно ожидать значительного влияния коэффициента дозарядки  $\zeta_{\text{доз}}$  на коэффициент очистки: при заданной величине коэффициента наполнения, даже незначительная дозарядка цилиндра приводит к повышению расчётной величины  $\zeta_{\text{оч}}$ . Поэтому можно предположить, что определение  $\zeta_{\text{оч}}$  в виде функции  $1/(e^{\varphi_k} - 1)$  [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  $\zeta_{\text{оч}}$  от 0.353 до 0.547, согласно (3), можно достичь при  $\eta_{\text{вп}} = 0.941$ , если принять коэффициент дозарядки  $\zeta_{\text{доз}} \approx 1.02$  и отношение  $\zeta_{\text{тепл}} = 1.04$ . Отсюда видно, что: при известном коэффициенте наполнения  $\eta_{\text{вп}}$  определять коэффициент очистки, не зная коэффициента дозарядки, весьма затруднительно; вычислять  $\eta_{\text{вп}}$  только с учётом величины  $\zeta_{\text{оч}}$ , но без учёта возможности дозарядки не вполне корректно (хотя и допустимо в учебных расчётах).

При расчёте коэффициента наполнения  $\eta_{\text{вп}}$  по параметрам среды во впускных каналах и заряда в цилиндре [2; 8] нужно знать величину коэффициента очистки  $\zeta_{\text{оч}}$ , который сам зависит от коэффициента наполнения посредством принятой экспоненциальной функции  $1/(e^{\varphi_k} - 1)$ , где  $\varphi_k$  пропорционален  $\eta_{\text{вп}}$  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  $n_v = 0.5 \dots 0.7$ , 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  $\eta_{\text{в0}}$  без учёта влияния продувки и дозарядки (если неизвестен коэффициент  $\zeta_{\text{доз}} \neq 1$ ) определяется по известной формуле [2 – 5, 8], где не требуется знать величину коэффициента очистки, так как принято  $\zeta_{\text{оч}} = 1$ .

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

$$\gamma_{\text{г}} = \frac{T_k + \Delta T_{\text{вп}}}{T_r} \frac{\zeta_{\text{оч}} / \zeta_{\text{доз}}}{\varepsilon \frac{p_a}{p_r} - \zeta_{\text{тепл}} \zeta_{\text{оч}}}, \quad (4)$$

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:

$$\frac{\zeta_{\text{оч}} \left( \varepsilon \frac{p_a}{p_r} - \zeta_{\text{тепл}} \right)}{\varepsilon \frac{p_a}{p_r} - \zeta_{\text{тепл}} \zeta_{\text{оч}}}. \quad (5)$$

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

Вследствие того, что численных рекомендаций для коэффициента очистки  $\zeta_{\text{оч}}$  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  $\zeta_{\text{оч}}$ :

$$\zeta_{\text{оч}} = \frac{\varepsilon \frac{p_a}{p_r} \gamma_{\text{г}}}{\varepsilon \frac{p_a}{p_r} - (1 - \gamma_{\text{г}}) \zeta_{\text{тепл}}}. \quad (6)$$

Приняты следующие интервалы изменения параметров в (6):  $\gamma_{\text{г}} = 0.25 \dots 0.9$ ;  $\varepsilon = 13 \dots 17$ ;  $p_a / p_r = 0.8 \dots 1.1$ ;  $\varepsilon p_a / p_r \approx 10 \dots 19$ ; отношение  $\zeta_{\text{тепл}}$  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  $\zeta_{\text{оч}}$  можно пренебречь. С помощью регрессионного

анализа данных табл. 1 получена квадратичная зависимость  $\zeta_{оч}$  от относительного КОГ:

$$\zeta_{оч} \approx (1.07 - 0.067\bar{\gamma}_r)\bar{\gamma}_r. \quad (7)$$

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]:

Таблица 2 - Влияние ряда факторов на коэффициент очистки

$\varepsilon p_a/p_r$	$\bar{\gamma}_r$	$\zeta_{оч}$ по (6)	$\zeta_{оч}/\bar{\gamma}_r$
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
-	$1.07 - 0.067\bar{\gamma}_r$	$\zeta_{оч}$ 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	-

$$(1.07 - 0.067\bar{\gamma}_r)\bar{\gamma}_r = (\exp(\eta_{v0}\bar{\eta}_v\varphi_n) - 1)^{-1}, \quad (8)$$

где относительный коэффициент наполнения  $\bar{\eta}_v$  приближённо вычисляется по формуле (2) с незафиксированным показателем степени 0.5...0.7, а базовое значение коэффициента наполнения  $\eta_{v0}$  (без учёта продувки) – по общепринятой зависимости [2 - 5; 8]; коэффициентом продувки  $\varphi_n$  следует задаться в пределах 1.05...1.2 [6]. Тогда из (8) можно выразить относительный КОГ, решив квадратное уравнение относительно  $\bar{\gamma}_r$  и взяв при этом правильный знак «минус»:

$$0.067\bar{\gamma}_r\bar{\gamma}_r - 1.07\bar{\gamma}_r + (\exp(\eta_{v0}\bar{\eta}_v\varphi_n) - 1)^{-1} = 0;$$

$$\bar{\gamma}_r = 8.04 \left( 1 - \sqrt{1 - 0.236(\exp(\eta_{v0}\bar{\eta}_v\varphi_n) - 1)^{-1}} \right). \quad (9)$$

Например, при значениях  $\varphi_n = 1.1$  и  $\eta_{v0}\bar{\eta}_v = 0.941$  по этой формуле получится относительный КОГ  $\bar{\gamma}_r \approx 0.54$ .

Вычислив затем базовое значение КОГ  $\gamma_{r0}$  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

$\gamma_{rn} = \gamma_{r0}\bar{\gamma}_r$ . Так, для рассмотренного примера с дизелем 16ЧН 26/26 ( $T_r = 800$  К;  $T_k = 344$  К) [2]  $\gamma_{r0} = 0.040$  и  $\gamma_{rn} = 0.040 \cdot 0.54 = 0.021$ . 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  $\varphi_n$  [8].

В примере расчёта цикла дизеля типа ЧН 26/26 ( $\varepsilon = 13$ ) [8] получено близкое значение КОГ  $\gamma_{rn} \approx 0.022$  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  $\varepsilon$ , чтобы при повышенном давлении наддува  $p_k$  максимальное давление заряда  $p_z$  не становилось слишком высоким [1]. Согласно формуле (10), при уменьшении  $\varepsilon$  и прочих равных условиях повышается КОГ: так, при снижении  $\varepsilon$  от 17 до 12 КОГ может увеличиться в  $16/11 \approx 1.5$  раза. Противодействовать этому можно, используя продувку цилиндров, так как при увеличении коэффициента  $\varphi_n$ , согласно формуле (9), снижаются и коэффициент очистки (экспоненциальная функция под знаком корня), и относительный КОГ.

Произведение  $\gamma_{r0}\bar{\gamma}_r$ , умноженное на безразмерный комплекс  $\frac{p_k T_r}{8.04 p_r T_k}$  и далее

обозначенное  $\psi$ , согласно формулам (9) и (10), зависит от трёх факторов – базовой величины коэффициента наполнения  $\eta_{v0}$ , коэффициента продувки  $\varphi_n$  и степени сжатия  $\varepsilon$ :

$$\psi = \frac{1 - \sqrt{1 - 0.236(\exp(\eta_{v0}\bar{\eta}_v\varphi_n) - 1)^{-1}}}{\eta_{v0}(\varepsilon - 1)}, \quad (11)$$

где относительный коэффициент наполнения  $\bar{\eta}_v$  зависит от  $\varphi_n$ ,  $\varepsilon$  и показателя степени  $n_v$ , согласно формуле (2). Далее исследовано влияние перечисленных факторов на

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

функцию  $\psi$ , пропорциональную величине КОГ при продувке.

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

Как видно, величина  $n_v$  незначительно влияет на функцию  $\psi$ , поэтому ниже рассмотрен случай  $n_v = 0.5$ . При  $\varepsilon = 13$  и  $\varphi_n = 1.2$  повышение  $\eta_{v0}$  от 0.85 до 0.95 ведёт к снижению  $\psi$  на 25%. К такому же снижению  $\psi$  приводит и повышение коэффициента продувки от 1.05 до 1.2 (при  $\varepsilon = 13$  и  $\eta_{v0} = 0.85$ ). В то же время, при отсутствии продувки снижение степени сжатия от 17 до 13 при прочих равных условиях ведёт к увеличению КОГ в  $16/12 \approx 1.3$  раза. Поэтому из табл. 3 следует, что благодаря продувке цилиндров дизеля ( $\varphi_n = 1.2$ ) при  $\varepsilon = 13$  возможно удержание КОГ примерно на исходной величине.

Таблица 3 - Влияние ряда факторов на функцию  $\psi$ , пропорциональную величине КОГ при продувке

$\eta_{v0}$	$\varepsilon$	$\varphi_n$	$10^3\psi$ 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  $\gamma_m$ , кроме функции  $\psi$  (11), пропорциональна безразмерному комплексу  $\frac{8.04p_r T_k}{p_k T_r}$ , 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

$p_r / p_{\text{выпк}}$  и  $p_k / p_{\text{выпк}}$  (где  $p_{\text{выпк}}$  – 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  $\varphi_n$ , 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  $T_k = 350 \dots 450$  К. Поэтому, согласно данным [6], на указанный прирост  $\varphi_n$  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.

А.Б. СТЕФАНОВСКИЙ

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, ТГАТУ*