БАКАЛАВРИАТ и МАГИСТРАТУРА

Л.М. Матюхин

ТЕОРИЯ ПОРШНЕВЫХ ДВС

ПРИКЛАДНАЯ ТЕРМОДИНАМИКА

Рекомендовано
Экспертным советом УМО в системе ВО и СПО
в качестве **учебного пособия**
для направлений бакалавриата и магистратуры
«Двигатели внутреннего сгорания»

BOOK.ru
ЭЛЕКТРОННО-БИБЛИОТЕЧНАЯ СИСТЕМА
КНОРУС • МОСКВА • 2021

УДК 621.4(075.8)
ББК 31.365я73
М35

Автор
Л.М. Матюхин, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет МАДИ (ГТУ)

Матюхин, Леонид Михайлович.
М35 Теория поршневых ДВС: прикладная термодинамика : учебное пособие / Л.М. Матюхин. — Москва : КНОРУС, 2021. — 284 с. — (Бакалавриат, магистратура).

ISBN 978-5-406-02041-8

Предлагаемый подход особенно важен при анализе рабочих циклов двигателей, работающих на все более востребованных газообразных топливах и, в частности, на водороде. В результате упрощается структура основных расчетных зависимостей, а их анализ становится более наглядным и понятным. Возможность визуализации результатов расчетов облегчает их анализ и является большим преимуществом предлагаемого подхода в дидактическом плане.

Базирование анализа работы двигателя на общетехнических понятиях долей позволяет уменьшить количество используемых в расчетах коэффициентов, упростить расчетные зависимости и создать универсальные термодинамические основы расчета рабочего цикла любых поршневых ДВС. Благодаря этому появляются новые возможности для изучения протекающих в двигателях процессов.

Соответствует ФГОС ВО последнего поколения.

Для студентов бакалавриата, магистрантов и аспирантов, обучающихся по направлению подготовки «Двигатели внутреннего сгорания», а также для инженеров и научных работников, занятых в сфере проектирования и испытаний поршневых ДВС.

Ключевые слова: поршневые ДВС; газообмен; объемные доли; тип топлива; рециркуляция.

УДК 621.4(075.8)
ББК 31.365я73

Матюхин Леонид Михайлович

ТЕОРИЯ ПОРШНЕВЫХ ДВС:
прикладная термодинамика

Изд. № 554056. Подписано в печать 24.09.2020. Формат 60×90/16.
Гарнитура «Petersburg». Печать офсетная.
Усл. печ. л. 18,0. Уч.-изд. л. 10,37. Тираж 500 экз.

ООО «Издательство «КноРус».
117218, г. Москва, ул. Кедрова, д. 14, корп. 2. Тел.: +7 (495) 741-46-28.
E-mail: welcome@knorus.ru www.knorus.ru

Отпечатано в АО «Т8 Издательские Технологии».
109316, г. Москва, Волгоградский проспект, д. 42, корп. 5.
Тел.: +7 (495) 221-89-80.

© Матюхин Л.М., 2021
© ООО «Издательство «КноРус», 2021

ISBN 978-5-406-02041-8

Оглавление

Применяемые в тексте обозначения 6
Введение 8

Глава 1. УТОЧНЕННАЯ ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ ГАЗООБМЕНА КОЭФФИЦИЕНТОМ НАПОЛНЕНИЯ 16
1.1. Полный объем и степень сжатия 16
1.2. Влияние на наполнение типа топлива и коэффициента избытка воздуха 18
1.2.1. Наполнение газовых двигателей 19
1.3. Оптимальное наполнение 21
1.4. Условия рассмотрения процесса сжатия 23
Тест 27

Глава 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОСТАВА И ПАРАМЕТРОВ РАБОЧЕГО ТЕЛА В ХАРАКТЕРНЫХ ТОЧКАХ ЦИКЛА 30
2.1. Газообмен в двигателях с внутренним смесеобразованием 30
2.2. Газообмен в двигателях с внешним смесеобразованием 34
2.3. Особенности теплового расчета ПДВС с рециркуляцией ОГ 41
2.3.1. Состав и кажущаяся молекулярная масса смеси двух газовых композиций 42
2.3.2. Оценка характеристик качества процессов газообмена при использовании рециркуляции отработавших газов 44
2.3.3. Зависимость степени рециркуляции от типа используемого топлива 48
2.3.4. Универсальные зависимости для нахождения количеств киломолей компонентов рабочей смеси 51
2.3.5. Парциальные объемы компонентов рабочей смеси при использовании рециркуляции 57
2.3.6. Коэффициент остаточных газов 59
2.3.7. Нахождение коэффициента наполнения с использованием значений парциальных объемов компонентов рабочей смеси 63
2.3.8. Влияние угла запаздывания закрытия впускных клапанов на величину коэффициента наполнения 70
2.3.9. Температура свежего заряда на входе в цилиндр и его кажущаяся молекулярная масса 78
2.3.10. Действительный и теоретический коэффициент молекулярного изменения в случае использования рециркуляции 84

2.3.11. Взаимозависимость коэффициентов дозарядки и очистки; их учет при нахождении действительного значения коэффициента молекулярного изменения.....89
2.3.12. Влияние дозарядки и очистки на величину действительного коэффициента молекулярного изменения.....95
2.3.13. Определение температуры конца сгорания с учетом коэффициентов очистки и дозарядки.....99
Тесты 109

Глава 3. РАСЧЕТ РАБОЧЕГО ЦИКЛА НА БАЗЕ ОБЪЕМНОЙ ДОЛИ ВОЗДУХА В РАБОЧЕЙ СМЕСИ 114
3.1. Оценка результатов процесса газообмена объемными долями компонентов рабочей смеси..... 119
3.1.1. Доли остаточных газов и свежего заряда в рабочей смеси 120
3.1.2. Доли воздуха и топлива в рабочей смеси..... 123
3.1.3. Определение предельного значения коэффициента наполнения 137
3.1.4. Доля рециркуляционных газов в рабочей смеси..... 140
3.1.5. Ухудшение наполнения в результате использования рециркуляции 148
3.1.6. Физический смысл теоретического и действительного коэффициентов молекулярного изменения..... 149
3.1.7. Определение максимальной температуры цикла T_z с учетом рециркуляции, очистки и дозарядки..... 158
3.2. Определение индикаторных показателей 167
3.2.1. Среднее индикаторное давление цикла..... 167
3.2.2. Удельный индикаторный расход топлива и индикаторный КПД 190
3.3. Связь между коэффициентом наполнения и объемной долей воздуха 193
3.3.1. Соотношения между объемными долями свежего заряда, горючей и рабочей смеси 196
3.4. Экспериментальное определение объемных долей компонентов рабочей смеси..... 199
3.5. Экспериментальное определение степени рециркуляции..... 202
3.6. Экспериментальное определение коэффициентов очистки и дозарядки..... 203
3.6.1. Нахождение аналитической зависимости между величинами коэффициентов очистки и дозарядки..... 209

3.6.2. Определение коэффициента очистки по результатам эксперимента ... 217
3.6.3. Определение коэффициента дозарядки по результатам эксперимента ... 221
3.6.4. Разделение влияния эффектов очистки и дозарядки на результаты газообмена ... 226
3.7. Влияние запаздывания закрытия впускного и выпускного клапанов на наполнение цилиндров и состав рабочей смеси ... 231
3.7.1. Изменение текущих значений объемных долей компонентов РС и коэффициента наполнения ... 231
3.7.2. Влияние угла запаздывания закрытия впускного клапана на наполнение ... 242
3.8. Термодинамические основы расчета рабочего цикла Аткинсона–Миллера на основе состава рабочей смеси ... 243
Тесты ... 249

Глава 4. ОСНОВЫ УТОЧНЕННОГО РАСЧЕТА ДВУХТАКТНЫХ ДВС ... 263
4.1. Общие положения ... 263
4.2. Определение коэффициентов остаточных газов и наполнения ... 265
4.3. Объемные доли свежего заряда и ОГ ... 268
4.4. Определение коэффициентов продувки и утечки продувочного воздуха ... 269
4.5. Определение среднего индикаторного давления ... 270
Тесты ... 273

Заключение ... 275
Ответы на тесты ... 276
Библиографический список ... 278

Применяемые в тексте обозначения

$A = \dfrac{\alpha L_0 \mu_{\text{В}}}{\alpha L_0 \mu_{\text{В}} + 1}$ — коэффициент вытеснения воздуха, учитывающий замещение части его объема в цилиндре двигателя (газообразным) топливом

$B = \left[\left(1 - \cos\varphi\right) + \left(\lambda / 4\right)\left(1 - \cos 2\varphi\right)\right]$ — тригонометрическая функция, учитывающая перемещение поршня при повороте коленчатого вала

G — часовой расход

$k = \dfrac{p_a}{p_k}\dfrac{T_k}{T_a}$ — коэффициент ухудшения наполнения

L_0 — стехиометрическое соотношение, (количество киломолей воздуха / кг топлива)

M — масса

N — количество киломолей

$R_c = \dfrac{M_R}{M_{\text{ГС}} + M_R}$ — степень рециркуляции как отношение массы рециркуляционных газов к массе свежего заряда (горючая смесь + рециркуляционные газы)

$R'_c = \dfrac{N_R}{N_{\text{ГС}} + N_R} = \sigma'_R$ — степень рециркуляции как отношение количества молей рециркуляционных газов к количеству киломолей свежего заряда (доля σ'_R рециркуляционных газов в свежем заряде)

r_i — объемные доли индивидуальных газов или компонентов топлива

V_a — полный объем цилиндра

V_c — объем камеры сгорания

V_h — рабочий объем цилиндра

$V_{\text{в}}$ — парциальный объем воздуха в рабочей смеси

V_r — парциальный объем остаточных газов в рабочей смеси

$V_{\text{т}}$ — парциальный объем топлива в рабочей смеси

V_R — парциальный объем рециркуляционных газов в рабочей смеси

V_r^{Σ} — парциальный объем продуктов сгорания в рабочей смеси

$V_{\text{потер}}$ — «потерянный» объем в двухтактных ДВС

$\alpha = \dfrac{G_{\text{в}}}{l_0 G_{\text{т}}}$ — коэффициент избытка воздуха

γ_r — коэффициент остаточных газов

η_v — коэффициент наполнения

$\eta_v^{\text{предел}}$ или $\eta_v^{\max}$ — коэффициент наполнения, соответствующий заполнению объема V_a свежим зарядом при отсутствии остаточных газов и продувки

λ — степень повышения давления

μ — молярная масса

ρ — плотность

$\sigma_{\text{в}}$ — объемная доля воздуха в рабочей смеси

$\sigma'_{\text{в}}$ — объемная доля воздуха в свежем заряде

$\sigma_{\text{т}}$ — объемная доля топлива в рабочей смеси

$\sigma'_{\text{т}}$ — объемная доля топлива в свежем заряде

σ_r — объемная доля ОГ в рабочей смеси

σ_R — объемная доля рециркуляционных газов в рабочей смеси

σ'_R — объемная доля рециркуляционных газов в свежем заряде

$\sigma''_{\text{в}}$ — объемная доля воздуха в горючей смеси

$\sigma''_{\text{т}}$ — объемная доля топлива в горючей смеси

$\sigma_{\text{ГС}}$ — объемная доля горючей смеси в смеси рабочей

$\sigma_{\text{СЗ}}$ — объемная доля свежего заряда в рабочей смеси

σ_r^{Σ} — объемная доля продуктов сгорания в рабочей смеси

$\varphi_1 = \dfrac{N_1^{\text{д}}}{N_1}$ — коэффициент дозарядки как отношение «действительного» количества киломолей в момент закрытия впускных клапанов к расчетному

$\varphi_s = \dfrac{N_r}{N_1}$ — коэффициент очистки, представляющий собой отношение действительного количества киломолей ОГ в составе рабочей смеси к их расчетному количеству

$\psi = \dfrac{V_{\text{потер}}}{V_h}$ — доля потерянного объема

ГС — горючая смесь

ДсИЗ — двигатель с искровым зажиганием

КС — камера сгорания

ОГ — остаточные газы

ПС — продукты сгорания

ПДВС — поршневой двигатель внутреннего сгорания

РГ — рециркуляционные газы

РС — рабочая смесь

СЗ — свежий заряд

Введение

Анализ способов оценки результатов процессов газообмена

Мощность, экономические и экологические показатели двигателя зависят от количества и состава сгорающей в его цилиндрах рабочей смеси. В связи с этим еще на заре становления автомобилестроения возникла необходимость введения некоторых величин, характеризующих результаты процессов газообмена. В итоге были предложены понятия коэффициентов остаточных газов и наполнения (у Г. Гюльднера [10] он носит название «объемный коэффициент», а у А. С. Ястржемского [60] — «коэффициент подачи»). Для этих же целей стали также использовать уже применявшееся теплотехниками и отражающее состав горючей смеси понятие «коэффициент избытка воздуха».

Как известно, все без исключения показатели поршневых двигателей внутреннего сгорания (мощностные, экономические и экологические) зависят от параметров и состава рабочей смеси. В качестве исходных данных при проведении теплового расчета рабочего цикла поршневых двигателей используются лишь параметры поступившего в цилиндр свежего заряда в совокупности с коэффициентами наполнения η_v, остаточных газов γ_r и избытка воздуха α. И если коэффициент избытка воздуха является величиной, широко используемой в теплотехнике, то два первых коэффициента — η_v и γ_r — применяются исключительно в теории поршневых ДВС и по величине коэффициента наполнения η_v опосредовано судят о степени заполнения цилиндров свежим зарядом.

При расчетах могут использоваться несколько определений коэффициента наполнения: «по воздуху», «по смеси», «условный» и «действительный» для двигателей двухтактных, с учетом или без учета утечек [4, 5, 10, 55]. Соответственно применяются и различные зависимости для определения характеристик двигателя. Это обстоятельство препятствует унификации расчета рабочего цикла. Используемые расчетные зависимости для оценки результатов наполнения не учитывают тип и состав применяемого топлива и лишь частично учитывают состав образующейся в процессе газообмена рабочей смеси, в общем случае определяемый объемными или массовыми долями ее компонентов — воздуха, топлива, остаточных и рециркуляционных газов.

Таким образом, по сути, существует несколько различных методик проведения расчета рабочего цикла двигателей — для двигателей, работающих на жидком топливе, на топливе газообразном, для двигателей с использованием рециркуляции и без нее. Также отдельные методики применяются и для расчета двигателей с регулированием мощности изменением

угла закрытия впускного клапана. Наличие различных определений коэффициента наполнения и, соответственно, различных выражений для его нахождения приводят к определенной многовариантности результатов расчета и не способствуют повышению точности проводимых расчетов.

Зависимости, предлагаемые различными авторами для определения коэффициента наполнения, получены исходя из балансов масс либо энергий. Как массы, так и энергия всегда привязаны к конкретным термодинамическим условиям. Масса смеси в объеме (будь то рабочий объем V_h или полный объем V_a) зависит от параметров заряда на входе в двигатель, а потому все формулы, полученные на основе определения масс или количества киломолей всегда привязаны к конкретным термодинамическим условиям окружающей среды. В то же время любой объем цилиндра — полный или рабочий — есть величина неизменная (для двигателей серийных). В связи с этим оценку результатов газообмена и расчет состава рабочей смеси целесообразно основывать на анализе соотношения парциальных объемов компонентов смеси в остающемся неизменным объеме. При этом равный объему рабочей смеси полный объем V_a является величиной более представительной, нежели V_h. Подобный подход позволяет унифицировать и упростить расчетные зависимости, что благодаря учету состава рабочей смеси в конечном итоге позволяет повысить точность результатов расчета рабочего цикла двигателя.

Мощность двигателя напрямую определяется количеством теплоты, вводимой с топливом в его цилиндры. Это количество, в свою очередь, при прочих равных условиях зависит от массы поступившего в цилиндр воздуха, то есть зависит от наполнения цилиндров. Для повышения точности вычислений помимо коэффициентов наполнения η_v и остаточных газов γ_r как правило дополнительно используются корректирующие коэффициенты — дозарядки и очистки.

При наличии различных определений коэффициента наполнения η_v (например, «по воздуху» или «по смеси») общим для них является то, что этот коэффициент соотносит количества воздуха или горючей смеси, в действительности поступившей в цилиндры двигателя, с «теоретическим» количеством, которое ***могло бы*** разместиться в рабочем объеме при условиях на входе в двигатель. Иными словами, коэффициент η_v соотносит действительное количество воздуха, поступившего в цилиндр работающего двигателя, с неким виртуальным количеством, которое могло бы заполнить объем, освобождаемый при бесконечно медленном перемещении поршня от верхней (ВМТ) к нижней мертвой точке (НМТ) в условиях непрогретого двигателя. Но отсюда следует, что сравнение действительного количество воздуха с тем, которое находится в рабочем объеме цилиндра неработающего двигателя, в первую очередь оцени-

вает не наполнение как таковое, а его ухудшение вследствие подогрева свежего заряда в условиях работающего двигателя и потерь давления по причине наличия гидравлических сопротивлений впускного тракта. Очевидно, понимая это, Рене Девилльер [14] определял этот коэффициент как ***коэффициент наполнения рабочего объема.***

Поскольку реальное наполнение соотносится с определяемой атмосферными условиями виртуальной величиной, из выражения $\eta_v = \frac{G_в^д}{G_в^т} = \frac{G_в^д}{V_h \rho_в^т}$ следует, что при фиксированном значении массового расхода $G_в^д$ коэффициент наполнения неизбежно должен изменяться при изменении параметров окружающей среды (в связи с изменением плотности воздуха $\rho_в^т$). Таким образом, стоящая в знаменателе выражения величина является функцией параметров окружающей среды (свежего заряда) на входе в цилиндры. В результате одному и тому же массовому наполнению соответствуют различные значения коэффициента η_v, то есть одной и той же степени заполнения цилиндра свежим зарядом $(G_в^ц = \text{idem})$ неизбежно соответствует бесконечное множество значений коэффициента наполнения. Более того, увеличение массового наполнения при понижении температуры окружающей среды может даже сопровождаться уменьшением коэффициента наполнения [6, 13]. Также при одинаковом массовом наполнении различными будут и коэффициенты наполнения в двух двигателях с различными степенями сжатия (и, соответственно, с разными объемами V_h), но с одинаковым полным объемом.

Указанные обстоятельства позволяют говорить об отсутствии четкой корреляции между массовым наполнением и коэффициентом наполнения, что может затруднять анализ влияния различных факторов на результаты газообмена. Кроме того, при традиционном подходе к оценке наполнения *не учитывается важная — особенно для газовых двигателей с внешним смесеобразованием — связь* η_v *с коэффициентом избытка воздуха и типом используемого топлива*. Таким образом, коэффициент наполнения неоднозначно связан с массовым наполнением и три упомянутых **невзаимосвязанных** между собой коэффициента (α, η_v и γ_r) лишь косвенно характеризуют состав рабочей смеси (РС), образующейся в цилиндрах двигателя к началу воспламенения.

При оценке наполнения в качестве основного традиционно рассматривается рабочий, а не полный объем цилиндра, то есть «по умолчанию» не принимается в расчет возможность полного заполнения свежим зарядом объема цилиндра V_a — суммы рабочего объема V_h и объема камеры сгорания V_c. Но образующаяся в результате смешения СЗ и ОГ рабочая смесь, как и любой из ее компонентов, при нахождении поршня в НМТ

занимает полный объем цилиндра. К тому же, например, при наддуве количество поступающего в цилиндр свежего заряда определяется не столько освобождаемым при перемещении поршня рабочим объемом, сколько давлением наддува и фазами газораспределения. В связи с этим оценивать наполнение одним лишь соотношением количества воздуха, действительно находящегося в *полном объеме* цилиндра и количества, которое могло бы разместиться в его *рабочем объеме*, едва ли логично.

Действительно, максимально достижимая мощность при данных p_k и T_k соответствует заполнению свежим зарядом полного объема цилиндра. При обычных для современных двигателей значениях коэффициента η_v объем свежего заряда при p_a и T_a — при параметрах точки «а» индикаторной диаграммы — может быть как меньшим, так и большим полного объема цилиндра. В первом случае можно говорить о неиспользованных резервах по наполнению, а во втором — о потерях части свежего заряда в результате продувки. Судить же о соотношении полного объема цилиндра и объема свежего заряда в нем по величине коэффициента η_v не представляется возможным. Иными словами, естественное стремление повысить коэффициент наполнения может приводить к потерям части СЗ в период перекрытия клапанов. В случае потерь характеризуемый параметрами p_a и T_a свежий заряд занимает объем, превышающий полный объем цилиндра. Из сказанного можно сделать вывод, что **коэффициент η_v недостаточно информативен, поскольку он не отражает степень заполнения свежим зарядом объема цилиндра V_a.**

При традиционным применении в качестве базового рабочего объема цилиндра V_h затруднительно назвать значение коэффициента наполнения, необходимое для заполнения свежим зарядом полного объема цилиндра. К тому же в случае изменении атмосферных условий и режима работы двигателя (значений параметров p_a и T_a) *полному, «идеальному» наполнению* соответствовали бы *различные значения* η_v, что создавало бы дополнительные неудобства при оценке результатов газообмена.

В статье [58] дается удобная таблица, в которую сведены зависимости, полученные рядом авторов и используемые для расчетного определения коэффициента наполнения (табл. 1).

В статье [22] показано, что использование приводимых в таблице зависимостей для одного и того же двигателя дает разброс в значениях коэффициента избытка воздуха около 5 %. Авторы указывают также на определенную алогичность используемых формул, в которых величина давления заряда на входе в цилиндры p_k всегда находится в знаменателе. Однако в конечном итоге они также не отказываются от понятия коэффициента наполнения, а лишь модифицируют его.

Таблица 1

Основные зависимости для определения η_v [58]

№ п/п	Вид уравнения	Источник
1	$\eta_v = \frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1} \frac{p_a}{p_k} \frac{T_k}{T_a} \frac{1}{1+\gamma}$	[11]
2	$\eta_v = \frac{T_k}{T_a + \Delta T} \frac{1}{\varepsilon - 1} \left(\varphi_{доз} \varepsilon \frac{p_a}{p_k} - \varphi_{теп} \varphi_{оч} \frac{p_r}{p_k} \right)$	[6]
3	$\eta_v = \varphi_{доз} \frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1} \frac{p_a}{p_k} \left(1 - \frac{\varphi_{теп} \varphi_{оч}}{\varepsilon \varphi_{доз}} \frac{p_r}{p_a} \right) \frac{T_k}{T_k + \Delta T}$	[16]
4	$\eta_v = \varphi_{доз} \frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1} \frac{p_a}{p_k} \frac{T_k}{T_k + \Delta T} \left(1 - \frac{\varphi_{теп}}{\varepsilon} \frac{p_r}{p_a} \right)$	[11]
5	$\eta_v = \varphi_{доз} \frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1} \frac{p_a}{p_k} \frac{T_k}{T_k + \Delta T + \varphi_{теп} \varphi_{доз} \gamma T_r}$	[13]
6	$\eta_v = \left[\frac{p_a}{p_k} + \left(\frac{p_a}{p_k} - \frac{p_r}{p_k} \right) \frac{1}{\varepsilon - 1} \right] \frac{T_k}{T_k + \Delta T}$	[59]
7	$\eta_v = \frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1} \varphi_{доз} \frac{p_a}{p_k} \frac{T_k}{T_a} \frac{1}{1+\gamma}$	[53]
8	$\eta_v = \frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1} \frac{p_a}{p_k} \frac{T_k}{T_k + \Delta T + \gamma T_r}$	[18]

Ни одна из используемых в настоящее время зависимостей не учитывает влияния на коэффициент наполнения типа топлива и величины коэффициента избытка воздуха, хотя из опыта известно, что они — в первую очередь в случае газовых ДВС — сказываются на наполнении. Так, перевод бензинового двигателя на газообразное топливо неизбежно приводит к ухудшению наполнения и к снижению мощности при опре-

деленном улучшении экономических и экологических показателей. Также в приведенных зависимостях не учитывается и влияние на наполнение степени рециркуляции, хотя понятно, что введение в свежий заряд инертных продуктов сгорания сопровождается снижением в его составе доли воздуха.

Собственно, приводимые в таблице 1 зависимости можно дополнить и рядом других, приводимых в [8, 19, 24, 26 и т. д.]. Ни одна из них (табл. 2) также не учитывает влияние на наполнение типа топлива, степени рециркуляции и угла закрытия впускного клапана.

Таблица 2

Зависимости для определения коэффициента наполнения

№ п/п	Зависимость	Источник
1	$\eta_v = \frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1} \frac{1}{(1+\gamma)} \frac{p_a V_a}{p_н T_н}$	[8] [19], [55]
2	$\eta_v = \frac{\Delta}{\delta} \frac{1}{k} \frac{\varepsilon}{(\varepsilon - 1)} \frac{p_a}{p_0} \left[\varepsilon - \frac{p_r}{p_a} + (k-1)(\varepsilon - 1)\mu_{вп} \right]$	[26]
3	$\eta_v = \frac{\lambda}{\delta} \frac{1}{k(\varepsilon - 1)} \frac{p_a}{p_k} \left[(1+B)\varepsilon - B - \frac{p_r}{p_a}\rho \right]$	
4	$\eta_v = \left(\frac{p_a}{T_a}\varepsilon - \frac{p_r}{T_r} \right) \frac{T_0}{p_0(\varepsilon - 1)}$	[19]
5	$\eta_v = \frac{1}{\varepsilon - 1} \frac{p_a}{p_0} \left(\varepsilon - \frac{p_r}{p_a} \right)$	[8]
6	$\eta_v = \frac{1}{\varepsilon - 1} \frac{1}{\delta} \frac{p_a}{p_0} \left[\varepsilon \frac{1 + d\gamma}{1+\gamma} - \frac{p_r}{p_a} d \right]$	[8]
7	$\eta_v = \frac{\Delta}{\delta} \frac{1}{k(\varepsilon - 1)} \frac{p_a}{p_0} \left[\varepsilon - \frac{p_r}{p_a} + (k-1)(\varepsilon - 1)\mu_{вп} \right]$	

№ п/п	Зависимость	Источник
8	$\eta_v = \left(\frac{\varepsilon p_a}{T_a} - \frac{p_r}{T_r}\right)\frac{T_0}{p_0(\varepsilon - 1)}$	[24]
9	$\eta_v = \frac{\varepsilon}{(\varepsilon - 1)}\frac{p_a}{p_k}\frac{T_k}{T_a}\frac{1}{1+\gamma_r}$	[16]
10	$\eta_v = \frac{\varepsilon}{(\varepsilon - 1)}\frac{p_a}{p_k}\frac{T_k}{T_k + \Delta T + \psi\gamma_r T_r}\lambda_1$	
11	$\eta_v = \frac{\varepsilon}{(\varepsilon - 1)}\lambda_1\frac{p_a}{p_k}\left(1 - \frac{\psi\lambda_2}{\varepsilon}\frac{p_r}{p_a}\right)\frac{T_k}{T_k + \Delta T}$	
12	$\eta_v = \frac{T_0}{T_0'}\left(\frac{p_a}{p_0} - \frac{p_r - p_a}{(\varepsilon - 1)p_0}\right)$	[55]
13	$\eta_v = \frac{\varepsilon}{(\varepsilon - 1)}\frac{p_a' T_0}{p_0 T_a (1+\gamma)}$	
14	$\eta_v = \frac{T_0}{T_0'}\left[\frac{p_a'}{p_0} - \frac{1}{(\varepsilon - 1)p_0}(\xi_c p_r' - p_a')\right]$	

Фигурирующие в приведенных зависимостях коэффициенты дозарядки и очистки необходимы ввиду отсутствия данных о параметрах остаточных газов и свежего заряда соответственно в моменты закрытия выпускного и впускного клапанов. С помощью этих корректирующих коэффициентов учитывается влияние на наполнение процессов с переменной массой, протекающих в цилиндре вблизи ВМТ и НМТ.

Аналитическое определение коэффициента наполнения с использованием компьютерной техники и современных программ не является проблемой.

В основе любой из подобных программ лежат зависимости, базирующиеся на термодинамических соотношениях и дополненные уточ-

няющими коэффициентами, полученными с использованием законов газовой динамики. Однако, поскольку показатели двигателя в значительной степени определяются составом образующейся в цилиндрах рабочей смеси, расчет газообмена нельзя сводить исключительно к оценке наполнения воздухом или топливовоздушной смесью.

Следовательно, необходима термодинамическая база для нахождения состава ***рабочей*** смеси, определяемого соотношением долей воздуха, топлива и продуктов сгорания (остаточных и рециркуляционных газов).

При работе двигателя масса поступающего в цилиндр воздуха уменьшается в сравнении с идеальным «теоретическом» значением циклового заряда $G_{в}^{ц} = V_h \rho_k$, а потому обычно $\eta_v < 1$. Таким образом, ***коэффициент наполнения действительно оценивает не наполнение цилиндров как таковое, а его ухудшение в сравнении с «идеальным» наполнением*** в отсутствии гидравлических потерь, остаточных газов, а также подогрева свежего заряда. Причем за «идеал» принимается заполнение свежим зарядом исключительно рабочего, а не полного объема цилиндра. Влияние гидравлических сопротивлений и подогрева на наполнение учитывается присутствующим в большинстве зависимостей для определения η_v соотношением $\frac{p_a}{p_k}\frac{T_k}{T_a}$. Доля в рабочей смеси остаточных газов косвенно отражается величиной $\frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1}$, учитывающей соотношение V_c и V_h в полном объеме.

В современных двигателях, в основном оснащенных системами наддува, заполнение цилиндра происходит не только в результате освобождения перемещающимся поршнем объема V_h, но и благодаря избыточному давлению во впускном тракте. И в этом случае показатели двигателя определяются степенью заполнения свежим зарядом полного объема цилиндра V_a, а также составом поступившего в цилиндр свежего заряда.

Можно констатировать, что приводимые в специальной и учебной литературе зависимости для определения коэффициента наполнения не учитывают ни тип используемого топлива, ни его соотношение с воздухом (через коэффициент избытка воздуха α), ни долю вводимых во впускной тракт рециркуляционных газов. В связи с этим представляется целесообразной разработка методики, позволяющей при анализе протекающих в цилиндрах двигателя процессов принимать в расчет влияние перечисленных факторов на наполнение и основные показатели двигателя.

ГЛАВА 1
УТОЧНЕННАЯ ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ ГАЗООБМЕНА КОЭФФИЦИЕНТОМ НАПОЛНЕНИЯ

Согласно определению, коэффициент наполнения есть отношение действительного количества воздуха, поступившего в цилиндры двигателя ($G_{в}^{д} = V_0^{в}\rho_0$, где $V_0^{в}$ — замеренный счетчиком и пересчитанный на один цикл объемный расход воздуха), к количеству теоретическому, которое могло бы разместиться в рабочем объеме, то есть при отсутствии наддува — $\eta_v = \dfrac{V_0^{в}\rho_0}{V_h\rho_0}$. В числителе этого выражения фигурирует приведенный к параметрам окружающей среды парциальный объем воздуха $V_0^{в}$, входящего в состав рабочей смеси. Последнюю зависимость можно переписать как [11]

$$\eta_v = \frac{V_0^{в}}{V_h}.$$

Это выражение учитывает уменьшение количества поступающего в цилиндр свежего заряда в сравнении с идеальным «теоретическим» значением, определяемым рабочим объемом цилиндра. Однако в результате понижения давления и подогрева объем СЗ *при параметрах рабочей смеси* может быть как большим, так и меньшим рабочего объема. Чтобы добиться повышения мощности без каких-либо потерь свежего заряда, необходимо стремиться к такому наполнению, при котором его объем при параметрах точки «*a*» индикаторной диаграммы в отсутствии остаточных газов будет равен полному объему цилиндра V_a. ***Используемые в настоящее время зависимости для определения коэффициента наполнения не позволяют назвать численное значение η_v, соответствующее подобному режиму работы.*** Но даже если бы такая возможность и существовала, полученные расчетом значения η_v для такого оптимального наполнения были бы различными при постоянно изменяющихся параметрах окружающей среды.

1.1. Полный объем и степень сжатия

Рабочий объем есть величина в известной степени условная, ограниченная лишь двумя реально существующими поверхностями: зеркалом цилиндра и головкой находящегося в НМТ поршня, а также виртуаль-

ной поверхностью, соответствующей положению поршня в ВМТ, в то время как полный объем есть величина реальная, ограниченная снизу, сверху и с боков. Это обстоятельство делает объем V_a весьма удобным для оценки результатов газообмена, поскольку дает возможность наглядно показать степень заполнения цилиндра свежим зарядом, сопоставляя парциальный объем последнего с V_a.

Будучи «привязанным» к рабочему объему цилиндра (величине, определяемой степенью сжатия), коэффициент наполнения неадекватно характеризует массовое наполнение. Это обстоятельство затрудняет сравнение по наполнению различных двигателей. Строго говоря, сравнивать наполнение можно лишь для двигателей с одинаковыми степенями сжатия и при одинаковых атмосферных условиях.

На такте впуска происходит заполнение свежим зарядом не рабочего, а полного объема цилиндра. Свежий заряд в конце такта впуска, как и образующаяся в процессе наполнения рабочая смесь, опять-таки занимают полный объем цилиндра. И все показатели двигателя зависят от количества, параметров и состава занимающей этот объем смеси.

Как следует из выражения $\eta_v = \dfrac{G_в}{V_h \rho_k}$, при известном полном объеме V_a значения коэффициента η_v и рабочего объема V_h определяются величиной степени сжатия. В связи с этим в двигателях с одинаковым полным объемом цилиндра V_a при одинаковом массовом наполнении (при неизменных значениях $G_в$), но при различных степенях сжатия (различных V_h) коэффициент наполнения будет иметь различные значения.

Если же рабочий объем цилиндра не изменяется, а варьирование степенью сжатия осуществляется в результате изменения объема КС (и полного объема цилиндра), то, несмотря на переменные значения объема камеры сгорания и количества остающихся в ней продуктов сгорания, значения η_v в соответствии с используемым выражением остаются постоянными. Однако при изменении степени сжатия доля воздуха в образующейся рабочей смеси и основные ее термодинамические характеристики не могут оставаться постоянными, а потому, следовательно, должны различаться и основные показатели двигателя. Таким образом, значения коэффициента наполнения никак не отражают ни степень заполнения воздухом цилиндра, ни состав образующейся к началу сжатия рабочей смеси. К аналогичным выводам приходят и авторы статьи [22]: «Чем выше степень сжатия (ε) при прочих равных условиях, тем меньше относительная величина камеры сгорания V_c, тем меньше относительный объем остаточных газов V_r, то есть возрастает относительный объем свежего заряда и коэффициент наполнения».

Казалось бы, при расчете можно использовать и коэффициент наполнения, отнесенный к полному объему цилиндра, то есть соотносить массу поступающего в цилиндр воздуха с тем «идеальным» его количеством, которое могло бы разместиться при условиях на входе в полном объеме цилиндра, то есть

$$\eta'_v = \frac{G_в}{V_a \rho_0} = \frac{V_в \rho_a}{V_a \rho_0}.$$

Однако и в этом случае нельзя сказать, при каком значении коэффициента η'_v будет достигаться полное заполнение цилиндра при отсутствии потерь свежего заряда. Очевидно лишь, что на работающем двигателе при $\eta'_v = 1$ свежий заряд, имеющий меньшую в сравнении с исходной плотность ρ_0, должен занимать объем, превышающий полный объем цилиндра. Следовательно, при $\eta'_v = 1$ будут иметь место потери СЗ.

Из вышеизложенного следует, что в случае различных значений степени сжатия и одинаковом коэффициенте наполнения состав образующейся рабочей смеси должен быть различным. При этом будут отличаться и основные показатели двигателя. Это позволяет сделать вывод, что соотношение традиционно определяемых коэффициентов наполнения и остаточных газов дает лишь косвенное представление о составе рабочей смеси.

1.2. Влияние на наполнение типа топлива и коэффициента избытка воздуха

Из опыта перевода бензиновых двигателей на питание газообразным топливом известно, что при неизменном значении коэффициента избытка воздуха конвертация сопровождается снижением мощности. Причина — в наполнении, в заполнении цилиндров двигателя меньшими количествами воздуха.

Из выражения для определения коэффициента избытка воздуха

$$\alpha = \frac{G_в}{l_0 G_т} = \frac{\rho_в V_в}{l_0 \rho_т V_т}$$

получаем [32, 40]

$$\frac{V_в}{V_т} = \frac{\rho_т}{\rho_в} \alpha l_0 = \frac{\mu_т}{\mu_в} \alpha l_0.$$

Таким образом, при данном значении коэффициента избытка воздуха α отношение парциальных объемов воздуха и топлива в горючей

смеси не может не зависеть от природы топлива, характеризуемой в данном случае его молекулярной массой и стехиометрическим соотношением. Отсюда следует вывод, что наполнение двигателя зависит от вида топлива. Если рассматривать различные топливовоздушные смеси при одинаковых значениях коэффициента избытка воздуха, можно сделать вывод, что ***чем меньше (кажущаяся) молекулярная масса топлива (то есть чем «легче» топливо), тем большую часть объема цилиндра будет оно занимать***. Соответственно и изменение коэффициента α не может не сказываться на наполнении — обогащение смеси должно приводить к возрастанию занимаемого газообразным топливом объема за счет уменьшения в цилиндре объема воздуха. Эта закономерность особенно важна при использовании в качестве топлива газов с небольшой молекулярной массой.

1.2.1. Наполнение газовых двигателей

Все более широкое применение газообразных топлив для питания поршневых ДВС [3, 17, 54, 57] требует использования расчетных зависимостей, учитывающих специфические особенности газов как топлив. Выражение для расчетного определения коэффициента наполнения обычно получают исходя из баланса масс [6, 11], количеств киломолей компонентов рабочей смеси [21], баланса энергий [8, 59, 26] или энтальпий [19]. При проведении теплового расчета двигателя традиционно применяются формулы, получаемые на основании уравнения состояния с использованием значения заполняющей цилиндр массы свежего заряда. Они имеют, например, следующий вид [6]:

$$\eta_v = \varphi_1 \frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1} \frac{p_a}{p_k} \frac{T_k}{\left(T_r + \Delta T + \varphi \gamma_r T_r\right)}. \qquad (1.1a)$$

[55] или

$$\eta_v = \varphi_{\text{доз}} \frac{\varepsilon}{\left(\varepsilon - 1\right)} \frac{p_a}{p_k} \frac{T_k}{\left(T_k + \Delta T + \varphi_{\text{теп}} \varphi_{\text{доз}} \gamma T_r\right)} \text{ в [13]}$$

Эти и большинство из аналогичных зависимостей не предназначены для оценки наполнения газовых двигателей, поскольку не учитывают «вытеснения» из цилиндра части воздуха газообразным топливом. Степень указанного «вытеснения» различна для различных газообразных топлив — метана и водорода, пропана и генераторного газа. К тому же она зависит от параметров и количества смешиваемого с воздухом топлива, то есть от коэффициента избытка воздуха. Как и остальные зависимости, используемые для расчетного нахождения η_v, они не от-

ражают влияния рециркуляции на наполнение. Однако очевидно, что как наличие рециркуляции, так и влияние типа топлива на наполнение могут и должны учитываться при расчете рабочего цикла. Иными словами — приводимые в справочниках и учебниках зависимости не универсальны. Лишь в статье [22] при выводе зависимости для нахождения коэффициента наполнения используется выражение

$$V_a = V_r + V_в.$$

В соответствии с законом «100-процентной эффективности математики», сформулированным академиком А.Г. Бутковским, для любой реальности существует математическая структура, которая ее описывает. Отсюда можно сделать вывод, что существует возможность нахождения универсальных зависимостей, учитывающих влияние на процессы газообмена типа используемого топлива, определяемого коэффициентом избытка воздуха α состава горючей смеси и доли вводимых во впускной трубопровод рециркуляционных газов.

Поскольку при одних и тех же условиях на входе в двигатель количество попадающего в его цилиндры окислителя зависит от типа используемого топлива и состава свежего заряда, традиционно различают коэффициенты наполнения «по воздуху» η_v и «по топливовоздушной смеси» $\eta_v^{см}$. И если применительно к бензиновым двигателям без рециркуляции численные значения коэффициентов $\eta_v^{см}$ и η_v практически одинаковы, то при питании двигателя с внешним смесеобразованием легким газообразным топливом или в случае использования рециркуляции коэффициенты наполнения «по воздуху» или «по смеси» могут существенно отличаться в связи с изменением содержания окислителя в свежем заряде. При этом известно, что в газовых двигателях значения коэффициента наполнения «по воздуху» меньше, нежели коэффициент наполнения «по смеси». Это обстоятельство нельзя объяснить замещением части воздуха в свежем заряде газообразным топливом.

Так как коэффициент наполнения является относительной величиной и показывает ухудшение наполнения в сравнении с его «идеальным» значением, то снижение наполнения газовоздушной смеси, например, на 20 % означает, что на те же 20 % уменьшается и наполнение каждым из компонентов свежего заряда — воздухом и газообразным топливом. Действительно, при фиксированном значении коэффициента избытка воздуха доля воздуха в топливовоздушной смеси есть величина неизменная. Она одинакова и для смеси, в действительности поступившей в цилиндр, и для стоящего в знаменателе коэффициента наполнения «теоретического» количества смеси, которое могло бы разместиться в рабочем объеме цилиндра при условиях на входе. Следовательно, оди-

наковые гидравлические сопротивления и подогрев в равной степени ухудшают наполнение цилиндров как поступающей в цилиндры двигателя топливовоздушной смесью, так и ее компонентами — воздухом и газообразным топливом. Таким образом, снижение в рассматриваемом случае наполнения газовоздушной смесью на 20 % означает, что на те же 20 % уменьшается и наполнение каждым из компонентов свежего заряда — воздухом и газообразным топливом. И если коэффициент наполнения по смеси будет равным 80%, то точно таким же должен быть и коэффициент наполнения по воздуху — соотношение количеств воздуха, в действительности поступившего в цилиндр, и того количества, которое могло бы разместиться в рабочем объеме при параметрах на входе, будет таким же, как и соотношение соответствующих количеств СЗ.

Это можно показать и исходя из зависимости для определения коэффициента наполнения. Поскольку масса горючей смеси представляет собой сумму масс воздуха и топлива, то [38]

$$\eta_v^{\text{см}} = \frac{G_{\text{см}}}{G_{\text{см}}^{\text{теор}}} = \frac{G_{\text{в}} + \dfrac{G_{\text{в}}}{\alpha l_0}}{G_{\text{в}}^{\text{теор}} + \dfrac{G_{\text{в}}^{\text{теор}}}{\alpha l_0}} = \frac{G_{\text{в}}\left(1 + \dfrac{1}{\alpha l_0}\right)}{G_{\text{в}}^{\text{теор}}\left(1 + \dfrac{1}{\alpha l_0}\right)} = \frac{G_{\text{в}}}{G_{\text{в}}^{\text{теор}}} = \eta_v.$$

Однако опыт показывает, что коэффициент наполнения «по воздуху» при работе двигателя на газообразном топливе оказывается ниже, чем коэффициент наполнения «по смеси». Причина указанного расхождения будет рассмотрена ниже (п. 2.3.7).

В любом случае само существование нескольких определений коэффициента наполнения и, соответственно, различных его значений для одного и того же режима работы двигателя усложняет понимание физики протекающих в газообмене процессов, внося некую неопределенность в оценку качества газообмена. Поэтому вместо нескольких методик расчета, соответствующих различным коэффициентам наполнения, было бы предпочтительнее иметь единую унифицированную методику, учитывающую тип и молекулярную массу используемого топлива, коэффициент избытка воздуха, а также наличие или отсутствие рециркуляции.

1.3. Оптимальное наполнение

В процессе впуска заполняется объем, освобождаемый при перемещении поршня от ВМТ к НМТ. Но все (и в первую очередь мощностные) показатели двигателя должны зависеть от параметров свежего заряда и от степени заполнения им *полного объема* в конце процесса

впуска. Если в результате газообмена в цилиндре не остается остаточных газов, то рабочая смесь состоит из одного лишь свежего заряда, заполняющего объем V_a. При прочих равных условиях именно такому наполнению цилиндров двигателя должна соответствовать его максимальная мощность.

Оценка качества газообмена с помощью коэффициента наполнения достаточно условна, поскольку η_v сравнивает реальный цикловой расход воздуха с переменной величиной, представляющей собой количество воздуха в рабочем объеме цилиндра при его параметрах на входе двигатель.

Анализируя понятие коэффициента наполнения [22], авторы статьи приходят к выводу о том, что при отсутствии ОГ, подогрева и гидравлических сопротивлений идеальным было бы наполнение, при котором свежий заряд при параметрах на входе заполнял бы полный объем цилиндра, то есть сумму рабочего объема и объема камеры сгорания ($V_h + V_c$). В этом случае развиваемая двигателем мощность была бы выше, чем в случае заполнения при тех же условиях объема V_h. Очевидно, именно по этой причине в качестве предельного в статье предлагается рассматривать коэффициент наполнения, при котором свежим зарядом при параметрах на входе был бы полностью занят полный объем цилиндра V_a. Иными словами, за некий идеальный предел принимается тот случай, когда свежий заряд при параметрах на входе занимает полный объем цилиндра (что при отсутствии наддува имеет место на неработающем двигателе). В этом случае

$$\eta_v^{\text{предел}} = \frac{\rho_0 V_a}{\rho_0 V_h} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1},$$

то есть «предельный» коэффициент наполнения всегда превышает единицу.

В данном случае авторы сопоставляют два идеальных случая: числитель — когда при параметрах на входе в цилиндр неработающего двигателя свежим зарядом заполнено все надпоршневое пространство цилиндра, и знаменатель — когда при бесконечно медленном перемещении поршня происходит заполнение его рабочего объема. Возникает вопрос: а почему не сравнивать действительное наполнение работающего двигателя с идеальным наполнением полного объема? Но едва ли следует стремиться к подобному «предельному наполнению». В действительности свежий заряд в цилиндре работающего двигателя находится при параметрах точки «*a*» индикаторной диаграммы, то есть при давлении более низком и при температуре более высокой, чем соответствующие параметры на входе в цилиндры. Следовательно, при параметрах точки

«*а*» заряд должен занимать объем, существенно превосходящий полный объем цилиндра [43]. Но подобное возможно, лишь когда часть заряда перетекает в процессе продувки в выпускной трубопровод, что приводит к его потере.

*Ни полное заполнение свежим зарядом полного объема цилиндра, ни наличие или отсутствие потерь СЗ никак не могут оцениваться с помощью приводимых в учебниках и справочниках зависимостей для нахождения коэффициента наполнения***.** Более того, определение значения коэффициента η_v, соответствующего максимально достижимой мощности двигателя при заполнении свежим зарядом полного объема цилиндра в отсутствии остаточных газов, не имеет смысла ввиду того, что при изменяющихся атмосферных условиях, а также в двигателях с различными степенями сжатия величины такого оптимального η_v будут постоянно изменяться.

1.4. Условия рассмотрения процесса сжатия

Из сказанного можно сделать вывод, что величина η_v не дает объективного представления о наполнении цилиндров двигателя, то есть не характеризует наполнение однозначно и тем более в сочетании с коэффициентами γ_r и α никак не позволяет судить о составе образующейся в процессе наполнения рабочей смеси. ***По численному значению коэффициента наполнения нельзя судить об имеющихся резервах по наполнению и о значении η_v, соответствующем максимально достижимой мощности двигателя при данных параметрах свежего заряда на входе в цилиндры.***

В равной мере ограничена и информативная ценность коэффициента остаточных газов. Он лишь косвенно — через соотношение количеств ОГ и свежего заряда — характеризует относительное содержание остаточных газов в рабочей смеси. Это позволяет утверждать, что для оценки качества газообмена и прогнозирования основных показателей работы двигателя недостаточно знать такие традиционно определяемые показатели, как коэффициенты наполнения и остаточных газов, а также характеризующий состав горючей смеси коэффициент избытка воздуха.

В связи с тем что количество подаваемого в цилиндры топлива при одинаковых значениях коэффициента избытка воздуха α зависит от количества находящегося в цилиндре воздуха, в конечном итоге мощность двигателя будет определяться величиной парциального объема или объемной долей воздуха $\sigma_в$, которая наиболее полно и однозначно характеризует результаты наполнения при известных параметрах рабочей смеси в конце процесса впуска.

Действительно, **полный объем цилиндра равен объему рабочей смеси в конце такта впуска**. Но объем любой газовой смеси равен сумме парциальных объемов ее компонентов. В соответствии с определением, парциальным называется объем, который занимал бы отдельный компонент смеси при ее (смеси) параметрах. Следовательно, **полный объем цилиндра может быть представлен суммой парциальных объемов компонентов свежего заряда** (в свою очередь являющегося суммой парциальных объемов воздуха, топлива и рециркуляционных газов) и остаточных газов. Для 1 м^3 смеси парциальные объемы компонентов численно равны их объемным (мольным) долям.

При сравнении двух одинаковых двигателей с внешним смесеобразованием, работающих на бензине и газе при равных (в результате наддува) количествах киломолей поступившего в цилиндрах *воздуха* и равных значениях коэффициента α их мощность должна быть приблизительно одинаковой. Если же рассматривать те же два двигателя при одинаковых α и одинаковых условиях на входе, то, как показывает опыт, мощность газового двигателя будет меньше в связи с уменьшением количества поступившего в цилиндры воздуха и, соответственно, топлива. Еще более существенной разница в мощности будет в случае одинаковых значений объемной (мольной) доли свежего заряда $\sigma_{СЗ}$ при использовании рециркуляции. Являясь частью свежего заряда, нейтральные рециркуляционные газы занимают часть объема цилиндра, что приводит к уменьшению доли горючей смеси в смеси рабочей. Следовательно, при известном значении плотности заряда массовое наполнение более полно характеризуется долей воздуха, отражающей степень заполнения им цилиндра. **Доля же ОГ является лишь оценочным критерием степени внутренней рециркуляции.**

В результате можно констатировать, что использование объемных долей для оценки качества процессов газообмена позволяет оценивать массовое наполнение и характеризовать состав образующейся в цилиндрах рабочей смеси.

Учитывая все более широкое применение в ДВС газообразных топлив [9, 13] и рециркуляции, можно утверждать, что использование при расчете двигателя объемных долей — это не только и не столько удобный альтернативный способ оценки наполнения, сколько новые возможности для определения состава получаемой в результате смесеобразования рабочей смеси. Более того, известный состав рабочей смеси — это возможность более точной оценки всех показателей проектируемого двигателя.

Как известно, при изучении газовых законов все многообразие реальных рабочих тел заменяется идеальным газом. В этом случае отпадет

необходимость учета характерных особенностей каждого конкретного газа и вычленяется то общее, что присуще всем газообразным субстанциям. Точно так же исследование газообмена в поршневых ДВС представляется методически целесообразным начать с использования обобщенной, идеализированной модели двигателя. Это позволяет абстрагироваться от конструктивных особенностей конкретных моделей и тем самым упростить последующий анализ *общих* закономерностей. В таком идеализированном двигателе процесс выпуска завершается, а процесс впуска начинается в верхней мертвой точке (ВМТ). Соответственно, процесс наполнения цилиндра прекращается в нижней мертвой точке (НМТ). Подобный подход традиционно используется при выводе зависимостей для определения коэффициента наполнения.

При этом предполагается, что в последующем процессе сжатия увеличивается давление свежего заряда, количество которого эквивалентно действительному количеству, остающемуся в цилиндре к моменту закрытия впускных клапанов в точке «*a″*» (рис. 1.1). «Эквивалентные» параметры рабочей смеси в точке «*a*» индикаторной диаграммы должны быть выбраны таким образом, чтобы обеспечивалось упомянутое условие $G_a = G_{a''}$, и в результате политропного сжатия от точки «*a*» значения давления и температуры РС в точке «*a″*» равнялись бы действительным. Подобный подход позволяет получить зависимости для нахождения характеристик процесса наполнения — коэффициента наполнения или доли воздуха в рабочей смеси.

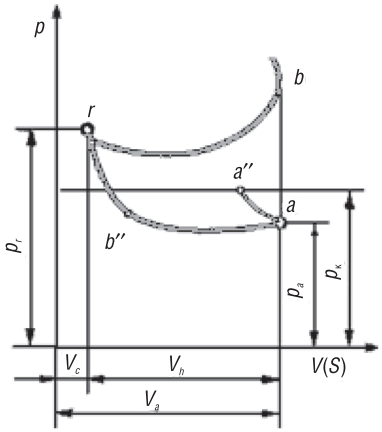

Рис. 1.1. Процесс газообмена в четырехтактном ПДВС

Таким образом, *«эквивалентными» назовем параметры РС в точке «а» индикаторной диаграммы, обеспечивающие при последующем политропном сжатии действительные значения* $p_{a''}$ *и* $T_{a''}$ *и участвующего в процессе сжатия количества РС.*

Нахождение эквивалентных параметров облегчается в случае анализа соотношения парциальных объемов компонентов рабочей смеси по завершении процессов газообмена [37].

Преимущества подобного подхода базируются на его универсальности и наглядности, что позволяет упростить рассмотрение влияния на процессы газообмена отдельных факторов.

Например, если речь идет о конце процесса расширения, то объем цилиндра будет равен сумме парциальных объемов всех компонентов отработавших газов при параметрах точки «*b*» индикаторной диаграммы. При нахождении же поршня в нижней мертвой точке (НМТ) в конце такта впуска полный объем цилиндра равен сумме парциальных объемов компонентов рабочей смеси при параметрах точки «*a*» индикаторной диаграммы, и это обстоятельство позволяет получить ряд зависимостей, упрощающих анализ факторов, влияющих на результаты процессов газообмена.

Итак, по завершении наполнения цилиндра свежим зарядом в общем случае в нем находится состоящая из воздуха и топлива горючая смесь, в также рециркуляционные и остаточные газы (ОГ).

Мощность двигателя зависит от количества сжигаемого в его цилиндрах топлива. В свою очередь, эта величина определяется количеством находящегося в цилиндрах воздуха. В связи с этим для каждого конкретного двигателя увеличение парциального объема воздуха при одинаковых параметрах рабочей смеси однозначно означает увеличение наполнения, а уменьшение парциального объема ОГ свидетельствует о лучшей очистке цилиндров. Следовательно, ***соотношение парциальных объемов, пропорциональных количествам киломолей соответствующих компонентов, в конечном итоге определяет в относительных единицах степень совершенства газообмена***. Это обстоятельство дает возможность получить простые математические зависимости для оценки результатов процессов газообмена как в четырех-, так и в двухтактных ДВС, основываясь исключительно на определении парциальных объемов компонентов рабочей смеси. Частное же от деления каждого из парциальных объемов на полный объем цилиндра V_a представляет собой значения соответствующих объемных долей, что в итоге дает представление о составе подготавливаемой к воспламенению рабочей смеси.

Поскольку на безразмерную величину коэффициента наполнения и на долю воздуха в рабочей смеси (РС) двигателей с наддувом и без него влияют одни и те же факторы, в дальнейшем все выводы (за исключением специально оговоренных) будут относиться к двигателям без наддува.

Как уже указывалось, мощность двигателя определяется в первую очередь количеством поступающего в цилиндры окислителя. Если же при равных значениях α и коэффициента наполнения *по свежему заряду* рассматривать бензиновый и газовый двигатели, то, как показывает опыт, мощность газового двигателя будет меньше в связи с меньшим его наполнением по воздуху.

Эта неоднозначность и существование различных выражений для определения коэффициента наполнения делают желательным поиск иных показателей для оценки качества процессов газообмена.

Масса смеси в объеме (будь то V_h или V_a) зависит от параметров заряда на входе в двигатель, а потому все зависимости, полученные на основе определения масс или количества киломолей, всегда привязаны к конкретным термодинамическим условиям. В то же время любой объем цилиндра — полный или рабочий — есть величина неизменная (по крайней мере для двигателей серийных). В связи с этим оценку результатов газообмена и расчет состава рабочей смеси целесообразно основывать на анализе соотношения парциальных объемов компонентов смеси в остающемся неизменным объеме. При этом равный объему рабочей смеси полный объем V_a является величиной более представительной, нежели V_h. По величине объемной доли свежего заряда (воздуха) $\sigma_{СЗ} = (V_{СЗ}/V_a)$ можно однозначно судить о наполнении, поскольку *доля* $\sigma_{СЗ}$ *характеризует степень заполнения полного объема цилиндра свежим зарядом.* В отличие от коэффициента наполнения величина объемной доли $\sigma_{СЗ}$ не зависит от условий на входе и определяется лишь соотношением компонентов рабочей смеси в цилиндре. При полном заполнении цилиндра свежим зарядом $\sigma_{СЗ} = 1$. Если $\sigma_{СЗ} > 1$, то это свидетельствует о наличии потерь свежего заряда в результате продувки. Произведение объемной доли $\sigma_{СЗ}$ на V_a и плотность заряда при параметрах точки «*a*» индикаторной диаграммы определяет массу находящегося в цилиндре свежего заряда.

Тест

1.1. Горючая смесь состоит из:

а) воздуха, топлива, рециркуляционных и остаточных газов;
б) воздуха и топлива;
в) воздуха, топлива и рециркуляционных газов;
г) воздуха, топлива и остаточных газов.

1.2. В общем случае свежий заряд состоит из:

а) воздуха, топлива, рециркуляционных и остаточных газов;
б) воздуха и топлива;
в) воздуха, топлива и рециркуляционных газов;
г) воздуха, топлива и остаточных газов.

1.3. В общем случае рабочая смесь состоит из:

а) воздуха, топлива, рециркуляционных и остаточных газов;
б) воздуха и топлива;

в) воздуха, топлива и рециркуляционных газов;
г) воздуха, топлива и остаточных газов.

1.4. Коэффициент наполнения характеризует:
а) долю воздуха в рабочей смеси;
б) степень заполнения цилиндра свежим зарядом;
в) массовую долю воздуха в рабочей смеси4
г) ухудшение реального наполнения в сравнении с идеальным.

1.5. Коэффициент остаточных газов есть:
а) отношение количества киломолей ОГ к количеству киломолей РС;
б) отношение количества киломолей ОГ к количеству киломолей СЗ;
в) отношение количества киломолей ОГ к количеству киломолей рециркуляционных газов;
г) массовая доля ОГ в РС.

1.6. Степень сжатия есть отношение:
а) давления в конце процесса сжатия к давлению в его начале;
б) рабочего объема цилиндра к объему камеры сгорания;
в) полного объема цилиндра к рабочему объему;
г) полного объема цилиндра к объему камеры сгорания.

1.7. Рабочим называется объем:
а) заключенный между головкой блока цилиндров и поршнем в момент его нахождения в НМТ;
а) заключенный между головкой блока цилиндров и поршнем в момент его нахождения в ВМТ;
в) описываемый при перемещениях поршня между ВМТ и НМТ;
г) равный отношению полного объема и степени сжатия.

1.8. В общем случае коэффициент избытка воздуха характеризует:
а) состав рабочей смеси;
б) долю воздуха в рабочей смеси;
в) состав горючей смеси;
г) состав свежего заряда.

1.9. Коэффициент избытка воздуха определяется по выражению:

а) $\alpha = \dfrac{G_{\text{в}}}{G_{\text{т}}}$;

б) $\alpha = \dfrac{G_{\text{т}}}{l_0 G_{\text{в}}}$;