

ИССЛЕДОВАНИЕ И РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ НЕРАВНОМЕРНОЙ ПОДАЧИ ТОПЛИВА В ЦИЛИНДРЫ ГАЗОДИЗЕЛЯ

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, (МАДИ):

Александр Фроимович Равич, к. ф.-м. н.,
Сергей Николаевич Богданов, профессор, д. т. н.,
Николай Валерьевич Осовин, к. т. н.,
Борис Павлович Загородских, профессор, д.т.н

Изложение результатов исследования по проблеме неравномерности процесса подачи газ-топлива в цилиндры газодизеля, возникающей при использовании стандартного газораспределительного коллектора. Представлена газодинамическая модель этого процесса, обеспечивающая построение полной картины динамики массового расхода газ-топлива в данном коллекторе. Приведены описание альтернативной конструкции газораспределительного коллектора, решающей проблему, а также расчётные и экспериментальные данные.

The presentation of results of research concerning the problem of non-uniformity of the process of gas-fuel supply to the cylinder of gas diesel, arising, when using the standard gas distribution manifold. The gas-dynamic model of the process, providing a complete picture of the dynamics of the construction of the mass flow rate of gas-fuel in the manifold is submitted. The description of an alternative construction of the gas distribution manifold, problem-solving, as well as the calculated and experimental data are represented.

Ключевые слова: газораспределительный коллектор, газовая динамика.

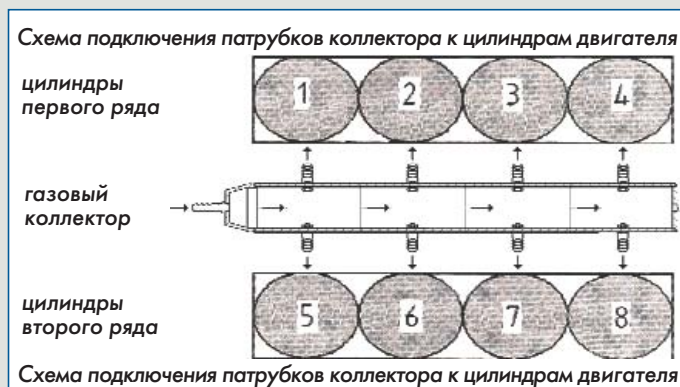
Keywords: gas-fuel, gas distribution manifold, gas dynamics.

Необходимым условием эффективной работы ДВС является равномерность подачи горючей составляющей и воздуха во все цилиндры двигателя. Это значит, что формируемые в процессах впуска заряды рабочей смеси должны содержать одинаковые количества данных компонентов. Неравномерная подача горючей составляющей или воздуха существенно влияет на работу двигателя, вызывая падение мощности и ухудшение топливной экономичности, сокращение срока службы деталей в отдельных цилиндрах (прогар поршней и клапанов, износ стенок цилиндра и т.д.) [2, 3, 4].

Проблема "равномеризации" рабочей смеси на впуске в цилиндрах ДВС особенно актуальна в связи с переоборудованием двигателей под газ-топливо. Задача решения этой проблемы возникла в ходе экспериментов с переоборудованием под газ-топливо двигателей ЯМЗ-238 тракторов К700. Было установлено, что используемый в газодизельных системах стандартный цилиндрический газораспределительный коллектор с выпускными патрубками, расположенными линейно-последовательно по образующим цилиндра канала коллектора, является источником неравномерной подачи газ-топлива в цилиндры двигателя.

Далее, в разделе 1. представлена полная газодинамическая картина массового расхода (в единицу времени) газ-топлива в стандартном газораспределительном коллекторе, объясняющая, почему в данном конструктивном исполнении возникает неравномерность подачи рабочей газовой смеси в цилиндры двигателя и как эта неравномерность проявляется количественно и по каким цилиндрам. При этом применяется методология, исходящая из известных законов газовой динамики [1].

В разделе 2. приведены описание альтернативной конструкции газораспределительного коллектора, решающей проблему, а также расчётные и экспериментальные данные.



Ниже приведена таблица-диаграмма чередования тактов в цилиндрах такого двигателя, нумерация цилиндров соответствует вышеприведенной схеме.

№ такта	№ 1/2 такта	№ цилиндра							
		1	2	3	4	5	6	7	8
1	1								
	2								
2	1								
	2								
3	1								
	2								
4	1								
	2								

Обозначения: впуск сжатие расширение выпуск конфигурация 1

о конфигурациях ниже (1.1.4., 1.1.5.).

Далее полагаем № патрубка = № соответствующего цилиндра

Обозначим:

$i (=1, \dots, 8)$ - номер цилиндра (патрубка),
 $j (=1, \dots, 4)$ - номер такта (хода поршня в полном рабочем цикле двигателя),
 $n (=1, 2)$ - номер 1/2 такта,
 (i, j, n) - позиция-процесс с "координатами" i, j, n на диаграмме;
 g_{ijn} - расход газ-топлива в процессе впуска, т.е. в (i, j, n) цилиндре с номером i в процессе 1/2 такта с номером n такта с номером j .

1.1. Расчёт g_{ijn} .

Все 8 строк диаграммы включают точно по два синхронных такта впуска. Это означает, что в процессе каждого (из 8) $1/2$ такта рабочего цикла осуществляют подачу газ-топлива в соответствующие цилиндры двигателя (активные) одновременно только и точно два (из 8) патрубка коллектора.

Отметим пары синхронных процессов $(i, n) = ((i_1, i, n), (i_2, i, n)), i_1 < i_2$ впуска в порядке следования $1/2$ тактов:

$(1, 1) = ((1, 1, 1), (8, 1, 1)), (1, 2) = ((1, 1, 2), (5, 1, 2)), (2, 1) = ((4, 2, 1), (5, 2, 1)), (2, 2) = ((2, 2, 2), (4, 2, 2)),$
 $(3, 1) = ((2, 3, 1), (6, 3, 1)), (3, 2) = ((3, 3, 2), (6, 3, 2)), (4, 1) = ((3, 4, 1), (7, 4, 1)), (4, 2) = ((7, 4, 2), (8, 4, 2)).$

Ниже каждая пара синхронных процессов впуска рассматривается как процесс в контрольном объёме [1] с одним входом-впускным штуцером, через который газ втекает, и двумя выходами-выпускными патрубками, через которые газ вытекает; искомые $g_{i1, jn}$ и $g_{i2, jn}$ в общем случае находятся из уравнений баланса энергии и расхода газа для газового потока в контрольном объёме [1].

1.1.0. Далее, в порядке постановки задачи вычисления искомых $g_{i1, jn}$ и $g_{i2, jn}$ обозначим условия, упрощающие последующие вычисления:

- 1) рассматриваем установившееся ламинарное движение газа;
- 2) предполагаем адиабатность процесса движения газа в коллекторе;
- 3) предполагаем также, что в плоских сечениях канала и выпускных патрубков параметры газа распределены равномерно, и векторы скорости движения

направлены перпендикулярно плоскостям соответствующих сечений.

1.1.1. Применительно к анализируемому контрольному объёму, с учетом 3) из 1.1.0., уравнение баланса энергии газового потока в данном контрольном объёме имеет вид:

$$A_{\phi_1} = Z_{\sigma_1} + Z_{\sigma_2} + W' + Q, \text{ где}$$

$\phi_1, \sigma_1, \sigma_2$ - рабочие сечения, соответственно, канала цилиндра коллектора;

A_{ϕ_1} - импульс энергии газа, втекающего через впускной штуцер;

$Z_{\sigma_1}, Z_{\sigma_2}$ - импульсы энергии газа, вытекающего через соответствующие выпускные патрубки;

W' - работа внешних сил над газом (сжатие, $W' > 0$) или работа газа (расширение, $W' < 0$), иначе $W' = 0$,

Q - приток теплоты (извне, подогрев, $Q > 0$) или отток теплоты (вовне, охлаждение, $Q < 0$), иначе $Q = 0$.

1.1.2. Уравнение баланса массового расхода газа в анализируемом контрольном объёме:

$$g_{\phi_1} = g_{\sigma_1} + g_{\sigma_2}, \text{ где:}$$

g_{ϕ_1}, g_{σ_1} и g_{σ_2} - расход газа через соответствующие рабочие сечения $\phi_1, \sigma_1, \sigma_2$

1.1.3. Из исходных условий 1) и 2) (1.1.1.) непосредственно следует:

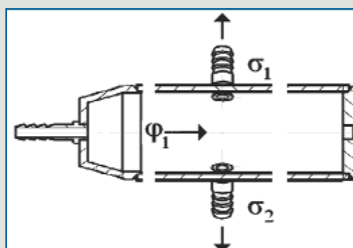
- 1) $W' = 0$,
- 2) $Q = 0$.

Таким образом, искомые неизвестные g_{σ_1} и g_{σ_2} определяются системой уравнений:

$$\begin{cases} A_{\phi_1} = Z_{\sigma_1} + Z_{\sigma_2} \\ g_{\phi_1} = g_{\sigma_1} + g_{\sigma_2} \end{cases} \quad g_{\phi_1} \text{ (считается известным - заданным) (1).}$$

Решение данной системы уравнений зависит от взаимного расположения выпускных патрубков σ_1, σ_2 . Возможны два варианта конфигурации этих патрубков.

1.1.4. Конфигурация №1 - патрубки σ_1, σ_2 расположены в одной плоскости, перпендикулярной оси цилиндра канала коллектора, рисунке справа; та-



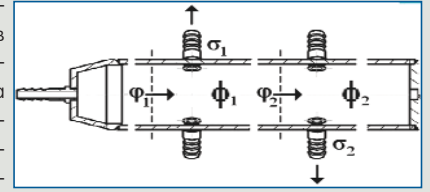
кая конфигурация наблюдается в трёх (из указанных выше 8) парах синхронных процессов впуска (1.1.) - (1,2), (3,1), (4,1) (соответствующие строки на диаграмме чередования тактов выше отмечены зелёным цветом);

искомое решение в этом случае:

$$g_{\sigma_1} = g_{\sigma_2} = g_{\phi_1} / 2$$

1.1.5. Конфигурация №2 -

патрубки σ_1, σ_2 находятся в разных рабочих сечениях цилиндра канала коллектора (схема на рисунке справа); эта конфигурация наблюдается в остальных 5 парах синхронных процессов впуска (1.1.) - (1,1), (2,1), (2,2), (3,2), (4,2);



Конкретизируем и уточним для этого случая обозначенную выше систему уравнений.

Уточнение требуется в связи с тем, что данная запись системы не отображает изменение динамики газового потока в канале коллектора после прохождения через рабочую плоскость канала, в которой находится первый по порядку следования выпускной патрубок.

Для того, чтобы учесть это изменение, представим исследуемый контрольный объём ϕ в виде последовательности двух элементарных контрольных объёмов ϕ_1 и ϕ_2 , разделённых секущей рабочей плоскостью ϕ_2 цилиндра канала коллектора так, что ϕ_1 включает один вход ϕ_1 , два выхода σ_1, σ_2 , а ϕ_2 - один вход ϕ_2 , один выход σ_2 . При этом, очевидно, $A_{\phi_2} = Z_{\phi_2} = Z_{\sigma_2}$,

Из предыдущего следует, что соответствующая система уравнений, определяющая искомые g_{σ_1} и g_{σ_2} будет иметь вид:

$$\begin{cases} A_{\phi_1} = Z_{\sigma_1} + Z_{\phi_2}, & Z_{\phi_2} = Z_{\sigma_2} \\ g_{\phi_1} = g_{\sigma_1} + g_{\phi_2}, & g_{\phi_2} = g_{\sigma_2} \end{cases} \quad (2)$$

Детализируем [1] полученную систему уравнений с учётом исходных условий 1.1.0:

$$A_{\phi_1} = h_{\phi_1} \cdot V_{\phi_1} \cdot \rho_{\phi_1} \cdot \phi = h_{\phi_1} \cdot g_{\phi_1}$$

$$Z_{\sigma_1} = h_{\sigma_1} \cdot V_{\sigma_1} \cdot \rho_{\sigma_1} \cdot \sigma = h_{\sigma_1} \cdot g_{\sigma_1}$$

$$Z_{\phi_2} = h_{\phi_2} \cdot V_{\phi_2} \cdot \rho_{\phi_2} \cdot \phi = h_{\phi_2} \cdot g_{\phi_2}$$

где ρ, V, h_0 - локальные параметры газового потока в рабочем сечении, соответственно, ρ - плотность, $V = g / (\rho \cdot s)$ - скорость, g - расход, s - площадь рабочего сечения газового потока, $h_0 = V^2/2 + h = V^2/2 + e + p/\rho$ - удельное полное теплосодержание (единицы массы),

$V^2/2$ - кинетическая энергия,

$h = e + p/\rho$ - ("классическое") удельное теплосодержание (энтальпия),

e - удельная внутренняя энергия, p - давление; ϕ, σ - площади рабочих сечений, соответственно, канала цилиндра коллектора, выпускных патрубков.

При этом из 1.1.0., 1), 2) следует:

1) $\rho = \text{const}, p = \text{const}$ (в коллекторе);

$$2) \quad e = \frac{1}{k-1} \cdot \frac{p}{\rho} \quad h = e + \frac{p}{\rho} = \frac{k}{k-1} \cdot \frac{p}{\rho}$$

Здесь k - показатель адиабаты.

Подстановка вышеуказанных выражений в систему уравнений (2) и последующее преобразование приводит к системе уравнений

$$\begin{cases} \Psi^2 \cdot g_{\sigma_1}^3 + g_{\varphi_2}^3 = g_{\varphi_1}^3 \\ g_{\sigma_1} + g_{\varphi_2} = g_{\varphi_1} \end{cases} \quad \text{здесь } \Psi = \varphi / \sigma$$

Решение этого:

где $g_{\sigma_1} = q_1 \cdot g_{\varphi_1}$ $g_{\varphi_2} = g_{\sigma_2} = q_2 \cdot g_{\varphi_1}$

$$q_1 = \frac{6}{\sqrt{3(4\Psi^2 - 1)} + 3} \quad q_2 = \frac{\sqrt{3(4\Psi^2 - 1)} - 3}{\sqrt{3(4\Psi^2 - 1)} + 3}$$

образом, в общем случае, для пары синхронных процессов впуска (1.1.)

а) в случае конфигурации №1 (1.1.4) $g_{i_1, in} = g_{i_2, in} = g_{\varphi_1} / 2$

б) в случае конфигурации №2 (1.1.5) $g_{i_1, in} = q_1 \cdot g_{\varphi_1}$ $g_{i_2, in} = q_2 \cdot g_{\varphi_1}$

Результирующая схема поцилиндрового расчёта расхода газ-топлива приведена в таблице ниже, g_{im} - расход газ-топлива в цилиндре с номером i, m - № 1/2 такта (такта впуска).

№ цилиндра	№ 1/2 такта впуска	
	1	2
1	$g_{11} = q_1 \cdot g_{\varphi_1}$	$g_{11} = q_1 \cdot g_{\varphi_1}$
2	$g_{21} = q_1 \cdot g_{\varphi_1}$	$g_{22} = g_{\varphi_1}$
3	$g_{31} = q_1 \cdot g_{\varphi_1}$	$g_{32} = g_{\varphi_1}$
4	$g_{41} = q_1 \cdot g_{\varphi_1}$	$g_{42} = q_2 \cdot g_{\varphi_1}$
5	$g_{51} = g_{\varphi_1} / 2$	$g_{52} = q_2 \cdot g_{\varphi_1}$
6	$g_{61} = g_{\varphi_1} / 2$	$g_{62} = q_2 \cdot g_{\varphi_1}$
7	$g_{71} = g_{\varphi_1}$	$g_{72} = q_1 \cdot g_{\varphi_1}$
8	$g_{81} = q_2 \cdot g_{\varphi_1}$	$g_{82} = q_2 \cdot g_{\varphi_1}$

Из вышеприведенной таблицы видно, что штатный газораспределительный коллектор не обеспечивает равномерный расход газ-топлива не только по цилиндрам, но и в процессе тактов впуска; на рисунке справа в графическом виде представлен результат расчёта поцилиндровой динамики среднего расхода газ-топлива для конкретного штатного коллектора с $g_{\varphi_1} = 10.8$ г/сек, $\varphi = 0.0022$ и $\sigma = 0.000028$ (м²).



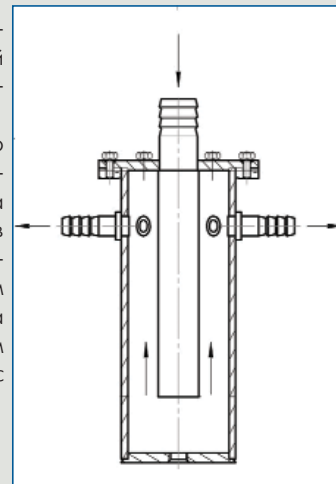
Следует отметить, что полученный график вполне коррелируется с полученной экспериментальным путём гистограммой температур выпускных газов.

2. Решение проблемы.

Альтернативой рассмотренному выше штатному газораспределительному коллектору, полностью решающей проблему равномерной подачи газ-топлива в цилиндры ДВС, является разработанная в СГАУ им. Н.И. Вавилова конструкция газораспре-

делительного коллектора с радиально расположенными в одной плоскости выпускными патрубками [5], рисунок справа.

Используя вышеизложенную методику анализа, легко установить, что, независимо от способа подключения выпускных патрубков предложенного газораспределительного коллектора к цилиндрам двигателя, расход газ-топлива на впуске в цилиндре с номером $i(=1,...,8)$, в процессе 1/2 такта с номером $m(=1,2)$ $g_{im} = g_{\varphi} / 2$.



ВЫВОДЫ.

1. Доказано и экспериментально подтверждено, что используемый в газодизельных системах традиционный газораспределительный коллектор с выпускными патрубками, расположенными линейно-последовательно по нормали вогне боковой поверхности цилиндра канала, не обеспечивает равномерную подачу газ-топлива в цилиндры двигателя.

2. Разработанная в СГАУ им. Н.И. Вавилова конструкция газораспределительного коллектора с радиально расположенными в одной плоскости выпускными патрубками обеспечивает равномерную подачу газ-топлива в цилиндры двигателя, независимо от способа подключения выпускных патрубков к цилиндрам.

Литература

1. Чёрный Г.Г. Газовая динамика. - М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988.
2. Генкин К.И. Газовые двигатели. - М.: Машиностроение., 1977.
3. Марков В.А., Козлов С.И. Топлива и топливоподача многоцилиндровых и газодизельных двигателей. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. - 296 с.
4. Гайворонский А. И., Богославцев Р. В. Теплонапряженность деталей дизеля, конвертируемого в газовый двигатель - М: Газовая промышленность., 2009, № 2.
5. Н.В.Осовин, В.В.Володин, Б.П.Загородских. Газовый коллектор: патент РФ № 123847, 2011.

Связь с автором: ravichaf@mail.ru

