

УДК 621.541

### ЗОЛОТНИКОВОЕ ВОЗДУХОРАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПНЕВМОДВИГАТЕЛЯ ГИБРИДНОЙ СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ АВТОМОБИЛЯ НА БАЗЕ БЕНЗИНОВОГО ДВИГАТЕЛЯ

**А.И. Воронков, доцент, к.т.н., С.С. Жилин, доцент, к.т.н.,  
И.Н. Никитченко, инженер, ХНАДУ**

*Аннотация.* Изложены принципы конвертирования бензинового четырехтактного двигателя в двухтактный пневмодвигатель с золотниковым воздухораспределением, описаны конструктивные особенности золотника и выбор основных его параметров.

*Ключевые слова:* поршневой пневмодвигатель, золотниковое воздухораспределение, индикаторная диаграмма.

### ЗОЛОТНИКОВИЙ ПОВІТРОРІЗПОДІЛ ПНЕВМОДВИГУНА ГІБРИДНОЇ СИЛОВОЇ УСТАНОВКИ АВТОМОБІЛЯ НА БАЗІ БЕНЗИНОВОГО ДВИГУНА

**О.І. Воронков, доцент, к.т.н., С.С. Жилін, доцент, к.т.н.,  
І.М. Нікітченко, інженер, ХНАДУ**

*Анотація.* Викладено принципи конвертування бензинового чотиритактного двигуна у двотактний пневмодвигун із золотниковим повітророзподілом, описано конструктивні особливості золотника і вибір основних його параметрів.

*Ключові слова:* поршневий пневмодвигун, золотниковий повітророзподіл, індикаторна діаграма.

### SLIDE-VALVE AIR DISTRIBUTION OF THE VEHICLE HYBRID POWER UNIT PNEUMATIC ENGINE ON THE BASIS OF GASOLINE ENGINE

**A. Voronkov, Associate Professor, Candidate of Technical Science,  
S. Zhylin, Associate Professor, Candidate of Technical Science,  
I. Nikitchenko, engineer, KhNAHU**

*Abstract.* The principles of gasoline four-stroke engine conversion into a two-stroke pneumatic engine equipped with valve air distribution are stated. The constructional features of the valve and its parameters choice are described.

*Key words:* piston pneumatic engine, valve air distribution, indicator diagram.

#### Введение

Одним из направлений улучшения экономических и экологических характеристик транспортных средств является создание гибридных силовых установок, в состав которых входят двигатели различных типов, включая и пневматический двигатель. Условия эксплуатации пневмодвигателя в составе гибридной силовой установки накладывают

специфические требования к его конструктивным и режимным параметрам.

Этот двигатель должен быть сравнительно компактным с экономичным расходом сжатого воздуха и возможностью работать в режиме компрессора для пополнения запаса сжатого воздуха и рекуперации энергии торможения транспортного средства.

Этим требованиям не отвечают выпускаемые в настоящее время пневмодвигатели, в частности, работающие в горнодобывающей промышленности. Поэтому на первом этапе создания гибридной силовой установки возникла необходимость создания пневмодвигателя на базе двигателя внутреннего сгорания с золотниковым воздухораспределением.

### Анализ публикаций

В настоящее время накоплен достаточно большой опыт по созданию и совершенствованию поршневых пневмодвигателей промышленного назначения. Так, в литературных источниках [1–4] отмечается, что для поршневого пневмодвигателя наиболее целесообразным является четырехпроцессный рабочий цикл. Он включает: наполнение, расширение, выпуск-выталкивание и обратное сжатие. Мертвый объем должен быть по возможности наименьшим.

Этот цикл пневмодвигателя реализуется благодаря применению золотникового воздухораспределения. Необходимо отметить, что фазы воздухораспределения выбраны таким образом, чтобы получить максимально возможную мощность пневмодвигателя.

Поэтому шахтные пневмодвигатели – это двигатели с практически полным наполнением цилиндра сжатым воздухом и малой степенью его расширения, что приводит к перерасходу сжатого воздуха, однако с этим мирятся, в связи с тем, что пневмодвигатели выполняют дополнительную функцию – воздухоснабжение шахтных разработок.

### Цель и постановка задачи

Целью исследования является создание работоспособной модели пневмодвигателя гибридной силовой установки автомобиля, стендовое исследование рабочего процесса, полученного путем конвертации ДВС в пневмодвигатель.

Для достижения данной цели необходимо решить следующие задачи:

- выбор и обоснование основных конструктивных параметров и фаз газораспределения золотника;
- создание системы золотникового воздухораспределения ПД;
- проведение экспериментального исследования ПД с золотниковым воздухораспределением.

### Объект исследования

Объектом исследования является рабочий процесс поршневого ПД для гибридной силовой установки автомобиля, организованной при помощи системы золотникового воздухораспределения.

### Конструктивные особенности пневмодвигателя

Базой пневмодвигателя является четырехцилиндровый четырехтактный карбюраторный двигатель воздушного охлаждения MeM3-968. Его основные конструктивные параметры:

|                  |  |
|------------------|--|
| диаметр цилиндра | $D = 76$ мм;   |
| ход поршня       | $S = 66$ мм;   |
| число цилиндров  | $i = 4$ ;  |
| компоновка       | $V$ -образная, с углом развала блоков цилиндров $90^\circ$ . |

Для конвертирования этого двигателя в пневмодвигатель возникла необходимость в значительном изменении коленчатого вала. В базовом двигателе используется крестообразный коленчатый вал с углом между кривошипами  $90^\circ$ .

При такой форме коленчатого вала и  $V$ -образной компоновке невозможно было реализовать двухтактный цикл пневмодвигателя с равномерным чередованием процессов в отдельных цилиндрах. Поэтому был применен плоский коленчатый вал с углом между кривошипами  $180^\circ$  и одной шатунной шейкой на два шатуна. Более подробно принципы конструирования коленчатого вала изложены в литературном источнике [5].

Вместо штатных головок цилиндров с клапанами и газовыми каналами использовались плоские индивидуальные крышки с центральным расположением штуцера для подвода и отвода воздуха. Крышки крепятся четырьмя шпильками. Газовый стык уплотняется медной прокладкой. Общий вид пневмодвигателя представлен на рис. 1.

Наиболее сложным и ответственным механизмом пневмодвигателя является механизм воздухораспределения. На первом этапе был принят золотниковый воздушный распределитель. Он значительно проще клапанного воздухораспределения, обеспечивает надежную синхронизацию работы отдельных цилиндров, однако имеет неизменность фаз воздухораспределения в процессе работы двигателя.



Рис. 1. Общий вид пневмодвигателя с золотниковым воздухораспределением

С целью уменьшения мертвого объема пневмодвигателя, положительно влияющего на работу цикла, но отрицательно – на удельный и часовой расход сжатого воздуха, золотниковый воздухораспределитель был размещен в непосредственной близости от крышек цилиндров в развале блока цилиндров. Был применен цепной привод золотника с использованием двухрядной цепи механизма газораспределения двигателя М-412 и двух одинаковых звездочек с 36 зубьями. Натяжение цепи регулировалось с помощью прокладок, устанавливаемых под корпус распределителя.

При проектировании золотникового распределителя возникает сложная проблема выбора проходных сечений воздушных каналов. С одной стороны, необходимо иметь достаточно большие проходные сечения, чтобы снизить гидравлические сопротивления при перетекании воздуха.

С другой стороны, большие проходные сечения увеличивают габариты распределителя и мертвый объем двигателя, который отрицательно сказывается на пневмодвигателе сжатого воздуха.

Проходное сечение  $f$  определялось из уравнения неразрывности воздушного потока в каналах

$$fw = F_n C_m,$$

где  $w$  – средняя скорость воздуха в каналах, м/с.

Для существующих пневмодвигателей  $w = 22\text{--}23$  м/с [1];

$$F_n = \frac{\pi D^2 \cdot 10^{-3}}{4} = 4,534 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2 \quad \text{– площадь}$$

$$\text{поршня; } C_m = \frac{S \cdot n \cdot 10^{-3}}{30} = 1,65 \text{ м/с – средняя}$$

скорость поршня.

Таким образом

$$f = \frac{F_n C_m}{w} = \frac{4,534 \cdot 10^{-3} \cdot 1,65}{22,5} = 0,3325 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3.$$

При условии применения цилиндрической формы впускного канала в распределителе, его диаметр составляет

$$d = \sqrt{\frac{4f}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,3325 \cdot 10^{-3}}{3,14}} = 20,6 \text{ мм.}$$

По данным литературных источников, отношение площади воздушного канала к площади поршня в пневмодвигателях должно составлять  $\delta \approx 8\%$  [2]. В нашем случае

$$\delta = \frac{f}{F_n} = \frac{0,3325 \cdot 10^{-3}}{4,534 \cdot 10^{-3}} = 0,0733,$$

т.е.  $\delta = 7,33\%$ .

Для проектирования элементов золотникового воздухораспределителя необходимо было выбрать рациональные фазы открытия и закрытия впускных и выпускных окон. Для их выбора использовалась программа для моделирования рабочего процесса пневмодвигателя, разработанная в ХНАДУ.

Разработанная программа позволяет рассчитать рабочий цикл пневмодвигателя при различных значениях: проходных сечений каналов, фаз воздухораспределения, частот вращения коленчатого вала, параметров воздуха (температура, давление) и т.д.

Кроме того, она позволяет определить такие важнейшие технико-экономические показатели, как мощность, крутящий момент, расход сжатого воздуха, среднее индикаторное и эффективное давление, литровая мощность. Для выбора фаз газораспределения была разработана программа расчетного моделирования. В этих расчетах изменялись следующие фазы:

$\varphi_v$  – начало открытия впускного окна до ВМТ;

$\varphi_1$  – закрытие впускного окна после ВМТ;

$\varphi_c$  – начало открытия выпускного окна до НМТ;

$\varphi_e$  – закрытие выпускного окна до ВМТ, а также давление воздуха на входе в диапазоне 0,5–1,5 МПа.

Как показали предварительные расчеты, частота вращения коленчатого вала практически не влияет на характер изменения параметров пневмодвигателя при изменении фаз воздухораспределения. Поэтому дальнейшие расчеты проводились при постоянной частоте вращения  $n = 600 \text{ мин}^{-1}$ , до которой раскручивается коленчатый вал при разгоне и постоянном движении автомобиля. Фазы  $\varphi_b$  и  $\varphi_1$  в дальнейшем в расчетах были неизменными.

Конструкция впускного канала золотникового распределителя автоматически задает длительность фазы наполнения. Она составляет  $58^\circ$  ПКВ ( $3^\circ$  до ВМТ и  $55^\circ$  после ВМТ).

Фаза  $\varphi_c$  имеет четкий экстремум для эффективной мощности двигателя и удельного расхода воздуха. Это связано с тем, что при уменьшении этого угла увеличивается степень расширения воздуха в цилиндре, что приводит к повышению мощности пневмодвигателя и удельного расхода воздуха.

При увеличении фазы закрытия выпускного окна  $\varphi_c$  мощность двигателя и удельный расход воздуха монотонно уменьшаются. Это связано с тем, что увеличивается длительность предварительного сжатия и воздух, входящий в цилиндр, начинает быстрее совершать полезную работу. При этом площадь индикаторной диаграммы уменьшается и, соответственно, уменьшается мощность двигателя. Поэтому при выборе фазы  $\varphi_c$  необходимо принимать компромиссное решение – достаточная мощность при допустимом расходе сжатого воздуха. В результате анализа расчетного исследования были приняты следующие фазы:  $\varphi_b = 3^\circ$  до ВМТ,  $\varphi_1 = 55^\circ$  после ВМТ,  $\varphi_c = 40^\circ$  до НМТ,  $\varphi_e = 100^\circ$  после НМТ.

Именно эти фазы легли в основу проектирования проточной части золотникового воздухораспределителя. При этом длительности отдельных процессов имеют такие значения:

|                        |                 |
|------------------------|-----------------|
| наполнение             | $58^\circ$ ПКВ  |
| расширение             | $85^\circ$ ПКВ  |
| предварительное сжатие | $77^\circ$ ПКВ  |
| выпуск-выталкивание    | $140^\circ$ ПКВ |
| Всего                  | $360^\circ$ ПКВ |

### Конструктивные особенности золотникового распределителя воздуха

Общий вид золотникового распределителя воздуха представлен на рис. 2.

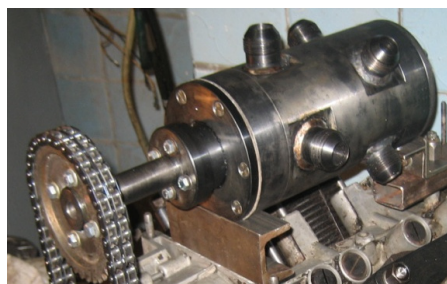


Рис. 2. Золотниковый воздухораспределитель

Он состоит из корпуса с внутренней цилиндрической поверхностью диаметром 80 мм. К корпусу приварен штуцер с условным проходным диаметром 20 мм под развальцовку медной трубки с внутренним диаметром 19 мм и толщиной стенки 1,5 мм. Один штуцер предназначен для подвода сжатого воздуха к золотнику, два штуцера – для отвода отработанного воздуха и четыре штуцера – для подвода воздуха в цилиндр и отвода его из цилиндра.

Внутри корпуса вращается золотник. Он установлен на трех шариковых подшипниках качения серии 1000911 ( $D = 80 \text{ мм}$ ,  $d = 55 \text{ мм}$ ,  $B = 13 \text{ мм}$ ). Зазор между корпусом и золотником составляет в среднем  $0,07 \text{ мм}$  на диаметр. Такой зазор между корпусом и золотником позволяет иметь незначительные утечки сжатого воздуха и малые потери механической энергии от трения. Это потребовало тщательной фильтрации сжатого воздуха, поступающего к золотниковому распределителю.

Золотник имеет два внутренних канала: канал подвода сжатого воздуха к цилиндрам и канал отвода отработанного воздуха. Второй канал имеет большую площадь поперечного сечения ( $d_{\text{вып}} = 26 \text{ мм}$ ). Это связано с тем, что выпуск осуществляется при меньшем перепаде давлений, а также выпуск из двух цилиндров частично перекрывается.

При четырехцилиндровом исполнении пневмодвигателя трудно обеспечить перекрытие фаз впуска воздуха в отдельные цилиндры. Поэтому этот двигатель без специальных мероприятий не может быть запущен из любого положения. Для обеспечения запуска на

золотнике выполнена небольшая проточка, объединяющая два цилиндра с напорной ветвью воздухопровода. Корпус закрыт с двух сторон крышками. Толщиной прокладки между крышкой и корпусом можно регулировать осевой люфт золотника. К золотнику крепится приводной вал со звездочкой цепного механизма. Механизм привода позволяет регулировать начальные (установочные) фазы воздухораспределения. Грубое регулирование осуществляется за счет смещения ведомой звездочки относительно коленчатого вала на одно звено цепи. Тонкое регулирование обеспечивается поворотом вала привода относительно золотника в пазах.

Испытания разработанного в ХНАДУ пневмодвигателя проводились на автомобиле «Таврия» с гибридной силовой установкой на беговых барабанах, а также на разработанном стенде. Полученные параметры пневмодвигателя свидетельствуют о его работоспособности.

На рис. 3 представлена индикаторная диаграмма, снятая на одном из режимов работы пневмодвигателя, и расчетная индикаторная диаграмма для этого режима.

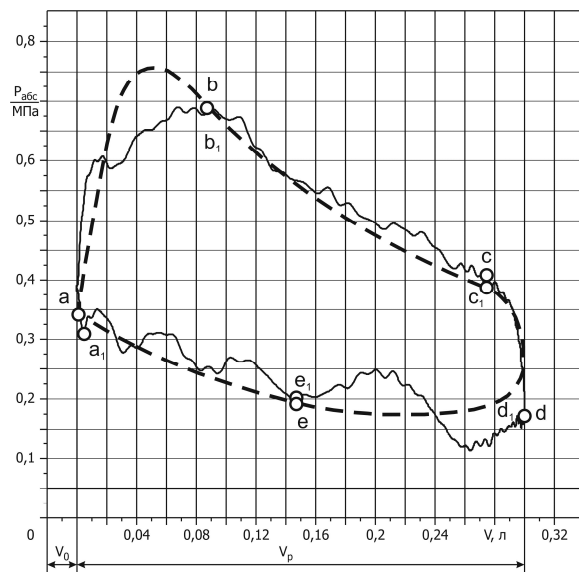


Рис. 3. Индикаторная диаграмма пневмодвигателя на режиме  $n = 600 \text{ мин}^{-1}$ ,  $p_{\text{вх}} = 0,9 \text{ МПа}$ : — — — экспериментальная индикаторная диаграмма; — — — расчетная индикаторная диаграмма

На диаграммах представлены характерные точки рабочего цикла пневмодвигателя: точка  $a$  ( $a_1$ ) – начало открытия впускного окна; точка  $b$  ( $b_1$ ) – конец закрытия впускного окна; точка  $c$  ( $c_1$ ) – начало открытия выпускного

окна; точка  $d$  ( $d_1$ ) – начало закрытия выпускного окна; точка  $e$  ( $e_1$ ) – конец закрытия выпускного окна. На участке впуска от начала открытия впускного окна до конца закрытия выпускного окна (точки  $a-b$ ) кривые идут параллельно. На участке расширения (точки  $b-c-d$ ) линии практически совпадают с показателем адиабаты  $n = 1,375$ . На участке  $d-e-a$  линии проходят эквидистантно. Коэффициент полноты индикаторной диаграммы  $\eta_{\text{п}} = 0,96$ .

## Выводы

В ходе проведенной работы были выполнены поставленные задачи:

1. Спроектирована и подготовлена система золотникового воздухораспределения пневмодвигателя для гибридной силовой установки автомобиля.
2. Выбраны и обоснованы основные конструктивные параметры золотника и фазы газораспределения.
3. Испытания на стенде пневмодвигателя подтвердили эффективность золотникового воздухораспределения ( $\eta_{\text{п}} = 0,96$ ).

## Литература

1. Зиневич В.Д. Поршневые и шестеренные пневмодвигатели горно-шахтного оборудования / В.Д. Зиневич, Л.А. Гешлин. – М.: Недра, 1982. – 200 с.
2. Борисенко К.С. Пневматические двигатели горных машин / К.С. Борисенко. – М.: Углетехиздат, 1958. – 204 с.
3. Дегтярев В.Н. Шахтные пневмомоторы / В.Н. Дегтярев, В.Н. Мялковский, К.С. Борисенко. – М.: Недра, 1979. – 176 с.
4. Туренко А.Н. О требованиях к конструкции и рабочему процессу пневмодвигателя для комбинированной энергоустановки автомобиля / А.Н. Туренко, В.А. Богомолов, Ф.И. Абрамчук и др. // Автомобильный транспорт: сб. науч. тр. – 2006. – Вып. 18. – С. 7–12.
5. Воронков А.И. Изменения эффективных параметров работы поршневого пневмодвигателя по скоростным характеристикам / А.И. Воронков, И.Н. Никитченко, Э.В. Тесленко и др. // Автомобильный транспорт: сб. науч. тр. – 2012. – Вып. 31. – С. 62–66.

Рецензент: Ф.И. Абрамчук, профессор, д.т.н., ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 1 октября 2013 г.