

УДК 621.5

ИЗМЕНЕНИЕ ЭКОНОМИЧЕСКИХ ИНДИКАТОРНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПНЕВМОДВИГАТЕЛЯ ПО СКОРОСТНЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ

А.И. Воронков, доц., к.т.н., Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет

Аннотация. Рассмотрены изменения индикаторных показателей поршневого пневмодвигателя $D/S = 76/66$ с золотниковым воздухораспределителем при его работе по скоростным характеристикам $p_{вх} = idem$ при неизменной температуре сжатого воздуха на входе.

Ключевые слова: поршневой пневмодвигатель с золотниковым воздухораспределением, рабочий процесс, индикаторные показатели, стендовые испытания, скоростная характеристика.

ЗМІНА ЕКОНОМІЧНИХ ІНДИКАТОРНИХ ПОКАЗНИКІВ ПНЕВМОДВИГУНА ЗА ШВИДКІСНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

О.І. Воронков, доц., к.т.н., Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. Розглянуто зміни індикаторних показників поршневого пневмодвигуна $D/S = 76/66$ із золотниковим повітророзподільником під час його роботи за швидкісними характеристиками $p_{вх} = idem$ за незмінної температури стиснутого повітря на вході.

Ключові слова: поршневий пневмодвигун із золотниковим повітророзподільником, робочий процес, індикаторні показники, стендові випробування, швидкісна характеристика.

VARIATION OF ECONOMIC INDICATOR INDEXES OF THE PNEUMATIC ENGINE ACCORDING TO SPEED PERFORMANCE

A. Voronkov, Assoc. Prof., Cand. Sc. (Eng.),
Kharkiv National Automobile and Highway University

Abstract. The variation of indicator indexes of the pneumatic engine $D/S = 76/66$ with the slide-valve air distributor when in operation according to speed characteristics $p_{ad} = idem$ without warming up of the compressed air intake are considered.

Key words: piston pneumatic engine with slide-valve air distribution, working process, indicator indexes, stand tests, speed description.

Введение

Рассматривается пневмодвигатель как составная часть автомобильной силовой установки или как самостоятельная автомобильная силовая установка. Эта проблема пока еще нуждается в исследованиях, как теоретических, так и экспериментальных, и анализе многолетнего опыта в данной области науки и техники.

Рассматриваемое в данной статье экспериментальное исследование лежит в русле накопления экспериментальных данных по этой проблеме.

Данное исследование является частью цикла работ, выполненных по изучению экономических и энергетических показателей работы четырехцилиндрового V -образного поршневого пневмодвигателя $D/S = 76/66$ золотникового воздухораспределения.

Анализ публикаций

На основании анализа публикаций [1–7] можно утверждать, что применение комбинированной энергетической установки (КЭУ) с пневмодвигателем выгодно, особенно на грузовых автомобилях малой и средней грузоподъемности и автобусах малого и особо малого класса с дизельными, бензиновыми и газовыми двигателями, эксплуатируемыми в городе.

Цель и постановка задачи

Целью работы является изучение рабочего процесса исследуемого пневмодвигателя путем использования экспериментальных методов.

Конкретные задачи этой экспериментальной работы состояли в следующем:

1. Провести стендовые испытания пневмодвигателя по снятию скоростных характеристик для давлений сжатого воздуха на входе в диапазоне, представляющем наибольший научный и практический интерес: $p_{вх} = 0,5; 0,7; 0,9$ и $1,1$ МПа, при неизменном уровне температуры подаваемого воздуха на входе $T_{вх} 293$ К, что соответствует температуре окружающей среды.
2. На всех режимах испытаний выполнить индицирование одного цилиндра с регистрацией всех внешних параметров работы пневмодвигателя.
3. На основании анализа полученных индикаторных диаграмм и других экспериментальных данных представить закономерности изменения скоростных характеристик $p_{вх} = \text{idem}$ основных индикаторных показателей рабочего процесса.

Результаты исследования

Рассмотрение индикаторных показателей, характеризующих экономические качества рабочего процесса пневмодвигателя, начнем с анализа изменения по скоростным характеристикам суммарного циклового $G_{ц\sigma}$, кг/цикл, и часового G , кг/ч, расхода сжатого воздуха. Заметим, что расход воздуха, измеряемый во время испытаний G , делится в пневмодвигателе на две части: утечки $G_{ут}$, кг/ч, и полезно использованный на осуществление рабочего процесса воздуха $G_{полез}$, кг/ч

$$G = G_{ут} + G_{полез}, \text{ кг/ч.} \quad (1)$$

Экономические показатели и КПД оцениваются по суммарному расходу воздуха G . А утечки надо знать, чтобы не только иметь представление, сколько сжатого воздуха теряется совершенно бесполезно, но и как эти потери сокращаются от внедряемых мероприятий по их снижению от режимов работы двигателя и т. д. Безусловно, надо стремиться, чтобы утечки воздуха были минимальными. Но бывают обстоятельства, когда утечки целенаправленно предусматриваются конструктивно. Так, например, в исследуемом четырехцилиндровом пневмодвигателе, где рабочие процессы цилиндров чередуются через 90° поворота коленчатого вала, процесс наполнения длится 55° .

Для того чтобы тронуться с места с любого положения вала, необходимо чтобы данный «рабочий» цилиндр через золотник был соединен с напорной магистралью сжатого воздуха в течение 90° поворота вала, а не 55° . Тогда, чтобы продолжить процесс наполнения цилиндра еще на 35° , по окружности вала золотника от канала впуска сделана канавка глубиной $0,5$ мм и шириной 1 мм в сторону, обратную вращению, т.е. уже на участке расширения, когда рабочая камера уже замкнута. Это обеспечивает почти мгновенный запуск двигателя с любого положения коленчатого вала.

После разгона пневмодвигателя время-сечение этих относительно узких и неглубоких канавок существенно уменьшается и они, как показал анализ снятых индикаторных диаграмм, практически не оказывают влияния на процесс расширения при высокой частоте вращения вала.

На рис. 1 и 2 представлены графики изменения по скоростным характеристикам циклового и часового расходов сжатого воздуха через пневмодвигатель при его подаче без подогрева на входе, т.е. при температуре окружающей среды 293 К. Несмотря на то, что часовой расход G , как видно из графиков, по каждой скоростной характеристике с ростом частоты вращения возрастает, и даже с заметно нарастающим темпом, цикловые массовые порции сжатого воздуха изменяются прямо противоположно. Это результат роста гидравлических потерь в процессе

наполнения при увеличении частоты вращения коленчатого вала.

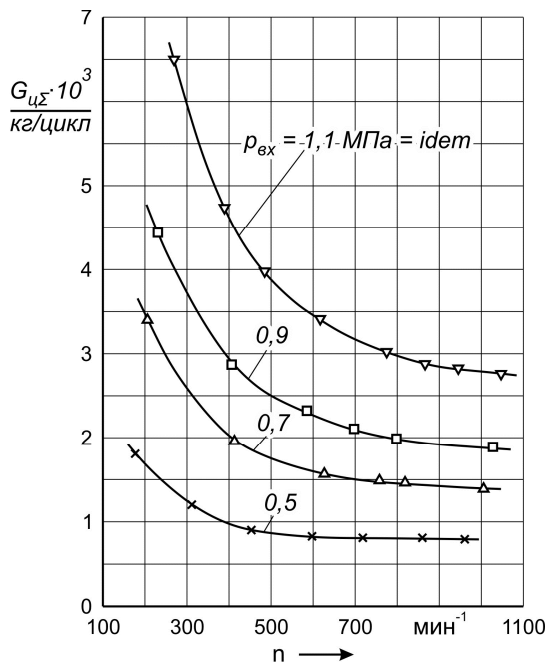


Рис. 1. Изменение по скоростным характеристикам циклового суммарного расхода сжатого воздуха $G_{цс}$ при его температуре на входе в пневмодвигатель $T_{вх} = 293$ К

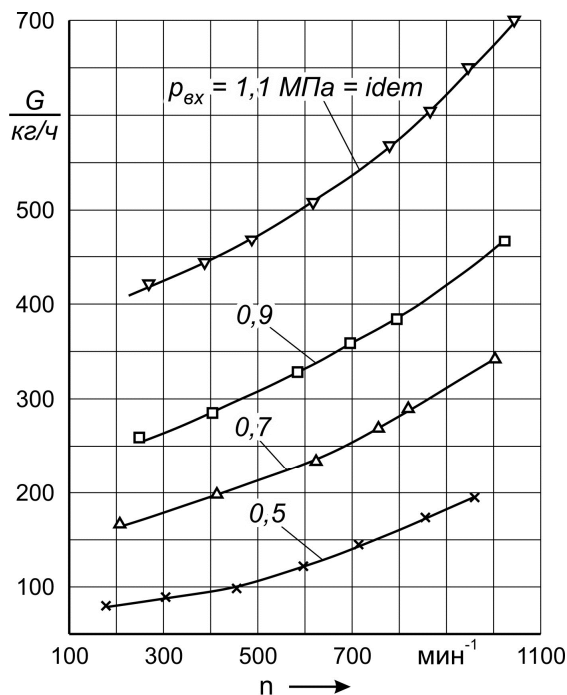


Рис. 2. Изменение часового расхода сжатого воздуха G при стендовых испытаниях пневмодвигателя по скоростным характеристикам без его подогрева на входе в систему золотникового воздухораспределения

Гидравлические потери, в свою очередь, нарастают с увеличением n и давления $p_{вх}$ вследствие роста скоростей движения воздуха в каналах золотниковой воздухораспределительной системы непосредственно перед цилиндром.

Об этом свидетельствуют представленные на рис. 3 экспериментальные зависимости отношения давлений $p_{наполн} / p_{вх} = \beta$, которые в значительной мере определяют скорость течения воздуха во впускных каналах. Здесь важно заметить, что отношение $p_{наполн} / p_{вх}$ отражает не только перепад давлений в переменном минимальном проходном сечении впускного канала золотниковой системы, но все гидравлические потери по длине этого канала до минимального проходного сечения и после него, а также все местные сопротивления впускного канала.

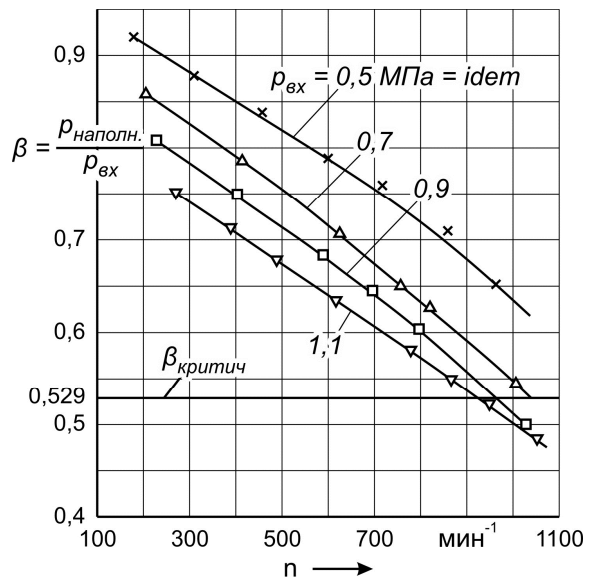


Рис. 3. Изменение по скоростным характеристикам пневмодвигателя отношения давлений $p_{наполн} / p_{вх}$, которое определяет скорость течения сжатого воздуха из напорной магистрали в цилиндр

На рис. 4 показано, как изменяется по скоростным характеристикам абсолютная величина утечек – часовой расход сжатого воздуха на утечки $G_{ут}$. Доля потерь на утечки оценивается коэффициентом утечек $\eta_{ут} = G_{ут} / G$.

Вместо графиков этого коэффициента на рис. 5 приведены данные об относительных

величинах потерь на утечки $\bar{G}_{ут}$, т. е. о доле (в процентах) расхода на утечки от поступившего в двигатель сжатого воздуха G

$$\bar{G}_{ут} = \frac{G_{ут}}{G} \cdot 100 \% \quad (2)$$

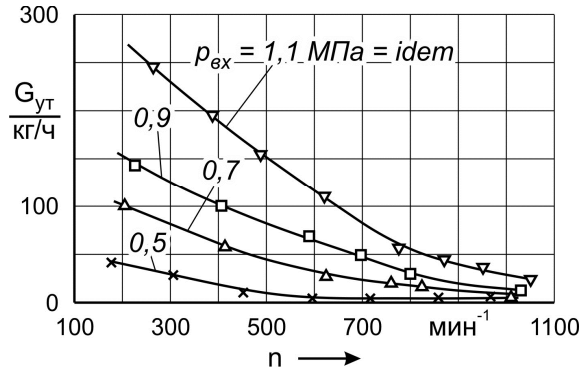


Рис. 4. Изменение часового расхода сжатого воздуха на утечки при стендовых испытаниях пневмодвигателя по скоростным характеристикам без его подогрева на входе в золотниковую систему воздухо-распределения

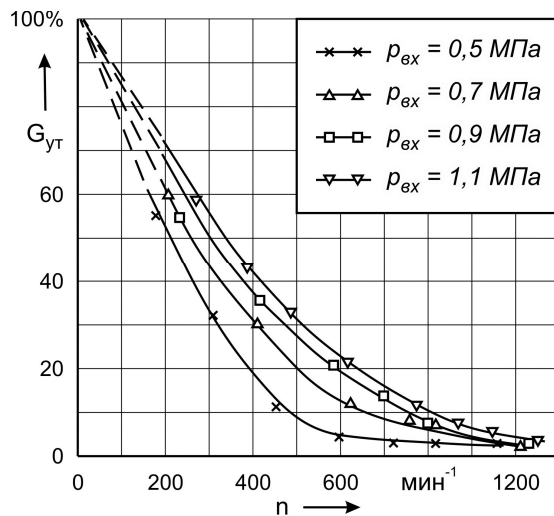


Рис. 5. Изменение процента потерь сжатого воздуха на утечки $G_{ут}$ при стендовых испытаниях пневмодвигателя по скоростным характеристикам без его подогрева на входе

Прежде всего заметим, что во всех случаях при $n=0$ весь поступающий в двигатель сжатый воздух уходит на утечки, т. е. $\bar{G}_{ут} = 100 \%$. На рабочих режимах на величину утечек существенно влияет давление подводимого воздуха $p_{вх}$, но основное влияние на утечки оказывает частота вращения n , так

как с ее ростом сокращается время-сечение щелей, через которые протекает воздух. Основные места утечек – это зазоры между вращающимся золотником и неподвижной золотниковой коробкой, в местах близости напорной магистрали и выпускной магистрали, в которой давление сравнительно мало отличается от атмосферного.

Из графиков рис. 5 видно, что, например, на частоте вращения 200 мин^{-1} на утечки уходит от 50% , при $p_{вх} = 0,5 \text{ МПа}$, до 70% , при $p_{вх} = 1,1 \text{ МПа}$, а на частоте 600 мин^{-1} утечки составляют уже только 5% , при $p_{вх} = 0,5 \text{ МПа}$, до 20% , при $p_{вх} = 1,1 \text{ МПа}$.

При частоте $n = 800 \text{ мин}^{-1}$ максимальные утечки снижаются уже до 10% , а при 1000 мин^{-1} $\bar{G}_{ут}$ снижается до $2-4 \%$. А то, что остается в двигателе после утечек, называется полезно использованным воздухом, который затрачен на осуществление рабочего процесса.

Как изменяется эта доля поступающего сжатого воздуха по скоростным характеристикам, приведено на рис. 6.

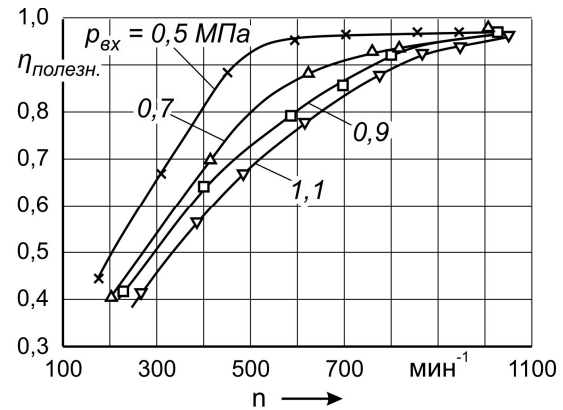


Рис. 6. Изменение коэффициента полезного использования сжатого воздуха $\eta_{полезн.}$ при стендовых испытаниях пневмодвигателя по скоростным характеристикам без его подогрева на входе в золотниковую воздухо-распределительную систему

На этих графиках показано изменение так называемого коэффициента полезного использования воздуха $\eta_{полезн.} = G_{полезн.} / G = 1 - \eta_{ут}$. Для более наглядного представления, как подаваемый в пневмодвигатель сжатый воз-

дух делится в количественном плане на полезно использованный и потерянный на утечки, на рис. 7 для скоростной характеристики $p_{вх} = 1,1 \text{ МПа} = idem$ приведен график-диаграмма, который можно не комментировать.

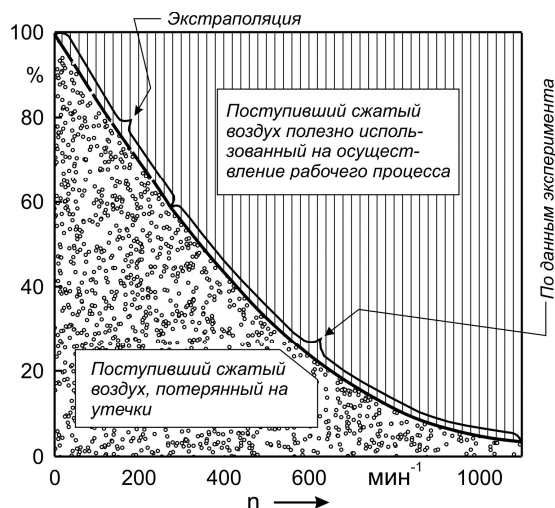


Рис. 7. Изменение по скоростной характеристике $p_{вх} = 1,1 \text{ МПа} = idem$ доли сжатого воздуха, полезно используемого на осуществление рабочего процесса пневмодвигателя, и доли сжатого воздуха, потерянного на утечки

Изменение удельной индикаторной работы $l_i = L_i / G_{ц\sigma} = N_i \cdot 3600 / G$, кДж/кг по скоростным характеристикам (рис. 8) показывает, как при различных давлениях $p_{вх}$ меняется, в зависимости от n , полнота преобразований потенциальной энергии поступающего сжатого воздуха в полезную индикаторную работу.

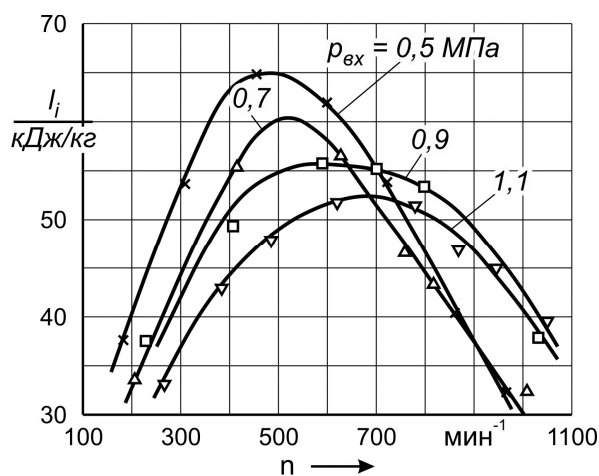


Рис. 8. Изменение удельной индикаторной работы сжатого воздуха l_i по скоростным характеристикам

Ведь в течение каждой скоростной характеристики изменяется только количество поступающего воздуха, а его термодинамические параметры на входе в пневмодвигатель остаются неизменными, следовательно, неизменна и его исходная удельная потенциальная энергия. Это означает, что если бы на каждом скоростном режиме рассматриваемое энергопреобразование происходило с одинаковой полнотой (одинаковым КПД), то удельный показатель l_i был бы неизменным.

В действительности, с ростом n при одних и тех же $p_{вх}$ и $T_{вх}$ меняются условия осуществления цикла: сокращается время протекания цикла, т. е. продолжительность всех процессов в цикле, увеличиваются скорости движения рабочего тела в каналах до и после рабочей камеры и в самой рабочей камере, т.к. растет средняя скорость поршня. Анализ показывает, что тут можно выделить два основных фактора влияния: утечки воздуха и гидравлические потери. Утечки, как уже было показано выше, изменяются от 100 %, при $n = 0$, до 2–3 %, при более высоких n (рис. 5), т. е. эти потери по мере роста n снижаются.

Гидравлические потери, как показал анализ снятых индикаторных диаграмм, с увеличением n только возрастают. Противоположное влияние этих двух основных факторов — источников потерь — и определяет характер изменения l_i в зависимости от n . Режимы максимальной удельной работы l_i^{max} , очевидно, являются режимами, где суммарные потери в процессах преобразования потенциальной энергии поступившего в двигатель сжатого воздуха в полезную индикаторную работу становятся минимальными. Так что эти скоростные режимы на рассматриваемых характеристиках работы пневмодвигателя являются и режимами минимальных удельных индикаторных расходов энергоносителя и максимальных индикаторных КПД.

Выводы

1. Экспериментально установлены и проанализированы закономерности изменения по четырем скоростным характеристикам $p_{вх} = 0,5; 0,7; 0,9$ и $1,1 \text{ МПа}$ основных индикаторных параметров поршневого пневмодвигателя с золотниковым воздухораспределением, характеризующих его экономические качества: циклового $G_{ц\sigma}$, кг, часового

суммарного G , кг/ч, часового на утечке $G_{ут}$, кг/ч, и часового полезно использованного на осуществление рабочего процесса воздуха $G_{полез}$, кг/ч, и относительные величины этих расходов, а также удельной индикаторной работы потребляемого сжатого воздуха l_i , кДж/кг.

2. Путем обработки снятых во время испытаний пневмодвигателя индикаторных диаграмм проанализированы условия возникновения основных гидравлических потерь в рабочем цикле – потерь в золотниковых и цилиндрических каналах в процессах наполнения и выпуска рабочего тела из цилиндра.

Литература

1. Автомобили с комбинированным энергетическим приводом: обзор разработок за рубежом // Автостроение за рубежом. – 2002. – № 3. – С. 5–11.
2. Гибридная силовая установка // Автостроение за рубежом. – 2002. – № 4. – С. 18.
3. 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.
4. Гібридні автомобілі / О. В. Бажинов, О. П. Смирнов, С. А. Серіков та ін. – Х: ХНАДУ, 2008. – 328 с.
5. Смирнов О. П. Характерні режими роботи гібридної енергетичної установки автомобіля / О. П. Смирнов, В. І. Калмиков // Автомобильный транспорт: сб. науч. тр. – 2006. – Вып. 18. – С. 13–15.
6. Жданов Е. Международный автосалон NAJAS-2010 в Детройте / Е. Жданов // Автостроение за рубежом. – 2010. – № 4. – С. 2–5.
7. Пневмодвигатель для автомобильной гибридной силовой установки / А.Н. Туренко, В.А. Богомолов, Ф.И. Абрамчук и др. // Автомобильный транспорт: сб. науч. тр. – 2009. – Вып. 24. – С. 7–10.

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

Статья поступила в редакцию 1 ноября 2014 г.