

УДК 621.5

ИЗМЕНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАБОТЫ ПНЕВМОДВИГАТЕЛЯ ПО СКОРОСТНЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ

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

Аннотация. Рассмотрены результаты экспериментального исследования рабочего процесса пневмодвигателя с золотниковым распределителем воздуха, без подогрева воздуха на впуске.

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

ЗМІНА ЕФЕКТИВНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ РОБОТИ ПНЕВМОДВИГУНА ЗА ШВИДКІСНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

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

Анотація. Розглянуто результати експериментального дослідження робочого процесу пневмодвигуна із золотниковим розподільником повітря, без підігріву повітря під час впуску.

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

CHANGE OF EFFECTIVE ENERGY INDEXES OF PNEUMATIC ENGINE OPERATION ASSERDING TO SPEED CHARACTERISTICS

A. Voronkov, Assoc. Prof., Ph. D. (Eng.),
Kharkov National Automobile and Highway University

Abstract. The effective indexes of the working process of the pneumatic engine with an air-distributor valve obtained according to the results of experimental research are presented. The influence of rotation frequency change of the pneumatic engine crankshaft on the value of the torque, power, average effective pressure of the rate of effective operation for different values of the inlet compressed air, shown by the change of power of mechanic losses as well as the mechanic ratio, depending on the frequency of pneumatic engine shaft rotation for different values of inlet compressed air pressure.

Key words: pneumatic engine, power of mechanic losses, average effective pressure, effective indexes.

Введение

Применение на автомобильном транспорте пневмодвигателя в составе комбинированной энергетической установки имеет большие перспективы [1–2, 4–6].

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

этой проблеме и относится к комплексу исследований, выполненных в лаборатории ДВС ХНАДУ.

Анализ публикаций

Проведя анализ публикаций [1–13], есть основание утверждать, что за весь более чем столетний период развития поршневого пневмодвигателя такое широкое и детальное

экспериментальное исследование его рабочего процесса выполнено впервые. Приведены результаты экспериментального исследования рабочего процесса пневмодвигателя с золотниковым распределителем воздуха при подаче сжатого воздуха в цилиндр с температурой окружающей среды (без подогрева на входе). Данное исследование является частью цикла работ, выполненных по изучению удельных экономических и энергетических показателей в поршневом пневмодвигателе D/S 76/66 при золотниковом воздухораспределении.

Цель и постановка задачи

Целью работы является оценка и анализ достигнутого уровня абсолютных значений, характеризующих энергетические показатели созданного на кафедре ДВС ХНАДУ поршневого пневмодвигателя с золотниковым воздухораспределением.

Задачей исследования является выявление из всего рабочего поля режимов, охватываемого четырьмя скоростными характеристиками, зоны наиболее энергетически целесообразных и благоприятных режимов для этого двигателя D/S = 76/66 как силового агрегата транспортного средства.

Экспериментальное исследование

На рис. 1 и 2 показано, как изменяются по скоростным характеристикам эффективный крутящий момент M_e , Н·м, и эффективная мощность N_e , кВт, пневмодвигателя. Во время испытаний параметры N_e , M_e определяются на основании непосредственно наблюдаемых показателей: нагрузки на тормозную электрическую балансирную машину P_n , кГ, и частоты вращения коленчатого вала n , мин⁻¹.

На графиках рис. 1 и 2 нанесены линии режимов максимальной мощности и режимов минимального удельного расхода сжатого воздуха (она же линия режимов максимального эффективного КПД) и заштрихована зона режимов наиболее экономичной работы пневмодвигателя. Конечно, самая экономичная работа могла бы происходить по линии режимов минимального удельного расхода энергоносителя, но, по-видимому, на практике это сложно осуществить для силовой установки транспортного средства.

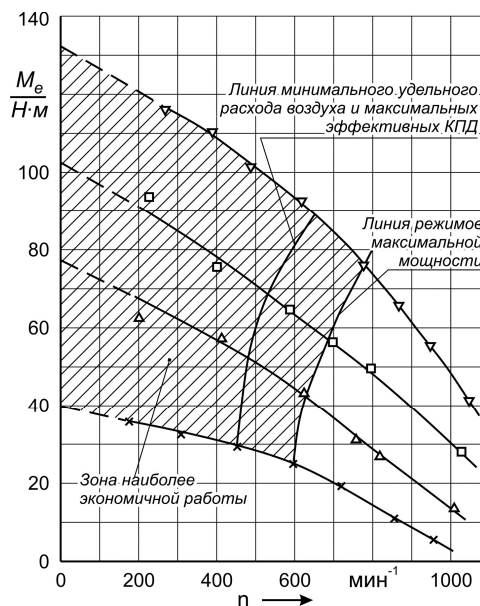


Рис. 1. Изменение эффективного крутящего момента пневмодвигателя M_e при его стендовых испытаниях по скоростным характеристикам без подогрева сжатого воздуха на входе

Эти два параметра характеризуют энергетический потенциал двигателя. Достигнут максимальный (номинальный) уровень эффективных мощностей пневмодвигателя при давлениях сжатого воздуха на входе 0,5–1,1 МПа, $N_e^{\text{ном}} = 1,57\text{--}6,21$ кВт и эффективный номинальный крутящий момент $M_e^{\text{ном}} = 25,0\text{--}76,4$ Н·м.

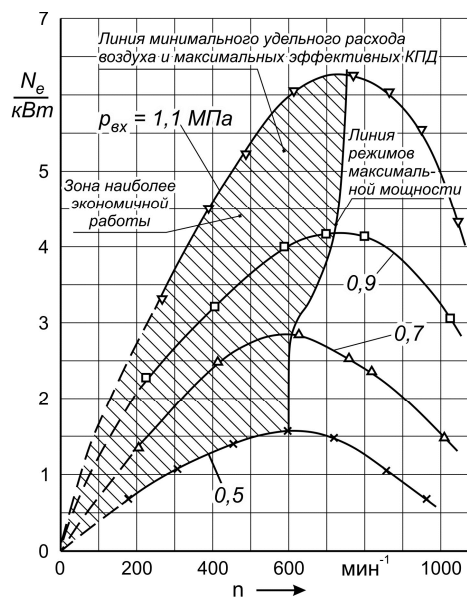


Рис. 2. Изменение по скоростным характеристикам эффективной мощности пневмодвигателя N_e при его стендовых испытаниях без подогрева сжатого воздуха на входе

Закономерности изменения по скоростным характеристикам среднего эффективного давления p_e представлены на рис. 3. Они полностью идентичны закономерностям эффективного крутящего момента $M_e(p_{вх}; n)$, так как отношение p_e / M_e всегда для данного двигателя const.

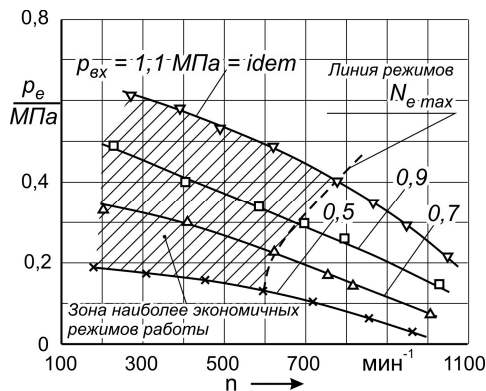


Рис. 3. Изменение среднего эффективного давления p_e по скоростным характеристикам при испытании пневмодвигателя без подогрева сжатого воздуха на входе

Для режимов максимальной (номинальной) мощности пневмодвигателя величина среднего эффективного давления изменяется от $p_e = 0,131$ МПа при $p_{вх} = 0,5$ МПа до $0,401$ МПа при $p_{вх} = 1,1$ МПа (рис. 3). Для сравнения укажем, что для номинальной мощности ДВС МеМЗ-968, равной $29,4$ кВт (базовая модель нашего пневмодвигателя), среднее эффективное давление составляет $0,67$ МПа [8].

На графиках $p_e(p_{вх}; n)$ также изображена линия режимов N_e^{max} и обозначена зона наиболее целесообразных и экономичных режимов работы пневмодвигателя. Изменение по скоростным характеристикам удельной эффективной работы l_e , кДж/кг, представлено на рис. 4.

При работе пневмодвигателя по одной и той же скоростной характеристике сжатый воздух подводится при одном и том же давлении $p_{вх}$ и одной и той же температуре $T_{вх}$, т. е. одного и того же энергетического качества, одной и той же удельной потенциальной энергии. А используются эти потенциальные возможности энергоносителя на разных режимах скоростной характеристики по-разному. Здесь действуют в основном два

решающих фактора: утечки и газодинамические потери, а также механические потери энергии.

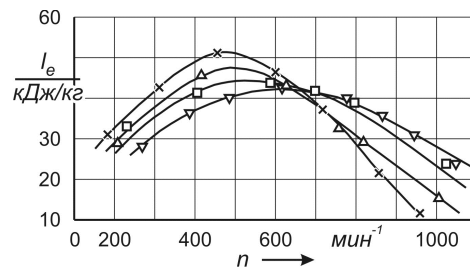


Рис. 4. Изменение по скоростным характеристикам удельной эффективной работы l_e , кДж/кг

С изменением частоты вращения n эти факторы изменяются прямо противоположно: с увеличением n утечки, как уже было рассмотрено выше, изменяются от 100% при $n = 0$ до $2-3\%$ – при n_{max} , а газодинамические (гидравлические) потери, как уже было показано при анализе индикаторных диаграмм, напротив – при увеличении n неуклонно возрастают. Увеличиваются с ростом n и механические потери в пневмодвигателе.

Такие двухфакторные функции, как известно, имеют максимум, что и наблюдается в закономерности $l_e(p_{вх}; n)$. Из рис. 4 видно, что с увеличением давления $p_{вх}$ влияние газодинамических и механических потерь увеличивается.

На рис. 5 и 6 представлены данные об изменениях по скоростным характеристикам мощности механических потерь пневмодвигателя N_m , кВт, и механического КПД η_m . На графиках изображена линия режимов максимальной мощности N_e^{max} и слева от этой линии обозначена зона наиболее целесообразных и экономичных режимов работы пневмодвигателя.

Мощность механических потерь N_m (рис. 5) возрастает при увеличении давления на входе $p_{вх}$ и при росте частоты вращения n воспринимается как естественное явление: возрастает давление в цилиндре и, как следствие, увеличиваются силы, действующие на поршень от давления газов, возрастают силы инерции; все это сопровождается ростом сил, действующих в трущихся парах кривошипно-шатунного механизма и цилиндрикопоршневого узла, растут и относи-

тельные скорости трущихся деталей, а значит, и увеличиваются затраты энергии на преодоление сил трения.

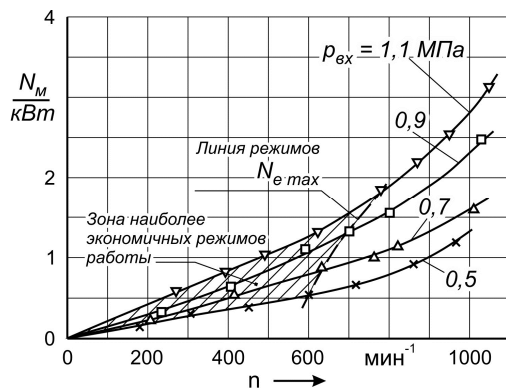


Рис. 5. Изменение по скоростным характеристикам мощности механических потерь пневмодвигателя N_M при его стендовых испытаниях без подогрева сжатого воздуха на входе

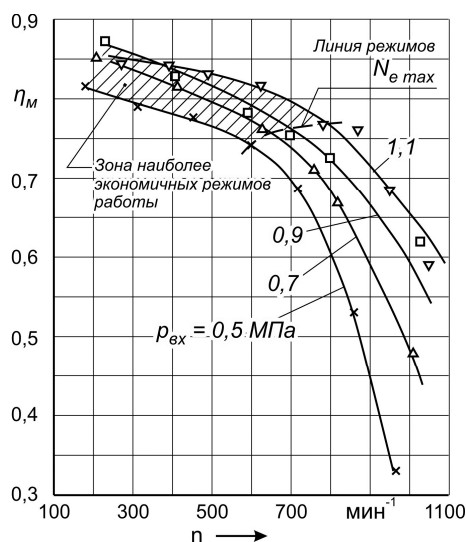


Рис. 6. Изменение по скоростным характеристикам механического КПД пневмодвигателя η_M при его стендовых испытаниях без подогрева сжатого воздуха на входе

Следует, однако, обратить внимание на существующие, казалось бы, противоречия: при неизменных частотах вращения $n = \text{const}$ с ростом давления сжатого воздуха на входе и возрастании мощности механических потерь (рис. 5) механический КПД η_M не падает (рис. 6), а наоборот, весьма существенно возрастает. Так, например, при $n = 600 \text{ мин}^{-1}$ увеличение $p_{\text{вх}}$ с 0,5 до 1,1 МПа вызывает рост мощности механических потерь N_M с 0,54 до 1,25 кВт, а механический КПД не только не снижается, а возрастает с

0,74 до 0,82. Это, на первый взгляд противоречивое, обстоятельство имеет закономерное объяснение: с увеличением $p_{\text{вх}}$, наряду с ростом мощности механических потерь N_M , в еще большей степени возрастают и мощности индикаторная N_i и эффективная N_e , и из-за этого отношение мощностей N_M/N_e существенно падает, что приводит к возрастанию η_M .

Выводы

Выполнено широкое экспериментальное исследование рабочего процесса созданного на кафедре ДВС ХНАДУ поршневого четырехцилиндрового V-образного пневмодвигателя с золотниковым воздухораспределением на основе его стендовых испытаний по четырем скоростным характеристикам при давлениях сжатого воздуха на входе $p_{\text{вх}} = 0,5; 0,7; 0,9; 1,1 \text{ МПа}$ и его температуре на входе $T_{\text{вх}} = 293 \text{ К}$.

Выявлены из всего рабочего поля режимов, охватываемого четырьмя скоростными характеристиками, зоны наиболее целесообразных, наиболее экономичных и благоприятных режимов для этого двигателя как силового агрегата транспортного средства.

Достигнутый максимальный (номинальный) уровень эффективных мощностей пневмодвигателя при давлениях сжатого воздуха на входе 0,5–1,1 МПа, $N_e^{\text{НОМ}} = 1,57\text{--}6,21 \text{ кВт}$ и эффективного номинального крутящего момента $M_e^{\text{НОМ}} = 25,0\text{--}76,4 \text{ Н}\cdot\text{м}$, а также пусковой момент под нагрузкой $M_e^{\text{пуск}} = 40\text{--}132 \text{ Н}\cdot\text{м}$ показывают, что, судя по экспериментальным данным наших исследований, силовой агрегат с такими энергетическими параметрами вполне применим для некоторых транспортных средств.

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 автомоби-

- ля / 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. Борисенко К.С. Пневматические двигатели горных машин / К.С. Борисенко. – М.: Углетехиздат, 1958. – 208 с.
 8. Зеленецкий С.Б. Ротационные пневматические двигатели / С.Б. Зеленецкий, Е.Д. Рябов, А. Г. Микеров. – Л.: Машиностроение, 1976. – 240 с.
 9. Дегтярев В.И. Шахтные пневмоторы / В.И. Дегтярев, В.И. Мялковский, К.С. Борисенко. – М.: Недра, 1979. – 192 с.
 10. Зиневич В.Д. Поршневые и шестерные пневмодвигатели горно-шахтного оборудования / В.Д. Зиневич, Л.А. Гешлин. – М.: Недра, 1982. – 200 с.
 11. Муратов В.А. Пневмопривод в отечественных и зарубежных горнорудных машинах / В.А. Муратов, Л.И. Пирогов, И.Г. Чернилов. – М.: НИИинформтяжмаш, 1970. – 372 с.
 12. Ильичев А.С. Рудничные пневматические установки / А.С. Ильичев. – М.: Углетехиздат, 1953. – Т. 1. – 632 с.
 13. 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.
- References**
1. Avtomobili s kombinirovannym energeticheskim privodom: obzor razrabotok za rubezhom [Vehicles with combined power unit: survey of developments abroad]. *Avtostroenie za rubezhom*, 2002, no. 3. pp. 5–11.
 2. Gibridnaja silovaja ustanovka [Hybrid power unit] *Avtostroenie za rubezhom*, 2002. no. 4. p.18.
 3. Turenko A.N., Bogomolov V.A., Abramchuk F.I. O trebovaniyah k konstrukcii i rabochemu processu pnevmodvigatelja dlja kombinirovannoj energoustanovki avtomobilja [On requirements to design and operation process of the pneumatic engine for combined vehicle power unit]. *Avtomobil'nyj transport: sb. nauch. tr.*, 2006, Vol. 18. pp. 7–12.
 4. Bazhynov O.V., Smirnov O.P., Syerikov S.A. *Hibrydni avtomobili* [Hybrid vehicles]. Kharkov, KhNADU Publ., 2008. 328 p.
 5. Smirnov O.P., Kalmikov V.I. Harakterni rezhimi roboti gibridnoj energetichnoj ustanovki avtomobilja [Specific operation modes of the vehicle power unit]. *Avtomobil'nyj transport: sb. nauch. tr.*, 2006, Vol. 18. pp. 13–15.
 6. Zhdanov E. Mezhdunarodnyj avtosalon NAJAS-2010 v Detrojte [International Motor Show NAJAS – 2010 in Detroit]. *Avtostroenie za rubezhom*, 2010, no. 4, pp. 2–5.
 7. Borisenko K.S. *Pnevmaticheskie dvigateli gornyh mashin* [Mining machine pneumatic engine]. Moscow, Ugletekhizdat Publ., 1958. 208 p.
 8. Zeleneckij S.B., Rjabov E.D., Mikerov A.G. *Rotacionnye pnevmaticheskie dvigateli* [Rotary pneumatic engines.]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1976. 240 p.
 9. Degtjarev V.I., Mjalkovskij V.I., Borisenko K.S. *Shahtnye pnevmotory* [Mine pneumatic motors.]. Moscow, Nedra Publ., 1979. 192 p.
 10. Zinevich V.D., Geshlin L.A. *Porshnevye i shesternye pnevmodvigateli gorno-shahtnogo oborudovanija* [Piston and gear pneumatic engines of mining equipment.]. Moscow, Nedra Publ., 1982. 200 p.
 11. Muratov V.A., Pirogov L.I., Chernilov I.G. *Pnevmoпривод v otechestvennyh i zarubezhnyh gornorudnyh mashinah* [Pneumatic actuator in domestic and foreign mining machines.]. Moscow, NIInformtjazhmash, 1970. 372 p.
 12. Il'ichev A.S. *Rudnichnye pnevmaticheskie ustanovki* [Mining air installation]. Moscow, Ugletekhizdat Publ., 1953, T. 1, 632 p.
 13. Turenko A.N., Bogomolov V.A., Abramchuk F.I. Pnevmodvigatel' dlja avtomobil'noj gibridnoj silovoj ustanovki [Pneumatic engine for vehicle hybrid powerplant]. *Avtomobil'nyj transport: sb. nauch. tr.*, 2009, Vol. 24. pp. 7–10.
- Рецензент: Ф.И. Абрамчук, профессор, д.т.н., ХНАДУ.
- Статья поступила в редакцию 8 июня 2015 г.