

УДК 621.5

ИЗМЕНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ ЭКОНОМИЧЕСКИХ 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 экономические показатели.

ЗМІНА ЕФЕКТИВНИХ ЕКОНОМІЧНИХ 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, ефективні економічні показники.

CHANGE OF EFFECTIVE ECONOMIC INDICATORS OF THE WORK OF PISTON AIR MOTOR BY SPEED RECOMMENDATION

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

Abstract. The results of experimental research of the air motor working process with the slide-valve air distributor without warming up the air on admittance are considered.

Key words: piston air motor with slide-valve air distribution, working process, stand tests, speed description, corrective economic indicators.

Введение

Рассматриваемое в данной статье экспериментальное исследование лежит в русле накопления экспериментальных данных по работе с автомобильными пневмодвигателями.

Применение пневмодвигателя на автомобильном транспорте актуально и имеет перспективу [1–2, 4–6]. Однако эта проблема нуждается в исследованиях.

Анализ публикаций

На основании анализа публикаций [1–13] можно сделать вывод, что такое всестороннее экспериментальное исследование рабочего процесса автомобильного пневмодвигателя 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).

Цель и постановка задачи

Целью работы является получение эффективных показателей, характеризующих экономические качества созданного на кафедре ДВС ХНАДУ поршневого пневмодвигателя с золотниковым воздухораспределением $S/D = 76/66$.

Задачей исследования является определение наиболее экономичных и благоприятных режимов исследуемого двигателя при изменении удельного эффективного расхода топлива и эффективного КПД.

Экспериментальное исследование

Данное исследование является частью цикла работ, выполненных по изучению удельных экономических и энергетических показателей в поршневом пневмодвигателе $D/S 76/66$ при золотниковом воздухораспределении.

Удельный эффективный расход энергоносителя – сжатого воздуха g_e , кг/(кВт·ч) и эффективный адиабатический КПД – это параметры, характеризующие экономическую эффективность пневмодвигателя, качество его рабочего процесса.

Наиболее «ощутимым» и зримым показателем экономичности двигателя является, конечно, эффективный удельный расход сжатого воздуха. Изменения названных параметров по снятым скоростным характеристикам показаны на рис. 1, 2.

Характерно, что кривые изменения всех этих параметров для всех скоростных характеристик имеют экстремум, т. е. точку наиболее высокой экономичности. Каждая скоростная характеристика имеет один такой режим работы двигателя, где наиболее высокие эффективные КПД $\eta_{e ад}^{max}$ и самый низкий эффективный удельный расход сжатого воздуха g_e^{min} .

Заметим, что при отклонении от линии g_e^{min} в обе стороны мы теряем в экономичности, но при отклонении влево мы теряем еще в скорости движения и в мощности двигателя, но увеличиваем его крутящий момент, т. е. его тяговые способности; при отклонении вправо от этой линии мы проигрываем не

только в экономичности, но и в крутящем моменте, зато выигрываем в скорости движения и первое время – в мощности (мощность растет только до линии N_e^{max} , а далее она падает).

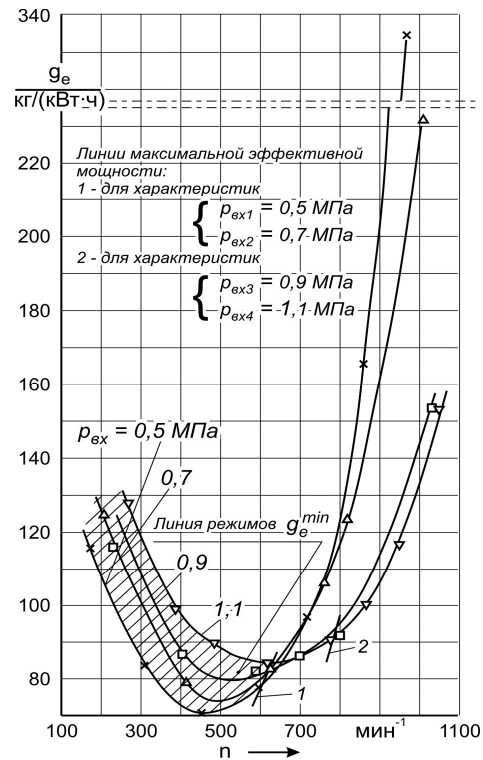


Рис. 1. Изменение удельного эффективного расхода сжатого воздуха g_e при стендовых испытаниях пневмодвигателя по скоростным характеристикам без его подогрева на входе в золотниковую воздухораспределительную систему

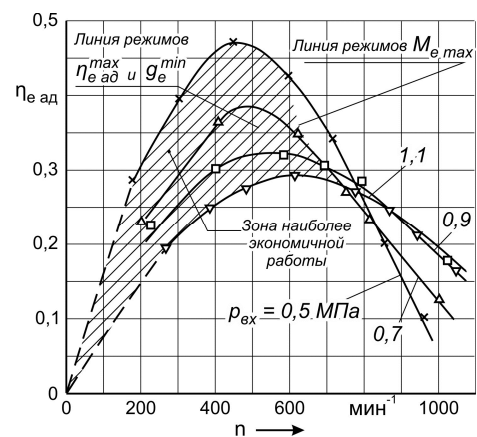


Рис. 2. Изменение по скоростным характеристикам эффективного адиабатического КПД пневмодвигателя $\eta_{e ад}$, полученное при его стендовых испытаниях без подогрева сжатого воздуха на входе в золотниковую воздухораспределительную систему

А вот при работе в зоне правее линии N_e^{\max} ухудшаются все силовые и экономические показатели, причем наиболее интенсивно растут удельный и часовой расход воздуха, но зато возрастает частота вращения вала двигателя. Так что в этой неблагоприятной зоне режимов по-видимому следует работать только в тех крайних случаях, когда надо увеличить скорость движения, как говорится, любой ценой.

Из экспериментальных данных графиков рис. 1, 2 следует, что наиболее экономично, с наибольшим эффективным КПД пневмодвигатель работает при самом низком давлении подаваемого сжатого воздуха $p_{вх1} = 0,5$ МПа – это режим работы $n = 455$ мин⁻¹, $N_e = 1,41$ кВт. На этом режиме удельный расход энергоносителя $g_e^{\min} = 70,9$ кг/(кВт·ч) и эффективный КПД $\eta_{e ад} = 0,468$. На этом режиме часовой расход энергоносителя $G = 100$ кг/ч. По мере повышения давления на входе $p_{вх}$ растет удельный g_e^{\min} и часовой G расход сжатого воздуха, но многократно растет и эффективная мощность двигателя N_e .

Для скоростной характеристики с самым высоким давлением на входе $p_{вх4} = 1,1$ МПа (давление возросло в 2,2 раза) мощность двигателя поднялась с 1,41 до 6,04 кВт, т. е. в 4,3 раза, но возрос и расход сжатого воздуха со 100 до 510 кг/ч, или в 5,1 раза, да и ценность воздуха как энергоносителя возросла многократно: его располагаемая энергия адиабатного расширения $N_{ад}^{\text{расп}}$ увеличилась в 6,9 раза (с 3,01 до 20,68 кВт); при этом экономичность пневмодвигателя заметно ухудшилась: удельный расход воздуха вырос на 19 % – с 70,9 до 84,4 кг/(кВт·ч), адиабатический КПД упал на 37 % – такова цена четырехкратного повышения мощности пневмодвигателя.

Укажем на важную особенность изменения экономичности пневмодвигателя по скоростным характеристикам: резкое нарастание удельного расхода сжатого воздуха g_e от изменения в обе стороны от режима g_e^{\min} частоты вращения n , в результате чего в каждой скоростной характеристике получается весьма узкий диапазон рабочих скоростных

режимов, где экономичность двигателя может быть признана приемлемой. Например, для еще приемлемого удельного расхода воздуха $g_e = 95–100$ кг/(кВт·ч) при $p_{вх} = 0,5$ МПа диапазон $n = 240–720$ мин⁻¹; при $p_{вх} = 1,1$ МПа диапазон $n = 390–870$ мин⁻¹, в обоих случаях – всего 480 мин⁻¹, что для транспортного двигателя, работающего в широком диапазоне частот вращения коленчатого вала, неудовлетворительно – двигатель часто будет работать на весьма неэкономичных режимах.

На рис. 1, 2 изображены линии режимов максимальной мощности N_e^{\max} и левее этих линий заштрихованы зоны наиболее целесообразной и экономичной работы пневмодвигателя. В этих зонах с понижением частоты вращения n хотя и снижается мощность, но растет эффективный крутящий момент, что очень важно для транспортного двигателя.

Заметим, что линии максимальной мощности и максимальной экономичности двигателя не совпадают. Причиной этого является наличие факторов, которые в разной степени влияют на величины мощности двигателя и его экономичности. Так, например, утечки сжатого воздуха, изменяющиеся от 100 % расхода воздуха до 3–4 %, в первую очередь увеличивают удельный расход энергоносителя и снижают КПД двигателя, но в меньшей степени снижают его мощность. Линия режимов минимального удельного расхода сжатого воздуха (она же линия максимальных эффективных КПД $\eta_{e ад}^{\max}$) проходит левее линии режимов максимальных мощностей скоростных характеристик примерно на 100–150 мин⁻¹.

Для поршневого пневмодвигателя, установленного на транспортном средстве в качестве силового агрегата, нет принципиальной необходимости, как в двигателе внутреннего сгорания, осуществлять запуск на холостом ходу, и только после того, как будет достигнута определенная частота вращения, включается муфта сцепления для трогания автомобиля с места. В поршневом пневмодвигателе после включения подачи сжатого воздуха еще при $n = 0$ развивается на валу максимальный для заданного давления $p_{вх}$ пусковой крутящий момент $M_e^{\text{пуск}}$ – двигатель запускается вместе с троганием автомобиля с места, т. е. он может запускаться под нагрузкой и работать при сколько угодно

малой частоте вращения. Такое свойство пневмодвигателя очень ценно, например, при движении в «пробках», при парковке, при выезде с места стоянки.

На рис. 3 приведены экспериментально установленные значения пускового крутящего момента испытанного пневмодвигателя в зависимости от давления сжатого воздуха на входе $p_{вх}$, а также отношение пускового крутящего момента к номинальному $M_e^{пуск} / M_e^{ном}$. Значения $M_e^{ном}$ взяты из графиков $M_e(p_{вх}; n)$ на линии режимов максимальной (номинальной) эффективной мощности пневмодвигателя.

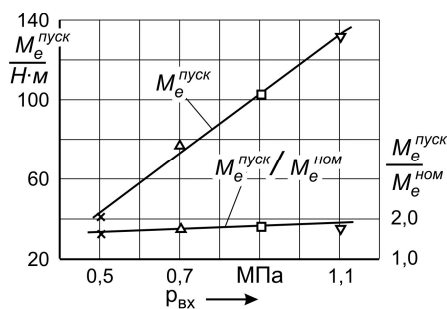


Рис. 3. Изменение пускового момента пневмодвигателя $M_e^{пуск}$ и отношения $M_e^{пуск} / M_e^{ном}$ в зависимости от давления сжатого воздуха на входе $p_{вх}$

Как видно из рис. 3, величина $M_e^{пуск}$ при изменении $p_{вх}$ от 0,5 до 1,1 МПа возрастает от 40 до 132 Н·м, что следует признать весьма высоким показателем для транспортного двигателя мощностью 2–6 кВт. Для сравнения укажем, что базовый для данного пневмодвигателя ДВС МеМЗ-968 номинальной мощностью 29,4 кВт имеет максимальный крутящий момент $M_{e_{max}} = 74,6$ Н·м [8]. Рассматриваемый пневмодвигатель уже при давлении сжатого воздуха на входе $p_{вх} = 0,7$ МПа имеет пусковой крутящий момент 77 Н·м.

На рис. 4 представлены экспериментальные данные о температуре отработавшего воздуха, замеренные в конце выпускного патрубка, т. е. на выходе воздуха из пневмодвигателя $t_{вых}$. В градусах Цельсия, как видим, эти температуры отрицательные и во всех режимах скоростных характеристик колеблются в сравнительно узких пределах: от минус 14 °С до минус 25 °С. Испытания пневмодвигателя по-

казали, что невозможно выделить отдельные закономерности изменения этой температуры ни для одной из скоростных характеристик.

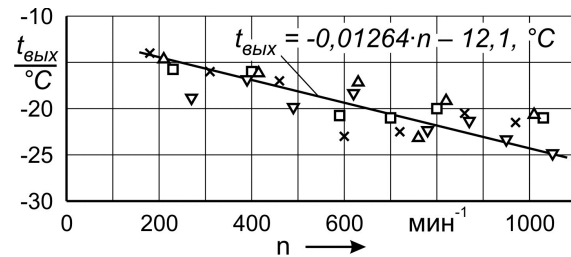


Рис. 4. Изменение температуры отработавшего воздуха на выходе из пневмодвигателя $t_{вых}$ при его работе по скоростным характеристикам

От давления сжатого воздуха на входе $p_{вх}$ его температура на выпуске не зависит. Она зависит от степени расширения, т. е. от отношения давления в начале расширения p_1 к давлению в конце расширения p_2 . Но степень расширения, как и степень наполнения, заложены в конструкции пневмодвигателя, и поэтому они одинаковы при любом давлении $p_{вх}$. Заметна некоторая тенденция снижения $t_{вых}$ при увеличении частоты вращения, что можно объяснить снижением времени на процесс выпуска, в течение которого холодный отработавший воздух нагревается от стенок каналов, по которым он течет и которые имеют более высокую температуру.

○ — $p_{вх} = 0,5$ МПа; △ — $p_{вх} = 0,7$ МПа;
□ — $p_{вх} = 0,9$ МПа; ▽ — $p_{вх} = 1,1$ МПа.

Через совокупность экспериментальных значений $t_{вых}$ проведена прямая (рис. 4), интерпретирующая опытные данные. Аналитически эта прямая может быть представлена уравнением

$$t_{вых} = -0,01264 \cdot n - 12,1, \text{ °С.} \quad (1)$$

Уровень температуры $t_{вых}$ служит показателем надежности работы пневмодвигателя в части возможного обмерзания выпускных каналов и возможного нарушения условий смазки деталей цилиндропоршневой группы. Авторы работы [6] на основании опыта эксплуатации пневмомоторов утверждают, что в длительном режиме работы выхлопные каналы могут обмерзать, в результате чего мощность пневмодвигателя уменьшается,

снижается частота вращения, увеличивается расход воздуха и шум. Время до начала интенсивного обмерзания пневмомоторов в длительном режиме составляет 2–4 ч [6]. Начальное обмерзание, не оказывающее значительного влияния как на механические, так и на акустические характеристики, составляет 0,5–1,5 ч [6]. Рекомендации относительно допустимого уровня температуры $t_{\text{вых}}$ в литературе по пневмодвигателям отсутствуют. Но имеются рекомендации относительно расчетной температуры воздуха в конце процесса расширения. Автор монографии [3] обоснованно называет минимально допустимый уровень этой температуры «порядка – 50 или даже – 60 °С» [3].

Выводы

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 при давлении сжатого воздуха на входе $p_{\text{вх}} = 0,5; 0,7; 0,9; 1,1$ МПа и его температуре на входе $T_{\text{вх}} = 293$ К.

Наиболее экономично, с наибольшим эффективным КПД пневмодвигатель работает при самом низком давлении подаваемого сжатого воздуха $p_{\text{вх1}} = 0,5$ МПа – это режим работы $n = 455 \text{ мин}^{-1}$, $N_e = 1,41$ кВт. На этом режиме удельный расход энергоносителя $g_e^{\text{мин}} = 70,9$ кг/(кВт·ч) и эффективный КПД $\eta_{e \text{ ал}} = 0,468$. На этом режиме часовой расход энергоносителя $G = 100$ кг/ч.

Определено изменение пускового момента пневмодвигателя $M_e^{\text{пуск}}$ и отношения $M_e^{\text{пуск}} / M_e^{\text{ном}}$ в зависимости от давления сжатого воздуха на входе $p_{\text{вх}}$. Получена аналитическая зависимость температуры на выхлопе от скоростного режима.

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. Бажинов О.В. Гібридні автомобілі / О.В. Бажинов, О.П. Смирнов, С.А. Серіков та ін. – Х.: ХНАДУ, 2008. – 327 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. Черников. – М.: НИИинформтяжмаш, 1970. – 250 с.
12. Ильичев А.С. Рудничные пневматические установки / А.С. Ильичев. – М.: Углетехиздат, 1953. – Т. 1. – 630 с.
13. Туренко А.Н. 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 25 марта 2015 г.