

**Ф. И. АБРАМЧУК, д. т. н., А. И. ХАРЧЕНКО, к. т. н.,
А. И. ВОРОНКОВ, к. т. н., И. Н. НИКИТЧЕНКО, инженер,**
Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет

О. Ю. ЛИНЬКОВ, к. т. н.

НТУ «Харьковский политехнический институт»

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ПНЕВМОДВИГАТЕЛЯ

Введение. Пневмодвигатель как составная часть транспортной силовой установки или как самостоятельная транспортная силовая установка является целесообразным и имеет перспективу широкого применения на транспорте [1, 2, 4, 5, 6].

Постановка проблемы. 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.

Анализ последних исследований и публикаций. На основании анализа публикаций [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12] 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).

Так, в частности, по результатам выполнения расчетов должен быть получен ответ на вопрос – каких удельных экономических и энергетических показателей в лучшем случае можно ожидать в поршневом пневмодвигателе при золотниковом воздухораспределении.

Цель статьи. Целью работы является представление и анализ результатов стендовых испытаний пневмодвигателя без подогрева сжатого воздуха на входе. Задачей исследования являлось получение закономерностей изменения по четырем скоростным характеристикам индикаторных и эффективных показателей. Определить уровень необходимой мощности пневмодвигателя.

Объектом расчетного исследования принят поршневой четырехцилиндровый V-образный пневмодвигатель размерностью, соответствующий экспериментальному образцу, созданному кафедрой ДВС ХНАДУ и установленному для лабораторных исследований на действующем испытательном стенде в лаборатории кафедры. На двигателе было установлено золотниковое воздухораспределение. Диаметр цилиндра $D = 76$ мм, ход поршня $S = 66$ мм.

Основной материал. Результаты стендовых испытаний пневмодвигателя без подогрева сжатого воздуха на входе представлены в таблице и на рис. 1.

Таблица.

Параметры пневмодвигателя на режимах максимальной эффективной мощности с различными давлениями сжатого воздуха на входе $p_{вх}$ при его температуре, равной температуре окружающей среды ($T_{вх} = T_{о.с} = 293$ К)

| Показатели работы пневмодвигателя | Обозначение | Размерность | $p_{вх}$, МПа (абс.) | | | |
|---|----------------------------|---|-----------------------|-------|-------|-------|
| | | | 0,5 | 0,7 | 0,9 | 1,1 |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Максимальная эффективная мощность, которая принята в качестве номинальной при данном давлении сжатого воздуха на входе $p_{вх}$ | $N_{ен}$ | кВт | 1,57 | 2,85 | 4,17 | 6,24 |
| Частота вращения коленчатого вала | n_n | мин ⁻¹ | 600 | 628 | 700 | 780 |
| Эффективный крутящий момент | $M_{ен}$ | Н·м | 25,0 | 43,3 | 56,9 | 76,4 |
| Среднее эффективное давление | p_e | МПа | 0,131 | 0,227 | 0,298 | 0,401 |
| Часовой расход сжатого воздуха | G | кг/ч | 122 | 236 | 360 | 570 |
| Удельный эффективный расход сжатого воздуха | g_e | $\frac{\text{кг}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}}$ | 78,0 | 82,8 | 86,3 | 91,3 |
| Эффективный КПД пневмодвигателя | η_e | – | 0,425 | 0,346 | 0,304 | 0,270 |
| Удельная мощность | $N_{л}$ | $\frac{\text{кВт}}{\text{дм}^3}$ | 1,31 | 2,38 | 3,48 | 5,21 |
| Средняя скорость поршня | $c_{п}$ | м/с | 1,32 | 1,38 | 1,54 | 1,72 |
| Пусковой момент при $n = 0$ | $M_{епуск}$ | Н·м | 40,0 | 77,0 | 103,0 | 132,0 |
| Отношение пускового момента к номинальному | $\frac{M_{епуск}}{M_{ен}}$ | – | 1,60 | 1,78 | 1,81 | 1,73 |

Экспериментальное исследование рабочего процесса было выполнено методом снятия скоростных характеристик пневмодвигателя при давлениях подаваемого сжатого воздуха в диапазоне его изменения, представляющем наибольший интерес $p_{вх} = 0,5; 0,7; 0,9$ и $1,1$ МПа с индицированием одного цилиндра на каждом режиме

испытаний. При этом испытания проводились в два этапа. На первом этапе воздух подавался при температуре окружающей среды $T_{вх} = T_{о.с} = 293 \pm 2$ К и на втором этапе – при более высокой температуре за счет электроподогрева. В данной статье рассмотрены результаты испытаний первого этапа, т.е. без подогрева сжатого воздуха на входе. Скоростные характеристики поршневых пневмодвигателей имеют максимум эффективной мощности. Если точки максимума мощности нескольких таких характеристик, снятых при одинаковых условиях, кроме давления сжатого воздуха на входе, соединить линией, то мы получим кривую режимов максимальной мощности с определенными закономерностями изменения параметров рабочего процесса.

Эти закономерности в качественном и количественном плане будут характеризовать рабочий процесс и поэтому представлять научный и практический интерес. На рис.1 такие закономерности построены для исследуемого пневмодвигателя, а в табл. 1 помещены экспериментальные данные некоторых важных параметров процесса на режимах максимальной эффективной мощности. Рассмотрим эти закономерности.

Максимальная эффективная мощность $N_{e\max}$ с повышением $p_{вх}$ растет с несколько нарастающей интенсивностью: с 1,57 кВт при $p_{вх} = 0,5$ МПа до 6,24 кВт при $p_{вх} = 1,1$ МПа.

Рост мощности происходит не только вследствие увеличения давления воздуха на впуске и, как следствие, его расхода через двигатель G , но и в результате возрастания частоты вращения коленчатого вала n , при которой наступает максимум N_e . Эта частота вращения коленчатого вала двигателя увеличилась в данном случае весьма существенно: с 600 до 780 мин^{-1} или на 30 %. Заметим, что если после доводочных экспериментально-конструкторских работ пневмодвигатель

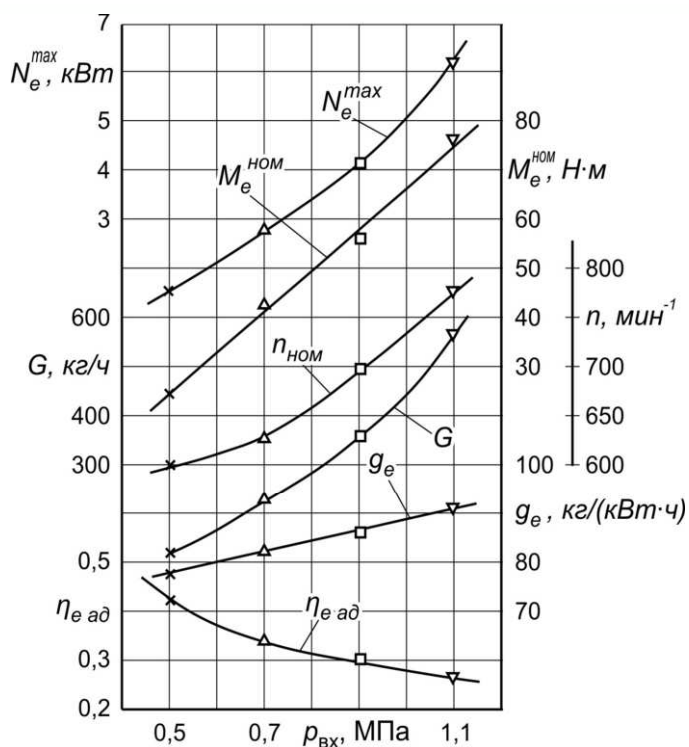


Рис. 1. Изменение показателей работы пневмодвигателя в зависимости от давления воздуха на впуске ($T_{вх} = 293$ К).

готовится к серийному производству, то, в зависимости его назначения и условий работы, принимается решение о величинах его паспортных (номинальных) параметров и, прежде всего, о требуемой величине давления сжатого воздуха на входе $p_{вх}$, мощности $N_{ен}$ и частоты вращения n_n . Обычно принимают $N_{ен}$ несколько меньше $N_{е max}$ при заданной величине $p_{вх}$ и соответственно меньшую частоту вращения n , т.е. берут на скоростной характеристике, которая в этом случае будет называться «внешней», точку левее режима максимальной мощности.

Мы же исследуем экспериментальный образец пневмодвигателя, для которого максимальная величина $p_{вх}$ не определена и в принципе каждая из рассматриваемых скоростных характеристик может быть названа внешней. Поэтому для простоты анализа примем режимы максимальной мощности на всех четырех скоростных характеристиках в качестве номинальных режимов, т.е. $N_{е max} = N_{ен}$.

Эффективный крутящий момент M_e и среднее эффективное давление p_e , отношение которых M_e / p_e для данного двигателя равно константе 190,621, с повышением давления сжатого воздуха на входе на режимах максимальных мощностей пневмодвигателя возрастают существенно быстрее, чем растет $p_{вх}$. Так при увеличении $p_{вх}$ от 0,5 до 1,1 МПа (в 2,2 раза) величины M_e и p_e выросли в 3,06 раза, что свидетельствует о благоприятных тяговых качествах пневмодвигателя как силового агрегата транспортного средства. С повышением $p_{вх}$ и удельный расход энергоносителя g_e (табл. 1 и рис. 1) возрастает, что свидетельствует об ухудшении экономичности пневмодвигателя при работе с более высокими давлениями подаваемого сжатого воздуха. Основные причины этому – рост гидравлических и механических потерь. В табл. 1 приведен еще один весьма важный параметр работы пневмодвигателя – средняя скорость поршня $c_{п}$, которая на режимах максимальных мощностей меняется, как и частота вращения коленчатого вала, на 30 %. Но главное не величина изменения $c_{п}$, а рабочий уровень этой величины – он ниже 2 м/с. Рабочая частота вращения коленчатого вала этого двигателя составляет 400–800 мин⁻¹, что в сравнении с привычными для нас двигателями внутреннего сгорания является очень низкой. Например, базовый двигатель внутреннего сгорания МеМЗ-968, на базе которого создан пневмодвигатель, имеет номинальную частоту вращения коленчатого вала $n = 4200–4400$ мин⁻¹ и $c_{п} = 9,24–9,68$ м/с [5]. Повышение частоты вращения коленчатого вала ограничивается в поршневом пневмодвигателе резким нарастанием в

первую очередь гидравлических потерь в процессах наполнения, выпуска и выталкивания из цилиндра отработавшего воздуха.

Выводы. 1. Выполнено экспериментальное исследование рабочего процесса созданного на кафедре ДВС ХНАДУ поршневого четырехцилиндрового *V*-образного пневмодвигателя с золотниковым воздухораспределением по скоростным характеристикам при давлении сжатого воздуха на входе $p_{вх} = 0,5; 0,7; 0,9; 1,1$ МПа и температуре на входе $T_{вх} = 293$ К. Такой уровень мощностей N_e (1,57–6,24 кВт) является приемлемым для применения пневмодвигателя в качестве основного силового агрегата такого транспортного средства как автобус ГАЗ-3302 (маршрутное такси, полная масса 2800 кг), используемого на городских маршрутах интенсивного движения автотранспорта, где средняя скорость движения не превышает 25–30 км/ч [13, 14].

2. Определена частота вращения коленчатого вала n , при которой достигается максимальная мощность пневмодвигателя. Если сравнить эти данные с параметрами автомобильного двигателя МеМЗ-968 (прототип исследуемого пневмодвигателя) мощностью 29,4 кВт при $n = 4200$ мин⁻¹, развивающего на номинальном режиме крутящий момент 66,8 Нм и имеющего максимальный крутящий момент всего лишь 74,6 Нм при 2700 мин⁻¹, то можно сделать вывод, что испытанный пневмодвигатель не уступает по тяговым качествам своему прототипу – поршневому ДВС и имеет перед ним преимущества развивать высокий пусковой крутящий момент под нагрузкой с одновременным троганием с места транспортного средства.

3. По удельному расходу сжатого воздуха g_e испытанный пневмодвигатель находится на уровне или лучше показателей наиболее распространенных серийно выпускавшихся в СССР поршневых пневмодвигателей марки П7,5-12; П16-25; П2,5-Ф1; П6,3-12 [15].

ЛИТЕРАТУРА

1. Автомобили с комбинированным энергетическим приводом : обзор разработок за рубежом // Автостроение за рубежом. – М.: Машиностроение, 2002. – № 3. – С. 5–11.

2. Гибридная силовая установка // Автостроение за рубежом. – М.: Машиностроение, – 2002. – № 4. – С. 18.

3. 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. – Харьков : ХНАДУ, 2006. – Вып. 18. – С. 7 – 12.
4. Бажинов О. В. Гибридные автомобили / О. В. Бажинов, О. П. Смирнов, С. А. Сериков та ін. – Харьков : ХНАДУ, 2008. – 327 с.
5. Смирнов О. П. Характерные режимы работы гибридной энергетической установки автомобиля / О. П. Смирнов, В. И. Калмиков // Автомобильный транспорт. – Харьков : ХНАДУ, 2006. – Вып. 18. – С. 13 – 15.
6. Жданов Е. Международный автосалон NAJAS-2010 в Детройте / Е. Жданов // Автостроение за рубежом. – М.: Машиностроение, – 2010. – № 4. – С. 2 – 5.
7. Борисенко К. С. Пневматические двигатели горных машин / К. С. Борисенко. – М.: Углетехиздат, 1958. – 205 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. – 189 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. : НИИинформтяж-маш, 1970. – 205 с.
12. Ильичев А. С. Рудничные пневматические установки / А. С. Ильичев. – М.: Углетехиздат, 1953. – Т. 1. – 630 с.
13. Горбачов П. Ф. Параметры движения маршрутного автомобильного пассажирского транспорта в центральной части г. Харькова / П. Ф. Горбачов, В. И. Воронков, А. С. Колий, И. Н. Никитченко // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного технического университета. – Х.: ХНАДУ, – 2013. – Вып. 60. – С. 34 – 47.
14. Воронков О. І. Визначення вихідних енергетичних параметрів транспортного засобу з пневматичним двигуном / О. І. Воронков, Д. М. Леонт'єв, Е. В. Тесленко // Автомобильный транспорт, – Харьков : ХНАДУ, 2013. – Вып. 33. – С. 70 – 76.
15. Туренко А. Н. Пневмодвигатель для автомобильной гибридной силовой установки / А. Н. Туренко, В. А. Богомолов, Ф. И. Абрамчук и др. // Автомобильный транспорт, – Харьков : ХНАДУ, 2009. – Вып. 24. – С. 7 – 10.