

*А. И. Воронков, И. Н. Никитченко*

## ВЛИЯНИЕ ПОДОГРЕВА СЖАТОГО ВОЗДУХА НА ЭФФЕКТИВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ПНЕВМОДВИГАТЕЛЯ

*Рассмотрены экспериментальные данные об изменении по скоростным характеристикам эффективных показателей рабочего процесса четырехцилиндрового поршневого пневмодвигателя  $D/S = 76/66$  мм с золотниковым воздухораспределителем без подогрева и с подогревом сжатого воздуха на входе. Показано что, подогрев сжатого воздуха оказывает положительное влияние на энергетические и экономические показатели рабочего процесса: увеличивается мощность и крутящий момент, сокращается часовой и удельный расход воздуха, существенно возрастает эффективный коэффициент полезного действия.*

### Введение

Несмотря на то, что имеется значительное число публикаций [1–8] о применении пневмодвигателей в различных машинах, сведений о влиянии подогрева сжатого воздуха, на котором они работают, пока что не встречалось.

На кафедре ДВС ХНАДУ проведено экспериментальное исследование опытного поршневого пневматического двигателя. Результаты данного исследования частично опубликованы [9], где в частности показано как воздействует подогрев воздуха на индикаторный процесс двигателя.

В данной статье тема подогрева сжатого воздуха в пневмодвигателях при их использовании на автомобилях продолжает свое развитие и рассматривается влияние подогрева сжатого воздуха на эффективные показатели работы пневмодвигателя.

### Объект и методика исследования

Целью проведенных исследований пневмодвигателя является определение влияния величины подогрева сжатого воздуха перед его поступлением в воздухораспределитель на основные энергетические и экономические показатели рабочего процесса.

Объект исследования – поршневой V-образный четырехцилиндровый пневматический двигатель с золотниковым воздухораспределением размерностью  $D/S = 76/66$  мм. Такой двигатель рассматривается как составная часть комбинированной (гибридной) энергетической установки (КЭУ) транспортного средства. Он может, например, работать на автомобиле рядом с двигателем внутреннего сгорания, заменяя его на режимах малых нагрузок (движение в «пробках», во время парковок и т.п.), т.е. на режимах неблагоприятных для ДВС по части топливной экономичности и токсичности выбросов с отработавшими газами.

Испытания пневмодвигателя проводились путем снятия скоростных характеристик при давлениях сжатого воздуха на входе, представляющих наибольший практический интерес:  $p_{вх} = 0,7$  и  $0,9$  МПа. Испытания двигателя проводились в два эта-

па. На первом этапе двигатель испытывался без подогрева подаваемого воздуха при температуре, равной температуре окружающей среды  $t_{вх} = t_{о.с} = 20$  °С.

На втором этапе скоростная характеристика снималась при  $p_{вх} = 0,7$  МПа при неизменном подогреве  $\Delta t_{под} = 90$  °, т.е. при постоянной температуре на входе  $t_{вх} = 110$  °С; а скоростная характеристика при  $p_{вх} = 0,9$  МПа снималась при подогреве воздуха  $\Delta t_{под} = 95$  °, т.е. при  $t_{вх} = 115$  °С.

При снятии каждой скоростной характеристики регистрировались 6–8 режимов от минимальной частоты вращения коленвала  $n_{мин} \approx 200$  мин<sup>-1</sup> до максимальной  $n_{max} \approx 1000$  мин<sup>-1</sup>. На каждом регистрируемом режиме испытаний снималась индикаторная диаграмма первого левого цилиндра, и одновременно фиксировались все измеряемые параметры работы двигателя.

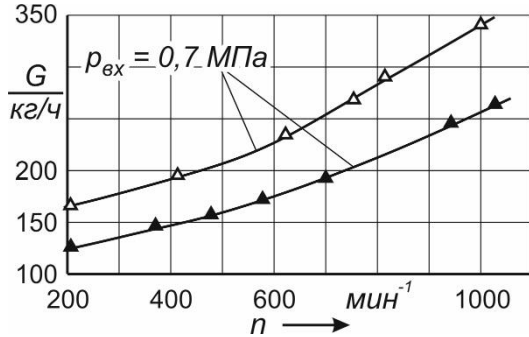
### Результаты исследования

В отличие от индикаторного процесса, где подогрев сжатого воздуха [9], влияет только на экономические индикаторные показатели (удельную индикаторную работу  $l_i$ , кДж/кг, удельный индикаторный расход сжатого воздуха  $g_i$ , кг/(кВт·ч) и эксергетический индикаторный КПД  $\eta_{i,ex}$ ) и совершенно не влияет на его энергетические индикаторные показатели (цикловую индикаторную работу  $L_i$ , кДж, агрегатную индикаторную секундную работу – индикаторную мощность  $N_i$ , кВт, и среднее индикаторное давление  $p_i$ , МПа), эффективные показатели пневмодвигателя как экономические, так и энергетические в результате подогрева воздуха изменяются положительно.

Прежде всего, отметим положительное изменение важнейшего экономического показателя – часового расхода сжатого воздуха  $G$ , кг/ч (рис. 1).

На режимах максимальной эффективной мощности по скоростным характеристикам вели-

чина  $G$  снизилась при  $p_{вх} = 0,7$  МПа (скоростной режим  $n = 628 \text{ мин}^{-1}$ ) с 236 до 177 кг/ч или на 25 %, а при  $p_{вх} = 0,9$  МПа ( $n = 700 \text{ мин}^{-1}$ ) с 360 до 270 кг/ч, что также составляет 25 %. Учитывая, что



подогрев воздуха составлял 90–95°C, каждые 10 ° повышения его температуры на входе  $t_{вх}$  снижают его расход на 2,6–2,8 %, что весьма существенно.

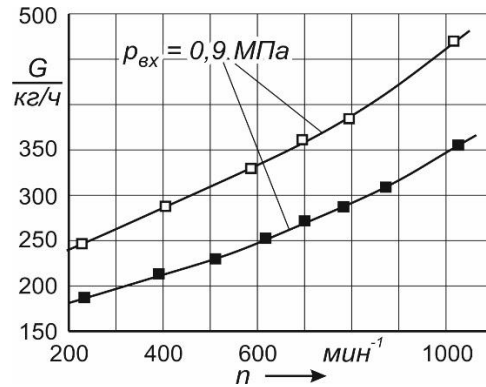


Рис. 1. Изменение массового часового расхода сжатого воздуха пневмодвигателя  $G$  по скоростным характеристикам

Эффективная мощность пневмодвигателя при подогреве воздуха на входе, как видно из рис. 2, заметно возрастает.

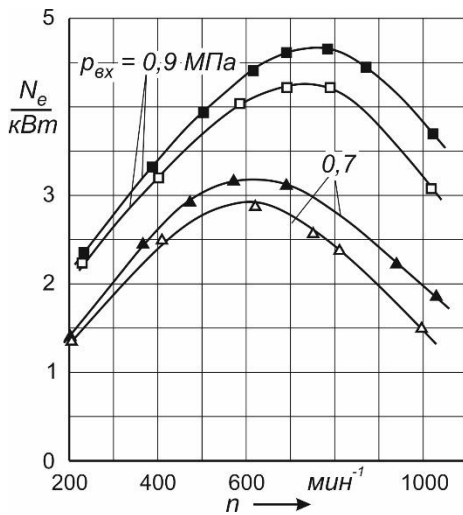


Рис. 2. Изменение эффективной мощности пневмодвигателя по скоростным характеристикам без подогрева ( $\Delta$ ;  $\square$ ) и с подогревом ( $\blacktriangle$ ;  $\blacksquare$ ) сжатого воздуха на входе

На режимах максимальной мощности по скоростным характеристикам величина  $N_e$  возросла при  $p_{вх} = 0,7$  МПа с 2,85 до 3,18 кВт или на 11,7 %, а при  $p_{вх} = 0,9$  МПа с 4,17 до 4,66 кВт или на 11,8 %. Это значит, что каждые 10 ° подогрева воздуха на входе увеличивают максимальную эффективную мощность пневмодвигателя по рассмотренным двум скоростным характеристикам при 0,7 и 0,9 МПа на 1,2–1,3 %. Эти закономерности изменения эффективной мощности пневмодвигателя по ско-

ростным характеристикам, показанные на рис. 2, как показал анализ, полностью соответствуют закономерностям снижения по скоростным характеристикам мощности механических потерь пневмодвигателя, приведенных на рис. 3.

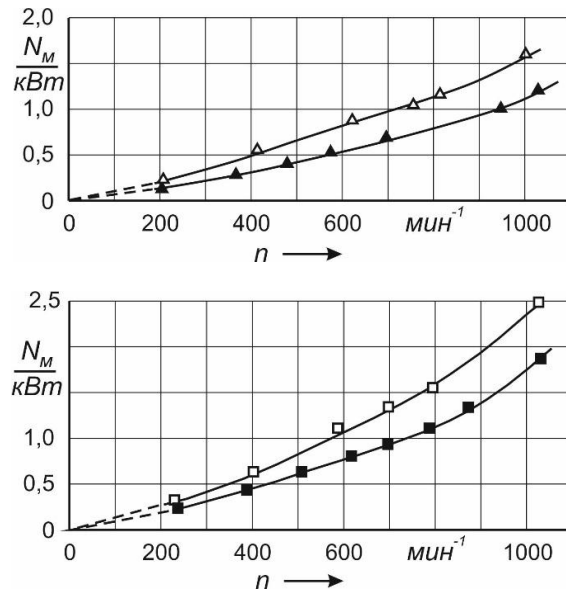


Рис. 3. Изменение мощности механических потерь пневмодвигателя  $N_m$  по скоростным характеристикам без подогрева –  $\Delta$ ,  $\square$  и с подогревом –  $\blacktriangle$ ,  $\blacksquare$  сжатого воздуха на входе

Поскольку экспериментальные исследования [9] показали, что при подогреве воздуха индикаторная мощность пневмодвигателя не изменяется, то его эффективная мощность может возрастать только за счет снижения механических потерь двигателя. При подогретом на входе воздухе процессы наполнения, расширения и выпуска протекают при

более высоких температурах как рабочего тела, так и деталей цилиндра-поршневой группы. При этом уменьшается вязкость смазочного масла и, как следствие, работа сил трения снижается, уменьшаются механические потери в двигателе.

Снижение мощности механических потерь служит прибавкой к эффективной мощности пневмодвигателя  $N_e$  и приводит, прежде всего, к возрастанию механического КПД  $\eta_M = N_e / N_i$  (рис. 4).

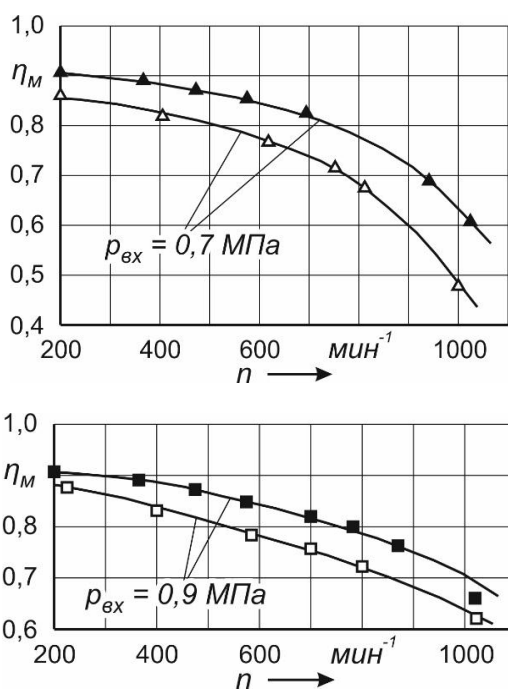


Рис. 4. Изменение механического КПД пневмодвигателя  $\eta_M$  при его работе по скоростным характеристикам без подогрева ( $\Delta$ ,  $\square$ ) и с подогревом ( $\blacktriangle$ ,  $\blacksquare$ ) сжатого воздуха на входе

Таким образом, определяющими факторами, оказывающими основное влияние подогрева воздуха на рабочий процесс пневмодвигателя являются часовой расход энергоносителя – часовой расхода сжатого воздуха  $G$  и эффективной мощности  $N_e$  (рис. 1, 2). Остальные эффективные показатели рабочего процесса являются по существу производными величинами от этих двух.

Удельный эффективный расход сжатого воздуха  $g_e = G / N_e$ , кг/(кВт·ч), снижается в наибольшей мере, что видно из формулы его определения – числитель  $G$  уменьшается, а знаменатель  $N_e$  – увеличивается на всех режимах скоростных характеристик (рис. 5, 6).

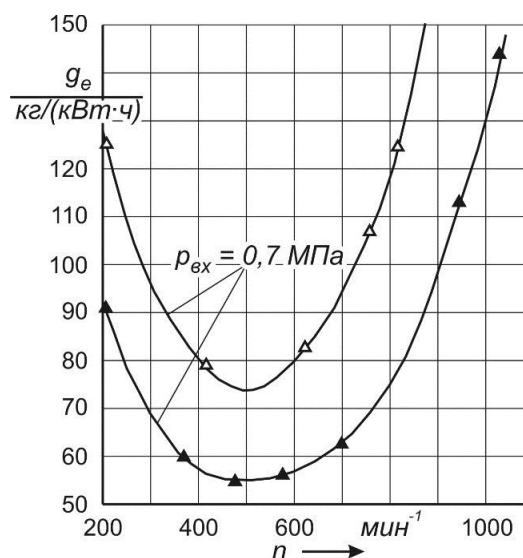


Рис. 5. Изменение удельного эффективного расхода сжатого воздуха  $g_e$  при работе пневмодвигателя по скоростным характеристикам  $p_{вх} = 0,7$  МПа ( $\Delta$  – без подогрева;  $\blacktriangle$  – с подогревом воздуха на входе)

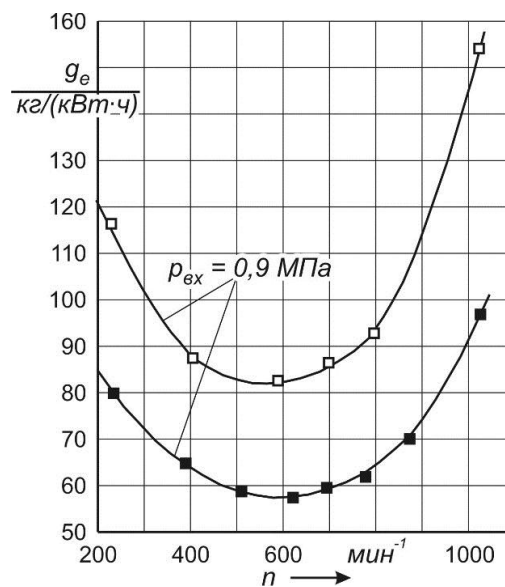


Рис. 6. Изменение удельного эффективного расхода сжатого воздуха  $g_e$  кг/(кВт · ч) при работе пневмодвигателя по скоростным характеристикам  $p_{вх} = 0,9$  МПа ( $\square$  – без подогрева;  $\blacksquare$  – с подогревом воздуха на входе)

Величина минимального эффективного удельного расхода воздуха по скоростным характеристикам  $g_e^{\min}$  в результате подогрева снизилась:

– при  $p_{вх} = 0,7$  МПа с 74,0 до 55,0 кг/(кВт·ч), или на 25,7 %;

– при  $p_{вх} = 0,9$  МПа с 82,0 до 57,5 кДж/(кВт·ч), или на 30 %.

Если учесть, что подогрев воздуха составлял 90–95 °, то каждые десять градусов подогрева снижают минимальный удельный эффективный расход энергоносителя – сжатого воздуха по рассмотренным скоростным характеристикам на 2,9–3,2 %, т.е. в среднем на 3 %. Заметим также, что по мере роста давления  $p_{вх}$  минимальные значения  $g_e$  несколько сдвигаются в сторону более высоких частот вращения при работе двигателя как без подогрева, так и с подогревом воздуха. В данном случае величина  $g_e^{\min}$  сдвинулась с 500 до 600 мин<sup>-1</sup>.

Удельная эффективная работа рабочего тела  $l_e = N_e \cdot 3600 / G$ , кДж/кг, в результате подогрева воздуха изменилась также положительно (рис. 7) – она заметно возросла.

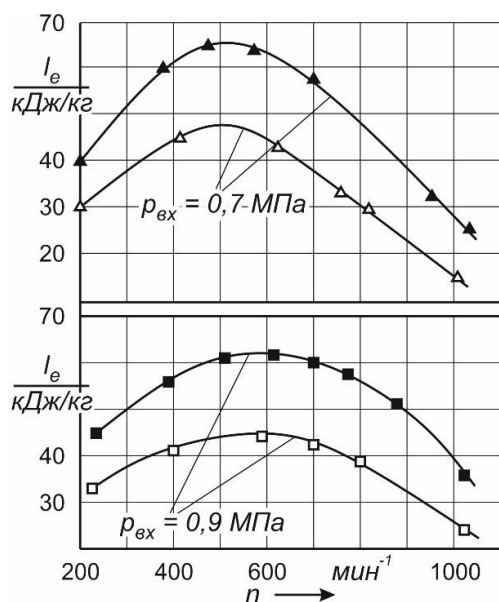


Рис. 7. Изменение удельной эффективной работы  $L$ , кДж/кг, при работе пневмодвигателя по скоростным характеристикам без подогрева ( $\square$ ,  $\Delta$ ) и с подогревом ( $\blacksquare$ ,  $\blacktriangle$ ) сжатого воздуха на входе

Так максимальная величина этой работы по скоростным характеристикам  $l_e^{\max}$  возросла:

– при  $p_{вх} = 0,7$  МПа с 48,0 до 65,0 кДж/кг, или на 35,4 %;

– при  $p_{вх} = 0,9$  МПа с 44,0 до 62,0 кДж/кг, или на 40,9 %.

Это означает, что каждые 10 ° подогрева воздуха увеличивают его удельную работу в пневмодвигателе в среднем на 4,1 %.

Подогрев поступающего сжатого воздуха в пневмодвигатель положительно сказался на его

тяговом показателе – эффективном крутящем моменте  $M_e$ : его величина на всех режимах обеих скоростных характеристик возросла – на  $\Delta M_e = 5$ –6 Н·м (рис. 8), что в относительных величинах соответствует 8 % при  $n = 200$  мин<sup>-1</sup> и примерно 33 % при  $n = 1000$  мин<sup>-1</sup>.

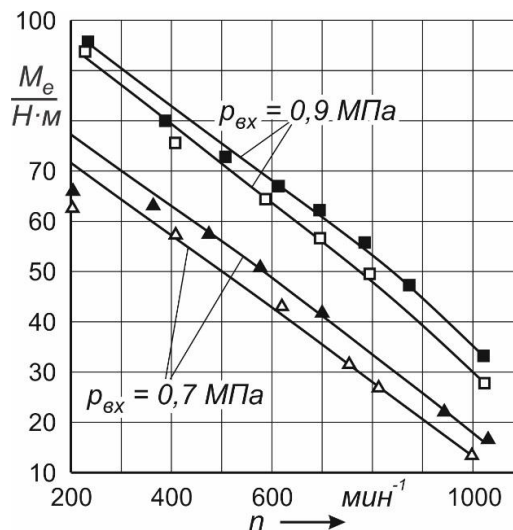


Рис. 8. Изменение эффективного крутящего момента  $M_e$  при его работе по скоростным характеристикам  $p_{вх} = 0,7$  МПа и  $p_{вх} = 0,9$  МПа без подогрева ( $\square$ ;  $\Delta$ ) и с подогревом ( $\blacksquare$ ;  $\blacktriangle$ ) воздуха на входе

Изменение среднего эффективного давления  $p_e$  (рис. 9), всегда повторяет закономерность изменения по скоростным характеристикам эффективного крутящего момента: оно увеличилось при подогреве воздуха на величину  $\Delta p_e = 0,020$ – $0,025$  МПа, что составляет примерно 6–8 % при  $n = 200$  мин<sup>-1</sup> (когда  $p_e$  имеет самые высокие значения) и около 30 % при  $n = 1000$  мин<sup>-1</sup> (когда  $p_e$  имеет самые низкие значения).

Изменение по скоростным характеристикам литровой мощности  $N_{л}$ , кВт/дм<sup>3</sup>, (рис. 10) по форме, естественно, повторяет закономерность изменения эффективной мощности  $N_e$ . Увеличение  $N_{л}$  при подогреве воздуха, так же как и  $N_e$ , объясняется снижением затрат энергии на механические потери, что подробно было рассмотрено выше. На режимах максимальных значений  $N_{л}$  прирост мощности  $\Delta N_{л}$  от подогрева воздуха составлял при  $p_{вх} = 0,7$  МПа 0,5 кВт/дм<sup>3</sup> или 21 % и при  $p_{вх} = 0,9$  МПа, 0,7 кВт/дм<sup>3</sup> или 20 %.

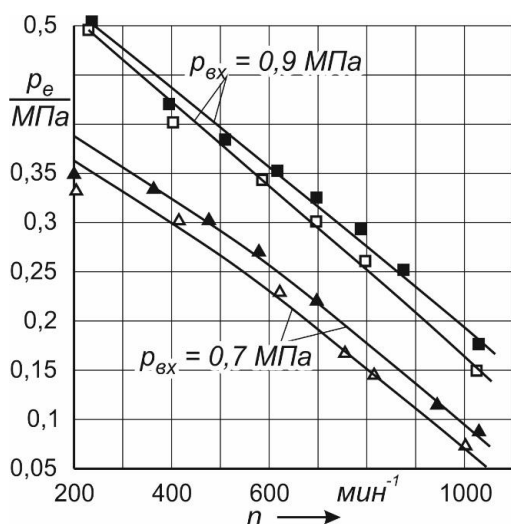


Рис. 9. Изменение среднего эффективного давления пневмодвигателя  $p_e$  при его работе по скоростным характеристикам без подогрева ( $\square$ ,  $\Delta$ ) и с подогревом ( $\blacksquare$ ;  $\blacktriangle$ ) сжатого воздуха на входе

Следствием снижения расхода сжатого воздуха  $G$  и увеличения эффективной мощности двигателя  $N_e$  в результате подогрева воздуха является также рост эффективных КПД: адиабатического  $\eta_{e ад} = N_e / N_{ад}^{расп}$  и эксергетического  $\eta_{e экс} = N_e / Ex_i$  (где  $N_{ад}^{расп}$  – располагаемая энергия адиабатного расширения потока сжатого воздуха по условиям на входе в двигатель, кВт;  $Ex_i$  – эксергия энтальпии воздушного потока по условиям на входе, кВт).

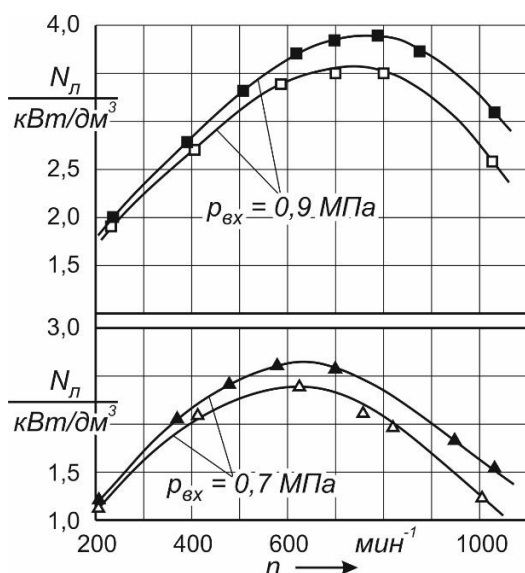


Рис. 10. Изменение литровой мощности пневмодвигателя  $N_l$ , кВт/дм<sup>3</sup> при его работе по скоростным характеристикам без подогрева ( $\square$ ,  $\Delta$ ) и с подогревом ( $\blacksquare$ ;  $\blacktriangle$ ) сжатого воздуха на входе

На рис. 11 показано как изменяется по скоростным характеристикам величина эффективного адиабатного КПД в результате подогрева сжатого воздуха на входе в пневмодвигатель.

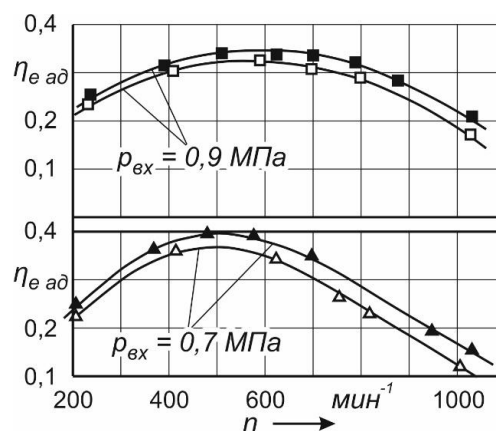


Рис. 11. Изменение эффективного адиабатического КПД пневмодвигателя  $\eta_{e ад}$  при его работе по скоростным характеристикам без подогрева ( $\Delta$ ;  $\square$ ) и с подогревом ( $\blacktriangle$ ;  $\blacksquare$ ) сжатого воздуха на входе

На режиме максимальной эффективной мощности  $N_e^{max}$  она возросла:

– при  $p_{вх} = 0,7$  МПа ( $n = 628$  мин<sup>-1</sup>) с 0,343 до 0,376 или если принять исходное значение за 100 %, то рост составил 9,6 %;

– при  $p_{вх} = 0,9$  МПа ( $n = 700$  мин<sup>-1</sup>) с 0,304 до 0,328 или на 7,9 %.

Таким образом, в среднем каждые 10° подогрева воздуха увеличивают эффективный адиабатный КПД пневмодвигателя примерно на 1 %.

### Выводы

1. Подогрев поступающего в пневмодвигатель сжатого воздуха оказывает положительное влияние на энергетические и экономические показатели рабочего процесса – увеличивается мощность и крутящий момент, сокращается часовой и удельный расход воздуха, существенно возрастает эффективный коэффициент полезного действия.

2. Подогрев сжатого воздуха на впуске позволяет увеличить максимально допустимую степень расширения рабочего тела в цилиндре пневмодвигателя, что дополнительно повышает его экономичность.

Однако следует сделать важную оговорку: изложенные выводы об эффективности подогрева воздуха сделаны без учета затрат тепловой энергии на этот подогрев, т. е. для случая, когда пневмо-

двигатель используется как составная часть гибридной силовой установки автомобиля и подогрев воздуха осуществляется утилизацией бросовой теплоты отработавших газов параллельно работающего двигателя внутреннего сгорания.

### Список литературы:

1. 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. – Вып. 18. – С. 7-12. 2. Бажин О.В. Гібридні автомобілі / О.В. Бажин, О.П. Смирнов, С.А. Серіков та ін. – Харків: ХНАДУ, 2008. – 328 с. 3. Смирнов О. П. Характерні режими роботи гібридної енергетичної установки автомобіля / О. П. Смирнов, В. І. Калмиків // Автомобільний транспорт: сб. науч. тр. – Вып. 18. – С. 13-15. 4. Жданов Е. Международный автосалон NAJAS-2010 в Детройте / Е. Жданов // Автостроение за рубежом. – 2010. – № 4. – С. 2-5. 5. Борисенко К. С. Пневматические двигатели горных машин / К. С. Борисенко. – Москва: Углетехиздат, 1958. – 208 с. 6. Зеленецкий С. Б. Ротационные пневматические двигатели / С. Б. Зеленецкий, Е. Д. Рябов, А. Г. Микеров. – Ленинград: Машиностроение, 1976. – 240 с. 7. Дегтярев В. И. Шахтные пневмоторы / В. И. Дегтярев, В. И. Мьялковский, К. С. Борисенко. – Москва: Недра, 1979. – 192 с. 8. Зиневич В. Д. Поршневые и шестерные пневмодвигатели горно-шахтного оборудования

ния / В. Д. Зиневич, Л. А. Гешлин. – Москва: Недра, 1982. – 200 с. 9. Воронков А.И. Рабочий процесс автомобильного пневмодвигателя: монография / А.И. Воронков, И.Н. Никитченко. – Харьков: ХНАДУ, 2015. – 200 с.

### Bibliography (transliterated):

1. Turenko, A.N., Bogomolov, V.A., Abramchuk, F.I. (2006), On requirements to design and operation process of the pneumatic engine for combined vehicle power unit [O trebovaniyah k konstrukcii i rabochemu processu pnevmodvigatelja dlja kombinirovannoj energoustanovki avtomobilja], Road transport: a collection of scientific papers, vol. 18, pp. 7-12. 2. Bazhinov, O.V., Smirnov, O.P., Syerikov, S.A., (2008), Hybrid vehicles [Hibrydni avtomobili], Kharkov, KhNADU Publ., 328 p. 3. Smirnov, O.P., Kalmikov, V.I., (2006), Specific operation modes of the vehicle power unit [Harakterni rezhimi roboti gi bridnoj energetichnoj ustanovki avtomobilja], Road transport: a collection of scientific papers, vol. 18, pp. 13-15. 4. Zhdanov, E., (2010), International Motor Show NAJAS - 2010 in Detroit [Mezhdunarodnyj avtosalon NAJAS-2010 v Detroyte], Autostructure abroad, № 4, pp. 2-5. 5. Borisenko, K.S., (1958), Mining machine pneumatic Engine, [Pnevmaticheskie dvigateli gornyh mashin], Moscow, Ugletehizdat Publ., 208 p. 6. Zeleneckij, S.B., Rjabov, E.D., Mikerov, A.G. (1976), Rotary pneumatic engines, [Rotacionnye pnevmaticheskie dvigateli], Leningrad, Mashinostroenie Publ., 240 p. 7. Degtyarev, V.I., Mjalkovskij, V.I., Borisenko, K.S., (1979), Mine pneumatic motors [Shahtnye pnevmotory], Moscow, Nedra Publ., 192 p. 8. Zinevich, V.D., Geshlin, L.A., (1982), Piston and gear pneumatic engines of mining equipment [Porshnevye i shesternye pnevmodvigateli gornoshahtnogo oborudovaniya], Moscow, Nedra Publ., 200 p. 9. Voronkov, A.I., Nikitchenko, I.N., (2015), Workflow automotive air motor: a monograph [Rabochij process avtomobil'nogo pnevmodvigatelja: monografija], Kharkov: HNADU, 200 p.

Поступила в редакцию 22.06.2016 г.

**Воронков Александр Иванович** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры ДВЗ Харьковского национального автомобильно-дорожного университета, Харьков, Украина, e-mail: rio@khadi.kharkov.ua.

**Никитченко Игорь Николаевич** – канд. техн. наук, ассистент кафедры ДВЗ Харьковского национального автомобильно-дорожного университета, Харьков, Украина, e-mail: igor\_nikita@mail.ru.

## ВПЛИВ ПІДГРІВУ СТИСНУТОГО ПОВІТРЯ НА ЕФЕКТИВНІ ПОКАЗНИКИ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ ПНЕВМОДВИГУНА

**О. І. Воронков, І.М. Нікітченко**

Розглянуті експериментальні дані зміни за швидкісними характеристиками ефективних показників робочого процесу чотирициліндрового поршневого пневмодвигуна D/S = 76/66 із золотниковим повітророзподільником без підігріву та з підігрівом стисненого повітря на вході. Показано що, підігрів стисненого повітря вносить позитивний вплив на енергетичні та економічні показники робочого процесу: збільшується потужність і крутний момент, скорочується часова і питома витрата повітря, суттєво зростає ефективний коефіцієнт корисної дії.

## INFLUENCE OF COMPRESSED HEATED AIR ON EFFECTIVE PERFORMANCE OF THE PNEUMOENGINE WORKFLOW

**A. Voronkov, I. Nikitchenko**

The experimental data on the change in speed characteristics of effective indicators of the four-cylinder piston air motor D/S = 76/66 mm with a spool air distributor with unheated and heated compressed inlet air are considered. It is shown that heating the compressed air has a positive effect on the energy and economic performance of the workflow: increased power and torque, reduced hours and specific air consumption significantly increases the effective efficiency.