

А. И. Воронков, И. Н. Никитченко

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

 $D/S = 76/66$ 

### 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

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

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

При снятии каждой скоростной характеристики регистрировались 6–8 режимов от минимальной частоты вращения коленвала  $n_{min} \approx 200$  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.

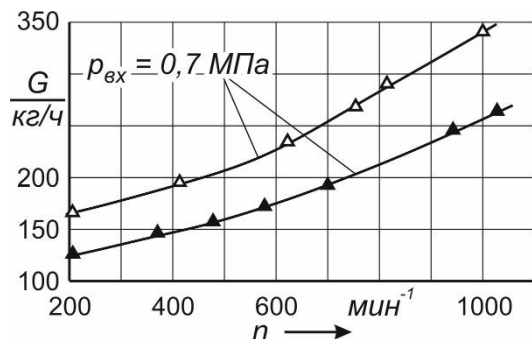
### Результаты исследования

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<sup>2</sup>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).

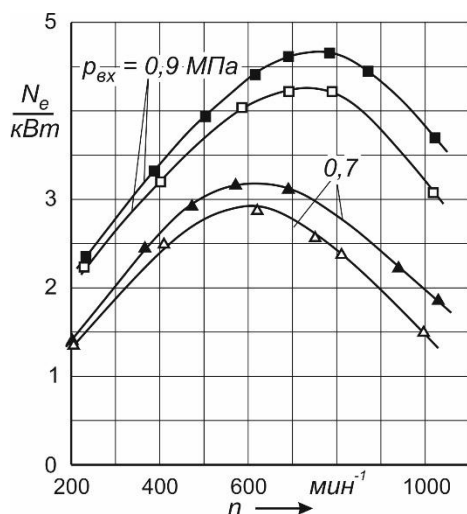
На режимах максимальной эффективной мощности по скоростным характеристикам вели-

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



1 .

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

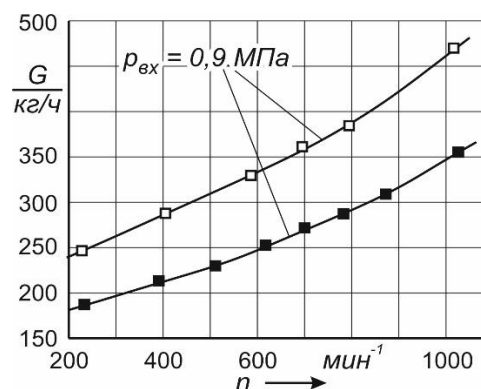


2 .

(8; œ) t ; > ) (

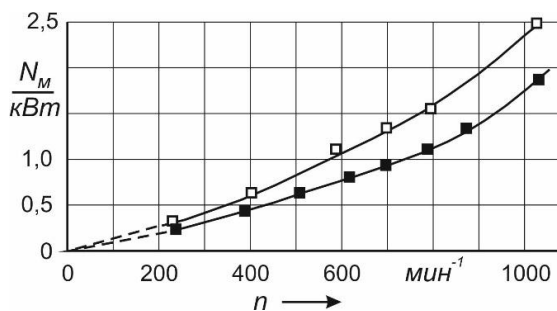
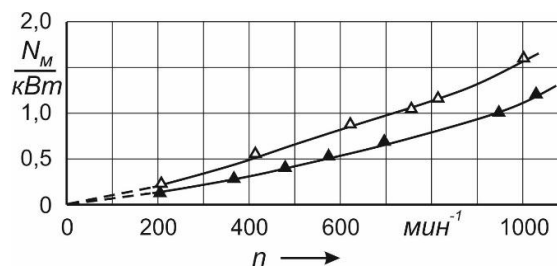
На режимах максимальной мощности по скоростным характеристикам величина  $N_e$  возросла при  $p_{вх} = 0,7$  МПа с 2,85 до 3,18 кВт или на 11,7 %, а при  $p_{вх} = 0,9$  МПа с 4,17 до 4,66 кВт или на 11,8 %. Это значит, что каждые 10 , подогрева воздуха на входе увеличивают максимальную эффективную 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-

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



G

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



3 .

$N_m$

–8, œ

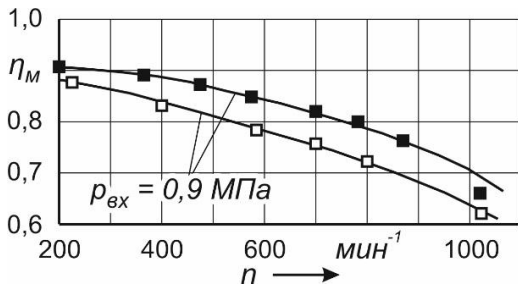
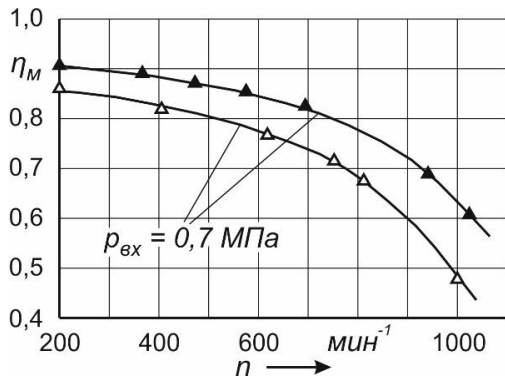
–t ,

>

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 подогревом 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  $\eta_M W_e / N_i$  (рис. 4).

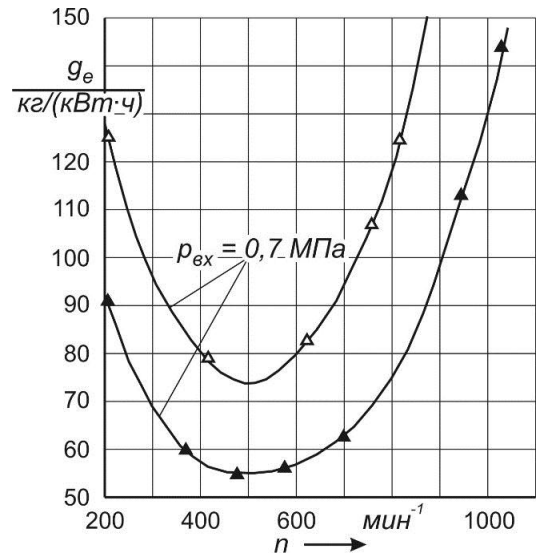


4 .

$\eta_M$  (т, > ) - (8, се)

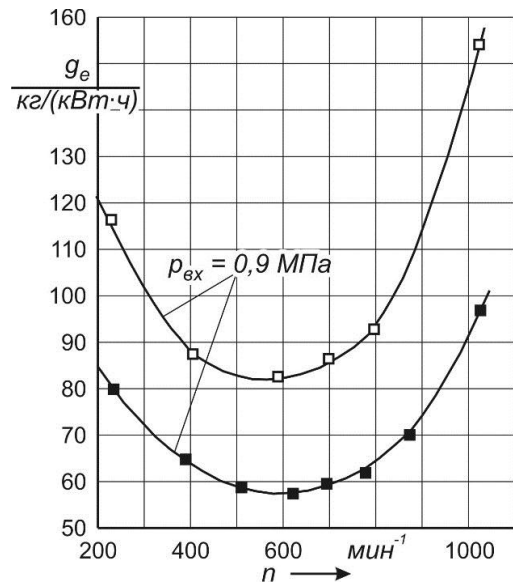
Таким образом, определяющими факторами, оказывающими основное влияние подогрева воздуха на рабочий процесс пневмодвигателя являются часовой расход энергоносителя – часовой расхода сжатого воздуха  $G$  и эффективной мощности  $N_e$  (рис. 1, 2). Остальные эффективные показатели рабочего процесса являются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

Удельный эффективный расход сжатого воздуха  $g_e$   $1 G / N_e$ , 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).



5 .

$g_e$  (т, > ) ;  $p_{вх} = 0,78$  -



6 .

$g_e$  / (² ) ;  $p_{вх} = 0,9 се$  - ( > - - ;

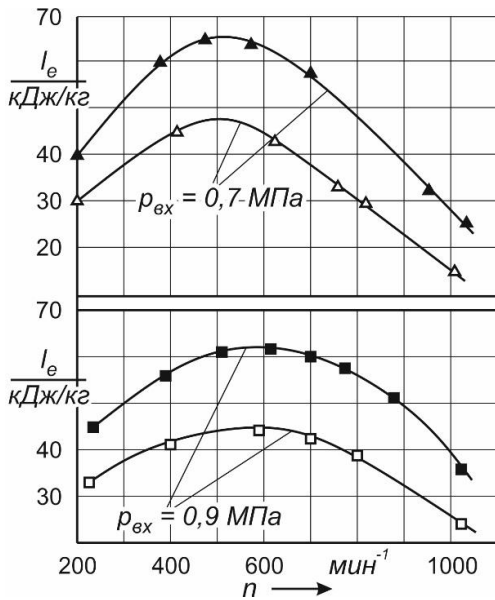
Величина минимального эффективного удельного расхода воздуха по скоростным характеристикам  $g_e^{min}$  в результате подогрева снизилась:

– 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 кг/(кВт<sup>2</sup>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  $l_e \approx N_e / G$ , кДж/кг, в результате подогрева воздуха изменилась также положительно (рис. 7) – она заметно возросла.



7 .  
L, / , (œ, 8 )  
> ; t ) (

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

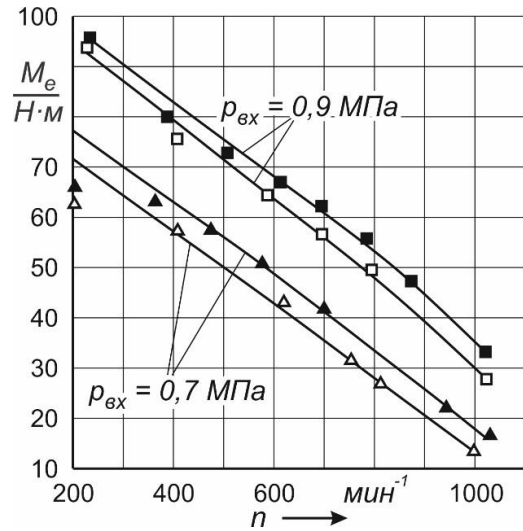
– при  $p_{вх} = 0,7$  МПа с 48,0 до 65,0 кДж/кг, или на 35,4 %;

– 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

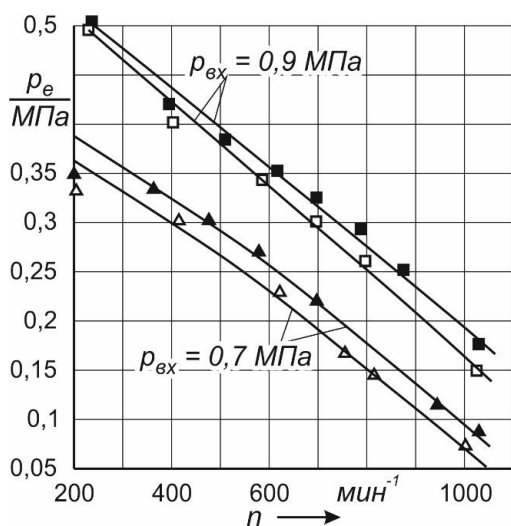
тяговом показателе – эффективном крутящем моменте  $M_e$ : его величина на всех режимах обеих скоростных характеристик возросла – на  $\delta M_e = 5–6$  Н·м (рис. 8), что в относительных величинах соответствует 8 % при  $n = 200$  мин<sup>-1</sup> и примерно 33 % при  $n = 1000$  мин<sup>-1</sup>.



8 .  
 $M_e$   
 $p_{вх} = 0,7$   $p_{вх} = 0,9$   
(œ; 8) (;> ; t )

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  $N_l$ , кВт/дм<sup>3</sup>, (рис. 10) по форме, естественно, повторяет закономерность изменения эффективной мощности  $N_e$ . Увеличение  $N_l$  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  $N_l$  прирост мощности  $\delta N_l$  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 %.

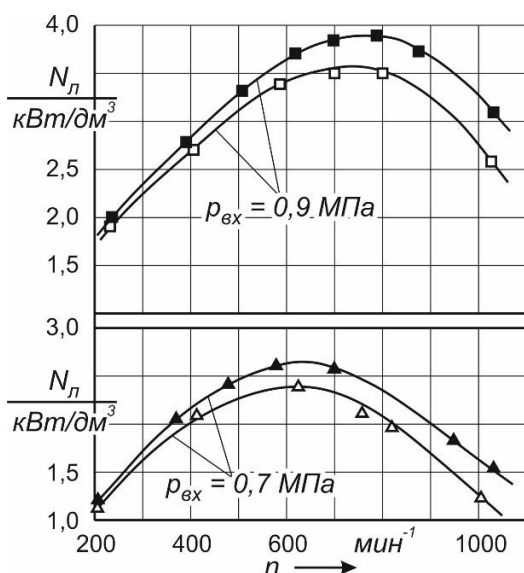


9 .

( > ; t )

(се, 8)

Следствием снижения расхода сжатого воздуха  $G$  и увеличения эффективной мощности двигателя  $N_e$  в результате подогрева воздуха является также рост эффективных КПД: адиабатического  $\eta_{ад} = W / N_{ад}^{расп}$  и эксергетического  $\eta_{ex} = N_e / Ex$  (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).



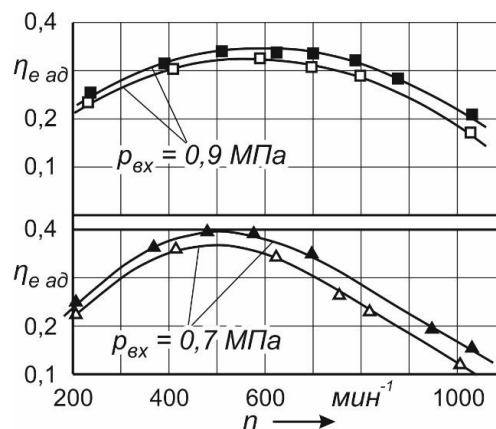
10 .

$N_l$  ,  $^3$  /

> ; t ) (

се, 8 )

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



11 .

$\eta_{e ад}$

(8; се)

(t ; > )

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. ...  
 2. ...  
 3 2 8 ...  
 4 ...  
 5 ...  
 - 2 0 8 ...  
 7. ...  
 8 ...

... 1 9  
 - 2 0 0 ...  
 - 2 0 0 , 2 0 1 5

**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 procesu pnevmodvigatelja dlja kombinirovannoj energoustanovki avtomobilja], Road transport: a collection of scientific papers, vol. 18, pp. 7-12. 2. Bazhynov, 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 g 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 [Mezhdunaradnyj avtasalon NAJAS-2010 v Detrojte], Auto s t r u c t u r e a b - 5. b. a B. 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. Degtjarev, 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 shesternnye 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.

22.06.2016

**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.