

УДК 621.541

О ВЫБОРЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ ЗАДАВАЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ РАБОТЫ ПОРШНЕВОГО ПНЕВМОДВИГАТЕЛЯ С КЛАПАННЫМ ВОЗДУХОРАСПРЕДЕЛЕНИЕМ

**Ф.И. Абрамчук, профессор, д.т.н., А.И. Харченко, доцент, к.т.н.,
С.С. Жилин, доцент, к.т.н., А.И. Воронков, доцент, к.т.н.,
И.Н. Никитченко, научн. сотр., ХНАДУ**

Аннотация. Рассмотрены результаты расчетного исследования в целях выбора рациональных величин задаваемых параметров работы поршневого пневмодвигателя с клапанным воздухо-распределением и автоматическим изменением фаз открытия и закрытия клапанов в зависимости от нагрузки, частоты вращения и эксплуатационных условий.

Ключевые слова: поршневой пневмодвигатель с клапанным воздухо-распределением, рабочий процесс, выбор рациональных задаваемых параметров рабочего процесса.

ПРО ВИБІР РАЦІОНАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ, ЩО ЗАДАЮТЬСЯ, РОБОТИ ПОРШНЕВОГО ПНЕВМОДВИГУНА З КЛАПАННИМ ПОВІТРОРІЗПОДІЛОМ

**Ф.І. Абрамчук, професор, д.т.н., А.І. Харченко, доцент, к.т.н., С.С. Жилін, доцент,
к.т.н., О.І. Воронков, доцент, к.т.н., І.М. Нікітченко, наук. співр., ХНАДУ**

Анотація. Розглянуто результати розрахункового дослідження в цілях вибору раціональних величин параметрів, що задаються, роботи поршневого пневмодвигуна з клапанным повіт-ророзподілом і автоматичною зміною фаз відкриття і закриття клапанів залежно від наван-таження, частоти обертання й експлуатаційних умов.

Ключові слова: поршневий пневмодвигун із клапанным повіт-ророзподілом, робочий процес, ви-бір раціональних параметрів, робочого процесу, що задаються.

ON CHOOSING RATIONAL SET PARAMETERS OF THE PISTON PNEUMATIC ENGINE WITH VALVE AIR-DISTRIBUTION PERFORMANCE

**F. Abramchuk, Professor, Doctor of Technical Science, A. Kharchenko, Associate
Professor, Candidate of Technical Science, S. Zhilin, Associate Professor, Candidate of
Technical Science, A. Voronkov, Associate Professor, Candidate of Technical Science,
I. Nikitchenko, research worker, KhNAHU**

Abstract. The results of estimate research with the purpose of choosing the rational values of the set working parameters of the piston pneumatic engine with valve air-distribution and automated shift of opening and closing phases depending on loading, frequency of rotation and operating conditions have been considered.

Key words: piston pneumatic engine with valve air-distribution, operation cycle, choice of rationally set parameters of operation.

Введение

Статья посвящена рассмотрению результатов расчетного исследования по выбору рациональных задаваемых параметров рабочего

процесса для поршневого пневмодвигателя с клапанным воздухо-распределением и электрогидравлическим приводом клапанов, имеющим автоматическое компьютерное управление.

Анализ публикаций

В нынешнем первом десятилетии XXI века выпуск автомобилей с гибридными силовыми установками в мировой практике расширялся с нарастающими темпами – от экспериментальных выставочных образцов в начале десятилетия до серийного производства сотен тысяч единиц в конце десятилетия [1–6]. По мнению экспертов, эта тенденция будет продолжаться и в наступающем втором десятилетии. Так фирма Toyota, которая, как известно [4], является пионером в разработке гибридных автомобилей, на Международном автосалоне NAJAS-2010 в Детройте объявила о своих планах продавать к 2015 году до миллиона единиц своих гибридных автомобилей ежегодно [6].

Распространение имеют пока что гибриды в составе двигателя внутреннего сгорания (ДВС) и одного-двух электромоторов. Но одновременно некоторыми известными зарубежными фирмами продолжают исследовательские работы альтернативного направления – создание гибрида в составе ДВС и пневмодвигателя. Известно [14], что такие гибриды имеют как существенные достоинства, так и недостатки в сравнении с гибридами, имеющими электромашину. Сегодня на фоне развития автомобильных гибридов с электромашинami невозможно утверждать, что пневмодвигатель как составная часть автомобильной силовой установки или как самостоятельная автомобильная силовая установка является целесообразным и имеет перспективу широкого применения на автомобильном транспорте. Эта проблема пока еще нуждается в исследованиях как теоретических, так и экспериментальных и анализе многолетнего опыта в данной области науки и техники [3, 6–13 и др.]

Рассматриваемое в данной статье расчетное исследование лежит в русле накопления теоретических данных по этой проблеме. Так, в частности, результатами выполнения расчетов должен быть получен ответ на вопрос – каких удельных экономических и энергетических показателей в лучшем случае можно ожидать в поршневом пневмодвигателе при клапанном воздухораспределении с применением электрогидравлического привода клапанов и гибкого компьютерного управления его работой. Имеется в виду такое программное компьютерное управление, при

котором бы автоматически устанавливались наиболее целесообразные фазы воздухораспределения с учетом скоростного и нагрузочного режимов работы двигателя, параметров рабочего тела на входе и эксплуатационных требований.

Объект исследования и постановка задачи

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 [13]. Вместо золотникового принято клапанное воздухораспределение. Диаметр цилиндра $D=76$ мм, ход поршня $S=66$ мм, номинальная расчетная частота вращения двигателя $n=900$ мин⁻¹, это соответствует средней скорости поршня $c_{п}=2,0$ м/с.

Расчеты выполнялись для четырех нагрузочных режимов, соответствующих давлениям сжатого воздуха на входе $p_{вх}$, равных: 1,2; 1,0; 0,8 и 0,6 МПа при одной и той же температуре поступающего воздуха на входе $t_{вх}=20$ °С и противодавлении на выпуске $p_{вып}=0,12$ МПа, создаваемом глушителем шума [8]. Относительная величина мертвого объема принята минимальной реально достижимой $\epsilon_0=0,05$. Утечки сжатого воздуха приняты пренебрежимо малыми, т.е. коэффициент утечек как отношение расхода полезно используемого в рабочем процессе воздуха к его полному расходу, включая утечки, принят $\eta_y=1,0$. Другие, необходимые для расчетов исходные данные, приняты с учетом опытных данных [7–10] по предельно высокому уровню, т.к. применение клапанного воздухораспределения с автоматически регулируемые фазами открытия и закрытия клапанов открывает возможности существенного улучшения показателей рабочего процесса, снижения расхода сжатого воздуха и повышения мощности пневмодвигателя.

Постановка задачи расчетного исследования состоит в том, чтобы определить наиболее выгодные значения задаваемых параметров рабочего процесса (давления сжатого воздуха на входе $p_{вх}$, степени наполнения ϵ_1 и

степени обратного сжатия ε_3) для режимов наилучшей экономичности и наибольшей мощности пневмодвигателя.

Анализ результатов исследования

Основные результаты расчетного исследования представлены на рис. 1 и 2. На рис. 1 представлены две нагрузочные характеристики для одного и того же скоростного режима $n=900 \text{ мин}^{-1}$. Для простоты анализа представлены только две самые крайние характеристики, соответствующие минимальной $\varepsilon_1^{\text{min}}$ и максимальной $\varepsilon_1^{\text{max}}$ степеням наполнения цилиндров.

Теоретически минимальной является та величина ε_1 , при которой происходит полное расширение поступившего в цилиндр воздуха, что означает равенство давления конца расширения p'_2 противодавлению выпуска p''_2 . При дальнейшем снижении ε_1 возникает неравенство $p'_2 < p_2$ и образуется так называемая «петля» отрицательной индикаторной работы, что ведет к снижению индикаторной, а следовательно, и эффективной мощностей, перерасходу сжатого воздуха и, что весьма важно, к переохлаждению двигателя.

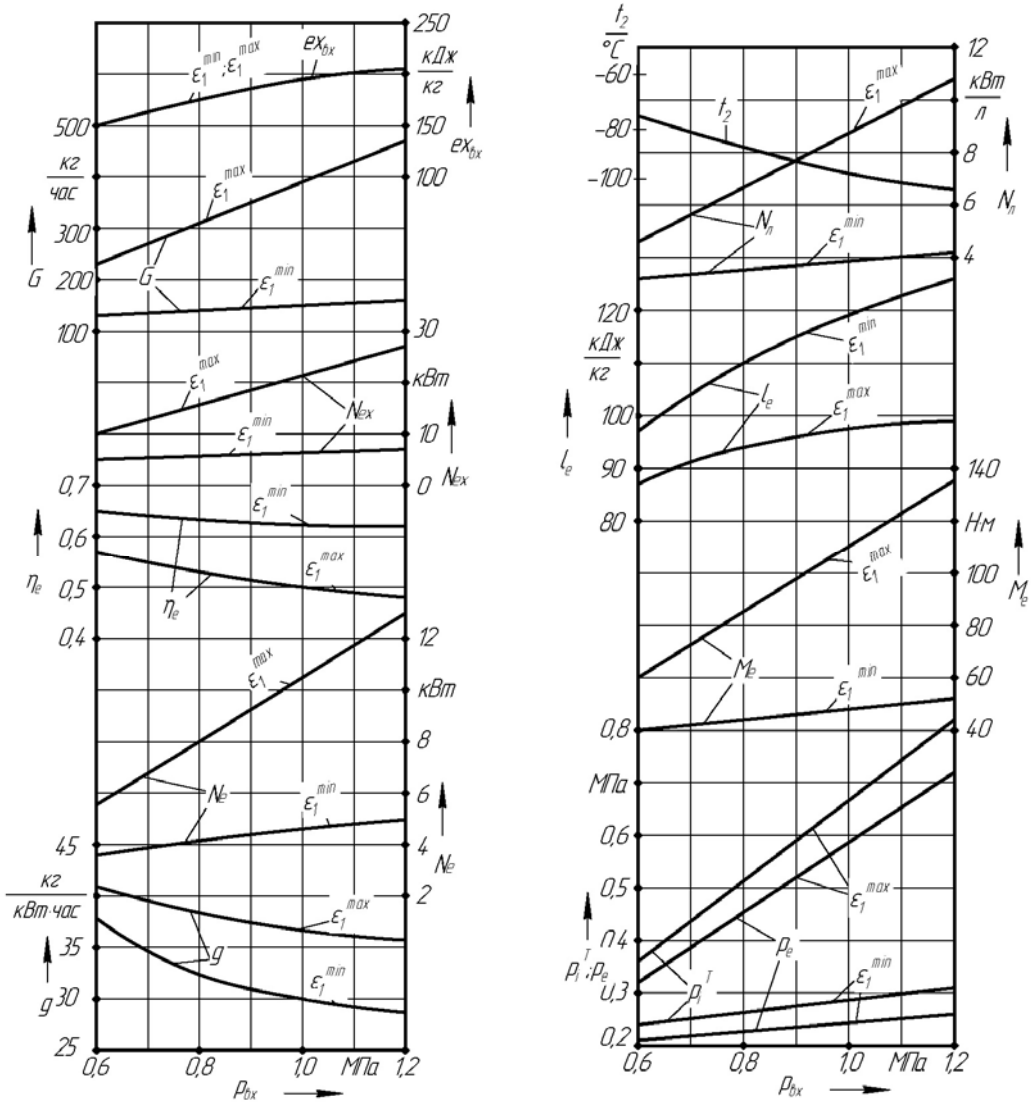


Рис. 1. Зависимость параметров работы поршневого пневмодвигателя от давления сжатого воздуха на входе $p_{вх}$ при минимальной $\varepsilon_1^{\text{min}}$ и максимальной $\varepsilon_1^{\text{max}}$ степенях наполнения цилиндров. Нагрузочные характеристики на скоростном режиме $n=900 \text{ мин}^{-1}$

Заметим, что во всех вариантах расчета, различающихся задаваемыми параметрами $p_{\text{вх}}$ и ε_1 , использовалась наивыгоднейшая (оптимальная) величина степени обратного сжатия $\varepsilon_3^{\text{опт}} = V_3 / V_p$ (см. рис. 3). Для этого выполнялось отдельное расчетное исследование по оптимизации величины ε_3 по критерию максимума удельной индикаторной работы теоретического цикла l_i^T , кДж/кг. Для теоретического цикла значение $\varepsilon_3^{\text{опт}}$ зависит от двух параметров: конструктивного ε_0 и режимного $p_{\text{вх}}$. От степени наполнения цилиндров величина $\varepsilon_3^{\text{опт}}$ не зависит. При заданном неизменном значении $\varepsilon_0 = 0,05 = \text{const}$, $\varepsilon_3^{\text{опт}}$ определяется только уровнем давления сжатого воздуха на входе.

Расчетом установлено:

для $p_{\text{вх}} = 1,2$ МПа – $\varepsilon_3^{\text{опт}} = 0,20$;
 $p_{\text{вх}} = 1,0$ МПа – $\varepsilon_3^{\text{опт}} = 0,17$;
 $p_{\text{вх}} = 0,8$ МПа – $\varepsilon_3^{\text{опт}} = 0,14$;
 $p_{\text{вх}} = 0,6$ МПа – $\varepsilon_3^{\text{опт}} = 0,10$.

Анализ зависимостей параметров работы пневмодвигателя по названным двум граничным нагрузочным характеристикам позволяет констатировать следующее.

а) Наиболее экономичная работа пневмодвигателя, т.е. работа с наименьшим удельным расходом сжатого воздуха $g = 28,3$ кг/(кВт·ч) достигается при максимальном давлении на входе $p_{\text{вх max}} = 1,2$ МПа в сочетании с минимально возможной степенью наполнения $\varepsilon_1^{\text{min}} = 0,15$. При этом двигатель будет иметь мощность $Ne = 5,1$ кВт.

Однако, как показали лабораторные испытания созданного на кафедре поршневого пневмодвигателя, максимальное рабочее давление воздуха на входе $p_{\text{вх}}$ по ряду причин целесообразно устанавливать 1,0 МПа. Для такого уровня $p_{\text{вх}}$ наиболее экономичный режим будет иметь параметры: $g = 30,0$ кг/(кВт·ч), $Ne = 4,83$ кВт, $\varepsilon_1^{\text{min}} = 0,20$. Теоретическая индикаторная диаграмма при работе двигателя на этом режиме изображена на рис. 3.

б) Наиболее высокая мощность пневмодвигателя $Ne = 12,9$ кВт достигается также при самом высоком давлении сжатого воздуха на входе $p_{\text{вх}} = 1,2$ МПа, но в сочетании уже с самой высокой степенью наполнения $\varepsilon_1^{\text{max}} = 0,5$. При давлении $p_{\text{вх}} = 1,0$ МПа и $\varepsilon_1 = 0,5$ эффективная мощность двигателя составляет $Ne = 10,4$ кВт, $g = 37,0$ кг/(кВт·ч).

Из графиков на рис. 1 и 2 видно, что в сравнении с наиболее экономичным режимом при переходе на режим максимальной мощности существенно улучшаются все энергетические параметры работы пневмодвигателя: Ne , литровая мощность N_l , крутящий момент на выходном валу Me , среднее эффективное p_e и среднее индикаторное p_i давления. При рабочем давлении воздуха $p_{\text{вх}} = 1,0$ МПа перечисленные параметры выросли в 2,2 раза. Но одновременно с этим положительным эффектом существенно ухудшились все параметры, характеризующие экономичность пневмодвигателя: удельный расход сжатого воздуха g , кг/(кВт·ч), вырос в 1,23 раза; часовое потребление сжатого воздуха G , естественно, выросло в наибольшей мере в 2,6 раза; эффективный КПД η_e снизился во столько раз, во сколько вырос удельный расход воздуха, т.е. в 1,23 раза; удельная работа l_e , кДж/кг, снизилась в той же мере, как и эффективный КПД, т.е. в 1,23 раза; поскольку термодинамические параметры поступающего сжатого воздуха остались те же и его удельная эксергия $ex_{\text{вх}}$, кДж/кг осталась той же, то мощность эксергетического потока сжатого воздуха на входе в двигатель

$$N_{ex} = G \cdot ex_{\text{вх}} / 3600, \text{ кВт},$$

естественно, возросла пропорционально G , т.е. в 2,6 раза.

Причины названных изменений параметров работы пневмодвигателя можно наглядно пояснить с помощью индикаторных диаграмм, изображенных в масштабе на рис. 3 для двух сравниваемых режимов при $p_{\text{вх}} = 1,0$ МПа: режима наилучшей экономичности при степени наполнения $\varepsilon_1^{\text{min}} = 0,2$ и режима наибольшей мощности при $\varepsilon_1^{\text{max}} = 0,5$. Сравнимые режимы отличаются только

величиной ε_1 . Из рис. 3 видно, что увеличение ε_1 с 0,2 до 0,5 привело к заметному росту площади индикаторной диаграммы, т.е. к росту цикловой индикаторной работы L_i^T , кДж. Расчеты показали, что L_i^T возросла в 2,2 раза. Следствием этого и является рост в 2,2 раза всех энергетических параметров: p_i^T , p_e , Ne , N_d , Me .

Вместе с тем из диаграмм рис. 3 видно, насколько остается недоиспользованной потенциальная энергия рабочего тела в условиях высокой степени наполнения. При $\varepsilon_1=0,2$ имеет место практически полное расширение рабочего тела до предельно возможного уровня конечного давления $p_2=0,12$ МПа (точка 2'). Во втором случае, при $\varepsilon_1=0,5$, процесс расширения закончился в точке 2'' еще при высоком давлении рабочего тела $p_2''=0,426$ МПа. Расчеты показали, что в этом случае располагаемая в исходном состоянии (точка 1'') потенциальная энергия рабочего тела успевает превратиться в полезную механическую работу меньше чем наполовину, т.е. большая часть энергии сжатого воздуха теряется – уходит в атмосферу с отработавшим воздухом. Отсюда ухудшение всех экономических показателей работы пневмодвигателя при увеличении степени наполнения цилиндров.

Таким образом, при увеличении степени наполнения цилиндров ε_1 действуют два основных фактора: положительный – увеличение мощности и отрицательный – ухудшение экономичности. Причем чем выше ε_1 , тем медленнее нарастает мощность и интенсивнее растет удельный расход сжатого воздуха.

Но есть еще один положительный фактор повышения ε_1 – возрастает доля отработавшего воздуха, который покидает цилиндр при более высокой температуре. С ростом ε_1 растут и доля этого не успевшего расширяться воздуха, и его температура. Низкие температуры отработавшего воздуха в процессе его выталкивания из цилиндра t_2 (см. рис. 1) – весьма серьезная проблема, влекущая за собой обмерзание выпускных каналов двигателя, в том числе и внутренних полостей глушителя шума. Как видно из рис. 1, температура t_2 при $p_{вх}=1,0$ МПа и $t_{вх}=20$ °С дос-

тигает минус 98 °С. Как показывает опыт эксплуатации поршневых пневмодвигателей [7, 9, 10] и наш опыт испытаний пневмодвигателя в лаборатории ДВС, при таких условиях продолжительная работа двигателя невозможна. Возможна только сравнительно кратковременная работа. На практике [7–10] во избежание обмерзания двигателей вынуждены понижать давление поступающего сжатого воздуха и применять полное наполнение.

Выводы

Разработаны методика и компьютерная программа расчета четырехпроцессорного рабочего цикла поршневого пневмодвигателя заданных размеров и имеющего клапанное воздухораспределение и автоматическое оптимизационное регулирование фаз открытия и закрытия клапанов в зависимости от задаваемых режимов работы.

В выполненном расчетном исследовании из всего поля эксплуатационных режимов работы пневмодвигателя выбран один номинальный (расчетный) скоростной режим $n=900$ мин⁻¹, соответствующий средней скорости поршня 2,0 м/с. Для этой частоты вращения рассчитано поле нагрузочных характеристик, в которых расчетный режим характеризуется давлением сжатого воздуха на входе в двигатель $p_{вх}$ и степенью наполнения цилиндров ε_1 . Диапазон изменения давлений $p_{вх}=1,2; 1,0; 0,8$ и $0,6$ МПа. Номинальным давлением принято $p_{вх}=1,0$ МПа. Диапазон изменения степени наполнения: от максимальной $\varepsilon_1^{\max}=0,50$ до минимально возможной ε_1^{\max} , зависящей от уровня $p_{вх}$.

Достигнута основная цель исследования – выбор наиболее выгодного сочетания задаваемых параметров работы двигателя $p_{вх}$ и ε_1 для интересующих режимов и определения энергетических и экономических параметров двигателя для этих режимов. Так режим максимальной номинальной мощности $Ne=10,5$ кВт достигается при $p_{вх}=1,0$ МПа и $\varepsilon_1^{\max}=0,50$; при этом удельный расход сжатого воздуха $g=37,1$ кг/(кВт·ч), эффективный крутящий момент $Me=111$ Н·м, эффективный КПД $\eta_e=0,502$, среднее эффективное давле-

ние $p_e=0,584$ МПа, литровая мощность $N_{л}=8,76$ кВт/л, часовой расход сжатого воздуха $G=389$ кг/ч.

Режим минимального удельного расхода сжатого воздуха $g=30,1$ кг/(кВт·ч) достигается при $p_{вх}=1,0$ МПа и $\varepsilon_1^{\min}=0,20$; при этом $Ne=5,25$ кВт, $Me=55,8$ Н·м, $\eta_e=0,617$, $p_e=0,293$ МПа, $N_{л}=4,39$ кВт/л, $G=158,3$ кг/ч.

Степень обратного сжатия ε_3 оптимизирована по критерию минимального удельного расхода воздуха:

для $p_{вх}=1,2$ МПа – $\varepsilon_3^{\text{опт}}=0,20$;

$p_{вх}=1,0$ МПа – $\varepsilon_3^{\text{опт}}=0,17$;

$p_{вх}=0,8$ МПа – $\varepsilon_3^{\text{опт}}=0,14$;

$p_{вх}=0,6$ МПа – $\varepsilon_3^{\text{опт}}=0,10$.

Расчетами установлено, что температура отработавшего воздуха в цилиндре t_2 достигает неприемлемо низкого уровня, и чем выше давление воздуха на входе $p_{вх}$, тем ниже t_2 .

Так, при $p_{вх}=1,2$ МПа – $t_2=-105$ °С,

$p_{вх}=1,0$ МПа – $t_2=-98$ °С,

$p_{вх}=0,8$ МПа – $t_2=-88$ °С,

$p_{вх}=0,6$ МПа – $t_2=-75$ °С.

При таких уровнях t_2 возможна лишь кратковременная работа двигателя (до 20–30 мин) до начала интенсивного обмерзания выпускных каналов и зарастания снежной шубой полостей глушителя шума.

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. 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.

- Харьков : ХНАДУ. – 2006. – Вып. 18. – С. 7–12.
4. Бажинов О.В. Гибридни автомобілі / О.В. Бажинов, О.П. Смирнов, С.А. Серіков та ін. – Харків : 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. – Харьков : ХНАДУ. – 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. – 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. Черников. – М. : НИИинформтяж-маш, 1970.
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. – Харьков : ХНАДУ. – 2009. – Вып. 24. – С. 7–10.
14. Абрамчук Ф.И. О достоинствах и целесообразности применения поршневого пневмодвигателя в составе автомобильной гибридной силовой установки / Ф.И. Абрамчук, А.И. Воронков, И.Н. Никитченко // Вестник ХНАДУ : сб. науч. тр. – Харьков : ХНАДУ. – 2010. – Вып. 48. – С. 200–205.

Рецензент: М.А. Подригало, профессор, д.т.н., ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 19 ноября 2010 р.