

УДК 621.5

ИЗМЕНЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ИНДИКАТОРНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПНЕВМОДВИГАТЕЛЯ ПО СКОРОСТНЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ БЕЗ ПОДОГРЕВА ЗАРЯДА НА ВПУСКЕ

А.И. Воронков, доц., к.т.н., Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет

Аннотация. Рассмотрены экспериментальные данные об изменении по скоростным характеристикам энергетических индикаторных показателей четырехцилиндрового поршневого пневмодвигателя $D/S = 76/66$ с золотниковым воздухораспределителем при неизменной температуре сжатого воздуха на входе.

Ключевые слова: поршневой пневмодвигатель с золотниковым воздухораспределением, рабочий процесс, индикаторные показатели, стендовые испытания, скоростная характеристика, индикаторная диаграмма.

ЗМІНА ЕНЕРГЕТИЧНИХ ІНДИКАТОРНИХ ПОКАЗНИКІВ ПНЕВМОДВИГУНА ЗА ШВИДКІСНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ БЕЗ ПІДГРІВАННЯ ЗАРЯДУ НА ВПУСКУ

О.І. Воронков, доц., к.т.н., Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. Розглянуто експериментальні дані щодо зміни за швидкісними характеристиками енергетичних індикаторних показників чотирициліндрового поршневого пневмодвигуна $D/S = 76/66$ із золотниковим повітророзподільником за незмінної температури стисненого повітря на вході.

Ключові слова: поршневий пневмодвигун із золотниковим повітророзподільником, робочий процес, індикаторні показники, стендові випробування, швидкісна характеристика, індикаторна діаграма.

CHANGE ON SPEED AIR CHARACTERISTICS THE POWER INDICATOR INDEXES OF PNEUMATIC ENGINE WITHOUT HEATING THE CHARGE DURING THE ADMITTANCE

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

Abstract. The experimental data on change according to speed characteristics of power indicator indexes of the four cylinder pneumatic engine $D/S = 76/66$ with a slide-valve air distributor at unchangeable temperature of compressed input air is considered.

Key words: piston pneumatic engine with slide-valve air distribution, working process, indicator indexes, stand tests, speed description.

Введение

Объектом экспериментального исследования принят поршневой четырехцилиндровый V-образный пневмодвигатель, созданный ка-

федрой ДВС ХНАДУ и установленный для лабораторных исследований на действующем испытательном стенде в лаборатории кафедры. На двигателе установлено золотниковое воздухораспределение.

Рассматриваемое в данной статье экспериментальное исследование лежит в русле накопления экспериментальных данных по проблеме изучения рабочего процесса пневмодвигателя.

Приведены результаты экспериментального исследования рабочего процесса пневмодвигателя при его работе по скоростным характеристикам $p_{вх} = idem$ при подаче сжатого воздуха в цилиндр с температурой окружающей среды (без подогрева на входе). Данное исследование является частью цикла работ, выполненных по изучению экономических и энергетических показателей пневмодвигателя.

Анализ публикаций

На сегодняшний день известно большое количество публикаций [1–13] по применению пневмодвигателя на автомобиле или других установках. Однако работ по изучению рабочего процесса и, в частности, экспериментальных исследований рабочего процесса пневмодвигателей, проведено недостаточно.

Цель и задачи исследования

Целью работы является проведение испытаний и анализ результатов стендовых испытаний пневмодвигателя по скоростным характеристикам без подогрева сжатого воздуха на входе. В работе были поставлены следующие задачи:

1. Снять во время испытаний пневмодвигателя индикаторные диаграммы для определения основных энергетических индикаторных показателей: цикловой индикаторной работы L_i , кДж, среднего индикаторного давления p_i , МПа, и индикаторной мощности N_i , кВт.
2. При давлениях сжатого воздуха на входе $p_{вх} = 0,5; 0,7; 0,9$ и $1,1$ МПа определить экспериментальные закономерности изменения площади индикаторной диаграммы $F_i = L_i$ в функции частоты вращения коленчатого вала n , $мин^{-1}$, и давления $p_{вх}$.
3. Получить в графическом виде экспериментально полученные закономерности изменения индикаторных энергетических показателей p_i и N_i по названным скоростным характеристикам и дать соответствующий анализ полученных закономерностей.

Экспериментальное исследование

На первом этапе испытаний, который выполнялся без подогрева сжатого воздуха на входе в воздухораспределительную систему при его температуре $T_{вх} = 293 \pm 2$ К, было зафиксировано 27 режимов, относящихся к четырем скоростным характеристикам при давлениях сжатого воздуха на входе $p_{вх} = 0,5; 0,7; 0,9; 1,1$ МПа с индицированием первого цилиндра. Диаграммы представлены такими, какими их зафиксировала измерительная аппаратура – без осреднения и какой-либо коррекции.

Для демонстрации в данной статье выбраны диаграммы с самой низкой и самой высокой частотами вращения n при одинаковых давлениях сжатого воздуха на входе.

На рис. 1 показано, как изменяется по скоростным характеристикам $p_{вх1} = 0,5$ МПа = $idem$, $p_{вх2} = 0,7$ МПа = $idem$, $p_{вх3} = 0,9$ МПа = $idem$ и $p_{вх4} = 1,1$ МПа = $idem$ цикловая индикаторная работа L_i , кДж, которая равна площади диаграммы F_i , имеющей ту же размерность.

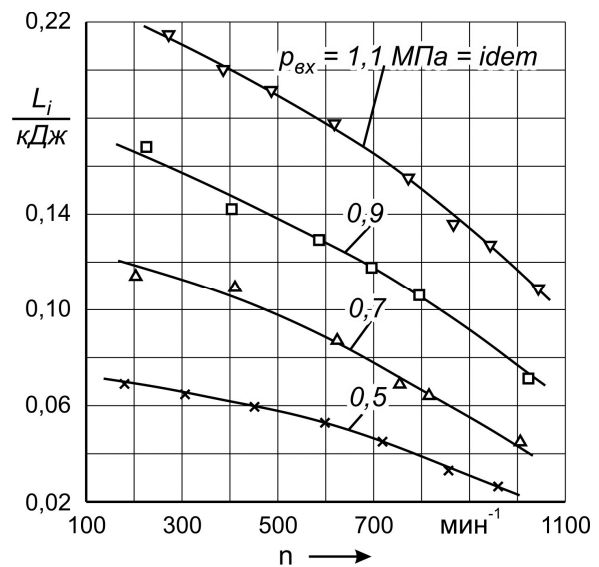


Рис. 1. Изменение цикловой индикаторной работы L_i пневмодвигателя при его стендовых испытаниях по скоростным характеристикам без подогрева сжатого воздуха на входе

По своей физической сущности L_i и F_i представляют собой одно и то же – цикловую работу рабочего тела. Как видно из

рис. 1, величина L_i с увеличением n снижается, и чем выше давление $p_{вх}$, тем резче происходит снижение.

Такой характер изменения цикловой индикаторной работы объясняется, главным образом, возрастанием по мере роста n и $p_{вх}$ гидравлических потерь давления в цилиндре в процессах наполнения и выталкивания из цилиндра отработанного воздуха. Это легко можно наблюдать по снятым индикаторным диаграммам, по изменению среднего давления в цилиндре в процессе наполнения $p_{наполн}$ и средней величины гидравлических потерь в процессе наполнения $\Delta p_{наполн} = p_{вх} - p_{наполн}$. Так, например, на режиме № 8, при $p_{вх} = 0,7$ МПа и $n = 206$ мин⁻¹ (рис. 2), $p_{наполн} = 0,60$ МПа, а $\Delta p_{наполн} = 0,10$ МПа. Но уже на следующем режиме № 9, при том же давлении на входе $p_{вх} = 0,7$ МПа и возросшей скорости вращения до $n = 414$ мин⁻¹, среднее давление в цилиндре в процессе наполнения упало до $p_{наполн} = 0,55$ МПа, что вызвало увеличение $\Delta p_{наполн}$ до 0,15 МПа.

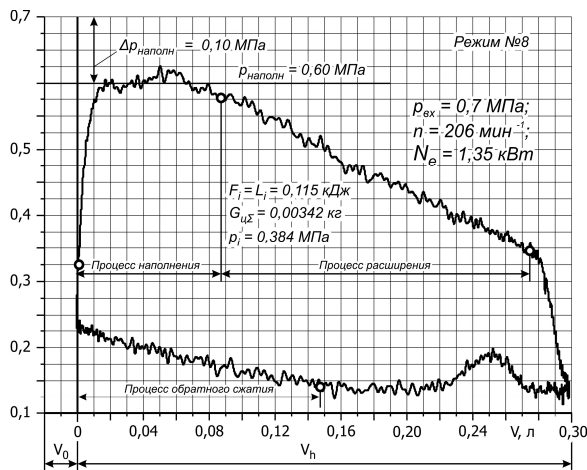


Рис. 2. Индикаторная диаграмма, снятая при работе пневмодвигателя на скоростном режиме $n = 206$ мин⁻¹ и давлении сжатого воздуха на входе $p_{вх} = 0,7$ МПа. Среднее давление процесса наполнения $p_{наполн} = 0,60$ МПа. Средняя величина гидравлических потерь в процессе наполнения $\Delta p_{наполн} = 0,10$ МПа

При максимальной частоте вращения $n = 1009$ мин⁻¹ $p_{наполн}$ снизилось до 0,382 МПа (рис. 3), а гидравлические потери $\Delta p_{наполн}$ выросли до 0,318 МПа; вся линия наполнения и расширения диаграммы значительно опустилась, а линия выталкивания и обратного сжатия отработанного воздуха поднялась вверх,

что очень, как видно из сопоставления диаграмм на рис. 2 и 3, деформировало контур диаграммы при неизменном давлении на входе 0,7 МПа.

При других давлениях сжатого воздуха на входе, т.е. при работе пневмодвигателя по другим скоростным характеристикам происходят деформации индикаторных диаграмм, подобные оборотам n .

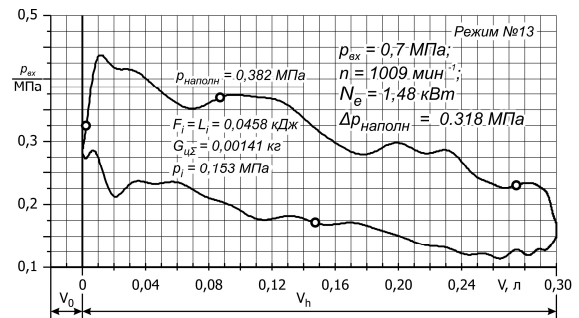


Рис. 3. Индикаторная диаграмма, снятая при работе пневмодвигателя на скоростном режиме $n = 1009$ мин⁻¹ и давлении сжатого воздуха на входе $p_{вх} = 0,7$ МПа. Среднее давление процесса наполнения $p_{наполн} = 0,382$ МПа. Средняя величина гидравлических потерь в процессе наполнения $\Delta p_{наполн} = 0,318$ МПа

Как изменяются величины среднего давления в цилиндре в процессе наполнения $p_{наполн}$ и гидравлические потери в этом процессе $\Delta p_{наполн}$ при работе пневмодвигателя по всем четырем рассматриваемым скоростным характеристикам, показано на рис. 4 и 5.

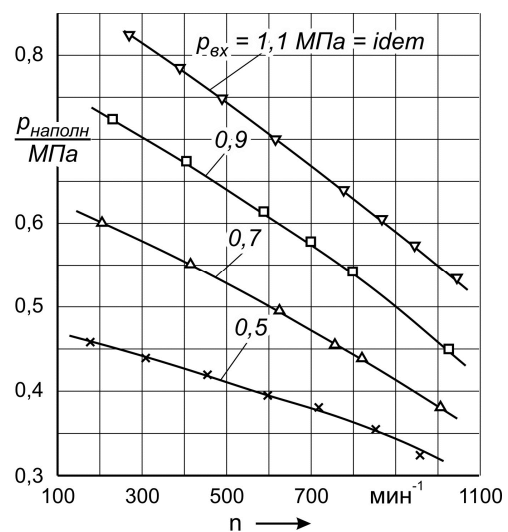


Рис. 4. Изменение по скоростным характеристикам среднего давления в цилиндре в процессе наполнения пневмодвигателя

Характер изменения по скоростным характеристикам цикловой индикаторной работы L_i влияет и на закономерности изменения других индикаторных параметров, которые будут рассмотрены ниже.

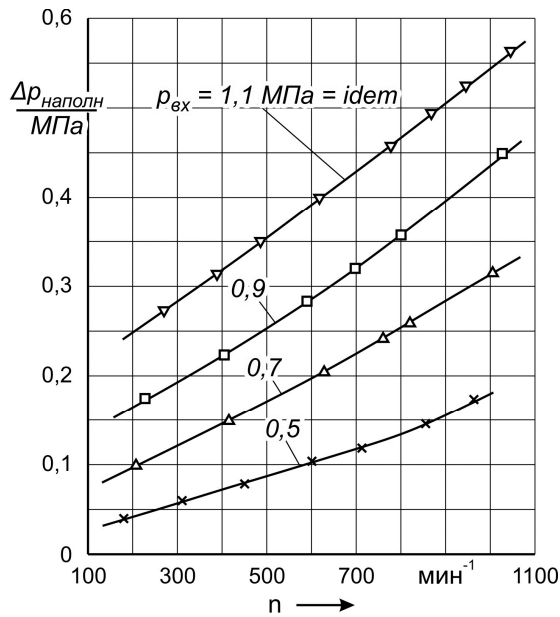


Рис. 5. Изменение по скоростным характеристикам разности давления сжатого воздуха на входе и среднего давления в цилиндре в процессе наполнения $p_{вх} - p_{наполн}$, полученное обработкой индикаторных диаграмм, снятых при стендовых испытаниях пневмодвигателя

На рис. 6 показано, как по рассматриваемым скоростным характеристикам изменяется среднее индикаторное давление

$$p_i = L_i / V_h = L_i / 0,2994, \text{ МПа.} \quad (1)$$

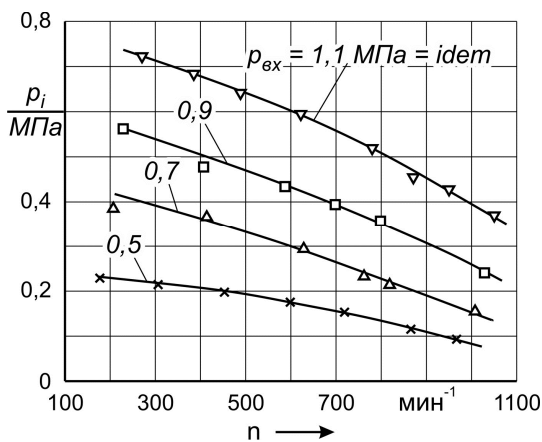


Рис. 6. Изменение среднего индикаторного давления p_i при испытаниях пневмодвигателя по скоростным характеристикам без подогрева сжатого воздуха на входе

Из этой формулы видно, что p_i полностью повторяет закономерности L_i , рассмотренные выше. Заметим, что среднее индикаторное давление p_i является важнейшим удельным параметром пневмодвигателя. Он показывает, какое количество полезной индикаторной работы получается на один литр рабочего объема цилиндра в результате осуществления рабочего процесса на данном режиме работы пневмодвигателя. Среднее индикаторное давление от режима к режиму существенно изменяется. При неизменном давлении энергоносителя на входе, т.е. в течение одной и той же скоростной характеристики, оно изменяется, как это видно из рис. 6, в два раза. Изменяется p_i так же, как и L_i , – нелинейно: по мере роста частоты вращения n снижение этих параметров становится все более интенсивным.

На рис. 7 представлено изменение по скоростным характеристикам индикаторной мощности N_i , кВт, – определяющего параметра, формирующего главный энергетический показатель двигателя – его эффективную мощность.

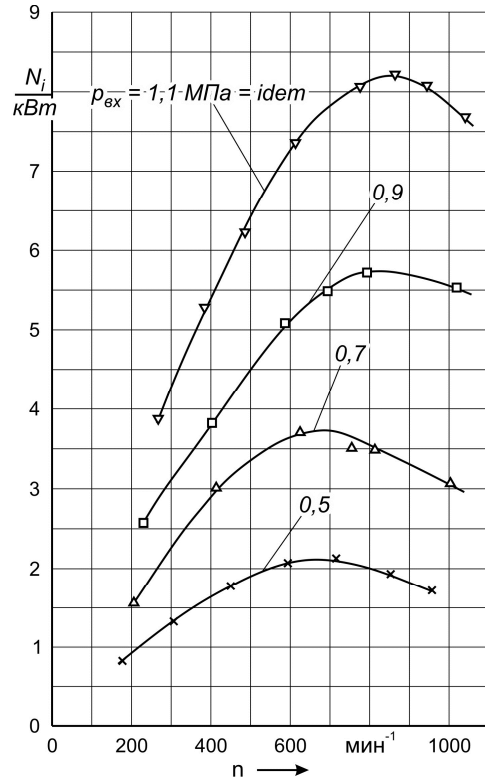


Рис. 7. Изменение по скоростным характеристикам индикаторной мощности пневмодвигателя N_i при его стендовых испытаниях без подогрева сжатого воздуха на входе

Вычисляется индикаторная мощность по известной зависимости

$$N_i = p_i \cdot V_h \cdot z \cdot n / 60 = L_i \cdot z \cdot n / 60, \text{ кВт}, \quad (2)$$

где $z=4$ – число цилиндров пневмодвигателя.

Важно отметить, что N_i есть функция произведения двух параметров L_i и n , изменяющихся по скоростным характеристикам прямо противоположно и с различной интенсивностью. Известно, что такая функция обязательно имеет экстремум. В данном случае имеет место максимум.

При $p_{\text{вх}} = 0,5$ МПа, $N_{i\text{max}} = 2,15$ кВт; при $p_{\text{вх}} = 0,7$ МПа, $N_{i\text{max}} = 3,75$ кВт; при $p_{\text{вх}} = 0,9$ МПа, $N_{i\text{max}} = 5,75$ кВт; при $p_{\text{вх}} = 1,1$ МПа, $N_{i\text{max}} = 8,25$ кВт. По мере роста давления сжатого воздуха на входе положение режима $N_{i\text{max}}$ имеет тенденцию сдвига в сторону более высокой частоты вращения вала.

В статье рассмотрены экспериментальные зависимости энергетических индикаторных показателей рабочего процесса, не зависящих от количества потребляемого сжатого воздуха, т.е. не имеющих отношения к экономичности и КПД пневмодвигателя.

Выводы

1. В работе показано, что исходными данными для определения основных энергетических индикаторных показателей: цикловой индикаторной работы L_i , кДж, среднего индикаторного давления p_i , МПа, и индикаторной мощности N_i , кВт, служат снятые во время испытаний пневмодвигателя индикаторные диаграммы; в работе для примера дан анализ двух индикаторных диаграмм для режимов работы пневмодвигателя, отличающихся частотой вращения коленчатого вала и нагрузкой.

2. Главное, что достигнуто в результате стендовых испытаний пневмодвигателя по четырем скоростным характеристикам при давлениях сжатого воздуха на входе $p_{\text{вх}} = 0,5; 0,7; 0,9$ и $1,1$ МПа, – это получение экспери-

ментальных закономерностей изменения по названным характеристикам площади индикаторной диаграммы $F_i = L_i$ в функции частоты вращения коленчатого вала n , мин⁻¹ и давления $p_{\text{вх}}$.

3. В работе представлены в графическом виде экспериментально полученные закономерности изменения индикаторных энергетических показателей p_i и N_i по названным скоростным характеристикам и дан соответствующий анализ полученных закономерностей.

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. Гібридні автомобілі / О. В. Бажинов, О. П. Смирнов, С. А. Серіков та ін. – Х: ХНАДУ, 2008. – 328 с.
5. Смирнов О. П. Характерні режими роботи гібридної енергетичної установки автомобіля / О. П. Смирнов, В. І. Калмиков // Автомобильный транспорт: сб. науч. тр. – 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. Чернилов. – М.: НИИинформтяжмаш, 1970.
12. Ильичев А. С. Рудничные пневматические установки / А. С. Ильичев. – М.: Углетехиздат, 1953. – Т. 1. – 632 с.
13. 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.
6. Zhdanov E. Mezhdunarodnyj avtosalon NAJAS-2010 v Detrojte. *Avtostroenye za rubezhom*, 2010, vol. 4. pp. 2–5.
7. Borysenko K. S. Pnevmatycheskye dvygately gornyh mashyn. Moscow, Ugletehyzdat Publ., 1958. 208 p.
8. Zeleneckij S.B., Rjabov E.D., Mykerov A.G. Rotacyonnye pnevmatycheskye dvygately. Leningrad, Mashynostroenye Publ., 1976. 240 p.
9. Degtjarev V.Y., Mjalkovskij V.Y., Borysenko K.S. Shahtnyepne v motory. Moscow, Nedra Publ., 1979. 192 p.
10. Zynevych V.D., Geshlyn L.A. Porshnevye y shesternye pnevmodvygately gorno-shahtnogo oborudovanyja. Moscow, Nedra Publ., 1982. 200 p.

References

1. Avtomobyly s kombinirovannym energetycheskym pryvodom: obzorrazrobotok za rubezhom. *Avtostroenye za rubezhom*, 2002, vol. 3. pp. 5–11.
2. Gybridnaja sylovaja ustanovka. *Avtostroenye za rubezhom*, 2002, vol. 4. p.18.
3. Turenko A.N., Bogomolov V.A., Abramchuk F.Y. O trebovanyjah k konstrukcii y rabochemu processu pnevmodvygatelja dlja kombynyrovannoj energoustanovki avtomobilja. *Avtomobyl'nyj transport: sb. nauch. tr.*, 2006, vol. 18. pp. 7–12.
4. Bazhynov O.V., Smyrnov O.P., Sjerikov S.A. Gibrydni avtomobili. Kharkov, KhNADU Publ., 2008, 328 p.
5. Smyrnov O.P., Kalmykov V.I. Harakternii rezhymy roboty gibrydnoi' energetychnoi' ustanovky avtomobilja. *Avtomobyl'nyj transport: sb. nauch. tr.*, 2006, vol. 18. pp. 13–15.
11. Muratov V.A., Pyrogov L.Y., Chernylov Y.G. Pnevmapryvod v otechestvennyh y zarubezhnyh gornorudnyh mashynah. Moscow, NYIinformtjazh-mash Publ., 1970.
12. Yl'ichev A.S. Rudnychnye pnevmatycheskye ustanovky. Moscow, Ugletehyzdat Publ., 1953, vol. 1. 632 p.
13. Turenko A.N., Bogomolov V.A., Abramchuk F.Y. Pnevmodvygatel' dlja avtomobyl'noj gybrydnojsylovoj ustanovky. *Avtomobyl'nyj transport: sb. nauch. tr.*, 2009, vol. 24. pp. 7–10.

Рецензент: Ф.И. Абрамчук, профессор, д.т.н., ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 1 июля 2014 г.