

А.А. Лисовал, А.Г. Разумцев

**БЕЗМОТОРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ЦЕНТРОБЕЖНОГО
КОМПРЕССОРА ФИРМЫ ROTREX**

В статье приведены описание особенностей конструкции приводных центробежных компрессоров фирмы Rotrex и результаты испытаний компрессора серии С15 на созданном безмоторном стенде. На автомобилях и мотоциклетной технике приводные компрессоры, чаще всего, применяют на двигателях с искровым зажиганием. На автотракторных дизелях приводные компрессоры находят применения в двухступенчатых системах наддува. Особенностью центробежных компрессоров серии С15 является компактность и быстроходность – частота вращения колеса компрессора достигает 200000 мин⁻¹. Фирма Rotrex применила в планетарной передаче вместо шестерёнчатых сателлитов цилиндрические ролики на шариковых подшипниках. Конструкция серии С15 получилась компактная, быстроходная, с высоким КПД и малошумная. Передаточное число на созданном стенде от вала электродвигателя к валу колеса компрессора равно 43. Частота вращения вала электродвигателя регулировалась с помощью программируемого микроконтроллера, который регулировал частоту тока. В процессе испытаний центробежного компрессора модификации С15-20 в статических режимах определена рабочая зона потребителя сжатого воздуха для этого компрессора. Характеристики потребителя сжатого воздуха моделировались специальными шайбами с минимальными диаметрами от 10,1 до 14,0 мм. В рабочем диапазоне потребителя сжатого воздуха (автомобильного двигателя внутреннего сгорания) достигнуто максимальное избыточное давление наддува 1,1...1,3 МПа при расходах 460... 250 кг/ч, соответственно. Испытания подтвердили работоспособность стенда для газодинамических исследований центробежных компрессоров. Устойчиво и надёжно работала электронная система управления частотой тока электродвигателя. Характеристики центробежного компрессора С15-20, результаты испытаний свидетельствуют о его назначении в качестве агрегата наддува для двигателей легковых автомобилей с искровым зажиганием и возможности применения в системах комбинированного наддува.

Ключевые слова: двигатели внутреннего сгорания, наддув, центробежный компрессор, испытания наддува

Введение

Приводные компрессоры (нагнетатели) наддува используются на поршневых двигателях внутреннего сгорания давно. Сначала это были роторно-зубчатые компрессоры типа Рутса, затем – винтовые и центробежные [1]. Все они имеют ускоряющую передачу и отбирают энергию на привод от коленчатого вала. По этой причине приводные компрессоры проигрывают газотурбинному наддуву по максимальным значениям степени повышения давления наддува.

На автомобилях и мотоциклетной технике приводные компрессоры, чаще всего, применяют на двигателях с искровым зажиганием для повышения динамических качеств колёсного транспортного средства. Это, например, серийные модели легковых автомобилей Мерседес-Бенц, разработки тюнинговых компаний. На серийных бензиновых двигателях с механическим приводом компрессора избыточное давление наддува не превышает 0,08...0,10 МПа. На автотракторных дизелях приводные компрессоры применялись ранее на двухтактных дизелях [2, 3], а сейчас находят применения в двухступенчатых системах комбинированного наддува [1].

В статье приведены описание особенностей конструкции приводных центробежных компрессоров фирмы Rotrex и результаты испытаний компрессора серии С15 на созданном безмоторном

стенде.

Особенности конструкции приводного компрессора

Особенностью центробежных компрессоров серии С15 является компактность и быстроходность – частота вращения колеса компрессора достигает 200000 мин⁻¹.

Максимальная степень повышения давления (π_k) достигает значений 2,45...2,94 при секундных расходах воздуха 0,12...0,10 кг/с, соответственно, для модификаций С15-16 и С15-20. Эти модификации рассчитаны на максимальные расходы воздуха до 0,15 кг/с и применяются при форсировке двигателя до 120...125 кВт. Модификация С15-60 рассчитана на расход воздуха до 0,22 кг/с и максимальное $\pi_k=2,35$. С таким центробежным компрессором возможна форсировка двигателя до 175 кВт.

Внешние габаритные размеры центробежных компрессоров серии С15 показаны на рис. 1.

Внешне модификации центробежных компрессоров С15 отличаются размером входного отверстия в компрессор (позиция А на рис. 1) и возможна установка различных шкивов (позиция Pully на рис. 1) для 7-ми или 8-ручейного ремня. Кроме того, каждая модификация может иметь 6 видов, т.к. возможно при установке поворачивать корпус компрессора на 60 град [4].

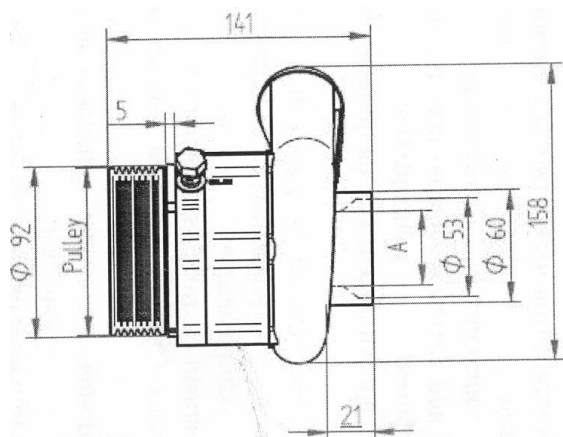


Рис. 1. Внешние размеры центробежных компрессоров Rotrex серии C15

Колесо компрессора с двумя рядами лопаток разной высоты, размещённых по радиусу, приводятся во вращение от выходного вала планетарной передачи. Последняя получает крутящий момент от шкива (позиция Pulley на рис. 1), который через 7-ми или 8-ми ручейный ремень создаёт кинематическую связь с коленчатым валом двигателя. Диффузор щелевой (безлопаточный) переходит в корпус улитки.

Обычно в центробежных приводных компрессорах применяют одноступенчатую ускоряющую или планетарную передачи шестеренчатого типа [5]. Фирма Rotrex применила в планетарной передаче вместо шестерёнчатых сателлитов цилиндрические ролики на шариковых подшипниках, т.е. передача крутящего момента от солнечной «шестерни без зубьев» через три ролика-сателлита передаётся валу колеса компрессора за счёт сил трения между линиями соприкосновения.

Конструкция серии C15 получилась компактная, быстроходная, с высоким КПД и малошумная. Для этой серии центробежных компрессоров передаточное число планетарной передачи составляет 12,67.

Про высокие значения КПД и передаточных чисел для такого вида планетарных передач свидетельствуют исследования немецкого филиала фирмы NSK, которая специализируется на разработке трансмиссий для гибридных автомобилей и электромобилей [6]. Исследователи NSK испытывают не только ролики, но и конические и шаровидные сателлиты.

Составной частью планетарной передачи является индивидуальная система смазки-охлаждения, которая входит в комплект поставки от фирмы Rotrex. Для успешной работы индивидуальной системы смазки требуется, чтобы при установке компрессора, ось вращения имела отклоне-

ние от горизонтали не более 15 град. Расширительный бачок системы должен быть размещен ниже корпуса компрессора, т.к. ролики планетарной передачи одновременно выполняют функцию масляного насоса. Жидкость синего цвета для смазки и охлаждения фирма тоже поставляет в комплекте.

Стенд для испытания приводного компрессора

На средства от инновационного проекта «Динамические системы воздушного охлаждения» (DAC) для перерабатывающей промышленности агропромышленного комплекса (АПК) был приобретён центробежный приводной компрессор Rotrex серии C15-20 и изготовлен стенд для газодинамических исследований. Динамическая система промышленного охлаждения для АПК в данной статье не описывается. Моделировалась работа центробежного компрессора на автомобиле.

Общий вид стенда для испытания компрессора C15-20 показан на рис. 2.

Центробежный компрессор закреплён горизонтально по отношению к раме и оси вращения вала однофазного электродвигателя переменного тока, мощностью 15 кВт.

Кинематическая связь с ведущим валом планетарной передачи осуществляется через шкивы и 7-ми ручейный ремень. Общее передаточное число от вала электродвигателя через ремennую и планетарные передачи к валу колеса компрессора составляет $3,4 \times 12,67 = 43$.

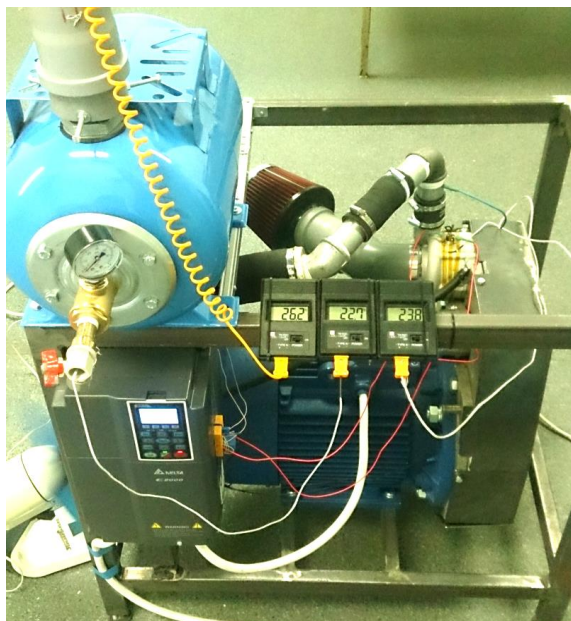
После центробежного компрессора сжатый воздух направляется в промежуточный охладитель (интеркулер) типа воздух-воздух. Охлаждающий поток внешнего воздуха создавался воздушным вентилятором с электрическим приводом.

После охладителя сжатый воздух поступал в ресивер, где на выходе устанавливались калиброванные расходные шайбы для моделирования потребителя.

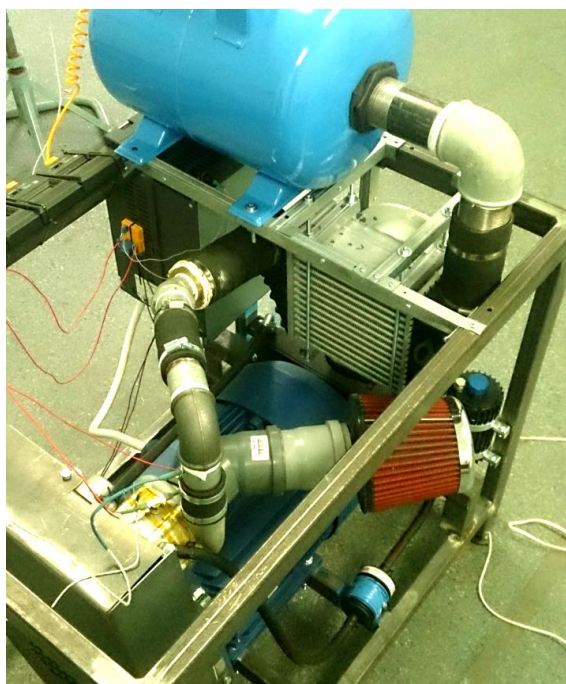
Частота вращения вала электродвигателя регулировалась с помощью программируемого микроконтроллера, который регулировал частоту тока. Микроконтроллер позволял выставлять и удерживать частоту вращения вала электродвигателя с точностью 1 мин^{-1} .

Температура воздуха до и после компрессора и охладителя измерялись термopарами с цифровой индикацией. Косвенно контролировали температуру масла – измерялась термopарой температура корпуса планетарной передачи.

Для определения расхода воздуха измеряли скорость потока с помощью цифрового анемометра Benetech GM8901.



а)



б)

Рис. 2. Вид стенда для испытаний центробежного компрессора C15-20: а) сбоку; б) сверху

Результаты испытаний

Испытания центробежного компрессора C15-20 проводили на установившихся режимах на разработанном стенде. В ручном режиме на микроконтроллере выставляли необходимую электрическую частоту и определяли параметры воздушного потока. В ходе испытаний меняли специальные расходные шайбы, минимальный диаметр которых был от 9 мм до 16 мм. Расходные шайбы установ-

ливали, как после ресивера, так и после компрессора.

Таблица 1. Результаты испытаний компрессора с расходной шайбой диаметром 14 мм

Частота электродвигателя, Гц	Обороты электродвигателя, мин ⁻¹	Обороты вала компрессора, мин ⁻¹	Скорость потока воздуха, м/с
38,1	2322	100000	16,3
41,9	2558	110000	19,1
45,8	2791	120000	20,9
49,5	3024	130000	22,4
53,3	3255	140000	23,2
57,1	3488	150000	24,1
61,0	3724	160000	25,1
64,8	3958	170000	26,6

В таблице 1 приведен фрагмент протокола испытаний центробежного компрессора с установленной на выходе расходной шайбой с минимальным диаметром 14 мм.

По результатам испытаний получили расходные характеристики установки (после ресивера) и компрессора. На рис. 3 показаны экспериментальные расходные характеристики компрессора при установке специальных шайб с диаметрами 10,1; 14,0; 16,0 мм, которые нанесены на заводскую характеристику компрессора C15-20 фирмы Rotrex.

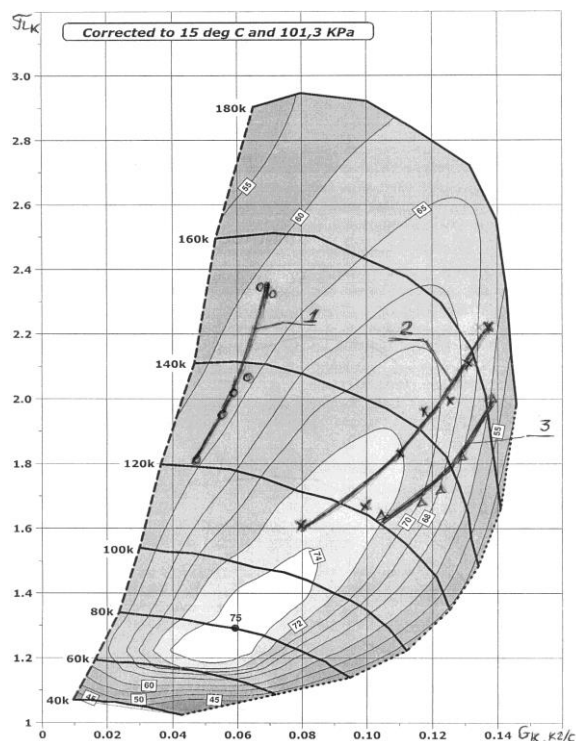


Рис. 3. Заводская характеристика C15-20 с расходными характеристиками потребителя при установке специальных шайб диаметром: 1– 10,1; 2– 14,0; 3– 16,0 мм

На рис. 3 видно, что с ростом частоты вращения вала компрессора и при увеличении расхода потребителем заводские характеристики при постоянной частоте вращения компрессора резко падают и уходят в область низких КПД. Это ощущалось уже после 130000 мин^{-1} вала компрессора. По этой причине достигнуть высоких давлений наддува на собраном стенде с расходными шайбами диаметром 12,6 мм и больше не удалось.

Максимальное избыточное давление после компрессора на протяжении длительного периода времени, которое удалось получить с расходной шайбой диаметром 10,1 мм (позиция 1 на рис. 3), было 1,3 МПа. Температура воздуха после компрессора была $120 \dots 130^\circ\text{C}$.

Заводские характеристики модификаций C15-16, C15-60 отличаются от C15-20 характером наклона характеристики при постоянной частоте вращения компрессора, быстроходностью и смещением больших значений КПД в зону высоких частот вращения [4].

Выводы

Испытания подтвердили работоспособность созданного стенда для газодинамических исследований центробежных компрессоров. Устойчиво и надёжно работала электронная система управления частотой тока электродвигателя.

В процессе испытаний центробежного компрессора модификации C15-20 в статических режимах определена рабочая зона потребителя сжатого воздуха для этого компрессора. Характеристики потребителя сжатого воздуха моделировались специальными шайбами с минимальными диаметрами от 10,1 до 14,0 мм. В рабочем диапазоне потребителя (автомобильного двигателя внутреннего сгорания) сжатого воздуха достигнуто максимальное избыточное давление наддува $1,1 \dots 1,3 \text{ МПа}$ при расходах $460 \dots 250 \text{ кг/ч}$ соответ-

ственно.

Характеристики центробежного компрессора C15-20, результаты испытаний свидетельствуют о его назначении в качестве агрегата наддува для двигателей легковых автомобилей с искровым зажиганием и возможности применения в системах комбинированного наддува.

Список литературы:

1. Патрахальцев Н.Н. Форсирование двигателей внутреннего сгорания наддувом / Н.Н. Патрахальцев, А.А.Савастенко. – М.: Легион Автодата, 2002. – 176 с.
2. Карягин А.В. Устройство, обслуживание и правила движения автомобилей / А.В.Карягин, Г.М. Соловьев. – М.: Военное издательство МО СССР, 1957.
3. Ханин Н.С. Наддув и нагнетатели автомобильных двигателей / Н.С.Ханин, А.Н.Шестак, Е.Н.Зайченко, Ю.Н.Динеев. – М.: Машиностроение, 1965. – 221 с.
4. “Rotrex C15 supercharger range”, available at: <http://www.rotrex.com>.
5. “Get inside ProCharger”, available at: <http://www.procharger.com>.
6. NSK представит новые компактные системы привода для электромобилей [Электронный ресурс], вход 05.06.2019, <http://www.automaster.net.ua/artykuly/nsk-predstavit-novye-kompaktnye-sistemy-privoda-dlya-eklektromobilej,52067>.

Bibliography (transliterated):

1. Patrahaltsev N.N., Savastenko A.A. (2002), “Forcing of internal combustion engines supercharged”, [“Forsirovaniye dvigateley vnutrennego sgoraniya nadduvom”], “Legion Avtodata”, Moscow, 176 p.
2. Karyagin A.V., Solovyov G.M. (1957), “Device, service and rules of the movement of cars”, [“Ustroystvo, obsluzhivaniye i pravila dvizheniya avtomobiley”], “Voyennoye izdatel'stvo MO SSSR”, Moscow, 216 p.
3. Khanin N.S., Shestak A.N., Zaichenko E.N., Dineev Yu.N. (1965), “Supercharger and supercharger of automobile engines”, [“Nadduv i nagnetateli avtomobil'nykh dvigateley”], “Mashinosmtroyeniye”, Moscow, 221p.
4. “Rotrex C15 supercharger range”, available at: <http://www.rotrex.com>.
5. “Get inside ProCharger”, available at: <http://www.procharger.com>.
6. “NSK will introduce new compact drive systems for electric vehicles”, (05.06.2019), [“NSK predstavit novye kompaktnye sistemy privoda dlya elektromobilej”], available at: <http://www.automaster.net.ua/artykuly/nsk-predstavit-novye-kompaktnye-sistemy-privoda-dly-lektromobilej, 52067>.

Поступила в редакцию 29.06.2019 г.

Лисовал Анатолий Анатольевич – доктор техн. наук, профессор, профессор кафедры двигателей и теплотехники Национального транспортного университета, Киев, Украина, e-mail: li-dvz@bigmir.net, [https:// orcid.org/0000-0001-6168-4010](https://orcid.org/0000-0001-6168-4010)

Разумцев Александр Геннадиевич – канд. философ. наук, руководитель проекта «Dynamic Air Cooling», Киев, Украина, e-mail: a.g.razum@gmail.com.

БЕЗМОТОРНІ ВИПРОБУВАННЯ ВІДЦЕНТРОВОГО КОМПРЕСОРА НАДДУВУ ФІРМИ ROTREX

А.А. Лисовал, О.Г. Разумцев

У статті наведено опис особливостей конструкції приводних відцентрових компресорів фірми Rotrex та результати випробувань компресора серії C15 на створеному безмоторному стенді. На автомобілях і мотоциклетній техніці приводні компресори, найчастіше, застосовують на поршневих двигунах з іскровим запалюванням. Сьогодні на автотракторних дизелях приводні компресори знаходять застосування в двоступеневих системах наддуву. Особливістю конструкції відцентрових компресорів серії C15 є компактність і швидкохідність – частота обертання колеса компресора досягає 200000 хв^{-1} . Фірма Rotrex застосувала в планетарній передачі замість шестерних сателітів циліндричні ролики на кулькових підшипниках. Конструкція нової серії C15 вийшла компактна, швидкохідна, з високим ККД та малошумна. Передавальне число на створеному стенді від вала електродвигуна до вала колеса компресора було 43. Частота обертання вала електродвигуна регулювалася за допомогою програмованого мікроконтролера, який регулював частоту струму. В процесі випробувань відцентрового компресора модифікації C15-20 в статичних режимах визначено робочу зону спожи-

вача стисненого повітря для цього компресора. Характеристики споживача стисненого повітря моделювалися спеціальними шайбами з мінімальними діаметрами від 10,1 до 14,0 мм. У робочому діапазоні споживача стисненого повітря (автомобільного двигуна внутрішнього згорання) досягнуто максимальний надлишковий тиск наддуву 1,1 ... 1,3 МПа при витратах повітря 460 ... 250 кг/год, відповідно. Випробування підтвердили працездатність стенду для газодинамічних досліджень відцентрових компресорів. Стійко і надійно працювала електронна система управління частотою струму електродвигуна. Характеристики відцентрового компресора C15-20, результати випробувань засвідчують про його призначення у якості агрегату наддуву для двигунів легкових автомобілів з іскровим запалюванням та можливість застосування в системах комбінованого наддуву.

Ключові слова: двигун внутрішнього згорання, наддув, відцентровий компресор, випробування наддуву.

ENGINELESS TESTS OF CENTRIFUGAL SUPERCHARGE OF ROTREX

A.A. Lisoval, O.G. Razumtsev

The article describes the design features of Rotrex centrifugal supercharger and the results of tests of the new C15 series compressor on the newly designed motorless stand. On automobiles and motorcycle technology, superchargers are most often used on spark ignition engines. On automobile diesel engines, superchargers are used in two-stage turbocharging systems. The feature of centrifugal superchargers of the C15 series is compactness and high speed - the rotational speed of the compressor wheel reaches 200000 rpm. The company Rotrex used in planetary gear instead of gear satellites cylindrical rollers on ball bearings. The design of the C15 series turned out to be compact, high-speed, with high efficiency and low noise. The gear ratio on the created stand from the motor shaft to the shaft of the compressor wheel is 43. The frequency of rotation of the motor shaft was regulated using a programmable microcontroller, which regulated the frequency of the current. During testing of the centrifugal supercharger of modification C15-20 in static modes, the working area of the compressed air consumer for this supercharger was determined. The characteristics of the compressed air consumer were modeled with special washers with minimum diameters from 10.1 to 14.0 mm. The maximum overpressure after the compressor over a long period of time, which was obtained with a flow washer with a diameter of 10.1 mm, was 1.3 MPa. The air temperature after the compressor was 120 ... 130°C. In the working range of the consumer of compressed air (automobile internal combustion engine), the maximum overpressure of 1.1 ... 1.3 MPa is achieved at flow rates of 460 ... 250 kg/h, respectively. Tests have confirmed the performance of the stand for gas-dynamic tests of centrifugal superchargers. The electronic control system of the frequency of the electric motor current worked steadily and reliably. The characteristics of the C15-20 centrifugal supercharger, the test results indicate its purpose as a supercharger for engines of passenger cars with spark ignition and the possibility of using it in combined supercharging systems.

Key words: internal combustion engine, boost, centrifugal supercharger, boost tests.

УДК 621.433.2:621.436

DOI: 10.20998/0419-8719.2019.2.04

С. О. Ковальов

РОЗРОБЛЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ГАЗОВОГО ДВИГУНА Д-240-LPG, КОНВЕРТОВАНОГО НА БАЗІ ТРАКТОРНОГО ДИЗЕЛЯ

Показані доцільність і переваги використання транспортними засобами (у тому числі сільськогосподарською технікою, такою як самохідні шасі, потужні колісні та гусеничні трактори тощо) газових моторних палив, зокрема, зрідженого нафтового газу, порівняно з традиційним дизельним паливом. Обґрунтовано доцільність конвертування дизелів таких транспортних засобів у газові ДВЗ із примусовим запалюванням. Розроблено та досліджено газовий ДВЗ моделі Д-240-LPG з примусовим запалюванням для роботи на зрідженому нафтовому газі, який конвертовано на базі дизеля Д-240, встановленого на універсально-просапні колісні трактори МТЗ-80 та МТЗ-82. Описано принцип роботи головних систем газового ДВЗ, до яких належить система живлення і подачі зрідженого нафтового газу до впускного трубопроводу через газоповітряний змішувач, а також безконтактна електронна система запалювання з рухомим розподільником напружності. Розроблено і виготовлено спеціальний електронний блок управління Avenir Gaz, призначений для обмеження максимальної частоти обертання шляхом управління роботою дистанційно керованими запірними електромагнітними газовими клапанами системи живлення газового ДВЗ зрідженим нафтовим газом. Проведені стендові випробування газового ДВЗ моделі Д-240-LPG на електричному навантажувальному стенді Zöllner із модернізованою мікропроцесорною системою вимірювання та керування. Знята зовнішня швидкісна характеристика двигуна, на підставі якої, визначені основні технічні характеристики газового Д-240-LPG, а також його ефективні параметри. Технічні характеристики показали, що номінальна потужність газового ДВЗ Д-240-LPG склала 97 % від номінальної потужності дизеля Д-240. Отримані енергетичні та економічні параметри створеного газового двигуна підтвердили доцільність конвертації дизелів транспортних засобів у газові ДВЗ з примусовим запалюванням і показали, що така конвертація є ефективним способом зменшення експлуатаційних витрат дизельними транспортними засобами за рахунок заміни більш дорогого дизельного палива більш дешевим зрідженим нафтовим газом.

Ключові слова: газовий двигун внутрішнього згорання; ЕБУ Avenir Gaz обмеження максимальної частоти обертання; зріджений нафтовий газ.

Вступ

Найбільш ефективним способом зменшення

експлуатаційних витрат дизельними транспортни-

ми засобами (серед яких найбільш вагомими є ви-