

## РАЗРАБОТКА КРИОГЕННОЙ СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТОГО АВТОМОБИЛЯ

*С.И.Бондаренко, И.Н.Кудрявцев\*, А.Я.Левин, Н.М.Левченко,  
Б.Н.Муринец-Маркевич, А.И.Пятак\**

*Физико-технический институт низких температур НАН Украины,  
61164, Харьков, пр. Ленина, 47; e-mail: bondarenko@ilt.kharkov.ua  
\* Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет,  
61002, Харьков, ул. Петровского, 25; e-mail: aip@khadi.kharkov.ua*

Рассмотрены устройство и принцип работы криогенной силовой установки, предназначенной для использования на экологически чистом автотранспортном средстве. Приведены основные технические характеристики изготовленной экспериментальной криогенной силовой установки, которая включает криогенный бак-газификатор, воздушный теплообменник и пневмодвигатель. Представлены результаты лабораторных испытаний по измерению мощности изготовленной силовой установки.

### ВВЕДЕНИЕ

Как известно, автомобили с силовыми установками (СУ) на основе двигателя внутреннего сгорания (ДВС) сегодня являются главным источником опасного для населения городов загрязнения. Поэтому, поиск и использование альтернативных способов преобразования и использования энергии для автомобильного транспорта, не загрязняющих окружающую среду, является актуальной научно-технической задачей. В настоящей работе рассмотрен принцип работы и представлены результаты экспериментальных исследований криогенной СУ, разработанной для модели первого украинского криогенного автомобиля.

Криогенная СУ, работающая на жидком азоте (LN<sub>2</sub>), предназначена для преобразования тепловой энергии окружающей среды при газификации жидкого азота в механическую энергию, которая может быть использована, в частности, для приведения в движение криогенного автомобиля (например, [1-4]). В качестве рабочего тела используется молекулярный азот, который, как известно, является химически инертным, негорючим и безопасным в эксплуатации газом. Жидкий азот получают из атмосферного воздуха на специальных воздуходелительных установках с использованием электроэнергии (в среднем на производство 1 л LN<sub>2</sub> требуется 0,4...1 кВт·ч). По окончании рабочего цикла в СУ газообразный азот возвращается в атмосферу, не нарушая равновесия окружающей среды.

### УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП РАБОТЫ КРИОГЕННОЙ СУ

В состав СУ (рис.1), работающей на жидком азоте, входит специальный сосуд Дьюара 1, теплообменник 5 с запорной регулирующей и измерительной аппаратурой, обеспечивающие превращение жидкого азота в газообразный азот высокого давления с температурой, близкой к температуре окружающей среды, и пневмодвигатель 8.

Принцип работы и математическая модель воздушного теплообменника (ВТО) с противоточной схемой движения теплоносителей, учитывающая влияние влажности воздуха и снежно-ледяной шубы на его поверхности, рассмотрены в работе [5]. При этом был выполнен теоретический анализ температуры азота на выходе из теплообменника в зависимости от скорости движения автомобиля и рассмотрены физические аспекты десублимации влаги на наружной поверхности теплообменника.

Рассмотрим рабочий процесс пневмодвигателя, изображенный на рис. 2 и 3, который осуществляется за один оборот коленчатого вала пневмодвигателя с осуществлением трех циклов: впуска под избыточным давлением газообразного азота, рабочего хода и выхлопа.

Впуск газообразного азота во впускную полость 8 (см. рис. 2) осуществляется путем подачи жидкого азота из сосуда Дьюара 1 под избыточным давлением при открытом вентиле 2 через газификатор 5, в котором он из жидкого состояния переходит в газообразное за счет теплопритока из окружающей среды. Из газификатора 5 по трубопроводу 6 газ поступает в общую для двух цилиндров пневмодвигателя полость 17, которая выполняет роль ресивера, из которого впуск газа в полость 8 происходит при вращении коленчатого вала 13 из положения А в положение Б.

При этом толкатель 15, ввернутый в поршень 11, перемещаемый шатуном 14, открывает клапан 7 и происходит заполнение впускной полости 8 газом высокого давления. В положении Б клапан 7 закрывается. При дальнейшем вращении коленчатого вала (см. рис. 3) из положения Б в положение В происходит расширение газа с совершением полезной работы (рабочий ход). При вращении коленчатого вала в положение В, открываются отверстия 16 в стенке цилиндров, что обеспечивает выпуск в атмосферу не полностью расширившегося газа (выхлоп). Энергия рабочего хода воспринимается маховиком 9 (см. рис. 1) и обеспечивает дальнейшее вращение коленчатого вала в положение А и цикл повторяется.

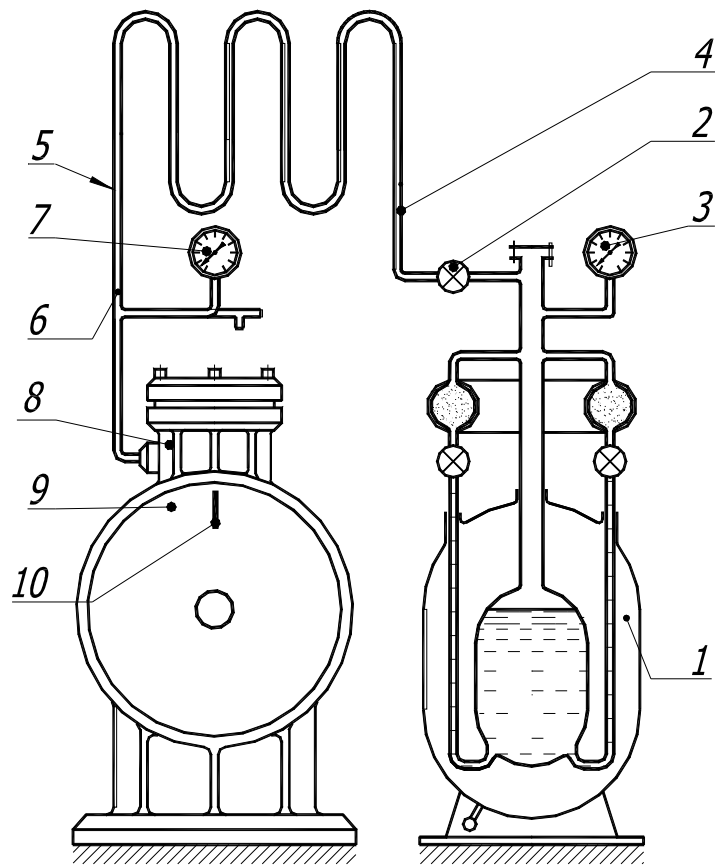


Рис. 1. Схематическое изображение криогенной силовой установки

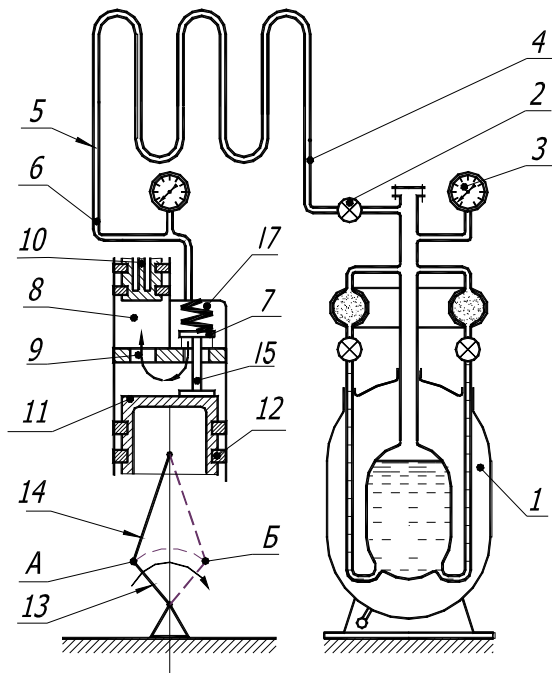


Рис. 2. Режим впуска

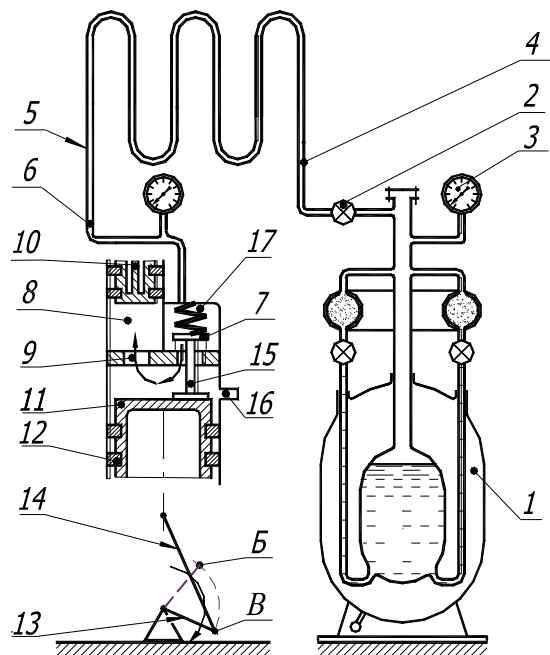


Рис. 3. Режим рабочего хода и выхлопа

## ПУСК И ОСТАНОВКА ПНЕВМОДВИГАТЕЛЯ

Для пуска пневмодвигателя необходимо, чтобы поршень одного из цилиндров находился в верхней мертвой точке, что обеспечивает открытие впускного клапана и заполнение впускной полости газом высокого давления. Практически, в соответствии с рис. 1, это осуществляется путем вращения маховика 9 до установления нанесенной на нем метки 10 в вертикальное положение. При этом не имеет значения положение метки вверху или внизу, поскольку используется двухцилиндровый двигатель. После установки метки 10 на маховике вертикально открытием вентиля 2 под избыточным давлением над жидким азотом в сосуде Дьюара 1 по трубке 4 подается жидкий азот в газификатор 5.

Из газификатора 5 газообразный и нагретый до положительных температур азот поступает во впускную полость двигателя. Необходимое давление азота контролируется манометрами 3 и 7. После установки давления газа по манометру 7, вращением рукой маховика 9 в нужном для работы направлении через 3...5 с двигатель «выходит» на полную мощность. Направление начального вращения при пуске маховика на параметры двигателя не влияет. На автомобиле это начальное вращение (пуск) удобнее выполнять стартером, при этом затрата энергии на пуск на несколько порядков меньше, чем запуск ДВС. Отметим, что при работе с таким пневмодвигателем нет необходимости иметь коробку передач, поскольку скорость можно менять простым увеличением потока и давления азота, подаваемого в двигатель, а для заднего хода достаточно изменить начальное вращение коленвала.

Остановка пневмодвигателя осуществляется закрытием вентиля 2 подачи жидкого азота из сосуда Дьюара. В случае экстренной остановки после закрытия вентиля 2 необходимо сбросить остаточное давление кольцом на предохранительном клапане (на рис. не показан).

Аналогичный пуск и работа пневмодвигателя может осуществляться и от баллона со сжатым газом высокого давления с установленным на нем редуктором, поддерживающим постоянное рабочее давление.

Изменение режима работы пневмодвигателя, увеличение или уменьшение его мощности может выполняться путем изменения давления газа при работе на сжатом газе с помощью редуктора, а при работе на жидком азоте - путем дросселирования жидкого азота вентилем впуска его в газификатор.

## РАЗРАБОТКА КРИОГЕННОЙ СУ ДЛЯ МОДЕЛИ ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТОГО АВТОМОБИЛЯ

В результате выполненных авторами работ была изготовлена экспериментальная криогенная силовая установка, состоящая из криогенного бака-газификатора, воздушного теплообменника и пневмодвигателя (рис. 4).

Криогенный бак-газификатор представляет собой толстостенный металлический криостат, рассчитанный на рабочее давление паров азота до 12 атм, объединенный с предварительным кольцевым теплообменником. Параметры газификатора следующие:

- высота - 900 мм;
- диаметр - 500 мм;
- масса – 30 кг;
- полная масса с жидким азотом – 60 кг;
- температура газообразного азота на выходе составляет 173 К (-100°C) при давлении 12 атм.

Данный газификатор снабжен устройствами, позволяющими повышать давление паров азота над поверхностью жидкого азота до 12 атм за счет регулируемого теплообмена с окружающим воздухом и подавать парожидкостную смесь со скоростью до 20 г азота в секунду в основной теплообменник криоавтомобиля.

Авторами был также разработан и изготовлен воздушно-криогенный стенд для изучения теплообмена между жидким азотом в теплообменнике и окружающим воздухом при вынужденной конвекции. В работе [6] представлены результаты проведенных на нем экспериментальных исследований эффективности работы модельного трубчатого ВТО в различных режимах эксплуатации, в том числе в условиях инееобразования. С учетом полученных результатов для криогенной СУ был изготовлен ВТО из латунной трубки с внутренним диаметром 12 мм и длиной 16 м, которая согнута в виде двойного меандра с размерами 1000x700x100 мм. Данный ВТО предназначен для подогрева холодных паров азота потоком окружающего воздуха, обтекающим ВТО. При этом для достижения температуры азота, близкой к температуре окружающего воздуха, от воздуха отбирается тепловая мощность, приблизительно в три раза большая, чем полезная мощность пневмодвигателя. Подогретый газообразный азот высокого давления подается далее в поршневой пневмодвигатель.

Пневмодвигатель изготовлен на базе фреонового компрессора ФАК 1,1 и обладает следующими характеристиками [7]:

- двигатель двухцилиндровый с рядным расположением цилиндров;
- диаметр цилиндров 40 мм;
- ход поршней 45 мм;
- объем цилиндров 113 см<sup>3</sup>;
- объем общей всасывающей полости головки блока цилиндров 110 см<sup>3</sup>;
- объем общей нагнетательной полости головки блока цилиндров 120 см<sup>3</sup>;
- коленчатый вал с оппозитным расположением шатунных шеек;
- мощность до 1,0 кВт при 900 об/мин,
- габариты 200x200x150 мм;
- масса 33 кг.



Рис. 4. Экспериментальная криогенная СУ

## ИСПЫТАНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОЩНОСТИ КРИОГЕННОЙ СУ

Испытание криогенной СУ производилось на специальном стенде (рис. 5), который включает в себя азотный газификатор (АГ), воздушный теплообменник (ВТО), измерители давления газа в пневматической цепи, расходомер и электрический генератор (Г), приводимый в действие пневмодвигателем посредством клиноременной передачи. Кроме того, стенд предусматривает возможность механического нагружения пневмодвигателя. Механическая часть стенда включает в себя пневмодвигатель со шкивом на его валу и приводимый в механический контакт со стальным шкивом чугунный груз. При этом вес груза прикладывается к верхней точке шкива и вызывает торможение его вращения во время работы пневмодвигателя. В процессе экспериментов груз опускался на шкив и фиксировалось значение частоты вращения вала пневмодвигателя с помощью тахометра.

Мощность пневмодвигателя в первом случае определяется по производимой генератором электрической мощности. Напряжение генератора подается на активное сопротивление  $R$  известной величины. Измеряя падение напряжения  $U$  и силу тока  $I$  на сопротивлении, можно определить мощность, выделившуюся на нем:  $N_1 = I \cdot U = I^2 R$ . На стенде применялся генератор постоянного напряжения, обмотка возбуждения которого питалась от стабилизированного источника питания типа СИП-35.

При давлении сжатого газа в системе 1,2 МПа, расходе газа на уровне 8 л/с (н.у.) и частоте вращения вала двигателя 700 об/мин были измерены следующие значения силы тока и напряжения:  $I = 28$  А,  $U = 20,5$  В. Мощность генератора при этом составила  $N_1 = 0,574$  кВт. В результате, мощность пневмо-

двигателя с учетом КПД генератора ( $\eta = 0,7$ ) оказалась равной  $N_2 = N_1 / \eta = 0,820$  кВт.

Расчет мощности пневмодвигателя во втором случае, при использовании механической нагрузки, можно выполнить по формуле  $N = f F v$ , где  $F$  - нагрузка на приводной шкив, Н;  $v$  - скорость вращения шкива, м/сек;  $f$  - коэффициент трения чугуна по стали. Скорость можно выразить через диаметр шкива  $D$ , м, и число оборотов  $n$ , об/мин:  $v = \frac{\pi D n}{60}$ .

Используя измеренные параметры  $D = 0,28$  м,  $n = 978$  об/мин,  $F = 235,2$  Н, и значение коэффициента трения  $f = 0,18$ , было получено следующее значение мощности, развиваемой пневмодвигателем:  $N = 0,607$  кВт.

Таким образом, экспериментально измеренная мощность рассматриваемой СУ на оборотах пневмодвигателя 700...1000 об/мин составляет 0,6...0,8 кВт, что полностью соответствует выполненным теоретическим расчетам [7] на основе предложенной в работе [8] математической модели рабочего процесса пневмодвигателя.

В результате экспериментальных исследований температурного режима пневматического двигателя при рабочем давлении газа во впускной магистрали 0,8 МПа, в нагрузочном режиме, было получено, что средняя температура газа в рабочей полости составила 290 К, а средняя температура газа в зоне выхлопа 288 К при начальной температуре газа в баллоне 290 К [9]. Таким образом, температура азота на выхлопе (в конце рабочего цикла) практически не снижается и близка к температуре на входе в пневмодвигатель, что исключает захлаживание и обмерзание пневмодвигателя в процессе работы.

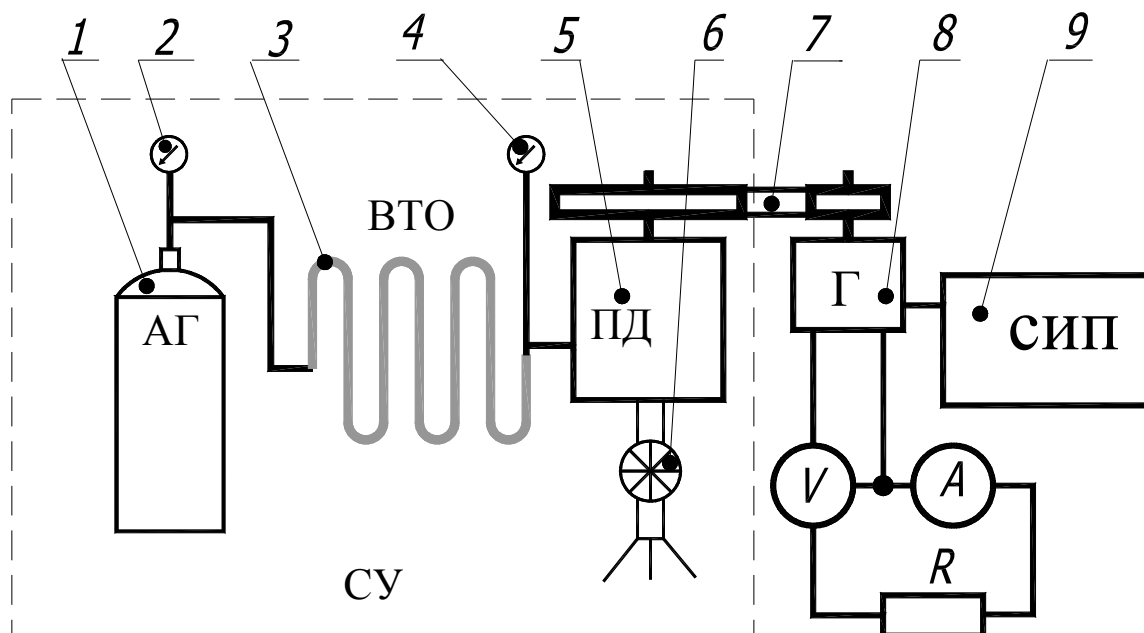


Рис. 5. Схема стенда для испытаний СУ

1 – азотный криостат-газификатор; 2,4 – манометры; 3 – воздушный теплообменник;  
5 – пневмодвигатель; 6 – расходомер; 7 – ременная передача; 8 – электрогенератор;  
9 – источник питания генератора

Отметим, что установка разработанной криогенной СУ на шасси и проведение испытаний на модели криогенного автомобиля составляет предмет наших дальнейших исследований.

В заключение перечислим основные преимущества применения криогенных силовых установок в автомобилях:

- полная экологическая чистота;
- недорогая технология производства и обслуживания СУ;
- эффективный КПД пневмодвигателя может достигать 50...60 % [10], что значительно превышает максимальный КПД двигателей внутреннего сгорания;
- пневмодвигатель обладает также высоким пусковым моментом и лучшей приемистостью по сравнению с ДВС;
- возможность рекуперации энергии при торможении, пожаробезопасность;
- доступность и относительно низкая стоимость рабочего тела (сжиженный или сжатый азот, воздух);
- экономическая целесообразность (стоимость 1 км пробега криоавтомобиля сопоставима со стоимостью пробега для автомобиля на ДВС, если учесть вред, наносимый населению и окружающей среде выхлопами ДВС [4]);

- возможность использования на борту высокоэффективных сверхпроводящих устройств.

## ЛИТЕРАТУРА

1. С.И.Бондаренко, В.Н.Фенченко. Двигательная установка транспортного средства // *Патент Украины* N 22721A, 1997.
2. С.А.Ordenez, М.С.Plummer. Cold Thermal Storage and Cryogenic Heat Engines for Energy Storage Applications // *Energy Sources*. 1997, v.19, p. 389-396.
3. С. Knowlen, J. Williams, A. T. Mattick et al. Quasi-Isothermal Expansion Engines for Liquid Nitrogen Automotive Propulsion / *SAE Future Transportation Technology Conference*. San Diego, CA, Aug. 6-8, 1997, p. 972.
4. А.Н.Туренко, А.И.Пятак, И.Н.Кудрявцев и др. Экологически чистый криогенный транспорт: современное состояние проблемы // *Вестник ХГАДТУ. Сб. науч. трудов, Харьков*. 2000, вып. 12-13, с. 42-47.
5. С.И.Бондаренко, А.Я.Левин, И.Н.Кудрявцев, А.И.Пятак. Разработка эффективного воздушного теплообменника для автомобиля на жидком азоте // *Вопросы атомной науки и техники. Серия: "Вакуум, чистые материалы, сверхпроводимость"*. 2003, № 5, с. 252-258.

6. С.И.Бондаренко, А.Я.Левин, Н.М.Левченко, А.И.Пятак, И.Н.Кудрявцев. Экспериментальный стенд и исследования модели воздушного теплообменника для криоавтомобиля в условиях инееобразования // *Вестник ХНАДУ. Сб. науч. трудов, Харьков.* 2003, вып. 23, с. 22-29.
7. С.И.Бондаренко, И.Н.Кудрявцев, А.В.Крамской, Н.М.Левченко, Б.Н.Муринец-Маркевич, А.И.Пятак, А.В.Архипов. Разработка пневматического двигателя мощностью до 1 кВт для модели криогенного автомобиля // *Механика и машиностроение.* 2004 (в печати).
8. А.Н.Туренко, В.А.Богомолов, И.Н.Кудрявцев, А.В.Крамской, А.И.Пятак, М.С.Плаummer. Математическая модель пневматического цилиндра с двусторонним приводом // *Автомобильный транспорт. Сб. науч. трудов, Харьков.* 2002, вып. 10, с. 10-16.
9. В.А.Богомолов, А.В.Крамской, И.Н.Кудрявцев, А.И.Пятак, С.И.Бондаренко, Б.Н.Муринец, М.С.Плаummer. К вопросу о вычислении показателя политропы для автомобильного пневматического двигателя // *Вестник ХНАДУ. Сб. науч. трудов, Харьков.* 2003, вып. 21, с. 14-17.
10. В.А.Богомолов, И.Н.Кудрявцев, А.В.Крамской, А.И.Пятак, С.И.Бондаренко, Б.Н.Муринец-Маркевич, М.С.Плаummer. Эффективный КПД пневматического двигателя для автомобильного транспорта // *Проблемы машиностроения.* 2004, т. 7, № 2, с. 64-72.

## **РОЗРОБКА КРІОГЕННОЇ СИЛОВОЇ УСТАНОВКИ ДЛЯ ЕКОЛОГІЧНО ЧИСТОГО АВТОМОБІЛЯ**

***С.І.Бондаренко, І.М.Кудрявцев\*, А.Я.Левін, М.М.Левченко,  
Б.М.Муринець-Маркевич, О.І.П'ятак\****

***Фізико-технічний інститут низьких температур НАН України,  
61164, Харків, пр. Леніна, 47; e-mail: bondarenko@ilt.kharkov.ua  
\* Харківський національний автомобільно-дорожній університет,  
61002, Харків, вул. Петровського, 25; e-mail: aip@khadi.kharkov.ua***

Розглянуто будову та принцип роботи криогенної силової установки, призначеної для використання на екологічно чистому автотранспортному засобі. Приведено основні технічні характеристики виготовленої експериментальної криогенної силової установки, що включає криогенний бак-газифікатор, повітряний теплообмінник та пневмодвигун. Представлено результати лабораторних іспитів по виміру потужності виготовленої силової установки.

## **DEVELOPMENT OF THE CRYOGENIC POWER PLANT FOR NON-POLLUTING AUTOMOBILE**

***S.I.Bondarenko, I.N.Kudryavtsev\*, A.Ya.Levin, N.M.Levchenko,  
B.N.Murinetz-Markevich, A.I.Pyatak\****

***Institute for Low Temperature Physics and Engineering NAS of Ukraine,  
61164, Kharkov, Lenin Ave., 47; e-mail: bondarenko@ilt.kharkov.ua  
\* Kharkov National Automobile and Highway University,  
61002, Kharkov, Petrovsky St., 25; e-mail: aip@khadi.kharkov.ua***

The structure and principle of operation of the cryogenic power plant intended for using on the non-polluting vehicle have been considered. The basic characteristics of the manufactured experimental cryogenic power plant, which includes a cryogenic tank-evaporator, air heat exchanger and pneumatic engine, are presented. Results of the laboratory tests on power measurement for the designed power plant have been given.