

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПНЕВМОДВИГАТЕЛЯ В АВТОМОБИЛЕ

УДК 621.484, 621.59

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

 Member of International Editorial Board (ISJAAE)

Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет (ХНАДУ)  
ул. Петровского, 25, г. Харьков, 61002, Украина  
Тел.: +38 057 707 36 72; e-mail: kudr@khadi.kharkov.ua

\* Физико-технический институт низких температур (ФТИНТ) НАН Украины,  
пр. Ленина, 47, г. Харьков, 61164, Украина

\*\* Университет Северного Техаса  
310679, г. Дентон, Техас, 76203, США



Кудрявцев  
Игорь Николаевич

**Сведения об авторе:** доцент кафедры физики ХНАДУ, зав. лабораторией криогенной и пневматической техники, кандидат физ.-мат. наук (1990 г.).

**Образование:** Харьковский государственный университет им. Каразина (1987 г.).

**Область научных интересов:** исследования по тепловым и кинетическим свойствам твердого, жидкого и газообразного азота, высокотемпературной сверхпроводимости; разработка и оптимизация пневматических двигателей и криогенных силовых установок, компьютерное моделирование физических процессов и систем.

**Публикации:** более 90 научных работ.



Пятак  
Александр Иванович



Бондаренко  
Станислав Иванович

**Сведения об авторе:** профессор, заведующий кафедрой физики ХНАДУ, доктор физ.-мат. наук (1993 г.).

**Образование:** Харьковский государственный университет им. Каразина (1965 г.).

**Область научных интересов:** исследования по физике плазмы, экологически чистым транспортным системам и альтернативным источникам энергии.

**Публикации:** более 100 научных работ.



Левин  
Аркадий Яковлевич

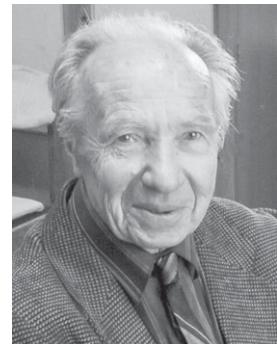
**Сведения об авторе:** главный конструктор проекта Специального конструкторско-технологического бюро по криогенной технике ФТИНТ НАН Украины.

**Образование:** Харьковский государственный университет им. Каразина (1973 г.).

**Профессиональный опыт:** с 1973 г. работает в области газовой промышленности и криогеной техники.

**Область научных интересов:** разработка низкотемпературного оборудования по переработке газов, конструирование и расчеты криогенных систем; космическая техника.

**Публикации:** более 30 научных работ.



Муринец-Маркевич  
Борис Николаевич

**Сведения об авторе:** вед. инженер ФТИНТ НАН Украины, заслуженный изобретатель Украины.

**Образование:** Харьковский автомобильно-дорожный институт (1954 г.).

**Область научных интересов:** разработка микрокриогенной техники для охлаждения элементов радиоэлектронной аппаратуры, криогенной медицинской техники, двигателей различной конструкции, включая пневмодвигатели.

**Публикации:** 56 научных работ, в том числе 3 монографии, 60 авторских свидетельств СССР, 9 патентов Украины.



Пламмер  
Митти Чарльз

**Сведения об авторе:** доцент факультета инженерных технологий Университета Северного Техаса (США), доктор философии (1970 г.).

**Образование:** Техасский А&М Университет (1967 г.).

**Область научных интересов:** исследования по теории колебаний, разработка экологически чистых транспортных систем, криогенных автомобилей, конструирование теплообменников и пневматических устройств, применение ядерной энергетики.

**Публикации:** более 60 научных работ.

The comparative analysis of the automobile power-trains with using pneumatic engines and internal combustion engines (ICE) has been carried out. The main energetic and operational characteristics of the cryogenic and traditional automobiles on the hydrocarbon fuel are considered. It is shown, that the total operational energetic efficiency of the considered automobiles practically coincides in urban cycle and accounting the ecological damage, caused to the population and environment by transport with ICE, the non-polluting cryogenic and pneumatic automobiles appear to be more profitable kind of the urban transport.

## Введение

Загрязнение атмосферы и окружающей среды в крупных городах обусловлено в первую очередь эксплуатацией автомобильного транспорта на двигателях внутреннего сгорания (ДВС) с углеводородным топливом. Кроме того, рост автомобильного парка с ДВС стремительно истощает невозобновляемые природные нефте- и газо-

ресурсы, приводит к интенсивному сжиганию атмосферного кислорода. В некоторых крупных городах (Токио, Мехико и др.) загрязнение атмосферного воздуха вредными выхлопами автомобилей приобрело характер экологической катастрофы. Опасная ситуация сложилась и в некоторых крупных городах Украины и России.

В качестве альтернативы в последние годы разрабатываются автомобили с пневматически-

ми двигателями, работающими на сжатом газе (азоте, воздухе) без использования каких-либо процессов горения [1–7]. Кроме того, предпринимаются усилия по внедрению сложных и дорогих автомобилей с ДВС, использующих в качестве топлива водород, а также электромобилей.

Предварительный технико-экономический анализ целесообразности разработки пневмоавтомобилей (криоавтомобилей) без ДВС для использования в городах был выполнен в работах [5–7]. Показано, что криоавтомобили имеют более высокие энергетические показатели и меньшую стоимость по сравнению с электромобилями, а их эксплуатационные расходы сопоставимы с традиционными автомобилями с ДВС при учете экологического аспекта.

В настоящей работе проводится детальный сравнительный анализ энергетических и эксплуатационных характеристик автомобильных силовых установок (СУ), использующих пневмодвигатели и ДВС.

### 1. Сравнительная характеристика автомобильных силовых установок на базе пневмодвигателей и ДВС

Как известно, полезная работа в автомобильной СУ с пневмодвигателем осуществляется в рабочем цикле подачи в него сжатого газа с температурой окружающей среды, последующего его расширения в рабочем цилиндре и выброса в атмосферу при давлении, близком к нормальному. В силовой установке криоавтомобиля в качестве рабочего тела используется жидкий азот, который при подаче из криобака газифицируется и нагревается в теплообменнике, а затем при повышенном давлении, например, 10–12 атм, подается в пневмодвигатель. При этом для передачи вращающего момента от пневмодвигателя к колесам автомобиля не нужна коробка передач (КПП).

Для старта автомобиля с помощью ДВС многоступенчатая КПП принципиально необходима. КПП не только изменяет крутящий момент на ведущих колесах, но также незначительно, на короткий промежуток времени, уменьшает обороты коленчатого вала. Последнее обстоятельство весьма существенно для ДВС, причем не только карбюраторных, но и дизельных, поскольку уменьшение оборотов снижает мощность, а в процессе всасывания снижает качество (процентное соотношение воздух–топливо), а также количество рабочей смеси, поступающей в цилиндры [8]. При резком изменении нагрузки в момент старта автомобиля в пневматическом двигателе так же, как и в ДВС, уменьшаются обороты вала, однако условия наполнения впускного объема сжатым газом высокого давления улучшаются в связи с уменьшением гидравлического сопротивления в тракте двигателя и клапанах, что в свою очередь

приводит к увеличению массы газа, поступающей во впускную полость, и увеличивает полезную работу газа при его расширении.

Отсутствие КПП в трансмиссии криоавтомобиля уменьшает механические потери энергии, которые весьма значительны при эксплуатации автомобиля в городских условиях с частыми остановками и троганиями с места. К тому же имеется возможность временно повышать давление впускаемого сжатого газа, увеличивая крутящий момент пневмодвигателя и приемистость автомобиля в целом, что исключено при применении на нем ДВС. Отсутствие КПП в конструкции автомобиля снижает его массу и стоимость, увеличивает надежность. Отсутствие КПП в криоавтомобиле является одним из существенных его конструктивных и эксплуатационных преимуществ.

Следующим существенным преимуществом пневмодвигателя является его более высокий КПД (50–60 %) [9] по сравнению с ДВС (30–40 % на стенде и 10–20 % в городском цикле езды). Это связано с тем, что ДВС выделяет в окружающую среду большее количество тепловой энергии и неиспользованной при рабочем ходе энергии газа высокого давления. Кроме того, надежность, а следовательно, и срок службы пневмодвигателя значительно повышаются в результате снижения тепловых нагрузок и отсутствия взрывных процессов горения, свойственных ДВС.

В отличие от традиционных четырехтактных ДВС пневмодвигатели работают в двухтактном режиме (рабочий ход—выхлоп), что позволяет уменьшить потери на осуществление вспомогательных тактов и повысить КПД.

Недостатком ДВС является также необходимость применения в нем сложных механизмов газораспределения и зажигания, требующих дополнительных затрат энергии и увеличивающих массу, приводящих к дополнительным потерям на трение и снижающих общую надежность автомобиля.

В пневмодвигателе мощность не зависит от рода сжатого газа, тогда как некачественное смесеобразование, зависящее от температуры окружающей среды, влажности и условий воспламенения в камере сгорания, весьма существенно для ДВС.

Отметим также, что для запуска пневмодвигатель не нуждается в стартере и сложных механизмах его привода (системы Бендинкса) и имеет более низкий уровень шума.

Наконец, важным преимуществом пневмодвигателя по сравнению с ДВС той же мощности заключается в лучшей приемистости, что связано с большим крутящим моментом на малых оборотах и с возможностью изменения начального давления в цилиндре пневмодвигателя в более широких пределах. Примером может служить пневмодвигатель, разработанный автора-

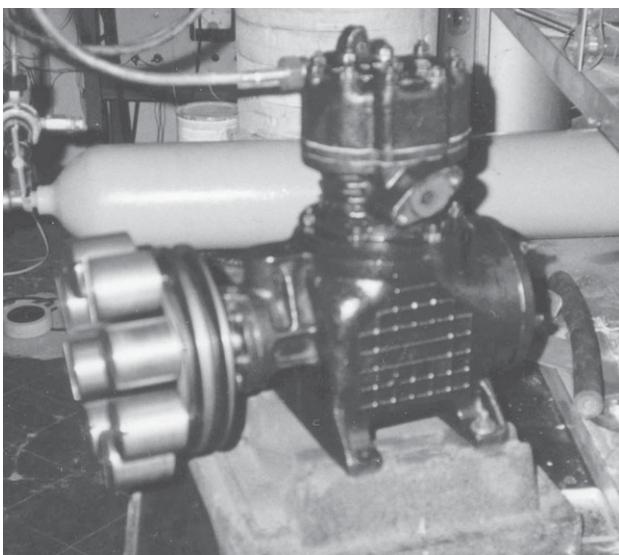


Рис. 1. Поршневой двухцилиндровый пневматический двигатель, разработанный в ХНАДУ

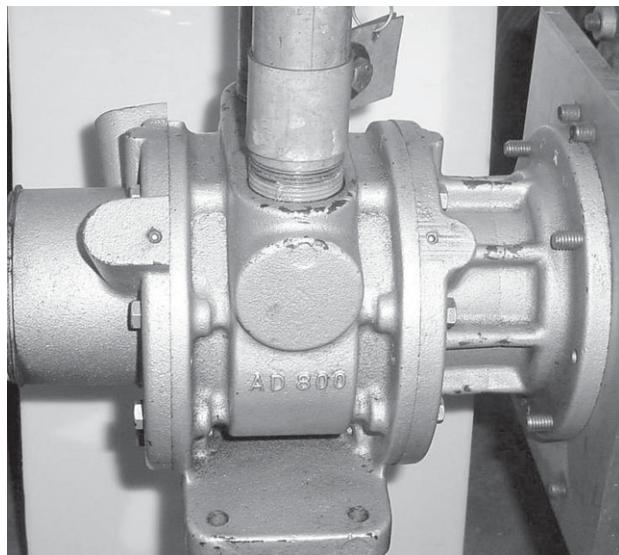


Рис. 4. Пневматический двигатель



Рис. 2. Пневматический двигатель, испытанный в УСТ, США



Рис. 3. Экспериментальная модель криогенного автомобиля (Университет Северного Техаса)

ми в ХНАДУ для экспериментальной модели криоавтомобиля, мощностью всего 0,6–0,8 кВт (рис. 1) [10], который приводит в движение автомобиль (рис. 2) массой 300 кг при рабочем давлении 10–12 атм и позволяет трогаться с места на любой передаче.

В Университете Северного Техаса при разработке модели криогенного автомобиля (рис. 3) испытывался пневматический двигатель типа

Ванкеля модели Ghast 16AM-FRV-13 (рис. 4), который развивает мощность 6,7 кВт.

Пневмодвигатель, имея малые размеры, обеспечивает существенные крутящий момент и ускорение примерно  $1,1 \text{ м/с}^2$  на малых скоростях движения. Максимальная скорость экспериментального криоавтомобиля с полной массой 700 кг и рабочим давлением сжатого газа 7 атм достигала 40 км/ч.

## 2. Энергетические и эксплуатационные показатели криоавтомобилей и автомобилей с ДВС

Выполним сравнительный анализ энергоэффективности силовых установок автомобилей с учетом энергоемкости производства соответствующих энергоносителей, их удельного энергосодержания и КПД двигателя.

Жидкий азот получают в промышленности из атмосферы на специальных воздухоразделятельных установках. Энергоемкость производства 1 кг жидкого азота составляет 0,44 кВт·ч [11].

Максимальное «энергосодержание» 1 кг жидкого азота (т. е. максимальная работа, которая может быть произведена при его нагревании и расширении) составляет 0,77 МДж [12, 13], а максимальный КПД пневмодвигателя, с учетом тепловых и механических потерь, может достигать 60 % [9]. При этом, как отмечалось в разделе 1, характер работы пневмодвигателя (начало движения, изменение оборотов, холостой ход) не оказывается существенным образом на его эффективности.

После окончания рабочего цикла газообразный азот, имеющий температуру не выше температуры окружающего воздуха, возвращается в атмосферу, не нарушая экологического равновесия.

В таблице представлены основные отличия в применении автомобильных силовых установ

Сопоставление основных параметров энергоносителей и силовых установок для криоавтомобилей  
и автомобилей с ДВС

Наименование	Жидкий азот	Бензин
Экологичность производства энергоносителя	Высокая	Низкая
Возобновляемость энергоносителя	Да	Нет
Ограниченност ресурсов энергоносителя	Нет	Да
Зависимость от источников сырья	Нет	Да
Экологический ущерб при транспортировке энергоносителя	Невозможен	Возможен
Пожаробезопасность энергоносителя	Да	Нет
Экологичность рабочего цикла двигателя	Абсолютная	Отсутствует
Сжигание атмосферного кислорода в рабочем цикле	Нет	~200 л кислорода на 1 кг бензина
Создание парникового эффекта	Нет	Да
Возможность рекуперации энергии в СУ при торможении	Да	Нет
Необходимость использования КПП, системы газораспределения и охлаждения двигателя	Нет	Да
Необходимость использования стартера для пуска двигателя	Нет	Да
Энергоемкость производства 1 кг энергоносителя, $\alpha$	0,44 кВт·ч (1,6 МДж) [11]	5 кВт·ч (18 МДж) [14]
Максимальное энергосодержание в 1 кг энергоносителя, $\beta$	0,77 МДж [12, 13]	44,0 МДж [14]
Максимальный КПД двигателя с использованием энергоносителя, $\eta$	0,6 [9]	0,3
Совокупная максимальная энергоэффективность СУ, $\beta \cdot \eta / \alpha$	0,29	0,73
Эксплуатационный КПД двигателя (в городском цикле), $\eta_g$	0,5–0,6	0,1–0,2
Совокупная эксплуатационная энергоэффективность СУ (в городском цикле), $\beta \cdot \eta_g / \alpha$	0,24–0,29	0,24–0,49
Стоимость пробега без учета экологического аспекта	0,024 \$/милю [15]	0,05 \$/милю [15]

вок на базе пневмодвигателей и ДВС и выполнено сопоставление основных энергетических характеристик соответствующих энергоносителей (жидкий азот и бензин).

Как видно из таблицы, с учетом основных энергетических характеристик автомобильных СУ на базе ДВС и пневмодвигателей, совокупная эксплуатационная энергоэффективность их в городском цикле оказывается практически одинаковой. Более того, по данным [15], стоимость пробега криогенного автомобиля (по энергетическим затратам), даже без учета стоимости экологического ущерба от применения ДВС, оказывается в 2 раза ниже, чем для автомобиля с ДВС. Уже это обстоятельство, наряду с большей простотой конструкции криоавтомобиля,

более высокой его надежностью и относительно низкой стоимостью производства, означает, что имеется экономическая целесообразность разработки и производства пневмоавтомобилей для эксплуатации в городах с целью постепенной замены автомобилей с ДВС.

### 3. Сравнение экологического аспекта эксплуатации автомобилей с пневмодвигателем и ДВС

Автомобили с ДВС наносят химико-биологический ущерб окружающей среде [16]: во-первых, выхлопные газы отравляют людей, во-вторых, они отравляют растения и водные источники, в-третьих, вызывают локальное снижение

содержания кислорода в атмосфере городов. Уменьшение содержания кислорода приводит к различным заболеваниям, уменьшение его содержания до 18 % (вместо 22 % по норме) может привести к потере сознания.

Как показали наши оценки [5], только ущерб от выхлопных газов сопоставим со стоимостью жидкого азота при выполнении одинаковой работы этими двумя типами двигателей, даже если КПД криодвигателей принять равным КПД ДВС (30 %), но так как КПД криодвигателей может быть вдвое выше, чем у ДВС, ущерб от выхлопных газов вдвое выше затрат на азот при выполнении двигателями одинаковой работы. Если учесть также вдвое меньшую стоимость пробега криоавтомобиля (см. табл.) без учета экологического ущерба, то суммарный выигрыш в стоимости эксплуатации криоавтомобиля окажется четырехкратным. И это только при учете влияния выхлопных газов ДВС на окружающую среду. К сожалению, в литературе отсутствуют данные по ущербу от остальных факторов работы ДВС. Для получения этих данных требуются специальные исследования, необходимость в которых уже назрела. Ясно, что учет этих факторов еще в большей степени увеличит выигрыш в стоимости эксплуатации криоавтомобилей по сравнению с автомобилями с ДВС.

Владелец криоавтомобиля почувствует реальный выигрыш от его эксплуатации только после принятия государственных актов, стимулирующих использование экологически чистого транспорта в городах (а в дальнейшем и за их пределами) и реально оценивающих вред окружающей среде, вызванный массовым использованием автомобилей с ДВС.

В перспективных конструкциях криоавтомобилей, где будут применяться сверхпроводниковые бесконтактные магнитные подшипники и амортизаторы, позволяющие резко снизить затраты мощности пневмодвигателя на преодоление сопротивления движению, количество бортового азота, а в итоге стоимость, могут быть значительно снижены. Это позволит снизить эксплуатационные затраты, повысить эффективность по сравнению с ДВС и сделать криоавтомобиль не только городским видом транспорта.

### Заключение

В настоящей работе рассмотрены основные особенности применения пневмодвигателей в криогенных (пневматических) автомобилях и представлен далеко не полный перечень их достоинств.

Выполнен сравнительный анализ основных энергетических и эксплуатационных характеристик криогенных автомобилей и автомобилей на основе ДВС. Совокупная эксплуатационная энергоэффективность СУ рассмотренных автомобилей в городском режиме практически одинакова. С учетом экологического ущерба от транспорта с ДВС экологически чистые криогенные (пневматические) автомобили в крупных горо-

дах оказываются экономически более выгодны. Поэтому проблема разработки серийного высокоэффективного автомобильного пневмодвигателя весьма актуальна.

### Список литературы

1. Ordonez C. A., Plummer M. C. Cold thermal storage and cryogenic heat engines for energy storage applications // Energy Sources. 1997. Vol. 19. P. 389–396.
2. Пат. № 22721А України. Двигатель-на установка транспортного средства/Бондаренко С. И., Фенченко В. Н. // 1997.
3. Plummer M. C., Ordonez C. A., Reidy R. F. A review of liquid nitrogen propelled vehicle programs in the United States of America // Bulletin of the Kharkov National Automobile and Highway University (Ukr.). 2000. Vol. 12–13. P. 47–52.
4. Knowlen C., Mattick A. T., Hertzberg A., Bruckner A. P. Ultra-Low Emission Liquid Nitrogen Automobile // Future Transp. Techn. Conf. & Exposition. Costa Mesa, CA, August 17–19, 1999. Paper SAE-1999-01-2932.
5. Туренко А. Н., Пятак А. И., Кудрявцев И. Н., Тимченко И. И., Жадан П. В., Бондаренко С. И., Левин А. Я., Самарский В. А. Экологически чистый криогенный транспорт: современное состояние проблемы // Вестник ХГАДТУ. 2000. Вып. 12–13. С. 42–47.
6. Туренко А.Н., Пятак А. И., Кудрявцев И. Н., Тимченко И. И., Жадан П. В., Бондаренко С. И., Левин А. Я. Пневматические силовые установки для экологически чистых автотранспортных средств // Автомобильный транспорт: Сб. науч. трудов. Харьков, 2001. Вып. 7–8. С. 193–197.
7. Бондаренко С. И., Кудрявцев И. Н., Пятак А. И., Тимченко И. И., Кудряш А. П. Новый вид пожаробезопасного и экологически чистого транспортного средства для аэропортов // Проблемы машиностроения. 2002. Т. 5, № 2. С. 92–95.
8. Болтинский В. Н. Теория конструкция и расчет тракторных и автомобильных двигателей: М.: Изд-во сельхоз. литературы, журналов и плакатов, 1962.
9. Богомолов В. А., Кудрявцев И. Н., Крамской А. В., Пятак А. И., Бондаренко С. И., Муринец-Маркевич Б. Н., Пламмер М. С. Эффективный КПД пневматического двигателя для автомобильного транспорта // Проблемы машиностроения. 2004. Т. 7, № 2. С. 64–72.
10. Бондаренко С. И., Кудрявцев И. Н., Крамской А. В., Левченко Н. М., Муринец-Маркевич Б. Н., Пятак А. И., Архипов А. В. Разработка пневматического двигателя мощностью до одного киловатта для модели криогенного автомобиля // Механіка та машинобудування. 2004. № 2. С. 102–110.
11. Knowlen C., Mattick A. T., Bruckner A. P., Hertzberg A. High efficiency energy conversion systems for liquid nitrogen automobiles //

Future Transp. Tech. Conf. and Exposition. Costa Mesa, CA, August 11–13, 1998. SAE Technical Paper Series 981898. P. 1–7. Frable N., Matheson-Trigas Company, USA, private communications.

12. Бондаренко С. И., Кудрявцев И. Н., Пятак А. И. Криогенные автомобили: разработка и применение // Экономика и производство. Технологии, оборудование, материалы. 2002. № 3. С. 37–39.

13. Knowlen C., Williams J., Mattick A. T., Deparis H., Hertzberg A. Quasi-isothermal expansion engines for liquid nitrogen automotive propulsion // Future Transp. Tech. Conf. & Exposi-

tion. San Diego, CA, August 6–8, 1997. Paper SAE-972649.

14. Теплотехника/Под ред. В. Н. Луканина. М.: Высшая школа, 1999.

15. Plummer M. C., Koehler C. P., Flanders D. R., Reidy R. F., Ordonez C. A. Cryogenic heat engine experiment // Adv. in Cryogenic Engineering. 1998. Vol. 43. P. 1245.

16. Bondarenko S. I., Levin A. Ya., Pyatak A. I., Kudryavtsev I. N. Development of cryocar on basis of liquid nitrogen // Proc. of the 8th CRYOGENICS'2004 IIR Int. Conf. Praha, Czech Republic, April 27–30, 2004. P. 123–127.



CSA & NASA Goddard Space Flight Center August 24–26  
**SPACE CRYOGENICS 2005**  
WORKSHOP Colorado Springs

NASA's Goddard Space Flight Center presents the 21st Space Cryogenics Workshop (a division of the Cryogenic Society of America), which will be held from August 24–26, 2005, in Colorado Springs, Colorado, USA. All aspects of space cryogenics will be represented, with emphasis on those related to Space Exploration.

The workshop immediately precedes the Cryogenic Engineering Conference in Keystone, Colorado and will continue the 20 plus year tradition of bringing together scientists and engineers from around the world who are actively working in the field of cryogenics as it relates to space applications.

Workshop participants representing industry, academia, and government will have an excellent opportunity for sharing their technical expertise through presentations of technical papers. Several invited papers will be solicited in areas of systems and technologies needed for the exploration of space.

#### IMPORTANT DATES

- ♦ Abstract submission Now Open
- ♦ Registration Opens December, 2004
- ♦ Abstracts due April 29, 2005
- ♦ Early registration deadline May 20, 2005
- ♦ Pre-registration deadline May 20, 2005
- ♦ Preliminary program June 24, 2005
- ♦ On-line registration deadline Aug. 19, 2005
- ♦ Welcome reception Aug. 24, 2005
- ♦ Papers due Aug. 25, 2005
- ♦ Workshop Aug. 25–26, 2005
- ♦ Awards banquet Aug. 25, 2005

#### WORKSHOP LOCATION

The workshop will be held in the Great Hall of the Glen Eyrie Castle in Colorado Springs, Colorado. In addition to its own beautiful setting and historic castle grounds, Glen Eyrie is located in the Garden of the Gods state park, which features some of the most unusual rock formations, and is home to The Trading Post, the site chosen for the Workshop banquet. The Trading Post features one of the largest collections of Native American art, as well as an extensive gift shop. The Park is also within sight of Pike's Peak, though it is still a 1.5 hour drive to the 14,000-foot summit.

#### WORKSHOP COMMITTEE

- Chair: Peter Shirron, NASA/Goddard Space Flight Center, (301)286-7327
- Co-Chair: Kimberley Shirey, NASA/Goddard Space Flight Center, (301)286-8664
- Award Committee Chair: Melora Larson, Jet Propulsion Laboratory
- Sponsor: Laurie Huget, Cryogenic Society of America

#### ADDITIONAL INFORMATION

The Space Cryogenics Workshop is a Division of the Cryogenic Society of America, a non-profit technical society and publisher of Cold Facts magazine. CSA's sponsorship provides several awards that will be presented at the banquet dinner.

For more detailed information, visit the NASA Goddard Web page

<http://www.cryogenicsociety.org/scw.htm>