

УДК 621.56:59

Канд. техн. наук **Н.Г. КИРИЛЛОВ**,
Военный инженерно-космический
университет

АВТОРЕФРИЖЕРАТОРНАЯ ТЕХНИКА НА СЖИЖЕННОМ ПРИРОДНОМ ГАЗЕ

Сжиженный природный газ как моторное топливо и хладагент

Перспективность использования сжиженного природного газа (СПГ) в качестве альтернативного моторного топлива для автотранспортных средств очевидна для большинства стран мира. Исследования, выполненные фирмами Ford, Toyo Menka, Mercedes-Benz, MAN, Messer, BMW и др., показали техническую возможность и экономическую целесообразность применения СПГ на автотранспорте.

СПГ как моторное топливо применяют в США, Германии, Нидерландах, Норвегии, во Франции и в других странах. Известная американская компания Mack в сотрудничестве с фирмой Waste Management Inc. уже в течение 20 лет успешно занимается производством двигателей на СПГ. Седельный тягач Mack CH/LNG, работающий на СПГ, — это самый чистый грузовой автомобиль на американских дорогах, отличающийся также и большим запасом хода (свыше 1000 км). Сейчас СПГ в качестве моторного топлива начал применять и другой промышленный лидер США — United Parcel Service (UPS).

В Германии фирмами Mercedes-Benz и Messer разработаны и производятся городские мусоровозы, работающие на СПГ. Только во Франкфурте предполагается использовать более 80 таких муниципальных машин.

За рубежом создано и успешно развивается множество фирм, специализирующихся на производстве газовой аппаратуры и криогенного оборудования для конвертации автомобилей на СПГ. Так, американская фирма Kaiser Brencar обслуживает свыше 1500 автомобилей на СПГ. Она выпускает криогенные баки емкостью от 70 до 500 л, рассчитанные на давление около 0,15 МПа и топливные системы питания жидким газом, обеспечивающие беззаправочный пробег автомобиля до 450 км.

В США и Западной Европе широкое

Problems of efficiency of use of liquefied natural gas (LNG) as a motor fuel and refrigerant in refrigerated vehicles have been considered. The factors influencing useful refrigerating capacity of LNG have been evaluated; ecological, energetic and design advantages of refrigerated vehicles working on LNG are given.

Prospects for creation of transport in Russia are given.

использование СПГ в качестве моторного топлива для автомобилей стимулируется наличием развитого централизованного промышленного производства СПГ. За последние 30 лет в мире создана и успешно функционирует целая индустрия, обеспечивающая получение до 100 млрд м³ СПГ в год. По прогнозам специалистов, объем мировой торговли им может возрасти к 2010 г. до 150 млрд м³ и более [1]. За рубежом производство СПГ связано с экспортом огромного количества природного газа из газодобывающих регионов мира (Алжира, Индонезии, Ливии, Малайзии и др.) в развитые страны Европы, США, Японии или с его более экономичной перевозкой морским транспортом в сжиженном виде.

В России промышленное производство сжиженного природного газа отсутствует. Проблема создания отечественной инфраструктуры производства СПГ может быть решена в кратчайшие сроки на основе использования криогенных газовых машин (КГМ) Стирлинга [2,3]. Стирлинг-технология позволяет создать различные по своему функциональному назначению и расположению типы заправочных станций СПГ: индивидуальные, гаражные, муниципальные. При этом учитывается уникальная особенность транспортировки природного газа в России, а именно, наличие широкой сети продукционных газопроводов низкого давления (от 0,1 до 0,6 МПа) практически в каждом населенном пункте — от крупных промышленных городов до небольших поселков [4]*.

*О концепции создания инфраструктуры производства сжиженного природного газа для городского автомобильного транспорта см. журнал ХТ № 7/2002.

Однако СПГ не только эффективен в качестве дешевого и экологически чистого моторного топлива. Он может использоваться как хладагент в авторефрижераторах и в кондиционерах (кабин дальнорейсовых грузовиков или автобусов).

Таким образом, можно удешевить стоимость прогона, сэкономив энергию и вернув большую часть затрат на сжижение газа.

Авторефрижераторная техника на СПГ — зарубежный опыт создания и эксплуатации

Авторефрижераторный транспорт на СПГ широко используется в Западной Европе для доставки в магазины свежих и подвергнутых глубокому замораживанию продовольственных товаров. В Германии серийное производство авторефрижераторов на СПГ освоено совместно фирмами MAN и REWE. Грузовики снабжены шестицилиндровыми двигателями MAN-19.232 мощностью 170 кВт и изотермическими кузовами вместимостью 18 т. Среднегодовой пробег авторефрижератора составляет более 30 тыс. км (при ежедневном — 159 км). Средний расход топлива (СПГ) 28 кг/100 км. Автомобиль потребляет 143 л СПГ при пробеге в 200 км.

Для определения эффективности применения СПГ как хладагента в сравнении с традиционной для авторефрижераторов парокомпрессионной холодильной машиной (ПКХМ) один из грузовиков был снабжен дополнительной холодильной установкой типа "FE 13" фирмы Frigoblock Grosskopf GmbH с генератором 17 кВт. Исследования показали, что использование традиционного холодильника вместо системы охлаждения СПГ увеличивает

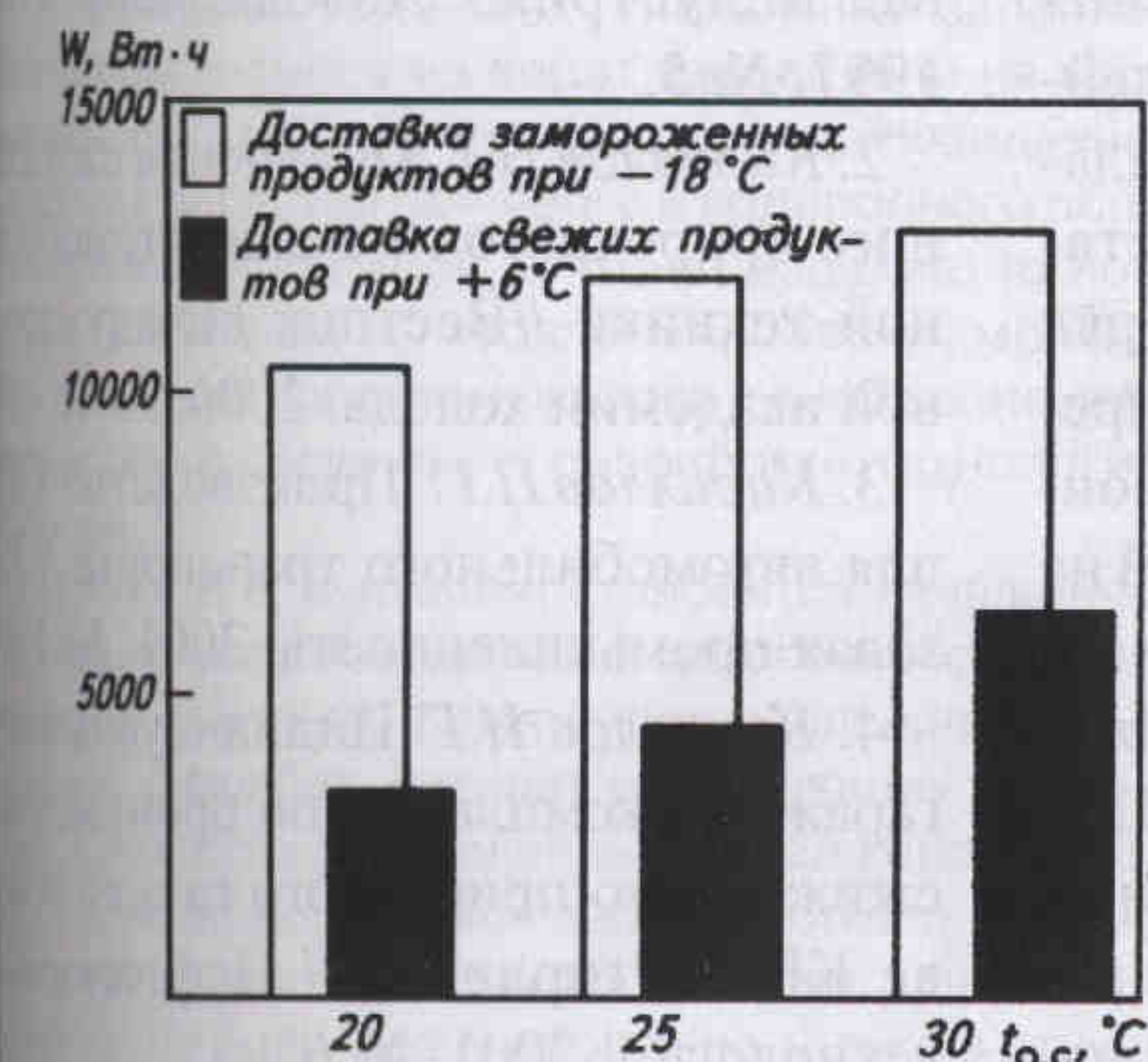
топлива в авторефрижераторе
но на 11%.

ный вопрос, возникающий при
ременном использовании СПГ в
ве топлива и хладагента, состо-
ом, достаточно ли его для под-
ния температуры в грузовом от-
а требуемом уровне термостати-
ия, т.е. для компенсации тепла,
ающего через изоляцию и по-
ающего в охлаждаемый объем при
овках для разгрузки товара.

к показал опыт эксплуатации ав-
фрижераторов MAN-19.232, наи-
е важными факторами, влияющи-
тепловой баланс, являются тем-
тура внешней среды, назначение
рижератора (доставка свежих про-
тов при +6 °С или замороженных
нах (-18 °С), а также число разгрузок
ара (доставка в одно или в несколь-
мест).

на диаграмме представлена зависи-
сть полезной охлаждающей способ-
сти СПГ, т.е. количества энергии, не-
ходимой для сохранения температу-
ры внутри грузового отсека на уровне
или -18 °С в течение 8-часового ра-
ного дня, от значения температуры
оужающей среды при следующих
словиях: расход СПГ 28 кг/100 км,
ощность двигателя 170 кВт, пробег
0 км/день, площадь поверхности
грузового отсека 92,5 м².

Как видно из диаграммы, максималь-
ая охлаждающая способность СПГ
егда, даже в самый жаркий летний
ень, обеспечивает не только возмож-
ость доставки свежих продуктов, но
сохранение нужного температурно-



Зависимость полезной охлаждающей способности СПГ от температуры окружающей среды

Тип авторефрижераторной установки	$W_{\text{двиг. отн}}$	$W_{\text{двиг. прив. отн}}$	$W_{\text{хл. отн}}$	$W_{\text{т. отн}}$	$\Sigma W_{\text{отн}}$
Авторефрижераторная установка с двигателем автомобиля и с двигателем привода компрессора на дизельном топливе, оснащенная ПКХМ	1	1	1	1	4
на дизельном топливе, оснащенная азотной системой охлаждения	1	0	0	1	2
и с двигателем привода компрессора на сжатом природном газе (КПГ), оснащенная ПКХМ	0,12	0,12	1	0	1,24
на сжиженном природном газе (СПГ в качестве топлива и хладагента)	0,12	0	0	0	0,12

го режима при открывании дверей до
30 раз при температуре окружающей
среды до 30 °С.

Экологическая эффективность авторефрижераторной техники на СПГ

В настоящее время использование
сжиженного природного газа одновре-
менно в качестве топлива и хладаген-
та является одним из возможных реше-
ний проблемы повышения экологичес-
кой чистоты авторефрижераторной
техники.

Энергетическая и экологическая эф-
фективность двигателей, авторефриже-
раторной техники в первую очередь
зависит от вида применяемого мотор-
ного топлива. Автомобиль, работаю-
щий на традиционном нефтяном топ-
ливе (дизельном топливе, бензине),
ежегодно поглощает из атмосферы бо-
лее 4 т кислорода, выбрасывая при этом
с отработанными газами примерно
800 кг CO₂, 40 кг окислов азота и по-
чти 200 кг различных углеводородов.
Для авторефрижераторов эти значения
выше не менее чем на 10 %, добавляе-
мых двигателем холодильного агрегата.

Результаты исследований токсично-

сти автомобилей, показыва-
ют, что при замене нефтя-
ного моторного топлива на
СПГ выброс в окружаю-
щую среду оксида углеро-
да снижается в среднем в 8
раз, углеводородов — в 3
раза, окислов азота — в 2
раза, ПАУ — в 10 раз, дым-
ность — в 9 раз.

В настоящее время для
оценки влияния холоди-
льной техники на экологию
введен критерий TEWI —
суммарный эквивалент гло-
бального потепления. Для
любой холодильной систе-
мы TEWI учитывает как
прямой вклад в парнико-

вый эффект от утечек хладагента, так
и косвенное влияние, связанное с про-
изводством энергии, потребляемой си-
стемой.

Разработанная автором методика по-
зволяет представить TEWI для авто-
рефрижераторной техники в общем
случае в виде следующей функции:

$$TEWI = f(W_{\text{дв}}, W_{\text{дв.прив}}, W_{\text{хл}}, W_{\text{т}}, W_{\text{карт.дв}})$$

где W — количество парниковых га-
зов (приведенное к эквивалентному ко-
личеству CO₂), образующихся: при ра-
боте автомобильного двигателя ($W_{\text{дв}}$),
при работе двигателя привода компрес-
сора ($W_{\text{дв.прив}}$); от утечки хладагента
($W_{\text{хл}}$); при хранении моторного топ-
лива и заправке им рефрижератора ($W_{\text{т}}$);
в картерах двигателей рефрижератора
($W_{\text{карт.дв}}$).

В таблице приведены относительные
значения вышеуказанных составляю-
щих для четырех типов авторефриже-
раторных установок (за 1 приняты зна-
чения W для традиционной авторефри-
жераторной установки, оснащенной
холодильным агрегатом на основе
ПКХМ с двигателем автомобиля и дви-
гателем привода компрессора на ди-
зельном топливе).

Из таблицы видно, что наиболее
экологически чистой является авто-
рефрижераторная установка, исполь-
зующая сжиженный природный газ в
качестве топлива и хладагента. При-
веденные в таблице значения лишь ка-
чественно характеризуют экологичес-
кий аспект использования различных
типов авторефрижераторной техники
и не могут служить для количествен-
ного сравнения. Корректность приве-
денного в таблице сравнения опреде-
ляется тем обстоятельством, что в
TEWI косвенный фактор (выбросы
двигателей) является доминирующим
по отношению в прямому (эмиссии
хладагента). Численные значения со-
ставляющих TEWI можно определить
только для конкретного типа автореф-

рижератора с учетом мощности его двигателя, вида моторного топлива, типа хладагента и т.д.

Авторефрижераторные установки на СПГ – перспективы создания в России

В России ввиду отсутствия инфраструктуры производства сжиженного природного газа для автотранспорта авторефрижераторная техника на СПГ пока широко не применяется. Организация сети гаражных заправочных станций СПГ на основе Стирлинг-технологий, расположенных непосредственно у потенциальных потребителей (в автохозяйствах), открывает широкие перспективы для создания отечественных авторефрижераторов на СПГ без использования дорогостоящих зарубежных ПКХМ.

Авторефрижераторы с использованием СПГ в качестве топлива и хладагента относятся к «расходным» системам охлаждения наряду с системами азотного охлаждения и системами охлаждения сжиженными бутан-пропановыми смесями. Исследования, выполненные во ВНИИгазе, показывают высокую экономическую эффективность применения авторефрижераторной техники на СПГ [5]. Так, по сравнению с жидким азотом, используемым в качестве хладагента при перевозке скоропортящихся продуктов, СПГ обладает почти в 3 раза более высокой скрытой удельной теплотой испарения (200 и 520 кДж/кг соответственно при температурах кипения 78 и 111 К) и в 2 раза более высокой теплоемкостью при нормальных условиях [1,05 и 2,26 кДж/(кг·К)].

Перед поступлением в двигатель транспортного средства СПГ испаряют и нагревают до температуры окружающей среды. На эти процессы требуется около 850 кДж на 1 кг газа в интервале температур 120...270 К. При потреблении топлива автотранспортом в количестве 20...30 кг/ч ресурсы холодопроизводительности составляют 25 тыс. кДж/ч, что позволяет поддерживать заданный температурный режим в холодильных камерах объемом до 300 м³, соответствующих классам С и F по нормам Европейской экономической комиссии ООН (ЕЭК ООН). Это является основным преимуществом СПГ как хладагента перед сжи-

женными бутан-пропановыми смесями, обеспечивающими температуру внутри грузового объема только в пределах от 12 до 0 °С, соответствующих классу А (ЕЭК ООН).

В авторефрижераторах малого и среднего радиуса действия предполагается использовать комбинированные системы охлаждения, включающие аккумуляторы холода с эвтектическими растворами, применение которых обеспечивает заданный температурный режим при длительных (ночное время, погрузка-разгрузка) остановках транспортного средства.

Расчеты показывают, что применительно к авторефрижераторам грузоподъемностью 1,5–12 т приведенные затраты на систему охлаждения с помощью СПГ по сравнению с охлаждением азотом снижаются в 8–10 раз, а по сравнению с машинным охлаждением (ПКХМ) – в 5–7 раз.

Специалистами Военного инженерно-космического университета (ВИКУ) в настоящее время разработано несколько принципиальных схем транспортных холодильных систем на СПГ, защищенных патентами РФ № 2166706, 2166704, 2163706, 2156418, 2164648 и др. и учитывающих конструктивные особенности крупнотоннажных, средних и малотоннажных авторефрижераторных установок. В этих технических решениях предложены новые принципы подачи СПГ в двигатели автомобилей и термоизолированные грузовые секции, что позволяет в значительной степени повысить энергетическую эффективность и надежность работы авторефрижераторных установок [6].

Кроме значительного уменьшения негативного экологического воздействия на окружающую среду предлагаемые авторефрижераторные установки на СПГ будут иметь также ряд экономических и конструктивных преимуществ по сравнению с традиционной авторефрижераторной техникой на дизельном топливе и с ПКХМ:

- снижение стоимости авторефрижератора на 10–40 тыс. долл. США, уменьшение его массы и габаритных размеров, повышение надежности работы из-за отсутствия холодильной машины;
- уменьшение эксплуатационных расходов благодаря исключению затрат

на обслуживание и ремонт холодильного агрегата;

- снижение расхода топлива (на выработку энергии для привода холодильного компрессора и вентилятора конденсатора);

- уменьшение затрат на топливо (согласно постановлению Правительства России от 15 января 1993 г. № 31 даже в условиях свободного рынка стоимость 1 м³ природного газа для транспортных средств не будет превышать 50 % стоимости 1 л бензина А-76, эквивалентного ему по энергосодержанию);

- увеличение ресурса двигателя автомашины на 15–20 %, снижение расхода масла на 30 %.

Безусловно, авторефрижераторная техника, работающая на СПГ, имеет свои недостатки, основные из которых – зависимость холодопроизводительности от работы самого транспортного средства и возможность работы только в режиме охлаждения. Однако в условиях предполагаемой программы всеобщей газификации автомобильного транспорта, предусматривающей замену дефицитных нефтяных видов топлива альтернативными за счет увеличения выпуска автотранспортных средств, работающих на природном газе, создание авторефрижераторной техники, использующей СПГ в качестве топлива и хладагента, является наиболее перспективным и экономически выгодным направлением развития транспортных рефрижераторных установок XXI в.

ЛИТЕРАТУРА

1. Беньяминович О.А. Холод и газовая индустрия // Холодильное дело 1997. № 5.
2. Кириллов Н.Г. Получение сжиженного природного газа для автомобильной техники // Вестник Международной академии холода. 2000. № 1.
3. Кириллов Н.Г. Производство СПГ для автомобильного транспорта // Газовая промышленность. 2001. № 1.
4. Кириллов Н.Г. Индивидуальные гаражные комплексы по производству сжиженного природного газа на основе КГМ Стирлинга // Нефтегазовые технологии. 2001. № 6.
5. Чириков К.Ю. Использование сжиженного природного газа на транспорте. – М., 1987.