

УДК 620.9

**А.В. Брагин, Ю.В. Колгушкин, О.М. Попов, В.Н. Удут**

ОАО «НПО Гелиймаш», Лужнецкая набережная, 10а, г. Москва, РФ, 119992

e-mail: gmashinf@ru.ru

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СПГ НА ТРАНСПОРТЕ

*Использование сжиженного природного газа (СПГ) в качестве энергоносителя вместо традиционных нефтяных видов топлив приближает время практического применения водорода. Совершенствование криогенных топливных баков для СПГ также способствует этому. Для обеспечения транспортных средств необходимым запасом СПГ создаются конструкции криогенных топливных баков (БКТ), отвечающих многочисленным требованиям: эффективная и недорогая теплоизоляция; наличие в баке автоматической системы поддержания рабочего давления в заданном диапазоне; обеспечение безотказности, надёжности и долговечности. Приводятся примеры применения БКТ в автомобилях различных моделей. Рассматривается возможность использования СПГ на маневровом газотепловозе.*

**Ключевые слова:** Сжиженный природный газ. Водород. Криогенный топливный бак. Вибрационные испытания. Автотранспорт. Газотепловоз.

**A.V. Bragin, Yu.V. Kolgushkin, O.M. Popov, V.N. Udut**

## USING OF LNG ON TRANSPORT

*Using of liquefied natural gas (LNG) as the energy carrier instead of traditional oil kinds of fuel approaches time of practical application of hydrogen. Perfection of cryogenic fuel tanks for LNG also promotes this. For maintenance of motor transport by necessary reserve of LNG are created the cryogenic fuel tanks (CFT) which answering to numerous requirements: effective and inexpensive heat insulation; availability in tank of automatic system for maintenance of working pressure in the set range; maintenance of reliability operation, safety and durability. Examples of application of CFT in automobiles of various models are resulted. The opportunity of use of LNG on shunting gas-diesel locomotive is considered.*

**Keywords:** Liquefied natural gas. Hydrogen. Cryogenic fuel tank. Vibration testing. Motor transport. Gas-diesel locomotive.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Из-за дефицита добываемой нефти, составляющего около 4 млн. баррелей в сутки, неуклонно растут цены на традиционные виды топлива: бензин, дизельное топливо, авиационный керосин, мазут. Те же тенденции приводят к повышению стоимости широко применяемого в автомобильном транспорте и секторе ЖКХ сжиженного углеводородного газа (СУГ).

В связи с увеличением энергопотребления, а также истощением разведанных запасов нефти у большинства стран остается только один выход — искать возможные варианты замещения нефтепродуктов другими видами энергоносителей в транспортном, промышленном и коммунальном секторах.

Сжиженный природный газ (СПГ) сейчас, а жидкий водород (ЖВ) в будущем являются наиболее реальной альтернативой. Следует ожидать, что в связи с развитием криогенных технологий ожижения, хранения и транспортирования природного газа приближа-

ется время практического применения водорода в качестве основного энергоносителя.

Известно, что одним из сдерживающих факторов широкого использования водорода является способ хранения этого самого лёгкого химического элемента на борту транспортного средства (в сжатом или в сжиженном состоянии). Наибольший запас газа в единице объёма топливной ёмкости как для природного газа, так и для водорода получается при их хранении в жидком состоянии. Поэтому для использования этих криогенных энергоносителей необходимы эффективные топливные баки.

### 2. КРИОГЕННЫЕ ТОПЛИВНЫЕ БАКИ

СПГ как моторное топливо имеет безусловно большие преимущества по сравнению с традиционными видами топлив нефтяного происхождения. В первую очередь — по стоимостным параметрам и во вторую — по более высокой чистоте обработанных вых-

**Таблица 1. Исходные данные для выбора криогенных топливных баков**

Модель двигателя	Транспортное средство	Давление газа на входе в систему питания, кгс/см <sup>2</sup>	Давление газа в БКТ (рекомендуемое), кгс/см <sup>2</sup>	Расход газа, м <sup>3</sup> /ч
Сummins CG-250/31	Автобус ЛиАЗ-5256 М	4,13 (минимальное)	5,6-6,3	104
КАМАЗ-820 (турбонаддув)	Автобус НЕФАЗ-5299-10-2 1	5-6; перед форсункой — 3	6-10	90
КАМАЗ-820 (атмосферный)				63
КАМАЗ-720 (газодизель)	Грузовики КАМАЗ	5-6; перед смесителем — 0,01		50
ММЗ-245 (конвертирован на газ)	Грузовик ЗИЛ-5301	2-5	2-5,5	30
ММЗ-245 (газодизель)	Трактор МТЗ-82			30
ЗМЗ-406 (двухтопливный)	Грузовик ГАЗ-3302			25
	Трактор К-701			
ЯМЗ-238	Трактор К-701			100

максимальное — не выше 1,034 МПа (150 psi). В газовом двигателе КАМАЗ-820.53-260 (EURO-2) давление перед электромагнитными форсунками должно поддерживаться устойчиво редуктором низкого давления на уровне около 0,3 МПа (см. табл. 1).

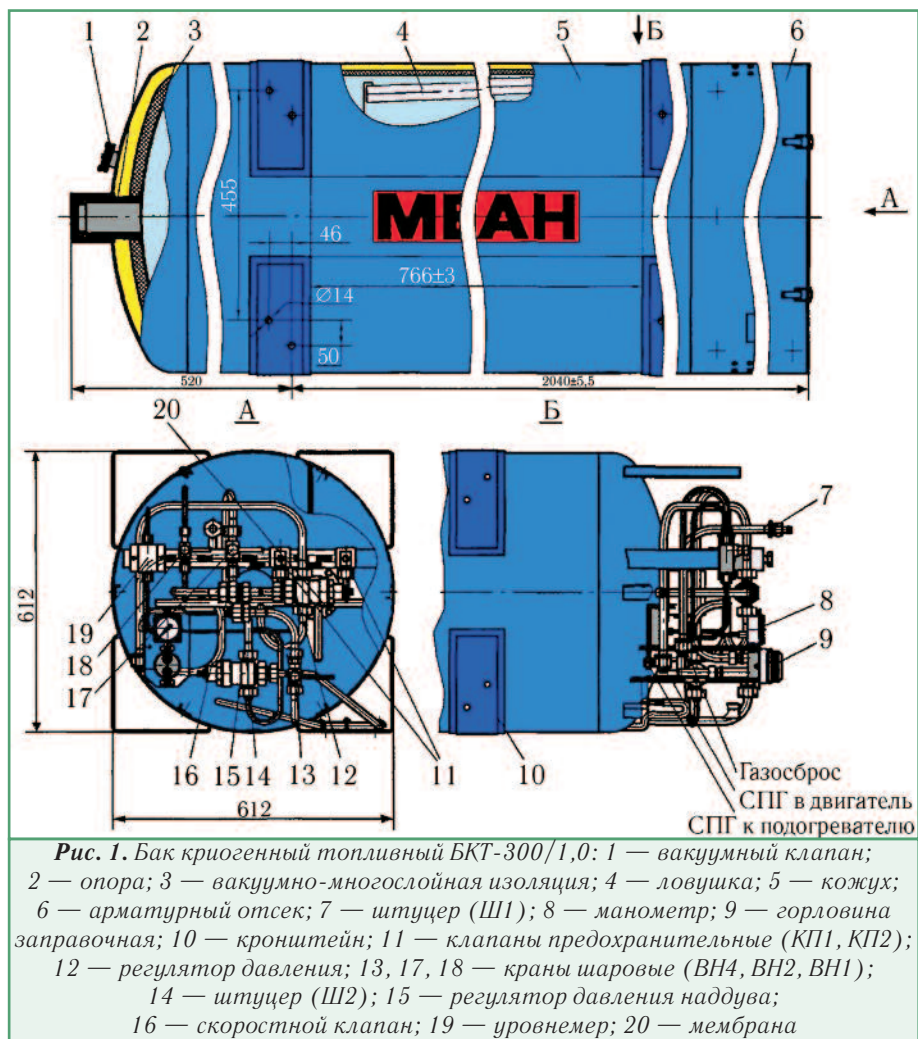
БКТ представляет собой двухстенный цилиндрический резервуар, выполненный из нержавеющей стали с вакуумно-многослойной теплоизоляцией. Внутренний сосуд закреплён в его кожухе на двух цилиндрических опорах из стеклопластика. В верхней части внутреннего сосуда размещена ловушка, предотвращающая

лопных газов двигателей внутреннего сгорания.

Для решения вопроса использования СПГ в качестве моторного топлива нашим предприятием было разработано семейство криогенных топливных баков (БКТ), включающее два типа базовых ёмкостей БКТ-100 и БКТ-300 с гидравлическими объёмами 100 и 300 л, соответственно [1-3].

Применение указанных баков позволяет привлечь к эксплуатационным испытаниям на СПГ широкий спектр типов автомобилей, автобусов и тракторов. Также решались вопросы обеспечения регазифицированным природным газом двигателя силовой установки. При этом гидравлические и тепловые расчёты арматуры, трубопроводов и теплообменников-газификаторов проводились с учётом максимальных часовых расходов газового топлива и рабочего давления на входе в газодозирующую аппаратуру двигателя. Так, в серийно выпускаемых газовых двигателях Cummins CG-250/31 минимально допустимое рабочее давление на входе в редуктор низкого давления должно быть не менее 0,413 МПа (60 psi), а

выброс жидкости в газо-сброс при движении автомобиля по неровной дороге и гарантирующая обеспечение определённого объёма паровой подушки над зер-



**Рис. 1. Бак криогенный топливный БКТ-300/1,0:** 1 — вакуумный клапан; 2 — опора; 3 — вакуумно-многослойная изоляция; 4 — ловушка; 5 — кожух; 6 — арматурный отсек; 7 — штуцер (Ш1); 8 — манометр; 9 — горловина заправочная; 10 — кронштейн; 11 — клапаны предохранительные (КП1, КП2); 12 — регулятор давления; 13, 17, 18 — краны шаровые (ВН4, ВН2, ВН1); 14 — штуцер (Ш2); 15 — регулятор давления наддува; 16 — скоростной клапан; 19 — уровнемер; 20 — мембрана

калом жидкости при заправке. На днище кожуха сосуда установлены вакуумный клапан, обеспечивающий возможность периодической откачки вакуумной полости при проведении регламентных работ, и предохранительная мембрана, предохраняющая от разрушений кожух при разгерметизации внутреннего сосуда. Арматурный отсек смонтирован непосредственно на сосуде и снабжён дверцей с замком, как показано на рис. 1. Сосуд должен отвечать требованиям ПБ 03-576-03 «Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением», утверждённым Госгортехнадзором.

Предохранительные клапаны БКТ настроены на давления открытия: 1,77; 1,15 или 0,55 МПа в зависимости от модификации криогенного бака. При повышении давления в сосуде осуществляется сброс СПГ в дренажный трубопровод через предохранительные клапаны.

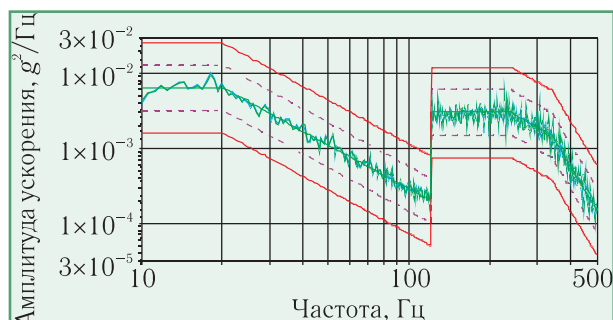
БКТ-300/1,0 изготавливается в двух исполнениях в зависимости от расположения арматурного отсека: по торцу или вдоль обечайки цилиндра. Баки комплектуются теплообменником — подогревателем природного газа. Тепло для газификации и подогрева СПГ подводится от системы охлаждения двигателя.

Были созданы конструкции баков БКТ-300 с малыми (0,2-0,5 МПа), средними (0,3-1,0 МПа) и большими (0,5-1,6 МПа) рабочими давлениями. Их показатели приведены в табл. 2. При их разработке были использованы требования и рекомендации стандарта NFPA 57 (США), регламентирующего в частности время бездренажного хранения (не менее 72 ч), а также соответствующие стандарты России.

В соответствии с требованиями заказчиков приходится учитывать нормы и критерии оценки безотказности и надёжности, предъявляемые к конструкции криогенных баков. Например, в соответствии со стандартом KGS-C 025 (компания «KoGAS») республики Южной Кореи были проведены вибрационные испытания криогенного топливного бака БКТ-300/1,0. Бак был заполнен жидким азотом, который по своей массе имитировал наличие в нём 100 % СПГ. После чего БКТ-300/1,0 был установлен на

вибростенд, имеющий мощный электромагнитный возбудитель колебаний в широком диапазоне частот.

Последовательно по направлению трёх осей X, Y и Z на бак производилось воздействие в заданных амплитудно-частотных диапазонах. На рис. 2 приведены значения амплитудно-частотных воздействий на указанный бак.



**Рис. 2.** Зависимость амплитуды ускорения от частоты при испытаниях БКТ-300/1,0 в случае возбуждения колебаний по оси X



**Фото 3.** Грузовой автомобиль Hyundai, оборудованный криогенным топливным баком БКТ-300/1,0

Суммарное время испытаний составило 9 ч. По три часа оно велось на каждой оси. Уровень колебаний плавно менялся по заданной компьютером программе в необходимом частотном диапазоне. Криогенный топливный бак считается выдержавшим испытания, если не нарушается герметичность сосуда, сохраняется уровень качества теплоизоляции, а также ра-

**Таблица 2.** Основные характеристики криогенных топливных баков

Параметры	Типы баков			
	БКТ-100	БКТ-300	БКТ-300/1,0	БКТ-300/1,6
Вместимость, л	110	325	325	325
Количество СПГ, заливаемого в бак, л (эквивалентный объём газа, нм³)	100 (60)	290 (175)	290 (175)	290 (175)
Вид теплоизоляции	экранно-вакуумная			
Максимальное рабочее давление, МПа	0,5	0,5	1,0	1,6
Время бездренажного хранения в процессе эксплуатации, сут.	5	18	20	более 20
Габаритные размеры сосуда (длина×ширина×высота), мм	1250×500×480	1910×610×610	1910×610×610	1910×610×610
Масса порожнего сосуда, кг	92	235	245	260
Применение на автомобилях, автобусах и тракторах	ГАЗ-3302 «Газель»; ЗИЛ-5301 «Бычок»; трактор ММЗ-82	КАМАЗ-53215; КАМАЗ-54115; КАМАЗ-55111; автобусы НЕФАЗ-5299-21, ЛиАЗ-52556Г; трактор К-701 «Кировец»		



ботоспособность всех его систем и узлов. Этим требованиям в полной мере удовлетворил БКТ-300/1,0 нашего производства.

### 3. ПРИМЕНЕНИЕ КРИОГЕННЫХ ТОПЛИВНЫХ БАКОВ

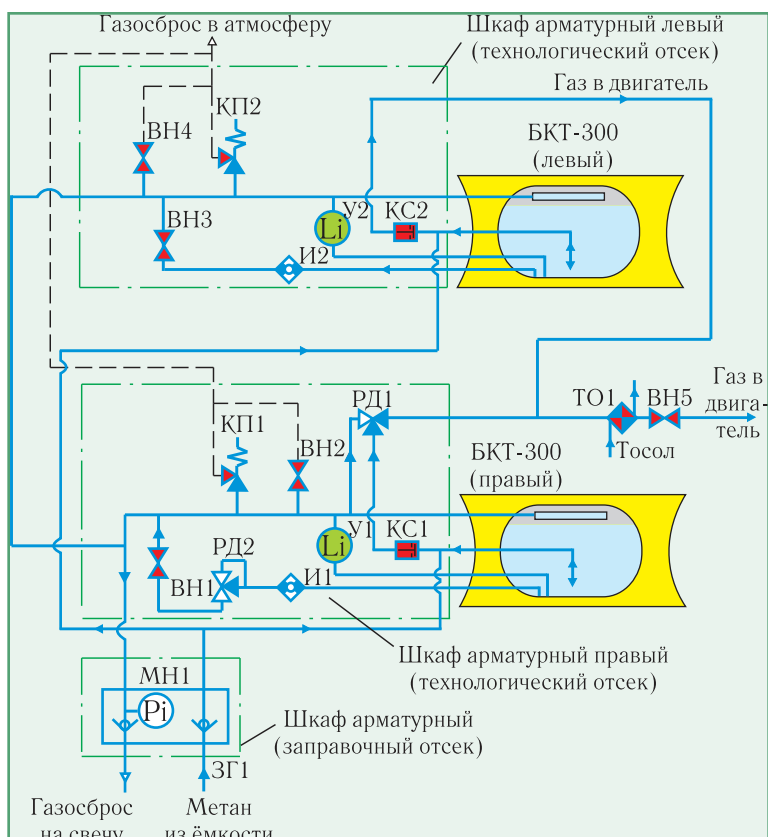
При переводе транспортного средства, например, автомобиля на СПГ, конструктор стремится сохранить, а в некоторых случаях и улучшить его эксплуатационные характеристики. Одним из таких параметров является дальность пробега, которая в первую очередь зависит от штатного запаса топлива, а также от его энергетической эффективности. Если сравнивать в объёмных единицах (литрах жидкости) СПГ с бензином и дизельным топливом, то один литр СПГ по энергетической эффективности будет равен 0,67 л бензина и 0,59 л дизельного топлива. Следовательно, для автомобилей, оборудованных однопаливным газовым двигателем, для сохранения дальности пробега на СПГ по сравнению с бензиновым объём криогенного топливного бака должен быть больше почти на 40 %.

Большинство автомобилей, находящихся в опытной эксплуатации, имеют по одному криогенному топливному баку. В качестве примера (см. фото 3) показан седельный тягач фирмы Hyundai, оборудованный криогенным топливным баком БКТ-300/1,0. На автомобиле установлен двигатель D6CA с объёмом цилиндров 12,92 л и мощностью 440 л.с., работающий в газодизельном режиме. С октября 2007 г. автомобиль находится в опытной эксплуатации.



**Фото 5.** Шасси малотоннажного грузового автомобиля ЗИЛ-5301 «Бычок», переоборудованного для работы на СПГ

На основе анализа различных компоновочных решений по размещению криогенных баков на борту грузовых автомобилей и автобусов нами сделан вывод, что зачастую два бака имеют большую практическую ценность (количество СПГ, клиренс, габариты), нежели один большой БКТ, специально сконструированный для данного транспортного средства.



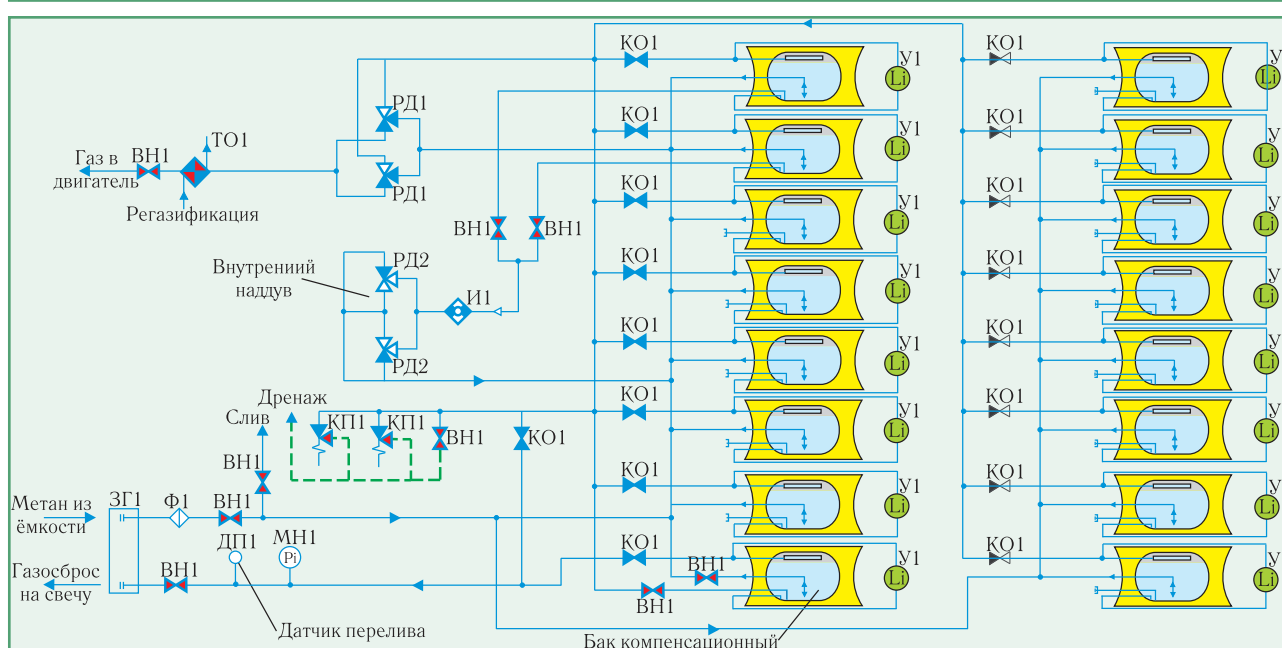
**Рис. 4.** Принципиальная пневмогидравлическая схема соединения двух БКТ: ВН1-ВН5 — шаровые краны; БКТ-300 — бак криогенный топливный; ЗГ1 — заправочная горловина; И1, И2 — испарители; КС1, КС2 — клапаны скоростные; КП1, КП2 — клапаны предохранительные; МН1 — манометр, РД1, РД2 — регуляторы давления (фазовые переключатели); ТО1 — теплообменник; У1, У2 — уровнемеры

На рис. 4 изображена схема параллельного соединения двух криогенных топливных баков. В этом случае заправка СПГ осуществляется одновременно в два бака через одну заправочную горловину. При этом, уменьшается количество предохранительных клапанов, запорных устройств. Используется один редуктор системы наддува. Можно в схеме применять только один испаритель газа в системе наддува.



**Фото 6.** Трактор К-701 «Кировец» с двумя БКТ-300

По такой схеме работают два БКТ-100 на малотоннажном грузовом автомобиле (см. фото 5) и два БКТ-300 на большом пропашном тракторе К-701



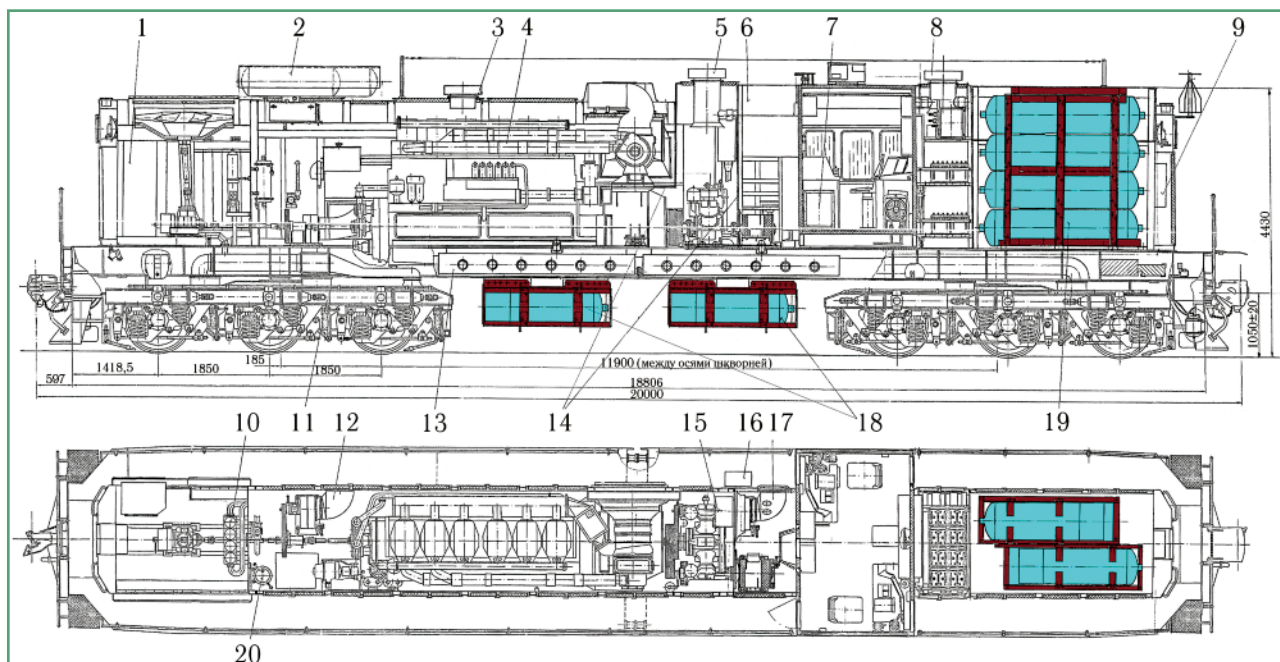
**Рис. 7.** Пневмогидравлическая схема соединения 16-ти БКТ-300/1,0 системы питания двигателя маневрового газотепловоза ТЭМ-18ГС: ВН1 — вентиль; БКТ-300/1,0 — бак криогенный топливный; ЗГ1 — заправочная горловина; И1 — испаритель; КО1 — клапан обратный; КП1 — клапан предохранительный; РД1 — регулятор давления (фазовый переключатель); РД2 — регулятор давления внутреннего наддува; ТО1 — теплообменник; У1 — уровнемер, Ф1 — фильтр

«Кировец» (фото 6).

Три грузовых автомобиля ЗИЛ-5301 «Бычок» были переоборудованы на СПГ в начале 2006 г. Они прошли доводочные и лабораторно — дорожные испытания и в настоящее время эксплуатируются на московском ЗАО «Автокомбинат № 41». На автомобилях установлен конвертированный для работы на

природном газе дизельный двигатель Д-245 с искровой системой зажигания, трёхкомпонентный каталитический нейтрализатор и кислородный датчик с блоком управления дозированием топлива.

По заданию руководства Свердловской железной дороги специалистами нашего предприятия совместно с ООО «Газпром Трансгаз Екатеринбург» выпол-



**Рис. 8.** Схема расположения 16-ти криогенных топливных баков на маневровом газотепловозе ТЭМ-18ГС: 1 — блок газового оборудования; 2 — резервуары тормозные; 3, 5, 8 — вентиляторы вытяжные; 4 — газодизель-генератор; 6 — аппаратная камера; 7 — пульт управления; 9 — щит управления переменного тока; 10 — полнопоточный масляный фильтр; 11 — тележка; 12 — вентилятор тяговых электродвигателей; 13 — баки для дизельного топлива; 14 — перегородки; 15 — трёхканальный выпрямитель; 16 — дроссель; 17 — вентилятор тяговых электродвигателей; 18, 19 — блоки топливных баков БКТ-300 (по 8 шт.); 20 — топливоподогреватель



нена предварительная компоновка 16-ти криогенных топливных баков БКТ-300/1,0 на маневровом газотепловозе ТЭМ-18ГС. Была разработана принципиальная пневмогидравлическая схема заправки, хранения и подачи регазифицированного газа в систему питания двигателя тепловоза (см. рисунки 7 и 8).

Баки, как видно из рис. 7, параллельно соединены между собой через общие коллекторы и разделены на три группы. Восемь баков расположены за кабиной машиниста и две группы по четыре штуки подвешены снизу под рамой между ходовыми тележками. Запас сжиженного природного газа на борту газотепловоза составляет 1920 кг или 2743 нм<sup>3</sup>. Кроме этого, газотепловоз использует 3180 кг дизельного топлива. По расчётам, исходя из опыта эксплуатации ТЭМ-18ГС на компримированном природном газе на Свердловской железной дороге, время между экипировками должно увеличиться с трёх суток до девяти. Таким образом, использование СПГ упрощает перевод железнодорожного транспорта на газодизельный режим с использованием природного газа.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С каждым годом растёт интерес к сжиженному природному газу как моторному топливу. Прошла его апробация по сути на всех видах автотранспортной

техники. СПГ может использоваться на грузовом и пассажирском автотранспорте. Учитывая лучшие по сравнению с компримированным объёмно-массовые характеристики СПГ, этот вид топлива должен занять достойное место и в сельском хозяйстве.

Для более широкого внедрения СПГ необходимо параллельно развивать инфраструктуру производства сжиженного природного газа в крупных объёмах и налаживать массовый выпуск криогенных топливных баков, отвечающих жестким эксплуатационным требованиям.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Комплексное решение проблемы перевода транспорта на СПГ/ **А.В. Брагин, Б.Д. Краковский, О.М. Попов, В.Н. Удут**// Технические газы. — 2006. — № 4. — С. 64-68.
2. Малотоннажные установки сжижения и бортовые топливные системы СПГ для транспорта/ **А.В. Брагин, Б.Д. Краковский, О.М. Попов, В.Н. Удут**// Автогазозаправочный комплекс + Альтернативное топливо. — 2004. — № 6. — С. 44-46.
3. Auto-tractor fuel system using liquefied natural gas/ **О.М. Popov, A.V.Bragin, С.В. Milman, V.N.Udut**// Cryo-Prague Multiconference. — July 17-21 2006. — P. 268.

ДЕВЯТЫЙ МЕЖДУНАРОДНЫЙ СЕМИНАР

ППРВ-2008

СЕМИНАР ПРОВОДИТСЯ  
УКРАИНСКОЙ АССОЦИАЦИЕЙ  
ПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ  
ТЕХНИЧЕСКИХ ГАЗОВ  
"УА-СИГМА"

ПОД ЭГИДОЙ:  
- МИНИСТЕРСТВА ПРОМЫШЛЕННОЙ  
ПОЛИТИКИ УКРАИНЫ  
- МИНИСТЕРСТВА  
ПРОМЫШЛЕННОСТИ И  
ТОРГОВЛИ РФ

- ОДЕССКОЙ ГОСУДАРСТВЕННОЙ  
АКАДЕМИИ ХОЛОДА  
- МЕЖДУНАРОДНОЙ  
АКАДЕМИИ ХОЛОДА

И ПРИ УЧАСТИИ:  
- ГОСУДАРСТВЕННОГО КОМИТЕТА  
УКРАИНЫ ПО ПРОМЫШЛЕННОЙ  
БЕЗОПАСНОСТИ, ОХРАНЕ ТРУДА  
И ГОРНОМУ НАДЗОРУ  
- ФЕДЕРАЛЬНОЙ СЛУЖБЫ  
ПО ЭКОЛОГИЧЕСКОМУ,  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМУ  
И АТОМНОМУ НАДЗОРУ

«ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ  
И БЕЗОПАСНОСТИ ПРОИЗВОДСТВ  
ПРОДУКТОВ РАЗДЕЛЕНИЯ ВОЗДУХА»

6-10 октября 2008 года  
г. Одесса

Место проведения семинара:  
Гостиница "Виктория", расположенная в  
знаменитом курортном районе г. Одессы — Аркадии.

Условия проживания:  
Одноместные номера со всеми удобствами.

Секретариат оргкомитета:  
65026, Украина, Одесса-26, а/я 271  
Тел/факс: + 380 48 777 00 87  
E-mail: uasigma@paco.net  
Http://www.uasigma.odessa.ua

Генеральный информационный спонсор