

# СТАЦИОНАРНЫЕ ХРАНИЛИЩА ПРИРОДНОГО ГАЗА НОВОГО ТИПА

Л.Л. ВАСИЛЬЕВ, профессор,  
заведующий лабораторией  
пористых сред ГНУ «Институт  
тепло- и массообмена  
им. А.В. Лыкова» НАН Беларуси

Л.Е. КАНОНЧИК, к.т.н., старший  
научный сотрудник лаборатории  
пористых сред ГНУ «Институт  
тепло- и массообмена  
им. А.В. Лыкова» НАН Беларуси

Природный газ – один из доминирующих энергоносителей XXI века. Развитие народнохозяйственного комплекса Республики Беларусь неизбежно связано с необходимостью модернизации газотранспортной системы и системы хранения природного газа с одновременным повышением требований к надежности их эксплуатации. В Концепции энергетической безопасности Республики Беларусь важнейшим фактором определена надежность систем энергоснабжения, в том числе и объектов транспортировки и хранения природного газа.

С точки зрения охраны окружающей среды природный газ после водорода является наиболее чистым видом топлива. Он содержит от 85 до 100 % метана, в котором минимум углерода и максимум водорода по сравнению с традиционными видами топлив. Природные ресурсы метана превышают все остальные энергетические ресурсы земли, включая нефть, уголь, ядерное топливо, поскольку огромные запасы природного газа хранятся в виде газовых гидратов под водой и в зоне вечной мерзлоты.

Основная доля потребления природного газа приходится на энергетику.

Метан по основным свойствам соответствует, а по некоторым показателям даже превосходит традиционные виды горючего, такие как бензин и дизельное топливо. Основные преимущества применения метана связаны, прежде всего, с высокой теплотворной способностью, гибкостью и эффективностью процессов преобразования энергии с его участием, приемлемостью для тепловых двигателей без существенного изменения конструкции. Метан способен заменить любой вид горючего в различных отраслях промышленности и энергетики, на транспорте. В его состав не входят токсичные вещества, которые добавляются, например, в бензин с целью повысить октановое число.

Неоспоримое достоинство природного газа – экологическая безопасность его использования. Соз-

даются благоприятные возможности для уменьшения образования твердых отходов и вредных автомобильных выбросов, ликвидации парникового эффекта.

К недостаткам метана относятся его низкая плотность и малая объемная теплота сгорания.

Природный газ может легко транспортироваться к объектам его существенного потребления (тепловые электрические станции) по трубопроводной сети под давлением 7,5 МПа. По мере продвижения газа по трубопроводу диаметром до 1,4 м он теряет энергию, преодолевая силы трения как между газом и стенкой трубы, так и между слоями газа. Поэтому через определенные промежутки необходимо сооружать компрессорные станции, на которых газ дожимается до 7,5 МПа.

Сооружение и обслуживание трубопровода – дело весьма дорогостоящее. Газотранспортную систему создают исходя из средней ее производительности, а вблизи крупных потребителей газа размещают централизованные стационарные хранилища. Проблема хранения природного газа в Республике Беларусь связана с неизбежным переходом от жидкого топлива на природный газ (транспорт с использованием двигателей внутреннего сгорания, солярка, бензин и т.д.). Создание газовых заправочных станций необходимо планировать уже сегодня. Не менее важной проблемой является организация доставки природного газа к

рассеянным по большой территории предприятиям, поселкам, отдельным жилым комплексам и т.д. Хранилища местного масштаба, расположенные рядом с автономными мелкими потребителями природного газа, – необходимое звено в решении проблемы газоснабжения (см. таблицу).

В настоящее время доставка природного газа транспортом осуществляется в баллонах после его предварительной подготовки по одному из способов: сжатие до высоких давлений (20–30 МПа) или сжижение при низких температурах (–163 °С). Большая металлоемкость сосудов со сжатым газом, большие энергозатраты по ожижению при криогенных температурах или его сжатию до 30–40 МПа требуют нахождения иных путей хранения и транспортировки.

Анализ научно-технической и патентной информации показал, что одной из наиболее перспективных технологий хранения природного газа является его адсорбция на микропористом твердом сорбенте. В ближайшие десятилетия альтернативой стандартным транспортным баллонам со сжатым газом (20 МПа) будут системы адсорбционного хранения, которые обеспечивают снижение давления до 2–3,5 МПа без значительного уменьшения объема по газу. В случае применения сорбентов отпадает необходимость в громоздких и металлоемких сосудах, в затратах энергии на сжатие или сжижение газа, сокращаются

Таблица 1. Сравнение различных способов хранения природного газа

Параметры	Связанный сорбентами ANG (сорбент)	Сжатый CNC (сжатый газ)	Ожиженный (-161 °С) LNG (жидкий метан)
1 Внутреннее давление, МПа	3,5	200	20
2 Объем баллона, л	110	100	35 внутренний 40-45 внешний
3 Масса баллона, кг	35	Сталь – 115	40
		Сталь/композит – 80	
		Композит – 40	
4 Стоимость, USD	600	Сталь – 350	3000
		Сталь/композит – 700	
		Композит – 1200	
5 Требования к инфраструктуре	Нет требований, газ поступает и перекачивается самопроизвольно из газовой линии	Требуется двух-трех ступенчатая компрессорная станция	Есть необходимость в дорогостоящей системе ожижения газа и теплоизоляции баллона
6 Потребление энергии	Нет	Энергия для сжатия газа	Энергия для ожижения газа
7 Возможность использования баллонов произвольной формы	Да	Баллоны только цилиндрической формы	Цилиндрическая или сферическая форма баллона
8 Надежность	Очень высокая	Баллон высокого давления опасен для человека	Баллон опасен для человека из-за низкой температуры

расходы на компрессорное оборудование и эксплуатационные затраты, упрощается организация сервисного обслуживания.

Давление в цистерне (баллоне) можно регулировать в диапазоне 1–4 МПа в зависимости от области применения. В бытовом баллоне (дом) возможно использование давления 1–2 МПа, в стационарной системе хранения – 3–5 МПа. При этом повышается безопасность эксплуатации стационарных систем хранения и пунктов заправки. Баллоны с адсорбированным природным газом более безопасны, чем традиционные баллоны для хранения газа в сжатом состоянии. В случае автомобильной аварии при транспортировке и повреждении корпуса происходит самозамораживание сорбента в окрестности отверстия и снижение скорости выхода газа в окружающую среду. Адсорбционные системы хранения и транспортировки природного газа являются перспективными для большой энергетики (подземные и наземные хранилища природного газа для децентрализованных потребителей) и газовой микроэнергетики (баллоны, цистерны объемом от нескольких литров до сотен м³).

Потенциальные области их применения:

- цистерны для хранения природного газа в адсорбированном

состоянии для автомобильного, железнодорожного, морского и воздушного транспорта;

- цистерны с адсорбированным природным газом как потенциальным источником промышленного получения чистого водорода в результате каталитической конверсии метана (в автомобиле на топливных элементах водород может размещаться в контейнере в адсорбированном состоянии или непосредственно вырабатываться из запасенного метана);
- цистерны с адсорбированным природным газом как сырьем для получения наноматериалов;
- баллоны для автомобильного транспорта (альтернатива баллонам со сжатым газом и пропан-бутановым баллонам);
- «источник питания» автономных адсорбционных и абсорбционных

тепловых насосов, холодильников и систем кондиционирования, котельных установок, газовых плит, инфракрасных обогревателей;

- наземные и подземные хранилища природного газа.

Такие системы хранения газа будут востребованы в России, Беларуси, странах с жарким и холодным климатом. В Индии, Китае они могут быть использованы для малолитражных двигателей рикшами; в северных труднодоступных районах это реальная альтернатива жидкому топливу (солянке, мазуту). Один из путей постепенного внедрения водорода на автотранспорте – применение двухтопливного двигателя внутреннего сгорания (водород-бензин, водород-метан) и связанной с помощью сорбентов системы хранения газа. В процессе эксплуатации двухтопливного автотранспорта возможен переход от водородного горючего на углеводородное, на их смеси, в зависимости от доступности того или иного вида горючего.

Опытно-конструкторские работы по созданию сорбентов и использованию их для хранения природного газа в адсорбированном (связанном) состоянии ведутся во многих странах (США, Канада, Англия, Португалия, Польша, Франция). В качестве сорбентов для хранения газа предпочтительнее отдается активированным углям. Особенно привлекательно дешевое производство микропористого активированного угля, основанное на термообработке сырья (древесина, древесные опилки, целлюлоза, солома, торф и т. д.) после пропитки.

В Беларуси [1–3] созданы таким способом перспективные микропористые сорбенты: углеродный волокнистый материал «Бусофит» (продукт пиролиза пропитанной целлюлозы) и активированный уголь из отходов древесины. Теоретически полученное максимальное значение плотности



Рис. 1. Адсорбционная газобаллонная система хранения природного газа, установленная на автомобиле ГАЗ-53:

а – общий вид; б – схема адсорбционного баллона; 1 – корпус; 2 – сорбент; 3 – центральная трубка; 4 – вход/выход газа; 5 – многослойный фильтр



Рис. 2. Транспортный газопровод

хранения природного газа (отношение объема газа в нормальных условиях к объему баллона) составляет 195 л/л при давлении 3,5–5 МПа. Реально получено 160 л/л (т.е. отношение объема газа к объему баллона равно 160).

Научный коллектив лаборатории пористых сред ГНУ «Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова» НАН Беларуси занимается разработкой систем связанного хранения метана на основе различного вида сорбентов, включая наноразмерные материалы. Здесь изготовлена и испытана газобаллонная система для автомобиля ГАЗ-53 (рис. 1, а). Она представляет собой двенадцать 24-литровых баллонов с жесткой обвязкой, собранных в три кассеты. Кассеты оборудованы ручными вентилями для независимого отключения от топливной системы автомобиля. Схема сорбционного баллона, заполненного активированным углем 207С, показана на рис. 1, б. Свободный газ заполняет макропоры, в то время как адсорбированный газ удерживается силами молекулярного взаимодействия в основном в микропорах, размер которых соизмерим с адсорбируемыми молекулами. Емкость хранения метана в таком баллоне составляет 150 л/л. Перед выходным патрубком баллона установлен трехслойный фильтр, состоящий из нержавеющей мелкоячеистой сетки, слоя тканого угольного волокна типа «Бусофит» толщиной 2 мм, слоя углеродного войлочного нетканого материала толщиной 8 мм и перфорированного металлического диска. Фильтр предотвращает попадание угольных частиц и пыли в топливную систему автомобиля. В результате объем извлеченного газа из разработанной транспортной системы, содержащей 132,5 кг сорбента, достиг 20 м<sup>3</sup>. Непрерывный пробег автомобиля со средней скоростью 12,5 км/ч на одной заправке газобаллонной

системы до давления 3,5 МПа составил по показаниям спидометра 50 км (остаточное давление 0,13 МПа).

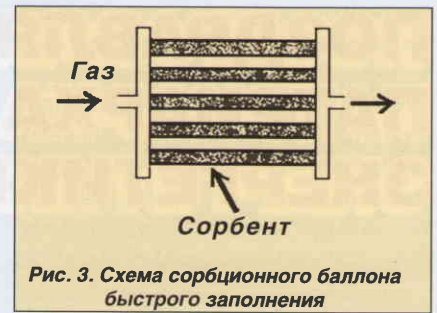
Для Республики Беларусь хранение метана (подземное либо наземное) в связанном сорбентами состоянии при низком давлении представляет интерес с точки зрения обеспечения топливом объектов районного масштаба. Газотранспортная система, рассчитанная на максимальную потребность в газе, на протяжении года будет не загружена; если же исходить из минимальной подачи, то город в отдельные месяцы не будет полностью обеспечен газом.

Такого рода хранилища можно рассматривать как аварийный запас топлива либо как запас топлива для снятия различных пиковых нагрузок. Наиболее удобны для децентрализованных потребителей газы хранилища, созданные на основе кусков магистральных трубопроводов (рис. 2). Приспособление этих емкостей под хранилища сводится к заполнению их специальным материалом – сорбентом, способным поглощать молекулы газа, установке дополнительного оборудования и размещению в тех районах, где нужны резервы газа.

Предлагаемое нами хранилище природного газа (метана) набирается из модулей в виде резервуара длиной до 100 м, диаметром 1,2 м, заполненного сорбентом и газом. Вместимость модуля при давлении 3–4 МПа составляет около 20 тыс. м<sup>3</sup> газа (в 4 раза больше по сравнению со сжатым газом).

Подобное решение проблемы позволит отказаться от компрессорных станций для закачки метана, в которых давление газа повышается от 7,5 МПа (давление в магистральном газопроводе) до 25 МПа. Хранилища газа наземного типа могут заполняться газом от транспортных емкостей при давлении 8 МПа либо от магистральных газовых труб. Для компенсации влияния теплоты сорбции и сокращения времени заправки можно организовать прокачку газа через резервуар, имеющий входной и выходной патрубки. Вынужденная конвекция обеспечит интенсификацию теплообмена внутри баллона, в котором чередуются слои сорбента и газовые каналы. Схема такого резервуара показана на рис. 3.

Согласно оценкам, потребности в подобных хранилищах газа, например в США, измеряемые млрд. м<sup>3</sup>, достигают для бытового сектора 12,2 млрд. м<sup>3</sup>



(при объеме резервуара 40 м<sup>3</sup>, для торгового сектора – 3,5 млрд. м<sup>3</sup> (при объеме резервуара 80 м<sup>3</sup>), для промышленного сектора – 4,26 млрд. м<sup>3</sup> (при объеме резервуара 160 м<sup>3</sup>). Это означает, что число резервуаров для хранилища газа в бытовом секторе США составляет 5,46 млн. контейнеров, в торговом секторе – 0,78 млн. и в промышленном секторе – 0,21 млн. контейнеров. Ежегодное пополнение подобными контейнерами рынка США составит 10 % от общего числа контейнеров. Следует отметить, что энергетический рынок США равен 25 % энергетического рынка всего мира.

Целесообразность использования сорбционной технологии хранения природного газа в Республике Беларусь и России обусловлена следующими факторами:

- наличием развитой сети магистральных газопроводов, газораспределительных станций и пунктов;
- существованием транспортных средств (коммунальных, специальных), пробег которых не превышает 100 км/сут., а следовательно, не требует большого объема и частоты заправки газом;
- наличием децентрализованных потребителей энергии (торговые точки, отдаленные усадьбы и предприятия; труднодоступные, северные районы России);
- потребностью в создании подземных и наземных газовых хранилищ для обеспечения топливом объектов районного масштаба.

**Список литературы**

1. Васильев, Л.Л. Хранение и транспортировка водорода в связанном состоянии / Л.Л. Васильев, Л.Е. Канончик. – Минск, 2006. – 36 с. (Препринт / ИТМО НАН Беларуси, № 2).
2. Васильев, Л.Л. Активированный микропористый углерод как сорбент водорода / Л.Л. Васильев, Л.Е. Канончик, А.Г. Кулаков // Углеродные наноструктуры. – Минск: ИТМО НАН Беларуси, 2006. – С. 201–212.
3. Vasiliev, L.L. Activated carbon fiber composites for ammonia, methane and hydrogen adsorption / L.L. Vasiliev [et al]// J. Low Carbon Technologies. Manchester University Press. – 2006. – No 2/1. – P. 95–111.