

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ В ОБЛАСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА В КАЧЕСТВЕ МОТОРНОГО ТОПЛИВА

УДК 629.331:662.76

С.В. Люгай, к.т.н., ООО «Газпром ВНИИГАЗ» (Москва, РФ), S_Lyugai@vniigaz.gazprom.ru

Обеспечение транспорта сжиженным природным газом с использованием мало- и среднетоннажных станций сжижения является одним из наиболее перспективных направлений. В работе представлены преимущества технологии мало- и среднетоннажного производства сжиженного природного газа перед крупнотоннажным, с последующей доставкой готовой продукции потребителю. Приведены результаты ретроспективного анализа динамики развития малотоннажного производства в мире. Определены показатели и перспективы спроса на сжиженный природный газ в России. Отмечено, что малотоннажный рынок в России сегодня находится на начальной стадии и сдерживается неразвитостью производственно-потребительской инфраструктуры. Рассмотрены наиболее эффективные способы производства, такие как частичное сжижение на газораспределительных станциях. Показаны преимущества и недостатки различных технологий производства. В заключение даны рекомендации и сформулированы направления научно-технических, опытно-конструкторских и технологических работ, целью которых является обеспечение эффективного производства и использования сжиженного природного газа.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: СЖИЖЕННЫЙ ПРИРОДНЫЙ ГАЗ, ТРАНСПОРТНЫЕ СРЕДСТВА, ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫЕ СТАНЦИИ, ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА СПГ, СЕЗОННАЯ НЕРАВНОМЕРНОСТЬ.

Для обеспечения транспорта сжиженным природным газом строятся мало- и среднетоннажные станции сжижения. Технологии мало- и среднетоннажного производства сжиженного природного газа (СПГ) имеют ряд определенных преимуществ перед крупнотоннажным производством, главные из которых – следующие предоставляющиеся возможности:

- регулируемого, эволюционно-го развития и наращивания производственных мощностей;
- размещения производственных мощностей в непосредственной близости от потенциального потребителя;
- расположения объектов заправки транспорта на площадках, непосредственно прилегающих к дорожному полотну;
- быстрого возведения объектов;
- передислокации объекта заправки при снижении спроса на газовое моторное топливо;

– отсутствие необходимости подключения криогенной заправочной станции к газопроводу-отводу.

Все ведущие компании, заинтересованные в создании инфраструктуры СПГ, едины во мнении: основу этой структуры в странах с развитой сетью газопроводов должны составлять специализированные малые установки сжижения сетевого газа из газопроводов.

ДИНАМИКА РАЗВИТИЯ МАЛОТОННАЖНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Мировыми лидерами использования СПГ на транспорте являются Китай, США, Испания и Великобритания.

В Китае доля заправочных станций на СПГ выросла с 1 % в 2008 г. до 34 % в 2013 г. Также увеличивается количество транспортных средств на СПГ. К 2015 г. в Китае планировалось заместить до 10 % используемого дизельного топли-

ва на СПГ. В настоящее время уже каждый десятый автобус в Китае работает на СПГ, а 60 % новых автобусов для муниципалитетов выпускаются в газовой (СПГ) модификации.

Немаловажную роль здесь играет фактор экономии средств потребителями. Цена на компримированный природный газ (КПГ) в КНР в 2013 г. составляла 60 % от розничной цены на дизельное топливо, а СПГ – 75 %. На Западе Китая в газодобывающих районах цена природного газа на автомобильных газонаполнительных компрессорных станциях может быть в четыре раза ниже цены дизельного топлива. Китайская Национальная комиссия развития и реформ (NDRC, государственный орган макроэкономического регулирования и планирования) продолжает поддерживать стоимость СПГ ниже стоимости энергетического эквивалента дизельного топлива с разницей в 20 % даже в условиях снижения

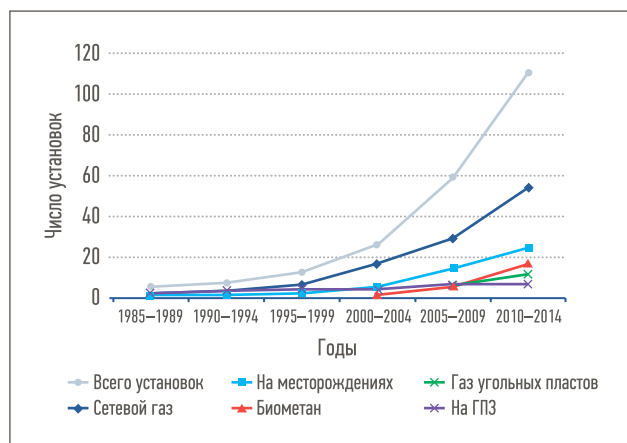


Рис. 1. Число малотоннажных установок в мире по периодам их ввода в эксплуатацию и в зависимости от источника природного газа

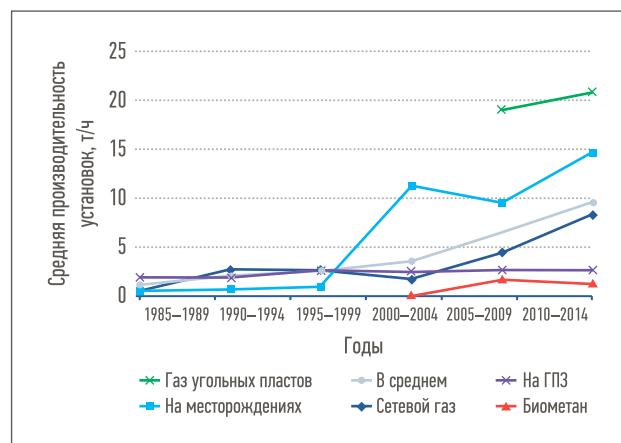


Рис. 2. Средняя производительность действующих малотоннажных установок сжижения в зависимости от источника природного газа

стоимости нефти и сокращения разницы в цене между СПГ и дизельным топливом. В этих условиях NDRC взяла на себя контроль технико-экономических обоснований на строительство новых объектов производственной инфраструктуры малотоннажного СПГ, и в период 2014–2015 гг. было отмечено снижение количества новых проектов. По сравнению с 2013 г. число санкционированных объектов сократилось на две трети. Данная ситуация способствовала тому, что госкомпании интенсифицировали разработку собственных образцов основного оборудования и технологий сжижения, не требующих покупки лицензий. И если несколько лет назад основными поставщиками оборудования и технологий для процессов сжижения более 30 т/ч были иностранные компании, то теперь такие китайские компании, как CPE-Southwest, HQCEC, Chengdu Cryogenic, Sichuan Air Separation, Lvneng and Harbin Cryogenic, уже занимают до 50 % этого бизнес-сегмента, а поставки установок производства СПГ менее 30 т/ч практически полностью обеспечивают китайские производители.

Мировая статистика показывает, что малотоннажные установки по производству СПГ сосредоточены в Китае (66 % от всего производства), США (14,3 %), Норвегии

(5,2 %), России (3,7 %) и ряде других стран. Динамика роста строительства станций приведена на рис. 1. Видно, что значительный рост числа станций сжижения наблюдается с 2000 г. Это связано с началом газификации Китая малотоннажным СПГ и появлением первых установок сжижения биометана в Австралии, Польше и Китае. Большинство установок сжижения размещается на магистральных газопроводах – до 50 % (рис. 2). Средняя производительность таких установок составляет около 8 т/ч.

ПОТЕНЦИАЛЬНЫЙ СПРОС НА СПГ

Малотоннажный рынок СПГ в России сегодня находится на начальной стадии и сдерживается неразвитостью производственно-потребительской инфраструктуры. Используемые в большинстве стран методы прогнозирования спроса на основе сложившихся трендов (с корректировкой при помощи статистических функций эластичности объемов потребления энергоресурсов) не могут быть применимы в данном случае из-за отсутствия представительных рядов отчетной информации. Поэтому примененные методы прогнозирования спроса на малотоннажный СПГ в РФ носят стратегический характер и радикально отличаются от технологий проектирования, ко-

торые, в свою очередь, детально обосновывают конкретные решения.

При определении спроса возможные сценарии развития рынка малотоннажного СПГ должны учитывать стратегические целевые показатели, принятые Группой «Газпром», государственными органами и потребителями СПГ (производители техники на газе).

По использованию СПГ в качестве газового моторного топлива (ГМТ) необходимо выделить основные категории потребителей – целевые сегменты рынка: магистральный транспорт (грузовые автотранспортные средства), тяжелая карьерная техника, железнодорожный транспорт, сельскохозяйственная техника, водный транспорт.

По каждому целевому сегменту проведены исследования, которые включают:

- анализ текущего состояния сегмента;
- анализ текущего состояния технологий использования СПГ техникой в сегменте;
- выделение локальных/линейных рынков по сегменту и определение якорных потребителей;
- определение позиции топлива СПГ с точки зрения межтопливной конкуренции, сравнение с товарами-заменителями;
- разработку направлений развития сегмента и формирование

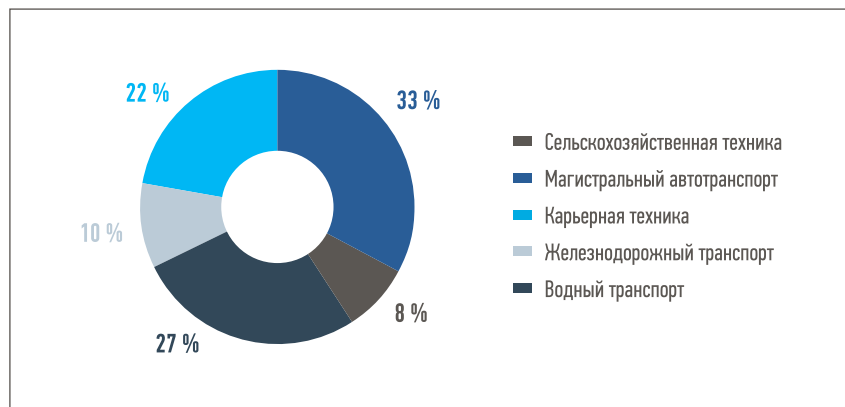


Рис. 3. Структура потенциального спроса на СПГ на транспорте по целевым сегментам рынка

спроса на СПГ в нем, исходя из локализации рынков и анализа межтопливной конкуренции;

- определение допустимых границ цен на СПГ, при которых обеспечивается наличие спроса.

Оценка проводилась по всем регионам РФ, на локальных и линейных рынках, по целевым сегментам и видам ГМТ. Были проанализированы существующие маршруты, объемы потребления моторного топлива, количество и перспективы модернизации магистрального грузового транспорта, карьерной техники, потенциальные потребности бункеровки СПГ-газовозов в портах РФ, перспективы развития СПГ как топлива на железнодорожном транспорте и в сельском хозяйстве. Для обеспечения системного подхода при формировании рынка СПГ применяется кластеризация спроса – выделение географических территорий (кластеров), объединяющих точки наибольшего спроса по различным сегментам транспорта, обеспеченного единой производственной и транспортной инфраструктурой.

В результате анализа потенциальных потребителей на территории РФ по категориям транспорта были сформированы 13 кластеров, шесть из которых являются наиболее приоритетными для развития спроса на СПГ. Ранжирование кластеров проведено на основе следующих критериев: объем

кластера, привлекательность основных сегментов кластера, наличие доступа к Единой системе газоснабжения.

В РФ потенциал потребления малотоннажного СПГ на транспорте к 2030 г. оценивается на уровне 5,2 млн т.

На рис. 3 представлена структура потенциального спроса на СПГ на транспорте по целевым сегментам рынка.

Для покрытия потенциального спроса на СПГ, используемого в качестве моторного топлива и топлива для автономной газификации, необходимо определить эффективные источники его производства и рациональные места их расположения.

Наиболее эффективный способ производства СПГ – сжижение природного газа на газораспределительных станциях (ГРС) по циклу среднего давления с использованием турбодетандера (технология 1). Именно эту технологию целесообразно принять в качестве основной при организации производственной инфраструктуры.

При этом необходимо учитывать, что газораспределительные станции различаются по величине давления в магистральном и распределительном газопроводах, по расходам и давлению газа в летние и зимние периоды, по составу газа в газопроводах. Поэтому первой задачей при организации

производственной инфраструктуры малотоннажного СПГ является разработка критериев для отбора ГРС. В процессе формирования перечня ГРС по технико-экономическим показателям для размещения установок среднего давления были приняты следующие критерии отбора:

- давление природного газа на входе в установку (с учетом дожимного компрессора) – не менее 2,5 МПа;

- коэффициент ожигения установки – не менее 10 %;

- минимальная производительность установки по сжижению – не менее 1 т/ч.

Исходя из этих критериев, на 4000 ГРС ЕСГ по технологии 1 может быть произведено 1,8 млн т СПГ в год, т. е. только 35 % от предполагаемой потребности (около 60 установок). Поэтому необходимо использовать и другие технологии, в том числе циклы частичного сжижения СПГ на ГРС с внешним охлаждением, удельные энергозатраты которых не превышают 0,2...0,3 кВт·ч/кг, что соответствует лучшим термодинамическим показателям (технология 2).

Там, где ближайшая ГРС находится на значительном расстоянии от объекта потребления, что затрудняет доставку СПГ, его производство может быть организовано по циклам с внешним охлаждением и полным сжижением газа (технология 3). При этом следует использовать наиболее эффективные циклы, в том числе и с многокомпонентным рабочим телом.

Предварительные оценки показывают, что производство и сбыт 5,2 млн т СПГ в год в качестве газомоторного топлива на территории РФ могут быть обеспечены примерно на 100 ГРС, в том числе: производство СПГ на ГРС по детандерной технологии (35 % от общего объема спроса, энергозатраты на сжижение отсутствуют); по технологии частичного сжижения на ГРС с дополнительными энергозатратами (36 % от общего объ-

ема спроса, около 30 установок); по технологии полного сжижения на магистральных газопроводах (29 % от общего объема спроса, с повышенными дополнительными энергозатратами, около 10 установок).

При разработке производственной инфраструктуры должно быть предусмотрено применение мобильных комплексов, заменяющих низкопроизводительные установки (производительность менее 1 т/ч), расположенные на ГРС или газопроводах-отводах. Размещать установки производительностью менее 1 т/ч на ГРС и газопроводах-отводах нецелесообразно и технически нереализуемо в связи с малыми расходами газа через блок ожижения. Наличие таких объектов говорит, что в данной зоне потребления начальный уровень спроса не требует крупных комплексов производства СПГ, и функции производства могут принять на себя мобильные комплексы СПГ. Со временем, по мере роста потребления, в данной зоне может появиться крупный комплекс производства сжиженного природного газа, работающий по энергоэффективным циклам, а мобильные комплексы могут быть перемещены в другую зону потребления. Они должны быть спроектированы на базе дешевых комплексов частичного ожижения со стандартным компрессорным и холодильным оборудованием.

В условиях низкого спроса важным фактором является способность к быстрому пуску и остановке оборудования комплекса сжижения в зависимости от изменения потребления в районе распределения продукции. При этом необходимо учитывать, что в процессе сжижения происходит изменение состава газа, что меняет его термодинамические свойства и потребительские качества. Кроме того, при разработке технологий малотоннажного производства СПГ необходимо учитывать, что состав газа в магистральных газопроводах меняется

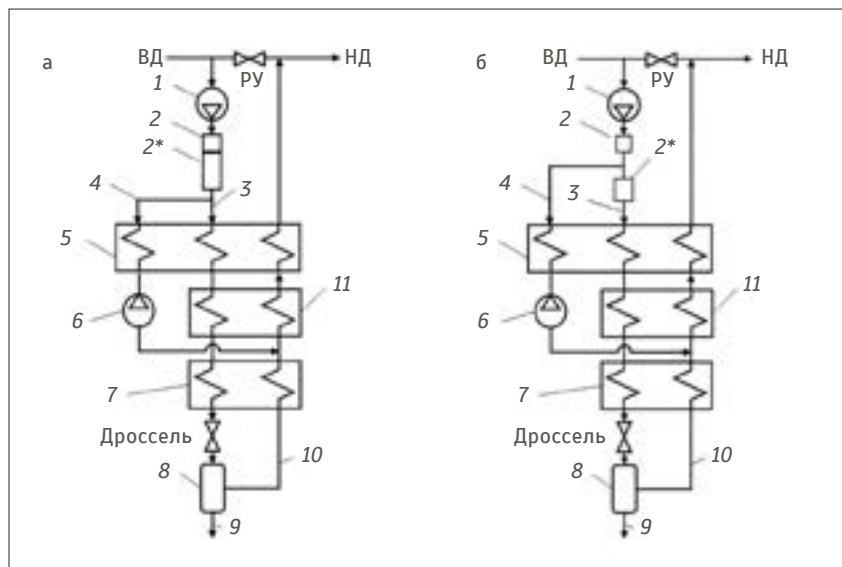


Рис. 4. Схема цикла производства СПГ на ГРС по однопоточной (а) и двухпоточной (б) схемам: ВД – газопровод высокого давления; НД – газопровод низкого давления; РУ – редуцирующее устройство на газораспределительной станции; 1 – компрессор; 2 – блоки осушки; 2* – блок очистки; 3 – производственный поток; 4 – детандерный поток; 5 – предварительный теплообменник; 6 – детандер; 7 – концевой теплообменник; 8 – сборник-сепаратор; 9 – СПГ; 10 – обратный поток; 11 – промежуточный (детандерный) теплообменник

в широком диапазоне, а давление и расход подвержены сезонным изменениям.

Между тем одним из основных факторов роста потребления природного газа в качестве моторного топлива является надежное, бесперебойное и экономически выгодное обеспечение потребителей. В настоящее время сформированы требования потребителей к расширению использования газомоторного топлива, в частности СПГ:

- стоимость СПГ – 50 % от стоимости дизельного топлива;
- обеспечение пожарной безопасности объектов производства и использования, приемлемого времени заправки и качества СПГ.

Для обеспечения этих требований основными задачами являются проведение ряда научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ, направленных на разработку и совершенствование технологий получения газовых моторных топлив с улучшенными экологическими характеристиками, снижение капитальных

и эксплуатационных затрат, повышение пожарной безопасности объектов производства и использования СПГ и снижение его себестоимости. Наличие крупной газотранспортной системы с развитой сетью ГРС в нашей стране позволяет реализовать существенное экономическое преимущество производства СПГ за счет установок среднего давления, размещенных на ГРС.

На ГРС происходит редуцирование газа из магистрального газопровода (давление 2,0–5,0 МПа) в распределительный (0,5–1,2 МПа). Этот перепад давлений можно использовать для сжижения газа, если расширять его в детандере.

Эффективность производства СПГ на ГРС обусловлена следующими факторами:

- сжижение газа осуществляется одновременно с его редуцированием из магистрального газопровода в распределительный;
- отсутствуют затраты энергии на сжижение газа;
- сжиженный газ производится при давлении (и равновесной температуре) около 0,5 МПа;

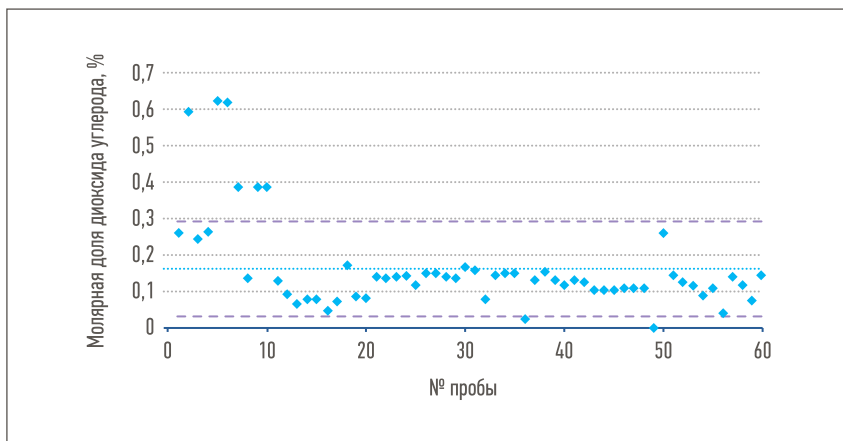


Рис. 5. Содержание диоксида углерода в природном газе магистральных газопроводов РФ за 2015 г. Каждой точке соответствует номер пункта отбора проб

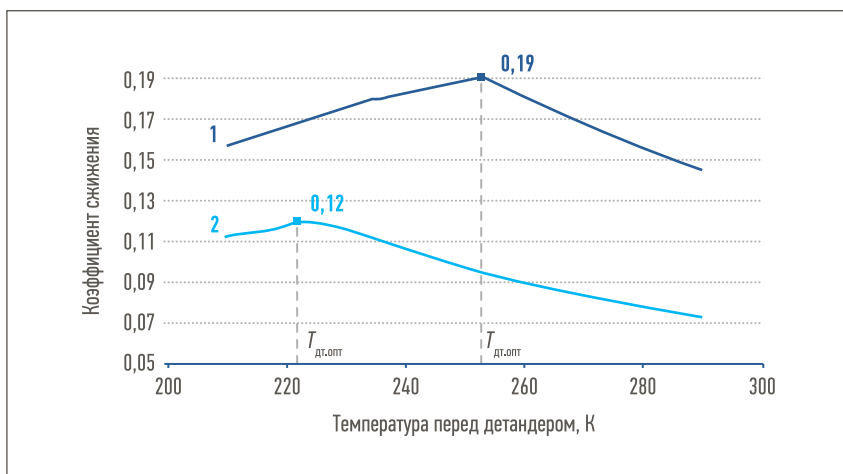


Рис. 6. Зависимость коэффициента сжижения установки среднего давления с турбодетандером (адиабатный КПД 75 %) от температуры перед детандером и располагаемого перепада давления: 1 – диапазон расширения 4,5–0,2 МПа; 2 – диапазон расширения 3,5–0,6 МПа

– несжиженную часть газа, а также газ регенерации из системы газоподготовки можно сбрасывать в распределительный газопровод.

Схемы производства СПГ на ГРС представлены на рис. 4 и отличаются от классической схемы (цикл Клода) тем, что газ в установку поступает из газопровода высокого давления, а обратный поток возвращается в газопровод низкого давления, т. е. цикл сжижения газа является открытым.

Одной из проблем при малотоннажном производстве СПГ на ГРС является необходимость установки системы очистки газа от высококипящих компонентов. Необходимость этой очистки об-

условлена, с одной стороны, требованиями к составу сжиженного газа как продукта установки, а с другой – опасностью забивки технологического оборудования в процессе сжижения из-за кристаллизации диоксида углерода. Задача усложняется тем, что содержание диоксида углерода в сетевом газе может меняться в широких пределах (рис. 5).

Как видно из рис. 6, в зависимости от перепада давлений и оптимальной температуры газа перед детандером в цикле с детандером может сжижаться 13–19 % газа, прошедшего через установку. Это значит, что осушке и очистке должен подвергаться расход газа, превышающий в 5–8 раз количество

сжиженного газа. Если стоимость осушки относительно невелика, то стоимость системы очистки газа от диоксида углерода достигает 35 % от стоимости установки.

В настоящее время применяются два подхода к содержанию диоксида в сжиженном природном газе:

- полная очистка всего потока газа адсорбционным методом на входе в установку (см. рис. 4а);
- отсутствие очистки газа в установке, что предполагает производство СПГ низкого качества (с высоким содержанием диоксида углерода и других высококипящих компонентов).

В первом случае обеспечивается концентрация диоксида углерода в СПГ на уровне 50 ppm, но существенно возрастает стоимость технологического оборудования (стоимость блока адсорбционной очистки газа от CO₂ может составлять 40–60 % от стоимости всей установки) и усложняется эксплуатация установки из-за необходимости регенерировать адсорбент при температуре 300 °С. Во втором случае ограничивается область применения СПГ низкого качества из-за вероятности кристаллизации диоксида углерода у потребителя в процессе эксплуатации.

Возможный путь снижения стоимости системы очистки – переход к двухпоточной схеме (патент ООО «Газпром ВНИИГАЗ»). Применение двухпоточной схемы (рис. 4б) основано на том, что в газе при повышении давления возрастает растворимость диоксида углерода. Если давление за детандером соответствует давлению в распределительной сети и равно 0,5–0,6 МПа, то значение растворимости близко к содержанию диоксида в исходном газе, и можно отказаться от очистки технологического потока от CO₂.

Широкий диапазон изменений параметров ГРС предполагает или создание установок с учетом индивидуальных условий и возможностью поддержания по-

стоянной производительности при сезонных колебаниях давления и расхода газа через ГРС, или создание унифицированных установок, работающих при постоянных условиях, которые обеспечиваются технологическими решениями.

Принципиальным является вопрос выбора давления, при котором производится СПГ на газопроводах. При крупнотоннажном производстве сжиженный природный газ производится при давлении, близком к атмосферному. При малотоннажном производстве сжиженный природный газ целесообразно производить при давлении 0,5–0,6 МПа и равновесной температуре 135–140 К, что соответствует давлению в большей части распределительных систем. При этом давлении на 15 % снижаются энергозатраты на производство СПГ, на порядок повышается растворимость диоксида углерода в жидкости, что снижает вероятность кристаллизации CO_2 при проведении технологических операций. Кроме того, в настоящее время за рубежом, согласно технологии, криогенные бортовые топливные системы автотранспортных средств заправляются СПГ при температуре 135 К (0,6 МПа), т. е. малотоннажный СПГ под давлением можно непосредственно использовать в качестве газомоторного топлива.

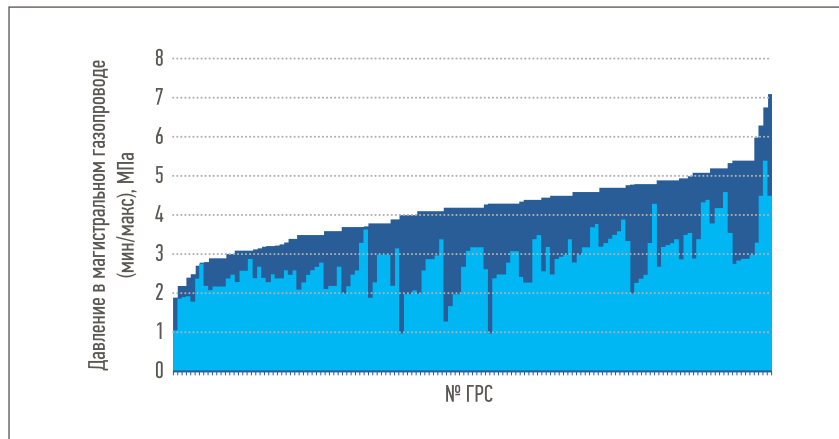


Рис. 7. Минимальное и максимальное значения давления в магистральном газопроводе в течение года (лето/зима) – каждому столбцу соответствует отдельная точка измерения на протяженности всей ГТС Российской Федерации

Для хранения и транспортировки СПГ можно использовать обычное криогенное емкостное оборудование с вакуумно-пористой или вакуумно-многослойной изоляцией объемом до 250 м³ и рабочим давлением до 0,8 МПа. В процессе эксплуатации и при проведении сливо-наливных операций давление и температура СПГ могут меняться, т. е. технология использования СПГ является неизотермической, в отличие от технологии использования крупнотоннажного СПГ.

К недостаткам производства и использования СПГ при повышенном давлении (и температуре) следует отнести увеличение стоимости криогенного емкостного

оборудования, снижение плотности жидкости, что уменьшает массу транспортируемого СПГ, сокращение длительности бездренажного хранения, увеличение количества пара при проливе жидкости из-за эффекта вскипания.

Одной из проблем при производстве СПГ на ГРС по циклу с детандером является необходимость обеспечения постоянной производительности при сезонном изменении давления газа в магистральном и распределительном газопроводах и при дефиците расхода газа через ГРС.

Давления в магистральном газопроводе для разных ГРС различаются между собой и могут меняться в течение сезона из-

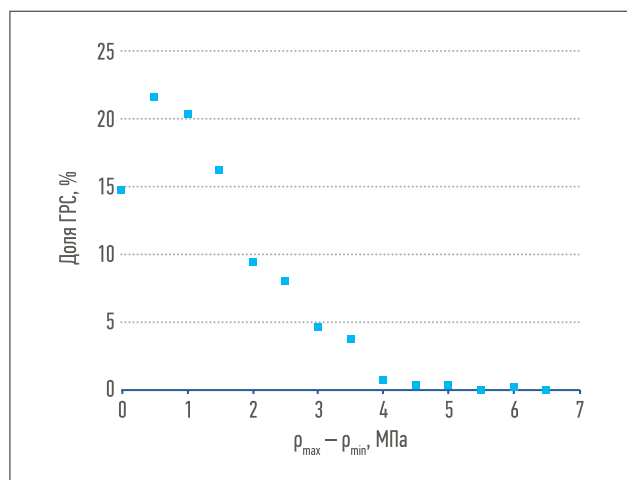


Рис. 8. Распределение ГРС по существующим значениям сезонного перепада давления на них (разница между максимальным и минимальным давлениями)

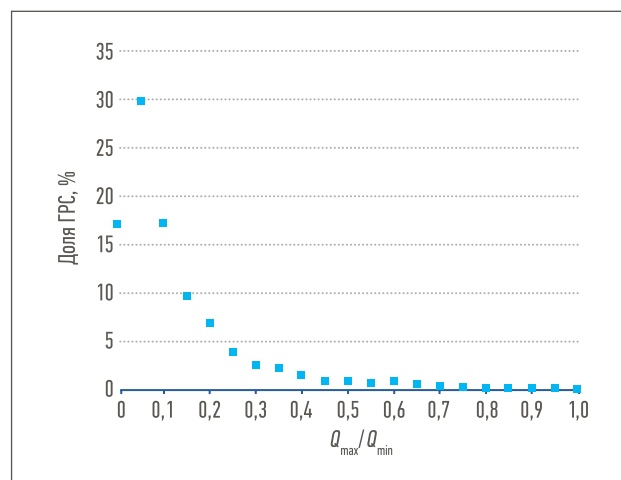


Рис. 9. Распределение ГРС по существующим значениям сезонного изменения расхода на них (отношение минимального к максимальному расходу)

за изменения потребления газа (рис. 8). Различаются ГРС и по расходу газа, который также меняется в течение года.

Наиболее просто решается вопрос обеспечения постоянной производительности при сезонном изменении давления. Снижение зависимости установки среднего давления (рис. 9) от сезонной неравномерности изменения давления в магистральном газопроводе на ГРС достигается за счет того, что установка сжижения работает при постоянном давлении и расходе газа на входе в установку, а переменное давление газа в газопроводе компенсируется за счет применения дожимающего компрессора, расположенного на линии основного потока. В самом простом случае установка рассчитывается на наиболее неблагоприятные характеристики (минимальное давление), а при повышении давления оно сбрасывается до минимального значения. Также может рассматриваться вариант ступенчатого снижения величины давления за счет применения многоступенчатого дожимающего компрессора.

Снижение производительности установки из-за уменьшения давления в магистральной сети можно также компенсировать увеличением расхода газа через установку. Такое неэффективное регулирование производительности установки возможно только при избыточном расходе газа через ГРС.

Более сложной является задача обеспечения постоянной производительности установки сжижения газа на ГРС при сезонном снижении давления и расхода газа в магистральном газопроводе, когда из-за малого значения коэффициента сжижения необходимо существенно увеличивать расход газа через установку. Если расхода газа через ГРС недостаточно, то номинальную производительность установки сжижения можно обеспечить несколькими способами:

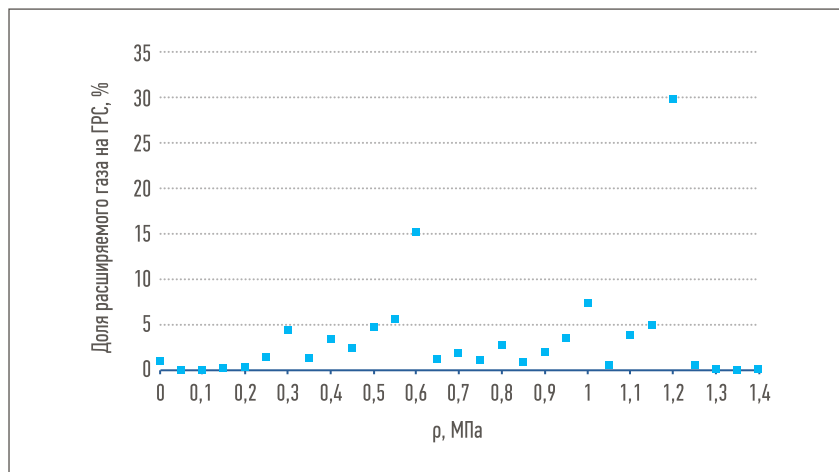


Рис. 10. Количество газа, проходящего через ГРС в зависимости от давления распределительной сети на ГРС

- повысить давление перед установкой дожимающим компрессором с дополнительными затратами энергии;

- использовать схему двух давлений – такая схема позволит повысить оптимальную температуру перед детандером, что приведет к потенциальному повышению коэффициента сжижения за счет вывода детандера из области влажного пара;

- перейти к производству СПГ по циклу с внешним охлаждением;

- использовать полуоткрытые (с рециркуляцией) циклы с внутренним и внешним охлаждением.

Если затраты энергии на сжижение газа по циклу с детандером при дефиците расхода газа на ГРС превышают величину работы при расширении газа в детандере, т. е. часть энергии на сжижение необходимо подводить извне, то следует рассмотреть возможность наиболее эффективного использования этой энергии, в частности за счет применения внешних циклов сжижения. Отличие этих циклов от циклов сжижения газа на отводах магистральных газопроводов заключается в том, что имеется возможность вернуть несжиженную часть газа в газопровод распределительной сети, т. е. применить циклы с частичным сжижением и внешним охлаждением.

ДАВЛЕНИЕ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОМ ГАЗОПРОВОДЕ

Производство СПГ на ГРС осложняется тем обстоятельством, что давление газа в распределительном газопроводе, как правило, выше 0,5 МПа, особенно на ГРС с повышенными расходами (рис. 10). Рис. 10 демонстрирует, какая доля всего расширяемого газа на 4000 ГРС приходится на конкретное значение давления в распределительной сети. Например, в распределительные сети с давлением 0,5 МПа пропускается 5 % (коммунально-бытовое потребление) всего расширяемого газа, тогда как в сети с давлением 1,2 МПа пропускается 30 % всего газа (крупные ГРС вблизи теплоэлектростанций).

Получение СПГ под повышенным давлением (более 0,8 МПа) затрудняет его хранение и реализацию, поэтому целесообразно осуществлять сброс давления СПГ до приемлемых значений 0,2–0,5 МПа.

ТРЕБОВАНИЯ К СОСТАВУ СПГ

Помимо затрат на сжижение газа существенное влияние на экономическую эффективность производства СПГ оказывают эксплуатационные затраты на очистку газа от загрязняющих компонентов. Основными за-

грязнителями СПГ являются вода, диоксид углерода, сернистые соединения, тяжелые углеводороды и азот. Для получения продукта необходимого качества применяются технологии предварительной подготовки газа перед сжижением и низкотемпературные методы очистки, осуществляемые в процессе сжижения газа. Низкотемпературная очистка в установках производства СПГ может осуществляться по нескольким технологическим схемам, выбор которых зависит от состава исходного газа, требований к продукту, технологии производства СПГ. На основе методов низкотемпературной очистки возможно создание различных технологий производства СПГ марок А, Б [1] на базе наиболее распространенных циклов сжижения, а также создание автономных блоков очистки и доочистки СПГ на комплексах производства и использования СПГ.

В настоящий момент на малотоннажных и среднетоннажных установках производства СПГ распространены нагревные адсорбционные и абсорбционные процессы предварительной осушки и очистки газа от диоксида углерода и серосодержащих компонентов. Применение этих процессов сопряжено со значительными эксплуатационными затратами, связанными с регенерацией сорбентов, причем доля затрат может составлять до 60 % и более от общих эксплуатационных затрат на производство СПГ.

Для осушки газа до содержания в нем воды не более 2 ppm наилучшим методом остается нагревная адсорбция на цеолитах. Мембранные, короткоцикловые адсорбционные безнагревные и абсорбционные методы обладают рядом преимуществ, однако существующие недостатки этих методов не позволяют рекомендовать их к использованию на станциях производства СПГ. При этом необходимо принимать меры для снижения эксплуатационных

затрат в адсорбционных нагревных блоках осушки.

Повышенное содержание CO_2 в СПГ приводит к забивке адиабатных участков коммуникаций и теплообменников при производстве, заправке и регазификации СПГ.

В настоящее время на территории Российской Федерации состав и свойства СПГ в зависимости от области его применения регламентируются ТУ 51 03-03-85 (с изм. 1, 2, 3) [1], утвержденными Мингазпромом. Свойства природного газа, газифицированного из СПГ, должны отвечать требованиям ГОСТ 5542-87 [2], кроме требований к интенсивности запаха. Требования к регазифицированному из СПГ компримированному газу, применяемому в качестве топлива для двигателей внутреннего сгорания транспортных средств (автомобили, железнодорожный транспорт, речные суда и сельскохозяйственная техника), регламентирует ГОСТ 27577-2000 «Газ природный топливный компримированный для двигателей внутреннего сгорания» (имеет межгосударственный статус) [3]. Наряду с этими документами с 01.01.2016 введен в действие ГОСТ Р 56021-2014 «Газ горючий природный сжиженный. Топливо для двигателей внутреннего сгорания и энергетических установок. Технические условия» [4], утвержденный Приказом Росстандарта от 15.05.2014 № 432-ст, определяющий требования к составу СПГ, используемому в качестве газомоторного топлива. Технические условия [4] распространяются на газ горючий природный сжиженный (СПГ), используемый в качестве моторного топлива для двигателей внутреннего сгорания, а также для энергетических установок промышленного и коммунально-бытового назначения, и устанавливают показатели качества поставляемого потребителям СПГ следующих марок:

- А – газ горючий природный сжиженный высокой чистоты, обладающий постоянной тепло-

той сгорания, используемый в качестве топлива для двигателей внутреннего сгорания и энергетических установок с узкими пределами регулирования;

- Б – газ горючий природный сжиженный, используемый в качестве топлива для двигателей внутреннего сгорания;
- В – газ горючий природный сжиженный, используемый в качестве топлива для энергетических установок.

При поставках СПГ с массовой концентрацией серосодержащих компонентов (общая сера) не более $0,010 \text{ г/м}^3$ к обозначению марки СПГ добавляют индекс «0».

В соответствии с [4] по физико-химическим показателям СПГ должен соответствовать требованиям и нормам, приведенным в табл. 1.

Как видно из табл. 1, состав СПГ нормируется по содержанию метана, диоксида углерода, высококипящих компонентов и азота.

Ограничения по составу СПГ обусловлены следующими причинами. Наличие тяжелых углеводородов в составе газа способствует возникновению детонационного горения топлива в двигателе, и чтобы избежать этого явления, необходимо уменьшать степень сжатия в двигателе и, соответственно, снижать его мощность. При высоком содержании диоксида углерода возможна его кристаллизация в жидкости с последующей забивкой технологического оборудования. К таким же результатам приведет и присутствие в СПГ метанола, неопентана, гексанов и компрессорного масла, которые замерзают при относительно высоких температурах (176 К и выше), но содержание которых в газе не контролируется. Основные свойства кристаллизующихся компонентов приведены в табл. 2.

Таким образом, современные системы осушки газа при производстве малотоннажного СПГ в целом обеспечивают удовлетворительные показатели продукта,

Таблица 1. Требования к СПГ по ГОСТ Р 56021 [4]

Наименование показателя	Значение для марки			Метод анализа или измерения*
	А	Б	В	
Компонентный состав, молярная доля, %	Определение обязательно			По ГОСТ 31371.1 – ГОСТ 31371.7
Область значений числа Воббе (высшего) при стандартных условиях, МДж/м ³	От 47,2 до 49,2	Не нормируется	От 41,2 до 54,5	По ГОСТ 31369
Теплота сгорания низшая при стандартных условиях, МДж/м ³	Не нормируется	От 31,8 до 36,8	Не менее 31,8	По ГОСТ 31369
Молярная доля метана, %, не менее	99,0	80,0	75,0	По ГОСТ 31371.1 – ГОСТ 31371.7
Молярная доля азота, %, не более	Не нормируется	5,0	5,0	
Молярная доля диоксида углерода, %, не более	0,005	0,015	0,030	
Молярная доля кислорода, %, не более	0,020			
Массовая концентрация сероводорода, г/м ³ , не более	0,020			По ГОСТ Р 53367 – ГОСТ 22387.2
Массовая концентрация меркаптановой серы, г/м ³ , не более	0,036			По ГОСТ Р 53367 – ГОСТ 22387.2
Расчетное октановое число (по моторному методу), не менее	Не нормируется	105	Не нормируется	По ГОСТ 27577

Таблица 2. Свойства кристаллизующихся компонентов [5–9]

Компонент	Температура тройной точки, К	Давление тройной точки, Па	Плотность кристалла, кмоль/м ³	Растворимость в жидком метане при температуре 154 К, моль. % (ppm)
CO ₂	216,58	517 950	34,375	0,967 (9670)
нео-C ₅ H ₁₂	256,76	35 7931	8,1	<0,02 (<200) [расчет]
C ₆ H ₆	278,5	4785	11,48	<0,0113 (<113)
C ₆ H ₁₂	279,69	5362,51	10,172	0,3 (3000)

но желательно снизить капитальные и эксплуатационные затраты при их применении. Что касается систем очистки, то существующие адсорбционные технологии позволяют снизить содержание диоксида углерода в газе до 50 ppm и ниже, но не решают вопроса очистки газа от углеводородов C₂₊, а также от паров метанола и компрессорного масла, которые могут кристаллизоваться в процессе сжижения и использования СПГ. То есть отработанная технология производства СПГ марки А в настоящее время отсутствует.

Следует отметить, что, применяя низкотемпературные методы разделения, можно получить СПГ марки А с содержанием метана 99 % и диоксида углерода 50 ppm. При этом практически полностью удаляются пары компрессорно-

го масла и метанола, а содержание тяжелых углеводородов не превысит 1 %. Как показывают оценки, стоимость блоков низкотемпературной очистки близка к стоимости адсорбционной системы очистки, но в несколько раз меньше последней по габаритам.

Особенностью объектов производства СПГ является их повышенная пожароопасность, обусловленная возможностью пролива жидкости с образованием большого количества холодного пара, последующей загазованностью территории и воспламенением с высокой интенсивностью теплового излучения при горении метана. Поэтому на объектах в соответствии с Федеральным законом от 22.07.2008 № 123-ФЗ (ред. 23.06.2014) «Технический регламент о требованиях пожарной

безопасности» [10] принимаются повышенные меры по пожарной безопасности, к которым относятся увеличенные противопожарные расстояния для емкостного и другого технологического оборудования, применение водяного орошения, ограничение площади возможного пролива жидкости, специальная технология сброса холодных паров СПГ.

Таким образом, малотоннажное производство СПГ на объектах ЕСГ (магистральные и распределительные газопроводы, газораспределительные станции) является более эффективным по сравнению с производством СПГ по технологии полного сжижения с внешним охлаждением. Эта эффективность обусловлена использованием потенциала сжатого газа в трубопроводах,

повышенным давлением и температурой СПГ.

При малотоннажном производстве СПГ на объектах газотранспортной системы могут использоваться следующие технологии:

- производство СПГ на газопроводах по дроссельной технологии (цикл высокого давления);
- производство СПГ на ГРС по детандерной технологии (цикл среднего давления);
- производство СПГ на ГРС по технологии частичного сжижения с внешним охлаждением;
- производство СПГ на магистральных газопроводах по технологии полного сжижения с внешним охлаждением.

Наиболее эффективным является малотоннажное производство СПГ на ГРС по детандерной технологии с использованием потенциала газа высокого давления в магистральном газопроводе. Если сжижать газ по циклу среднего давления с расширением газа в детандере, то не только будут практически отсутствовать энергозатраты на сжижение газа, но и получаемую работу расширения газа можно утилизировать, например для выработки электроэнергии.

Размеры и стоимость системы очистки газа в установках частичного сжижения на ГРС можно уменьшить, если использовать двухпоточную схему и применить низкотемпературную очистку взамен очистки газа на входе в

установку. При этом также появляется возможность производить СПГ повышенного качества (марка А по ГОСТ Р 56021) [4].

При производстве СПГ на ГРС по циклу с детандером возможно обеспечить постоянную производительность установки при сезонном изменении давления газа в магистральном газопроводе и при дефиците расхода газа через ГРС. Влияние сезонного изменения давления на работу установки можно исключить, используя дожимающий компрессор, работающий за счет энергии, вырабатываемой детандером, или путем увеличения расхода газа через установку с изменением режимов работы теплообменных аппаратов и системы газоподготовки.

Следует отметить, что при производстве малотоннажного СПГ на объектах ЕСГ возможно применение всех перечисленных технологий, в зависимости от параметров источника сырьевого газа и наличия/отсутствия приемника газа низкого давления. Например, предварительные оценки показывают, что производство и сбыт 5,2 млн т СПГ в год в качестве газомоторного топлива на территории РФ могут быть обеспечены примерно на 90 ГРС и 10 автономных комплексах, в том числе примерно на 60 ГРС по циклу среднего давления с детандером и на 30 ГРС по циклу частичного сжижения с дополнительными энергозатратами.

Для обеспечения эффективного производства и использования СПГ научно-технические, опытно-конструкторские и технологические работы необходимо вести по следующим направлениям:

- разработка эффективной технологии производства СПГ на газопроводах с учетом различных давлений и расходов газа на каждом объекте и сезонных колебаний давлений и расходов газа. Предполагается создать унифицированные установки, которые обеспечивают постоянную производительность в условиях переменного давления и расхода;
- организация производства СПГ высокого качества. В ООО «Газпром ВНИИГАЗ» разработана технология производства на ГРС СПГ сорта А без дополнительных затрат. Ближайшая задача – экспериментальная отработка технических решений и создание опытных образцов блоков низкотемпературной очистки;
- обеспечение пожарной безопасности при малотоннажном производстве и использовании СПГ. Основное направление работ – исключение проливов СПГ и последующей загазованности территории. Применение противопожарных ограждений и двухобъемных резервуаров позволит отказаться от системы орошения и уменьшить противопожарные расстояния. ■

ЛИТЕРАТУРА

1. ТУ 51 03-03-85. Газ горючий природный сжиженный. Топливо для двигателей внутреннего сгорания [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://matcar.pf/download/gbo/tu_51-03-03-85.pdf (дата обращения: 12.03.2018).
2. ГОСТ 5542-87. Газы горючие природные для промышленного и коммунально-бытового назначения / Разработчики: А.И. Гриценко; А.К. Карпов (руководители темы); В.П. Булычев (утв. Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 16.04.1987 № 36. Взамен ГОСТ 5542-78). Официальное издание. М.: Изд-во стандартов, 2000.
3. ГОСТ 27577-2000. Газ природный топливный компримированный для двигателей внутреннего сгорания. Взамен ГОСТ 27577-87. Газы горючие. Технические условия: Сб. ГОСТов. М.: Изд-во стандартов, 2004.
4. ГОСТ Р 56021-2014. Газ горючий природный сжиженный. Топливо для двигателей внутреннего сгорания и энергетических установок. Технические условия / ООО «Газпром ВНИИГАЗ» (утв. Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 15.05.2014 № 432-ст.). Официальное издание. М.: Стандартинформ, 2014.
5. Горбачев С.П., Люгай С.В., Медведков И.С. Особенности сжижения природного газа с повышенным содержанием диоксида углерода и высококипящих компонентов в циклах с внутренним охлаждением // Газовая промышленность. 2013. № 685. С. 76–80.
6. Горбачев С.П., Медведков И.С. Низкотемпературная очистка природного газа при малотоннажном производстве сжиженного природного газа // Вести газовой науки. Современные технологии переработки и использования газа. 2015. № 1 (21). С. 114–123.
7. Горбачев С.П., Медведков И.С. Особенности малотоннажного производства СПГ на газопроводах на основе дроссельных циклов высокого давления // Технические газы. 2016. Т. 16. № 1. С. 29–36.
8. Liquefied Natural Gas Infrastructure, U.S. and Canadian Natural Gas Vehicle Market Analysis // Final Report. 2010. P. 63.
9. Суринов А.В. Стратегия развития рынка газомоторного топлива Российской Федерации // Газовая промышленность. 2015. № 728. С. 10–15.
10. Федеральный закон от 22.07.2008 № 123-ФЗ (ред. от 23.07.2014) «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» (с изм. и доп., вступ. в силу с 13.07.2014) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://base.garant.ru/12161584/> (дата обращения: 12.03.2018).