

Инновационные технологии при подготовке природного газа в проектах производства сжиженного природного газа

Ф. Г. Жагфаров, А. Б. Карпов, Н. А. Григорьева
РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина,
firdaus_jak@mail.ru

Для удаления тяжелых углеводородов из газового сырья разработан процесс селективной адсорбции, который может выборочно удалять углеводороды C_{5+} и ароматические углеводороды при небольшом перепаде давления. Данное решение может обеспечить экономию до 50% по сравнению с криогенным удалением. Внедрение таких решений в виде модульных установок обеспечит более низкие капитальные затраты, чем площадочная реализация для производства сжиженного природного газа до 500 тыс. т/год.

Ключевые слова: сжиженный природный газ, подготовка природного газа, адсорбционная очистка.

Сжиженный природный газ (СПГ) — один из наиболее перспективных видов энергоносителей. Это одно из наиболее активно развивающихся направлений в энергетике [1]. По данным Международного энергетического агентства (IEA), человечество ежегодно потребляет свыше 3 трлн м³ газа, и спрос на него может вырасти до 4,5 трлн м³ к 2035 г. [2]. При этом в 2016 г. мировой рынок СПГ составил около 265 млн т и по прогнозам к 2030 г. он вырастет почти вдвое — до 460 млн т [3].

Сегодня как в мире, так и в России существует ряд запланированных проектов производства СПГ, основная цель которых удовлетворить будущий разрыв в поставках. Для успешной реализации таких проектов, разработчики должны преодолеть ряд рисков, проблем и сложностей, в том числе:

- согласование мощности завода с гарантированными потребителями;
- прогнозирование, контроль затрат и графика реализации проекта;
- использование более сложного и переменного по составу сырья;
- введение более строгих экологических норм и требований к продукции;
- использование доступного оборудования, удовлетворяющего современным требованиям надежности, безопасности и эффективности;
- устранение и полная утилизация отходов и побочных продуктов.

Своевременные сроки и результаты принятия окончательных инвестиционных решений (FID), соблюдение графиков строительства и запуска установок зависят от способности подрядчиков и операторов производств решать эти важнейшие задачи.

Оптимизация технологий является одним из способов совершенствования эффективности в индустрии СПГ [4]. Внедрение инноваций на установках предварительной обработки газа, обеспечивают преимущества того или иного проекта по сжижению газа. При производстве СПГ, основное внимание должно уделяться мероприятиям по подготовке газа к ожижению, т. е. по доведению природного газа до параметров, позволяющих конденсацией получить СПГ требуемого качества [5], при этом данная стадия составляет значительную часть капитальных вложений и эксплуатационных расходов завода по производству СПГ.

В области современных технологических решений на стадии подготовки газа, основное внимание следует уделять адсорбентам, которые увеличивают эффективность удаления ртути и воды, что напрямую влияет на экономию капитальных и операционных расходов. Однако, затраты на адсорбционные процессы при их неправильном расчете могут неоправданно увеличиваться, поэтому очень важно располагать правильными исходными данными по емкости адсорбентов по компонентам для газа определенного состава [6].

Для удаления тяжелых углеводородов из газового сырья был разработан процесс селективной адсорбции, который может выборочно удалять углеводороды C_{5+} и ароматические углеводороды при небольшом перепаде давления. Данное решение может обеспечить экономию до 50% в сравнении с криогенным удалением на крупномасштабных установках и до 35% экономии по сравнению с ректификационной очисткой на мало- и среднетоннажных установках.

Одним из преимуществ данной технологии является возможность ее реализации в блочно-

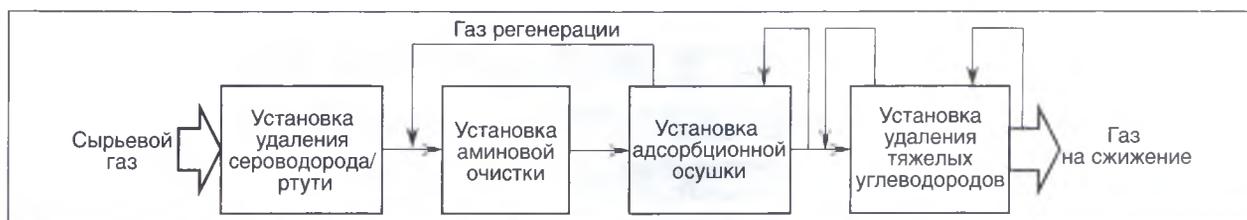


Рис. 1. Типовая схема очистки газа перед сжижением

модульном исполнении. Использование блоков заводской готовности для установок предварительной подготовки газа, в отличие от площадочного монтажа оборудования, позволяет быстрее производить изготовление и сборку, что влечет за собой соблюдение графика реализации и качества производства.

Уровень требований к обработке природного газа зависит от состава и изменчивости источников сырья, спецификаций на товарные продукты и местных экологических норм.

Следует отметить, что качество СПГ определяется не только нормативными документами на поставку газа, определенные требования накладывает сам процесс сжижения. Например, для предотвращения эксплуатационных проблем в криогенных установках (обмерзание теплообменников из-за высокого содержания воды и углекислого газа, образования амальгам на алюминиевых частях оборудования, коррозия оборудования), концентрация этих веществ ограничивается [5].

При очистке и разделении природного газа по традиционной схеме технологического процесса, из исходного сырья на различных этапах сначала удаляют ртуть, сероводород, углекислый газ и воду до чрезвычайно низких уровней, затем сырье обрабатывают для удаления тяжелых углеводородов (рис. 1).

Для удаления ртути возможно использовать регенерируемые или нерегенерируемые адсор-

бенты (рис. 2). Современные нерегенерируемые адсорбенты используются в адсорбере, размещаемым перед установками аминовой очистки и осушки. Их основное отличие от традиционных установок удаления ртути, на которых применяется активированный уголь, — возможность размещения перед установкой осушки из-за устойчивости адсорбентов к воде. Современные адсорбенты (GB-567, GB-562HP) имеют почти в три раза большую емкость, чем стандартные [7], что приводит к увеличению срока службы, меньшему количеству загрузки и экономии капитальных затрат за счет уменьшения металлоемкости адсорберов.

Адсорбенты на основе оксидов и сульфидов переходных металлов являются регенерируемыми, поэтому могут быть добавлены в адсорберы осушки, сокращая затраты при этом на отдельный блок. Для установок осушки целесообразно использовать адсорбенты, которые также обеспечивают длительный срок службы за счет большей емкости и имеют повышенную прочность. В новых установках такие адсорбенты позволяют уменьшить размеры аппаратов, тем самым уменьшая капитальные затраты (металлоемкость) и снизить операционные издержки (меньшее потребление энергии).

Одним из требований владельцев и компаний-операторов заводов СПГ является гибкость технологической установки подготовки газа, которая будет постоянно защищать основной криогенный теплообменник от отложений кри-



Рис. 2. Адсорбционные технологии удаления ртути с нерегенерируемым (а) и регенерируемым (б) адсорбентом



Рис. 3. Технологии удаления тяжелых углеводородов

сталлов тяжелых углеводородов. Современные реализованные технологии могут эффективно удалять тяжелые углеводороды, из жирного сырья газа (рис. 3).

Установки СПГ получают сырье из разных источников. Часто в процессе разработки месторождения компонентный состав газа может изменяться. Еще более динамичным может быть состав газа, поставляемого на сжижение по трубопроводу. Если для первого случая (в РФ это такие проекты, как Ямал СПГ и Штокман СПГ) данный фактор изменяется достаточно медленно, то для проектов заводов СПГ, увязанных с газопроводами (Балтийский СПГ, СПГ на КС «Портовая» и Владивосток СПГ, малотоннажные заводы), изменение состава газа может серьезно влиять на параметры технологии сжижения, поэтому, чтобы оставаться экономически эффективными, заводам необходима оперативная оптимизация процесса [4].

Традиционные методы обработки бедного газа для удаления тяжелых углеводородов, такие как абсорбция, низкотемпературная сепарация и конденсация, могут иметь более высокие экономические издержки, уменьшать мощность установки и усложнять процесс.

Адсорбционное извлечение углеводородов представляет собой высокоселективный процесс аналогичный регенерируемой адсорбционной осушке. Газ в потоке очищается в адсорбере, в то время как десорбер (или десорберы) продуваются чистым, нагретым газом регенерации для отдувки тяжелых углеводородов. Регенерированный газ затем охлаждают и сконденсированные углеводороды отделяются в сепараторе.

Помимо насыщенных углеводородов блок может удалять ароматические углеводороды до концентраций <1 ppm, воду, углекислый газ, меркаптаны и следы других загрязнителей, таких как гликоль, смазки и амины (если они присутствуют в сырьевом газе). Система является достаточно гибкой, чтобы справляться с различными составами газа осуществляется регулировка времени

цикла регенерации или температура охлаждающего потока газа.

Технология адсорбционной очистки энергоэффективна, поскольку позволяет избежать значительного снижения давления и нагрузки на узел охлаждения, неизбежных при криогенных вариантах. При крупнотоннажном производстве СПГ традиционная установка для удаления углеводородов включает в себя турбодетандер или дроссель, расположенный после блока осушки. Расширение снижает температуру углеводородов, однако этот метод требует ректификационной колонны для отделения жидкостей от газа и компримирования газа на выходе из установки до уровня, позволяющего эффективному функционированию основного криогенного теплообменника.

При адсорбции же происходит небольшой перепад давления (вызванный гидравлическим сопротивлением). Кроме того, охлаждению подвергается только отдувочный газ, что снижает затраты на сжатие и конденсацию. Например, по оценкам авторов работы [7], для завода мощностью 500 тыс. т/год возможна экономия до 50% по сравнению с криогенным решением (экономика капитальных затрат до 30% и ежегодная экономия на операционных затратах до 75%).

Для небольших и средних проектов СПГ удаление углеводородов может осуществляться в колонне, которая может быть интегрирована с холодильным агрегатом для предварительного охлаждения газа или путем отделения потока из главного криогенного теплообменника. Этот вариант дешевле схемы с турбодетандером, но он более сложен при эксплуатации, особенно когда подаваемый сырьевой газ обеднен. Помимо падения давления, необходимого для работы, на производительность колонны может влиять недостаточное количество широкой фракции легких углеводородов для создания рефлюкса, необходимого для удаления тяжелых компонентов, что в целом приводит к проблемам работоспособности и надежности.

Традиционно EPC-поставщики ответственны за компоновку поставляемых различными производителями технологических установок для каждой стадии предварительной очистки. Для компаний-заказчиков установок СПГ такой подход подвергает рискам невыполнения поставок отдельных узлов производства. Применение модульных конструкций и поставок обеспечивают точное соблюдение графика, предсказуемость взаимной интеграции блоков и экономически эффективный подход. При таком решении поставщик технологии очистки газа напрямую работает с заказчиком для определения оптимальных параметров аминовой очистки, осушки и проектирования блока удаления тяжелых углеводородов, а затем предоставляет решение в виде сборного модульного оборудования с фиксированной ценой. EPC-подряд по-прежнему играет важную роль в этом подходе, но существуют явные преимущества реализации установок предварительной очистки в блочно-модульной конфигурации.

1. Снижение затрат и сроков реализации: монтажные работы выполняются на производстве с более низкими почасовыми ставками на оплату труда, с контролируемым графиком (без задержек, связанных с погодой и внешними факторами) и до начала эксплуатации месторождения или сырьевого газопровода. Скомплектованные установки, размещаемые на

раме и отправляемые грузовиками или баржами, готовы к установке.

2. Эффективность производства и качество: оборудование, трубопроводы и приборы более доступны в условиях сборочного завода, размещенного ближе к складским и производственным базам, могут быть полностью протестированы перед отправкой на площадку.

3. Единоличная ответственность за производительность и работоспособность оборудования.

Для монтажа предельно компактного и мобильного блока-модуля не требуется капитального строительства. Необходима лишь подготовка фундамента, способного выдерживать статические нагрузки от конструкции. Соответственно, значительно экономится время, ресурсы и бюджет, а качество и надежность проектных решений возрастает. Проект сводится к оптимальной трубопроводной обвязке на территории строительной площадки, подключению трубопроводов и электросети к блочно-модульной установке.

Модульное оборудование может обеспечить более низкие капитальные затраты, чем площадочная реализация для производственных мощностей по СПГ до 500 тыс. т/год, что связано с сокращением инженерного, проектного управления, труда в условиях площадки и использования повторяемости решений. Одиночные линии легко комбинируются. Несколько линий могут быть введены как одновременно, так и поэтапно, чтобы быть более экономически эффективными,

Пути достижения эффективности для установок подготовки газа перед сжижением

Инновация в технологическом процессе	Преимущества	Эффектообразующий фактор	Экономический эффект
Адсорбенты для удаления ртути	Нерегенерируемый адсорбент или слой регенерируемого адсорбента в адсорбере осушки; использование адсорбентов с большей емкостью; меньший размер адсорбера и более низкая стоимость	Гибкость работы; меньшее количество загрузки	Снижение металлоемкости; экономия энергии
Адсорбенты для осушки	Использование адсорбентов с большей емкостью; более длительное время адсорбции, меньшее количество циклов, более длительный срок службы; меньший размер адсорбера и более низкая стоимость	Меньшее количество загрузки	Снижение металлоемкости; экономия энергии
Адсорбционное удаление тяжелых углеводородов	Удаление тяжелых углеводородов, особенно эффективно при постоянном составе сырьевого газа; высокая избирательность по C_2 позволят углеводородам C_2 повышать калорийность СПГ; низкий перепад давления	Простота управления; надежность	Отсутствие дожимного компрессора; более низкие эксплуатационные затраты; не требуется абсорбент
Блочно-модульное исполнение	Гибкая доставка, быстрый и простой монтаж; фиксированная цена; типизированное решение, наращивание мощностей поэтапно в зависимости от спроса	Сокращение временных и стоимостных рисков; качество поставки; точный график	Меньше проектных и трудовых затрат; гибкое управление денежными потоками; возможность быстрой замены и возврата

по сравнению с одной линией большой мощности. Использование полинейного роста для наращивания мощностей представляют собой эффективную стратегию управления потоками денежных средств за счет расширения установок поэтапно, поскольку возможности реализации продукции растут с течением времени. Если дополнительный спрос в будущем не оправдается, владелец сможет уменьшить инвестиции в ненужные мощности.

В свете предстоящего освоения газоносных районов Арктики с минимальной плотностью населения и суровыми климатическими условиями компактность и мобильность установок подготовки и сжижения газа становятся наиболее актуальными [8].

В таблице приведены обобщенные факторы и пути достижения эффективности для установок подготовки газа перед сжижением.

Потребление природного газа продолжает быстро увеличиваться. Сейчас природный газ рассматривается как наиболее обильный и динамично развивающийся первичный источник энергии. Огромные ресурсы природного газа и новые технологии его добычи делают XXI век

веком газа [9]. СПГ является привлекательным способом монетизации береговых и морских запасов газа. Кроме того, перспективным направлением развития отрасли является применение СПГ в качестве моторного топлива [10]. Для удовлетворения будущих потребностей в поставках потребуются большие мощности по производству СПГ.

В современных условиях применение инновационных технологий является одним из источников повышения технологического уровня производств СПГ. Для снижения рисков финансовых издержек и графиков реализации, отрасль должна внедрять эффективные решения, современные достижения в области технологий и новые подходы к выполнению проектов подготовки газа — повышать эффективность удаления ртути, кислых газов, воды и тяжелых углеводородов.

Внедрение таких решений в виде модульных установок обеспечит быстрый и упрощенный монтаж на любой площадке без дополнительных дорогих строительно-монтажных работ, что приведет к сокращению графиков реализации и перерасхода средств.

Литература

1. Голубева И. А., Мещерин И. В., Дубровина Е. П. Производство сжиженного природного газа: вчера, сегодня, завтра // Мир нефтепродуктов. — № 6. — 2016. — С. 4–13.
2. Мещерин И. В., Настин А. Н. Анализ технологий получения сжиженного природного газа в условиях арктического климата // Труды РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина. — № 3. — 2016. — С. 144–157.
3. «Газпром» собрался самостоятельно создать генподрядчика для проектов СПГ [Электронный ресурс]. URL: <http://www.rbc.ru/business/30/05/2017/592855609a7947107580809f> (дата обращения: 12.06.2017).
4. Мещерин И. В. Оптимизация технологий сжижения природного газа с целью повышения экономической эффективности процесса // Территория «НЕФТЕГАЗ». — № 3. — 2016. — С. 146–152.
5. Кондратенко А. Д., Жагфаров Ф. Г. Разработка технологии подготовки природного газа для малотоннажного производства СПГ // Сборник трудов 71-й Международной молодежной научной конференции «Нефть и газ – 2017», Москва. — Т. 2. — С. 176–181.
6. Трифонова И. Н., Козлов А. М. Определение емкости цеолитов для глубокой очистки газа перед ожигением // Тезисы докладов Юбилейной десятой всероссийской конференции «Новые технологии в газовой промышленности», Москва, 2013. — С. 151.
7. Smith T., Palla R. Pretreatment improvements // LNG Industry. — № 12 — 2016. — С. 33–37.
8. Федорова Е. Б., Мельников В. Б. Особенности подготовки природного газа при производстве СПГ // Труды РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина. — 2015. — С. 100–114.
9. Арутюнов В. С. Концепция малотоннажной газохимии в освоении ресурсов российского природного газа // NEFTEGAZ. RU. — № 4 — 2015. — С. 36–43.
10. Кондратенко А. Д., Карпов А. Б., Козлов А. М. и др. Российские малотоннажные производства по сжижению природного газа // НефтеГазХимия. — № 4. — 2016. — С. 31–36.

F. G. Zhagfarov, A. B. Karpov, N. A. Grigoreva

Gubkin State University of Oil and Gas, firdaus_jak@mail.ru

Innovative Natural Gas Treatment Technologies at Liquefying Natural Gas Projects

The introduction of innovations in gas pretreatment facilities provides the advantages of a particular project for liquefying natural gas (LNG). In the field of modern technological solutions in the gas preparation stage, the focus should be on effective adsorbents for the removal of mercury and water. To remove heavy hydrocarbons from the gas feedstock, a selective adsorption process has been developed that can selectively remove C₅₊ hydrocarbons and aromatic hydrocarbons at a slight pressure drop. This solution can save up to 50% compared to cryogenic disposal. The introduction of such solutions in the form of modular units will provide lower capital costs than the site-wide implementation for LNG production facilities up to 500 thousand tons per year.

Key words: innovations, liquefied natural gas, natural gas treatment, technologies.