

**Ю.С. Бухолдин\*, А.В. Зленко, В.М. Татаринов, А.С. Северин, С.В. Шахов**

ОАО «Сумское машиностроительное НПО им. М.В. Фрунзе», ул. Горького, 58, г. Сумы, Украина, 40004

\*e-mail: smpo@frunze.com.ua

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ СЖИЖЕНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА НА БАЗЕ МОДЕРНИЗИРОВАННОГО СТЕНДА РЕКОНДЕНСАЦИИ МЕТАНА

*Ранее авторами сообщалось об экспериментальном исследовании установки для сжижения природного газа. На её основе реализовывались криогенные технологии реконденсации паров метана, которые образуются при морском транспортировании сжиженного природного газа (СПГ). Сообщается о создании СПГ-стенда на основе существующей установки. Назначение стенда состоит в подтверждении эффективности разработанной новой технологической схемы СПГ-установки с азотным контуром, в котором производится холод, необходимый для ожижения природного газа. Стенд позволяет оценить реальные характеристики компрессорных и расширительных машин, рекуперативных теплообменников. Полученная информация позволит начать проектирование трёх типов промышленных СПГ-установок различного назначения.*

**Ключевые слова:** Природный газ. Метан. Азот. Сжижение. Сжиженный природный газ (СПГ). Компрессор. Турбодетандер. Стенд. СПГ-установка. Рекуперативный теплообменник. Криогенный сепаратор.

**Yu.S. Buholdin, A.V. Zlenko, V.M. Tatarinov, A.S. Severin, S.V. Shahov**

## PERFECTION OF LIQUEFACTION TECHNOLOGY OF NATURAL GAS ON THE BASIS OF MODERNIZED STAND OF RECONDENSATION OF METHANE

*About experimental research of plant for liquefaction of natural gas was informed by authors earlier. On its basis a cryogenic technologies of recondensation of methane vapor which are formed at sea transportation of liquefied natural gas (LNG) were realized. It is informed on creation of the LNG-stand on the basis of existing plant. The purpose of the stand will consist in confirmation of efficiency of the developed new technological circuit of LNG-plant with nitric contour in which the cold necessary for liquefaction of natural gas is made. The stand allows to estimate the real characteristics of compressor and expansion machines, recuperative heat-exchangers. The received information will allow to begin designing of three types of industrial LNG-plants for various purpose.*

**Keywords:** Natural gas. Methane. Nitrogen. Liquefaction. Liquefied natural gas (LNG). Compressor. Turbo-expander. Stand. LNG-plant. Recuperative heat-exchanger. Cryogenic sep-

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Наше объединение является крупнейшим в СНГ производителем оборудования для нефтегазового комплекса. Поэтому для нас всегда были приоритетны вопросы использования новых технологических процессов для разработки и изготовления эффективного оборудования для газовой промышленности [1,2].

Одним из таких новых направлений в нашей деятельности является изготовление криогенного оборудования и установок для получения сжиженного природного газа (СПГ) [3].

Нами создан стенд сжижения природного газа на основе имеющегося стенда реконденсации метана. Данный стенд предназначался для отработки технологии реконденсации паров метана, которые образуются при перевозке сжиженного газа на судах-метано-

возах, а также демонстрации процесса реконденсации метана потенциальным заказчиком оборудования для оснащения указанных судов [3]. Изначально стенд рассматривался как уменьшенная модель пилотной установки. Однако в ходе её разработки и проектирования была создана полноразмерная установка.

На новом СПГ-стенде нами начаты работы по дальнейшему совершенствованию процессов, оборудования и технологий сжижения природного газа.

### 2. ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СХЕМА И ОБОРУДОВАНИЕ СПГ-СТЕНДА

Технологическая схема и практически всё необходимое оборудование разработано и изготовлено на нашем объединении. На фото 1 представлен общий вид СПГ-стенда.



**Фото 1.** Общий вид демонстрационного стенда сжижения природного газа

Стенд построен на территории испытательного комплекса силами собственного ремонтно-строительного предприятия и монтажного управления. В его состав входят следующие основные системы: холодильный комплекс сжижения метана с азотным контуром; система осушки и очистки газа; система обратного водоснабжения; система хранения и подачи азота. Кратко охарактеризуем особенности перечисленных систем.

**Холодильный комплекс сжижения метана** (далее холодильный комплекс) реализован с использованием азотного контура, в состав которого входят компрессорный и детандерный агрегаты, расположенные на одном валу. Привод компрессора осуществляется электродвигателем. В азотном контуре про-

изводится необходимое количество холода для охлаждения и конденсации метана.

**Система осушки и очистки** природного газа выполнена на базе адсорбционной установки и предназначена для осушки газа до точки росы по влаге  $-70^{\circ}\text{C}$  и достижения концентрации  $\text{CO}_2$  в очищенном газе не выше  $0,04 \text{ г/м}^3$ .

**Система обратного водоснабжения** предназначена для охлаждения газа после ступеней сжатия в компрессоре азотного цикла. Основные технические параметры стенда реконденсации метана приведены в [4].

Стенд реконденсации метана был модернизирован для создания на его основе стенда для сжижения метана. Целью этой работы являлось:

1. Отработка технологии сжижения природного газа, поступающего из газопровода, с получением СПГ в низкотемпературном сепараторе.

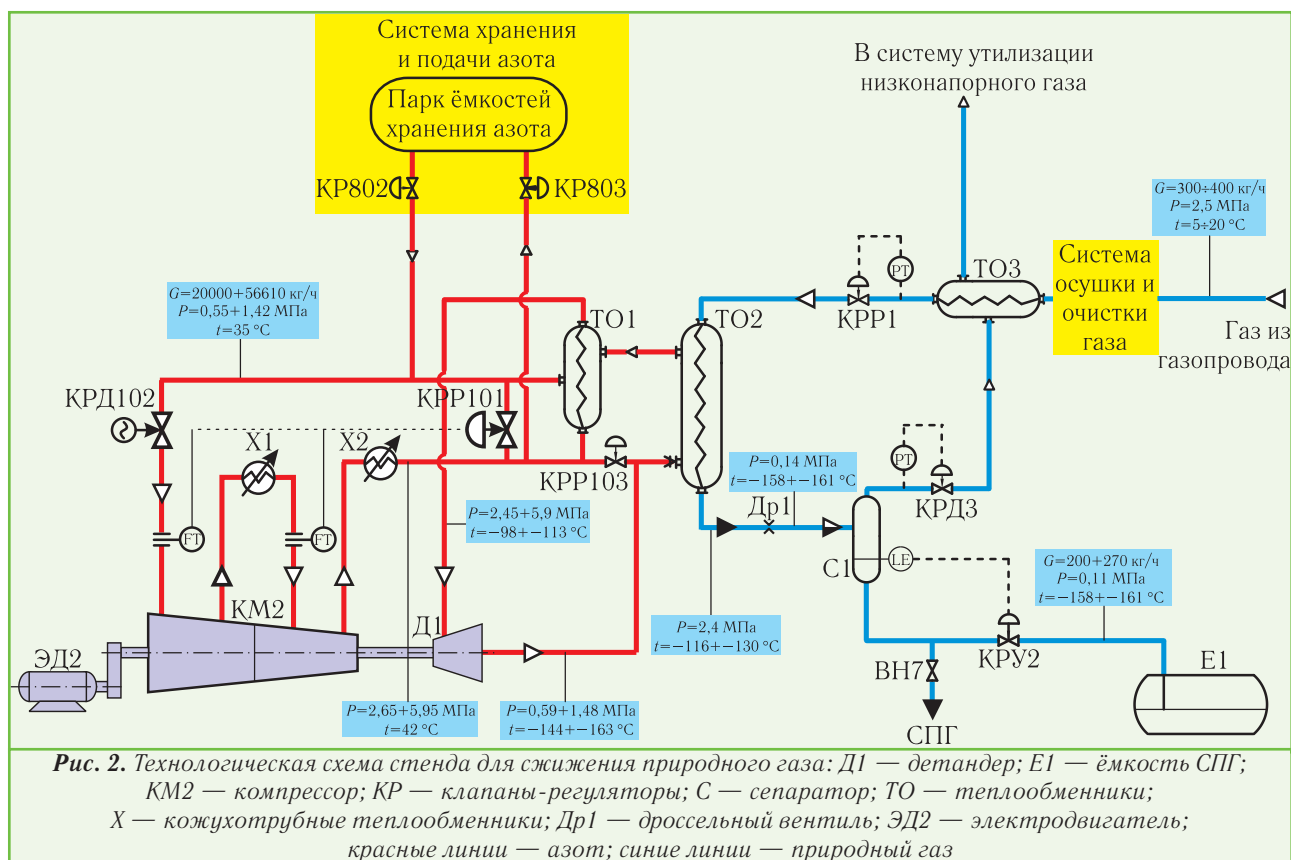
2. Применение полученных результатов для создания промышленных СПГ-установок.

При разработке мероприятий по доработке стенда учитывалось следующее:

– использовать имеющееся оборудование и системы (установку осушки газа, азотный компрессор с турбодетандером, витые теплообменники азотного контура, систему водяного охлаждения, систему хранения азота, ёмкости для хранения СПГ, криогенный сепаратор, систему САУ);

– по результатам расчёта материально-теплового баланса выполнить доработку линии сжижения природного газа с учётом имеющейся трубопроводной обвязки стенда.

Расчёт технологических параметров и выбор ре-



Наименование параметра, единица измерения	Численное значение параметра
Метановый контур	
Производительность стенда по природному газу, кг/ч	300...400
Давление природного газа на входе в установку, МПа (абс.)	2,5
Давление в криогенном сепараторе С1, МПа (абс.)	0,14
Температура СПГ в криогенном сепараторе, °С	–158...–161
Азотный контур	
Производительность азотного компрессора, кг/ч	20000...56610
Давление на входе в азотный компрессор, МПа (абс.)	0,55...1,42
Давление на выходе из азотного компрессора, МПа (абс.)	2,65...5,95
Температура азота на выходе из детандера, °С	–144...–163
Система осушки и очистки газа	
Производительность по газу, кг/ч	300...450
Давление природного газа на входе в систему, МПа	2,5
Содержание H <sub>2</sub> O в подготовленном газе, ppm объёмных, не более	1
Содержание CO <sub>2</sub> в подготовленном газе, ppm объёмных, не более	50

жимов работы проводился при помощи программного комплекса HYSYS.

Технологическая схема СПГ-установки приведена на рис. 2.

В технологической схеме оборудование азотного холодильного контура осталось без изменений, а метановый контур был доработан. Укажем основные выполненные при этом работы:

1. Смонтирован трубопровод подачи природного газа из установки осушки в теплообменный аппарат ТО2.

2. Подобрана и установлена необходимая запорно-регулирующая арматура и предохранительные клапаны.

3. Смонтирована линия отвода и утилизации низконапорного газа.

4. Доработана линия слива СПГ из теплообменника ТО2 в криогенный сепаратор С1.

Основные технические параметры стенда сжижения природного газа приведены в таблице.

Остановимся на особенностях технологической схемы.

Природный газ с давлением 2,5 МПа после системы осушки и очистки подаётся в теплообменник метана ТО2, где охлаждается за счёт холода, вырабатываемого в азотном контуре. Входной трубопровод оснащён клапаном-регулятором КРР1, предназначенным для поддержания постоянного расхода на входе в систему, и обратным клапаном. После теплообменника ТО2 СПГ дросселируется в шайбе Др1 и с температурой –158...–161 °С поступает в сепаратор С1, предназначенный для разделения жидкой и паровой фаз метана.

Газ из сепаратора С1 через регулирующий клапан КРД3 подаётся в рекуперативный теплообменник ТО3, предназначенный для подогрева низконапорного газа, и отводится затем из него для утилизации (подаётся на вход АГНКС). Клапан КРД3 предназначен для поддержания постоянного давления в С1. Слив СПГ из кубовой части сепаратора осуществляется по трубопроводу, оборудованному электроприводным вентилем, расходомерным устройством и регулирующим клапаном КРУ2, используемым для поддержания уровня жидкости в С1.

В азотном холодильном контуре после сжатия в двухступенчатом однокорпусном компрессоре азот высокого давления поступает в теплообменник ТО1, где предварительно охлаждается азотом низкого давления. После теплообменника азот подаётся на вход детандера Д1. В нём азот за счёт расширения и совершения внешней работы охлаждается до температуры –144...–163 °С. Затем он направляется в теплообменник метана ТО2, где происходит охлаждение потока природного газа, поступающего на сжижение. После ТО2 азот проходит теплообменник ТО1, охлаждая поток азота высокого давления, который подаётся на вход детандера, и далее через расходомерное устройство поступает на вход в компрессор.

Для обеспечения эффективной работы азотного контура предусмотрено использование следующих контуров регулирования:

1) антипомпажный контур, укомплектованный клапаном-регулятором расхода КРР101, который соединяет нагнетательный трубопровод КМ2 (после теплообменника Х2) с входным трубопроводом;

2) контур байпасирования детандера Д1, оснащённый клапаном-регулятором расхода КРР103, который обеспечивает регулирование холодопроизводительности азотного контура стенда при его пуске и остановке;

3) линии с регулирующими клапанами КР802 и КР803, при помощи которых за счёт изменения массы азота, циркулирующего в контуре, осуществляется регулирование его холодопроизводительности.

В ходе проведённых испытаний на стенде сжижения природного газа была отработана технология получения СПГ, проверена работоспособность основного и вспомогательного оборудования, подтверждены расчётные параметры технологической схемы.

На рис. 3 приведены мнемосхемы азотного и метанового контуров во время работы стенда в режиме получения СПГ.

В процессе испытаний СПГ-установки азотный контур не выводился на номинальный режим работы, так как ставилась задача получения ограниченного количества жидкого продукта в криогенном сепараторе. После того, как кубовая часть сепаратора напол-

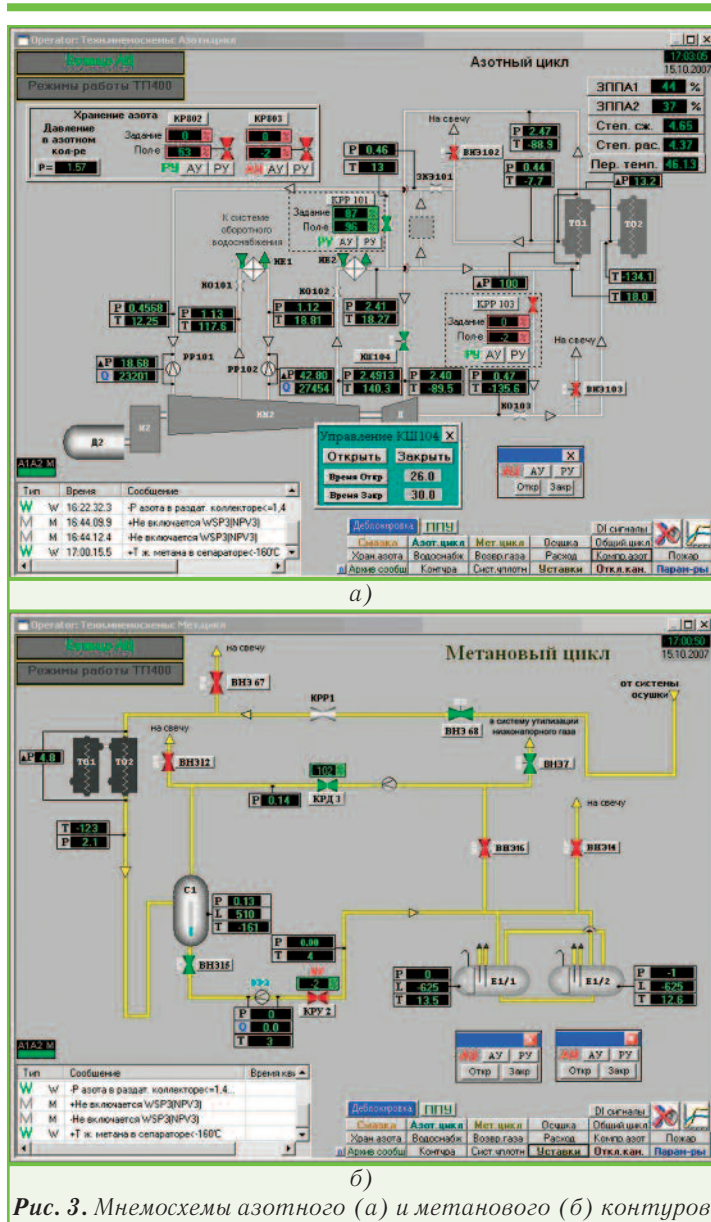


Рис. 3. Мнемосхемы азотного (а) и метанового (б) контуров

нилась жидкостью, испытания были прекращены.

На рис. 4 показано, как демонстрируется наличие жидкости в криогенном сепараторе.

### 3. НАПРАВЛЕНИЯ ДАЛЬНЕЙШИХ РАБОТ ПО СОЗДАНИЮ СПГ-УСТАНОВОК

Одним из важных результатов проведённой работы было подтверждение правильности технологических расчётов и определения основных параметров стенда. Эксперименты, выполняемые на стенде, дали возможность убедиться в достаточной точности расчёта оборудования установки сжижения, а также в возможности применения полученных результатов для разворачивания дальнейших работ по данной тематике. Так, опыт создания криогенного стенда позволил нам приступить к проектированию промышленных установок сжижения природного газа различного назначения. Проработка технологических схем ведётся для трёх основных типов СПГ-установок:

1. Установка сжижения природного газа с двойным детандерным охлаждением.



Рис. 4. Слив СПГ из сепаратора установки

2. Установка сжижения природного газа с дроссельным циклом на смешанном хладагенте.

3. Установка сжижения природного газа на базе АГНКС-125.

Наряду с этим ведутся работы по повышению эффективности оборудования разрабатываемых установок сжижения: обеспечение более высоких КПД компрессорных и расширительных машин; создание более эффективных теплообменников; совершенствование узлов и деталей основного технологического оборудования.

### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Нами накоплен богатый опыт технологического проектирования, изготовления оборудования и внедрения результатов разработок в создание СПГ-установок.

Начато проектирование и изготовление оборудования промышленных установок для сжижения природного газа. Это позволит предприятию расширить номенклатуру выпускаемой продукции. Вместе с тем, возможно рассмотрение предложений по совместному участию в аналогичных проектах, которые намечены для реализации другими компаниями.

### ЛИТЕРАТУРА:

1. **Беляев А.А., Машканцев М.А.** Развитие малотоннажного производства СПГ в Северо-Западном районе Российской Федерации// Технические газы. — 2006. — № 3. — С. 17-21.
2. Применение криогенных СПГ-технологий в переработке попутных нефтяных газов/ **Ю.В. Горбатский, В.А. Передельский, А.Л. Довбиш и др.**// Технические газы. — 2006. — № 3. — С. 22-27.
3. **Лавренченко Г.К.** Проблемы эффективного производства и использования КПГ и СПГ// Технические газы. — 2006. — № 5. — С. 2-16.
4. **Бухолдин Ю.С., Сухоставец С.В., Петухов И.И.** Криогенная установка для сжижения природного газа// Технические газы. — 2006. — № 5. — С. 39-46.