

УДК 621.593

<sup>1</sup>Л.Н. Зотова, <sup>2</sup>А.Л. Довбиш, канд. техн. наук, <sup>3</sup>Е.И. Гуров, <sup>4</sup>В.С. Аксенов

ОАО «Криогенмаш», просп. Ленина, 67, г. Балашиха Московской обл., РФ, 143907

e-mail:<sup>2</sup>dovbish@cryogenmash.ruORCID:<sup>2</sup>http://orcid.org/0000-0002-8697-3123; <sup>3</sup>http://orcid.org/0000-0002-2760-3288

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СПГ-УСТАНОВОК СРЕДНЕЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ С ВНЕШНИМ КРИОГЕННЫМ АЗОТНЫМ ДЕТАНДЕРНЫМ ЦИКЛОМ

В настоящее время ощущается спрос на СПГ-установки производительностью от 5 до 20 т/ч. Анализ показал, что достаточно эффективные установки указанной производительности можно разрабатывать на основе внешнего криогенного азотного детандерного цикла. В процессе дальнейшего исследования установлено, что при создании СПГ-установок производительностью до 10 т/ч нужно отдавать предпочтение схеме с одним турбодетандер-компрессорным агрегатом и ступенью предварительного охлаждения азота с помощью холодильной машины. Минимальное значение удельных затрат энергии на ожижение природного газа 0,66 кВтч/кг удалось достигнуть в СПГ-установке при оптимальной температуре предварительного охлаждения азота холодильной машиной на уровне 233 К. Для заказчика в ОАО «Криогенмаш» разработан проект СПГ-установки производительностью 7 т/ч, в которой используются оптимальные режимные и схемные показатели, найденные при минимизации удельных затрат энергии на сжижение природного газа. На предприятии уже ведётся изготовление и поставка оборудования СПГ-установки заказчику.

**Ключевые слова:** Сжиженный природный газ (СПГ). СПГ-установка. Криогенная техника. Азот. Криогенный азотный детандерный цикл. Турбодетандер-компрессорный агрегат. Холодильная машина. Удельные затраты энергии.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В последние годы в газовой промышленности России, в её государственных и частных структурах приступили к реализации программ по производству и использованию сжиженного природного газа (СПГ). Ряд дочерних фирм ОАО «Газпром» («Газпром газэнергосеть», «Газпром промгаз», «Газпром ВНИИгаз», «Газпром добыча шельф» и др.) возглавляют разработку СПГ-проектов, целью которых является газификация отдельных населенных пунктов, энергообеспечение промышленных объектов, использование на транспорте и т. п.

При производстве СПГ для указанных целей используются, как правило, установки малой (до 3...5 т/ч) и средней (от 5 до 20 т/ч) производительности.

ОАО «Криогенмаш» имеет богатый опыт разработки и создания СПГ-установок, базирующихся на дроссельно-эжекторном цикле высокого давления [1, 2]. Однако, несмотря на то, что эти СПГ-установки подтвердили свои превосходные эксплуатационные качества и достаточно высокую энергетическую эффективность, им свойственны недостатки, которые проявляют себя все более радикальным образом по мере увеличения производительности. Высокое давление газа в цикле (20 МПа) негативно влияет на конструктивные и массогабаритные характеристики теплообменных

аппаратов. Кроме этого, при росте производительности оказывается под вопросом применение поршневых компрессоров. В совокупности эти обстоятельства ограничивают единичную производительность установок этого типа на уровне примерно 4-5 т/ч. Для установок более высокой производительности необходимо использовать другой цикл ожижения.

Разработку СПГ-установок средней производительности наше предприятие, опираясь на многолетний опыт создания крупных криогенных воздухоразделительных установок, в которых основным холодопроизводящим элементом является детандер, считает целесообразным проводить на основе применения внешнего азотного детандерного криогенного цикла с холодильной ступенью предварительного охлаждения азота [3].

### 2. ОСОБЕННОСТИ СПГ-УСТАНОВКИ СРЕДНЕЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ

Первая опытная установка средней производительности на 7 т/ч СПГ разрабатывалась и создавалась нами по заказу ЗАО «Криогаз» (С.-Петербург).

Природный газ (ПГ) на входе в установку имел следующие показатели:

- давление 2,2...4,5 МПа;
- состав, % мольные: метан —  $97 \pm 1,5$ , азот —  $0,8 \pm 0,2$ , этан —  $0,8 \pm 0,4$ , пропан —  $0,3 \pm 0,15$ , бута-