

<sup>1</sup>А.А. Вассерман, доктор техн. наук; <sup>2</sup>А.Г. Слынько, кандидат техн. наук<sup>1,2</sup>Одесский национальный морской университет, ул. Мечникова, 34, г. Одесса, Украина, 65029e-mail: <sup>1</sup>avas@paco.net; <sup>2</sup>asg\_37@ukr.netORCID: <sup>1</sup>http://orcid.org/0000-0001-8147-8417; <sup>2</sup>http://orcid.org/0000-0002-5310-4335

## ПОВЫШЕНИЕ ЭКОНОМИЧНОСТИ ТРЁХКАСКАДНЫХ ХОЛОДИЛЬНЫХ УСТАНОВОК

*Предлагается в трёхкаскадных холодильных установках перед каждым компрессором предельно регенеративно перегревать пар хладагента до температур промежуточного охлаждения и конденсации, а затем изотермически сжимать его до соответствующих давлений. Это уменьшит эффективную мощность установки и массогабаритные показатели теплообменных аппаратов, увеличит холодильный коэффициент установки и улучшит условия работы компрессоров. На примере трёхкаскадной холодильной установки реконденсации пара метана, перевозимого метановозом грузоместимостью 150000 м<sup>3</sup>, показано, что при её модернизации предлагаемым способом эффективная мощность установки уменьшается более чем в два раза, чему соответствует экономия более 107 тыс. кВтч электроэнергии в сутки.*

**Ключевые слова:** Трёхкаскадная холодильная установка. Реконденсация пара метана. Регенеративный теплообмен. Адиабатное и изотермическое сжатие. Удельные массовая и объёмная холодопроизводительности. Холодильный коэффициент.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

При морской перевозке сжиженных газов (СГ) при давлении, близком к атмосферному, возникают большие затраты энергии на повторную конденсацию (реконденсацию) пара, образующегося при транспортировке СГ из-за теплопритоков в танки. Поэтому актуальны любые усилия, направленные на совершенствование таких установок с целью снижения этих затрат.

Уменьшить потребление энергии в холодильных установках позволяет замена адиабатного сжатия хладагента изотермическим. В работе [1] на основании теоретического анализа и расчётов для ряда хладагентов показано, что холодильный цикл с изотермическим сжатием рабочего тела имеет существенные преимущества перед циклом с адиабатным сжатием.

В настоящей работе на примере перевозки сжиженного метана метановозом грузоместимостью 150000 м<sup>3</sup> показана возможность значительного повышения экономичности работы трёхкаскадной установки реконденсации пара метана путём использования предельной регенерации теплоты перед каждым компрессором и замены адиабатных процессов сжатия пара изотермическими.

### 2. БАЗОВАЯ И МОДИФИЦИРОВАННАЯ УСТАНОВКИ РЕКОНДЕНСАЦИИ

При перевозке и хранении сжиженного метана при давлении, близком к атмосферному, используются трёхкаскадные установки реконденсации пара [2].

Принципиальная схема современного (базового) варианта такой установки с адиабатным сжатием пара в компрессорах приведена на рис. 1. Во всех трёх ветвях установки применяются двухступенчатые холодильные машины с неполным промежуточным охлаждением пара. При этом в нижней ветви каскада используется метановая установка открытого типа, в средней — этиленовая и в верхней — пропановая. В нижних ступенях каждой ветви каскада применяется ограниченный регенеративный теплообмен между жидкостью и паром.

На принципиальной схеме базовой установки (рис. 1) указаны арабскими толстыми прямыми числами её элементы, а тонкими наклонными — положение точек, соответствующих состояниям рабочих тел до и после каждого элемента в холодильном цикле, приведенном на рис. 2. Схема и цикл выполнены цветными для облегчения анализа работы установки.

При анализе схемы отметим, что в вентиле 2 дросселируется жидкость, получаемая при реконденсации пара перевозимого метана при её возвращении в танк 1. В регенеративном теплообменнике (РТО) 3 переохлаждается указанная жидкость и перегреваются пары, образующиеся в танке 1. В ПС 4 происходит разделение жидкости и пара после дросселирования метана в вентиле 5. В конденсаторе-испарителе (КИ) 6 охлаждается и реконденсируется пар метана и кипит этилен. В КНД 8 и КВД 7 сжимаются пары метана перед их поступлением в КИ 6.

В вентиле 9 дросселируется этилен до давления в КИ 6. В РТО 10 переохлаждается жидкий этилен и