

**ИССЛЕДОВАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ РЕКОНДЕНСАЦИИ  
ОТПАРНОГО ГАЗА ПРИ ТРАНСПОРТИРОВКЕ СПГ**

**Тараев Н.С. (ИТМО)**

**Научный руководитель – кандидат технических наук, доцент Зайцев А.В.  
(ИТМО)**

**Введение.** Транспортировка сжиженного природного газа (СПГ) сопровождается образованием отпарного газа (BOG – Boil-Off Gas) вследствие теплообмена с окружающей средой. Эффективная реконденсация BOG позволяет минимизировать потери СПГ, снизить выбросы CO<sub>2</sub> и повысить экономическую целесообразность транспортировки.

Исторически СПГ-танкеры использовали паротурбинные двигательные установки, в которых отпарной газ сжигался в котлах. Однако эффективность такого метода составляет лишь 30% [1]. Современные системы реконденсации BOG включают реверсивный цикл Брайтона с азотом, каскадное охлаждение и комбинированные методы с возвратом неконденсируемых газов в танки.

В последнее время крупные производители оборудования (Osaka Gas, Tractebel, Cryostar, HGS) разработали инновационные системы реконденсации для СПГ-танкеров Q-Flex и Q-Max, направленные на повышение энергоэффективности и снижение эксплуатационных затрат [2, 3]. Однако до сих пор не существует единого стандарта, который бы обеспечивал оптимальный баланс между энергетическими и экономическими показателями.

**Основная часть.** Основной целью исследования является анализ существующих технологий реконденсации BOG и разработка рекомендаций по их оптимизации.

Наиболее распространенные системы:

1. LNG Jamal (Osaka Gas) – первая бортовая установка реконденсации, использующая обратный цикл Брайтона с азотом. Производительность – 3 т/ч, удельное энергопотребление – 1 кВт·ч/кг BOG.
2. TGE (Tractebel) – усовершенствованный цикл Брайтона с эффективностью 0,75 кВт·ч/кг, автоматическим регулированием температуры и давления.
3. Mark I (HGS) – система двойной компрессии с улучшенным управлением и производительностью 6 т/ч.
4. Ecorel (Cryostar) – установка для судов Q-Max с высокой производительностью (7 т/ч) и энергопотреблением 0,86 кВт·ч/кг.
5. Mark III (HGS) – система с компрессией BOG при температуре окружающей среды и морским охлаждением, потребление 0,78 кВт·ч/кг.
6. TGE Laby-GI (Tractebel) – первая каскадная система реконденсации на основе этилена и пропилена, обеспечивающая повышенную термодинамическую эффективность.

Анализ показывает, что использование каскадных циклов с хладагентами (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>/C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>) позволяет снизить энергопотребление до 0,6 кВт·ч/кг BOG, но требует более сложного технического обслуживания.

Основные критерии выбора системы реконденсации:

1. Компактность – ограниченное пространство на судне требует минимизации оборудования.
2. Стабильность работы – системы должны устойчиво функционировать при качке и изменениях нагрузки.
3. Надежность и безопасность – важны автоматическое регулирование и резервирование критических узлов.

**Выводы.** Реконденсация отпарного газа является важнейшим элементом транспортировки СПГ, влияющим на экономику и экологию отрасли. Оптимизация этих

процессов позволяет минимизировать потери топлива и сократить выбросы вредных газов.

Наиболее перспективными направлениями развития являются:

1. Интеграция каскадных циклов охлаждения для снижения энергопотребления.
2. Применение автоматизированных систем управления процессами реконденсации.
3. Внедрение новых теплоизоляционных материалов для снижения теплопотерь.

**Список использованных источников:**

1. Küver M, Clucas C, Fuhrmann N. Evaluation of propulsion options for LNG carriers // The 20th international conference and exhibition for the LNG, LPG and natural gas industries (GASTECH 2002).

2. Anderson T.N., Ehrhardt M.E., Foglesong R.E., Bolton T., Jones D., Richardson A. Shipboard Reliquefaction for Large LNG Carriers // Proceedings of the 1st Annual Gas Processing Symposium. – 2009. – P. 317-324.

3. Romero Gómez J., Romero Gómez M., Ferreiro Garcia R., De Miguel Catoira A. On board LNG reliquefaction technology: a comparative study // POLISH MARITIME RESEARCH. – 2014. – №1. – P. 77-88.