

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ РЕГАЗИФИКАЦИИ СПГ И ОБОСНОВАНИЕ НЕОБХОДИМОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Коромзин И.А.¹, Хенов Д.И.¹,

¹Национальный исследовательский университет ИТМО, г. Санкт-Петербург,
d.khenov_gaspipe@mail.ru

Ключевые слова: регазификация СПГ, нестационарные теплофизические процессы, эксергетический анализ, математическое моделирование, энергоэффективность.

Введение

Стремительное развитие мирового рынка сжиженного природного газа (СПГ) и его стратегическое значение для энергообеспечения удаленных и арктических территорий Российской Федерации обуславливают необходимость совершенствования технологий регазификации. Существующие на сегодняшний день технические решения, такие как испарители с водяным орошением (ORV), погружные подогреватели (SCV) и атмосферные испарители (AAV), обладают рядом существенных недостатков: от высокого энергопотребления и сжигания части продукта до критической зависимости от климатических условий и значительных габаритов [1, 2]. Более того, анализ научной литературы показывает, что подавляющее большинство исследований рассматривают процесс регазификации в статической постановке, не учитывая переменность внешних факторов и теплофизических свойств сред, что приводит к снижению точности проектирования и эффективности эксплуатации в реальных условиях [3]. В связи с этим актуальной научно-технической задачей является углубленное исследование нестационарных теплофизических процессов, протекающих в регазификационном оборудовании, для повышения энергоэффективности и надежности систем газоснабжения.

Основная часть

Целью настоящей работы является аналитическое обоснование необходимости перехода от статических методов расчета регазификационных установок к динамическим теплофизическим моделям, учитывающим реальные условия эксплуатации.

В ходе исследования проведен систематический обзор существующих технологий регазификации. Установлено, что наиболее распространенные решения (ORV, SCV, AAV) характеризуются либо низкой экологической безопасностью, либо высокими эксплуатационными затратами. Перспективные интегрированные схемы на основе циклов Ренкина и Брайтона, а также совмещение с воздухоразделительными установками (ВРУ) демонстрируют высокий эксергетический КПД (до 51%), однако их теоретическая эффективность, подтвержденная математическим моделированием, в реальных условиях может существенно снижаться [4].

Ключевой проблемой, выявленной в результате анализа, является отсутствие в существующих моделях учета нестационарных факторов:

1. Переменность внешних условий: резкие перепады температуры и влажности окружающего воздуха, ведущие к нестабильному теплообмену и обмерзанию поверхностей атмосферных испарителей (AAV).

2. Изменение теплофизических свойств: зависимость вязкости, теплоемкости и плотности как самого СПГ, так и промежуточных теплоносителей (водно-гликолевых смесей, фтороформа, пропана) от текущих температуры и давления, особенно вблизи критических точек.

3. Динамика переходных режимов: инерционность процессов нагрева и испарения, приводящая к запаздыванию в системах автоматического регулирования, что было продемонстрировано при анализе передаточных функций объектов хранения.

В рамках дальнейшего исследования предполагается разработка усовершенствованной математической модели теплообмена, которая будет описывать динамику изменения коэффициента теплоотдачи $\alpha(\tau)$ в зависимости от вышеперечисленных факторов. Коэффициент теплоотдачи α в общем случае не является постоянной величиной, а зависит от режима течения, теплофизических свойств сред и внешних условий, изменяющихся во времени. Для адекватного описания динамики процесса используется функция $\alpha(\tau)$, определяемая из критериального уравнения (1):

$$\alpha(\tau) = \frac{\lambda(\tau)}{d} \cdot Nu(Re(\tau), Pr(\tau)), \quad (1)$$

λ – теплопроводность среды, d – характерный размер, числа Рейнольдса Re и Прандтля Pr также зависят от времени через скорость потока и теплофизические свойства ($Nu(Re, Pr)$ зависит от: геометрии канала (труба, пластина, пучок труб), режима течения (ламинарный, турбулентный, переходный), условий на границе (постоянная температура стенки или постоянный тепловой поток). Модель позволит идентифицировать параметры системы в реальном времени и сформировать основу для перехода от реактивного ПИД-регулирования к адаптивному или предиктивному управлению процессом регазификации.

Выводы.

Проведенный анализ подтвердил, что повышение энергоэффективности регазификационных терминалов невозможно без учета динамики теплофизических процессов. Обоснована необходимость создания нестационарной математической модели, учитывающей влияние климатических факторов и переменных свойств теплоносителей. Результаты дальнейших исследований позволят разработать научно обоснованные рекомендации по выбору и эксплуатации оборудования для конкретных климатических условий, а также создать алгоритмы адаптивного управления, минимизирующие потери и обеспечивающие устойчивое газоснабжение потребителей.

Список литературы

1. ГОСТ Р 56021-2014 Газ горючий природный сжиженный. Топливо для двигателей внутреннего сгорания и энергетических установок. Технические условия.
2. Бармин И.В., Кунис И.Д. Сжиженный природный газ вчера, сегодня и завтра. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – 256 с.
3. Фальман А. Г., Агейский Д. Э. Перспективы регазификации СПГ // Вестник международной академии холода. – 2020. – № 2.
4. Мещерин И.В., Настин А.Н. Анализ технологий получения сжиженного природного газа в условиях арктического климата // Химические науки. – 2016. – №3. – С. 144–157.
5. Федорова Е.Б. Современное состояние и развитие мировой индустрии сжиженного природного газа: технологии и оборудование. – М.: РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2021. – 159 с.
6. Выгон Г., Белова М. Развитие мирового рынка СПГ: вызовы и возможности для России // Энергетический центр Московской школы управления Сколково. 2023.
7. Tarlowski J., Sheffield J. LNG import terminals – Recent Developments. M. W. Kellogg Ltd. UK. URL: http://www.cheresources.com/lng_terminals.pdf.

Коромзин Иван Александрович – аспирант 2-го года обучения (группа 7800, факультет [800] ОЦ ЭИС). Область научных интересов: математическое моделирование нестационарных теплофизических процессов, эксергетический анализ энергетических установок, автоматизация и адаптивное управление системами регазификации СПГ.

Хенов Дмитрий Иванович – аспирант 2-го года обучения (группа 7800, факультет [800] ОЦ ЭИС). Область научных интересов: сравнительный анализ технологий регазификации СПГ, интеграция регазификации с системами выработки энергии и разделения воздуха, проектирование технологических схем приема и хранения СПГ.

**COMPARATIVE ANALYSIS OF LNG
REGASIFICATION TECHNOLOGIES AND JUSTIFICATION OF THE NEED
TO STUDY UNSTEADY THERMOPHYSICAL PROCESSES**

Koromzin I.A., Khenov D.I.
ITMO University, St. Petersburg, Russia

Existing LNG regasification technologies (ORV, SCV, AAV) have high energy consumption, climatic dependence, and burn part of the product. Promising integrated cycles (Rankine, Brayton, ASU) show exergy efficiency up to 51%, but current static models ignore unsteady factors: variable ambient conditions, changing thermophysical properties, and transient dynamics. A dynamic mathematical model for the heat transfer coefficient $\alpha(\tau)$ is proposed. It enables adaptive control, reducing losses and improving energy efficiency of gas supply systems.