

УДК 621.565:621.59

М.Б. Кравченко, канд. техн. наук

Одесская национальная академия пищевых технологий, ул. Канатная, 112, г. Одесса, 65039

e-mail: kravtchenko@i.uaORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9310-2166>**СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ РАБОТЫ КРИОРЕФРИЖЕРАТОРА ГИФФОРДА-МАКМАГОНА**

Системный анализ одноступенчатого криорефрижератора Гиффорда-МакМагона выполнен с использованием волнового подхода к моделированию работы регенеративного теплообменника. Приводится описание математической модели криорефрижератора, построенной на основе уравнений материального и энергетического балансов. Подтверждена адекватность математической модели путём сравнения её результатов с опубликованными экспериментальными данными о работе одноступенчатого криорефрижератора Гиффорда-МакМагона. Расчётная эффективность работы регенеративного теплообменника получилась близкой к 100 %. Основным источником термодинамических потерь в анализируемом криорефрижераторе являются потери при теплообмене газа со стенкой рабочего цилиндра. Предложена конструкция рабочего цилиндра с развитой поверхностью теплообмена, позволяющая уменьшить термодинамические потери.

Ключевые слова: Криогенная техника. Криорефрижератор Гиффорда-МакМагона. Математическое моделирование. Регенеративный теплообменник, Термодинамические потери.

1. ВВЕДЕНИЕ

Криорефрижераторы Гиффорда-МакМагона (GM) работают по замкнутому регенеративному циклу, в котором тепло от объекта охлаждения отбирается в процессе выхлопа.

На рис. 1 приведена схема рабочего процесса в криорефрижераторе (GM). Криорефрижератор состоит из компрессора 1, концевой охладителя 2, переключателя потоков 3 и низкотемпературной части установки, представляющей собой рабочий цилиндр, внутри которого перемещается вытеснитель-регенератор 4. Перемещение вытеснителя-регенератора чаще всего осуществляется кривошипно-кулисным механизмом с приводом от отдельного электродвигателя.

Рабочий цикл криорефрижератора GM представляет собой замкнутую последовательность термодинамических процессов с газообразным рабочим веществом, обычно, гелием. Эта последовательность включает следующие этапы:

- а) сжатие и выпуск газа в цилиндр (1–2);
- б) изобарное охлаждение газа при перемещении вытеснителя-регенератора вверх (2–3);
- в) выхлоп газа, обеспечивающий холодопроизводительность установки (3–4);
- г) нагрев газа при перемещении вытеснителя-регенератора вниз (4–1).

Процессы нагрева и охлаждения газа в криорефрижераторе GM проходят практически изобарно, видимо, поэтому *Вильям Гиффорд* рассматривал свой цикл как аналог цикла *Брайтона*, в котором расши-

рение газа в детандере заменено процессом выхлопа [1].

В последние десятилетия криорефрижераторы GM получили широкое распространение. Основными областями применения криорефрижераторов GM являются: криовакуумная техника; установки для реконденсации гелия; ожижители азота малой производительности; а также разнообразные объекты для научных исследований при криогенных температурах.

Несмотря на существенный прогресс к созданию криорефрижераторов GM, число работ по термодинамическому анализу их циклов GM сравнительно невелико [1–6]. Одна из причин недостаточного количества теоретических работ по анализу цикла GM — сложность процессов, протекающих в реальных, а не идеализированных охладителях GM. Все процессы в реальных установках GM — нестационарные, сопровождаемые одновременным изменением массы, температуры и давления рабочего вещества.

Реализация потенциальных возможностей установок GM сдерживается отсутствием глубокого термодинамического анализа этого цикла, на основе которого можно было бы обозначить пути их совершенствования.

В пользу того, что потенциал криорефрижераторов GM раскрыт далеко не полностью, говорит чрезвычайно низкая частота циклов у серийных установок. Типичное число циклов для криорефрижераторов GM находится в пределах 60–70 циклов в минуту. Казалось бы, достаточно немного повысить число циклов работы установки GM, и это приведёт к существенному повышению её холодопроизводительности