

УДК 621.565:621.59

¹Г.К. Лавренченко, доктор техн. наук; ²М.Б. Кравченко, доктор техн. наук¹Восточноевропейская ассоциация производителей технических газов «СИГМА», а/я 188, г. Одесса, Украина, 65026²Одесская национальная академия пищевых технологий, ул. Дворянская, 1/3, г. Одесса, Украина, 65082e-mail: ¹uasigma@mail.ru; ²kravtchenko@i.uaORCID: ¹http://orcid.org/0000-0002-8239-7587; ²http://orcid.org/0000-0002-9310-2166

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ СТУПЕНИ КРИОРЕФРИЖЕРАТОРА ГИФФОРДА-МАК-МАГОНА С РЕГЕНЕРАТОРОМ, ЗАПОЛНЕННЫМ ЦЕНОСФЕРАМИ

Создание криорефрижераторов Гиффорда-Мак-Магона (ГМ) для охлаждения при температурах ниже 4,2 К является очередным качественным скачком в развитии техники получения гелиевых температур. Приводится сравнительный анализ различных видов насадок регенераторов, позволяющих получать температуры ниже 4,2 К. Обоснованы преимущества насадок из ценосфер, заполненных гелием. С использованием волнового подхода к моделированию работы регенератора проведен анализ работы двухступенчатого криорефрижератора ГМ, имеющего холодопроизводительность 0,2 Вт на температурном уровне 4,2 К. Расчётное значение длины регенератора с насадкой из ценосфер для такого криорефрижератора оказалось равным 320 мм, т. е. существенно больше, чем длина регенератора с насадкой из интерметаллических соединений редкоземельных элементов. Полученное значение длины не выходит за рамки технически возможных размеров регенераторов для криорефрижераторов ГМ. Преимущества насадки из ценосфер могут компенсировать увеличение размеров криорефрижераторов.

Ключевые слова: Криорефрижератор Гиффорда-Мак-Магона. Математическое моделирование. Регенератор. Ценосферы. Гелий.

1. ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия значительно усовершенствовались и получили широкое распространение криорефрижераторы Гиффорда-Мак-Магона (ГМ). Основные области применения криорефрижераторов ГМ — криовакуумная техника; установки для конденсации гелия; ожижители азота малой производительности; разнообразные криостаты для научных исследований при криогенных температурах.

Минимальная температура, которая может быть достигнута в криорефрижераторе ГМ, теоретически ничем не ограничена, но на практике она определяется эффективностью работы его регенератора при низких температурах.

В криорефрижераторах ГМ, которые выпускались до начала 90-х годов прошлого века, в качестве насадки низкотемпературной ступени регенератора обычно использовались свинцовые шарики. Это объясняется тем, что при температуре ниже 20 К теплоёмкости большинства материалов быстро снижаются. Использование же насадки из свинца обеспечивает достаточно эффективную работу регенератора в диапазоне температур 10–20 К.

При температуре 10 К объёмная теплоёмкость меди, из которой обычно изготавливают насадку высокотемпературной ступени криорефрижератора ГМ, равна всего лишь 7,68 мДж/(см³К). При этом объёмная теплоёмкость газообразного гелия, движу-

щегося в таком теплообменнике, например, при давлении 6 бар, составляет 239 мДж/(см³К), т. е. намного больше теплоёмкости меди. Объёмная теплоёмкость свинца при температуре 10 К равна 155 мДж/(см³К), что уже сопоставимо с объёмной теплоёмкостью гелия и существенно превосходит объёмную теплоёмкость меди.

При понижении температуры до 4 К, объёмная теплоёмкость свинца падает до 7,94 мДж/(см³К). Объёмная же теплоёмкость гелия при этой температуре, наоборот, увеличивается и при давлении 6 бар составляет 465 мДж/(см³К). Поэтому в криорефрижераторах ГМ с теплообменниками, в которых используется насадка из свинцовых шариков, не удается получать температуры ниже 7–10 К.

К началу 90-х годов прошлого века появился ряд публикаций [1–7], в которых рассматривалась возможность использования интерметаллических соединений редкоземельных элементов в качестве материала насадки для низкотемпературных теплообменников. Исследования показали, что эти материалы обладают аномально высокой теплоёмкостью в диапазоне температур от 4 до 10 К. (рис. 1).

Высокая теплоёмкость этих материалов связана с их магнитными свойствами. В точке Кюри в ферромагнитных материалах происходит фазовый переход второго рода, в результате которого они теряют способность к спонтанному намагничиванию и становятся обычными парамагнитными материалами. Это