

Совершенствование конструкции и работы электрогазодинамического (ЭГД) компрессора для холодильной техники и систем кондиционирования

Д-р техн. наук Г.И. БУМАГИН, А.Г. ЛАПКОВА
Омский государственный технический университет,
канд. техн. наук С.Г. ОВЧИННИКОВ
НПФ «Экотерм», г. Омск,
канд. техн. наук А.Е. РАХАНСКИЙ
ООО НТК «Криогенная техника», г. Омск

The bases of the development of electric-gas dynamic compressor (EGD) are considered; schematic diagrams of the stage of such a compressor and of the design of multi-stage EGD-compressor on the basis of this stage are presented. The flow rate and head characteristics of multi-stage EGD-compressor with the permanent voltage supply are given. Power losses in the compressor and ways for their reduction are considered. The advantages of use of pulsed voltage supply instead of permanent one are considered. The ways for further design improvement of the multi-stage EGD-compressor are outlined.

ЭГД-компрессор относится к ЭГД-преобразователям энергии, в которых электрическая энергия непосредственно преобразуется во внутреннюю энергию сжатого рабочего тела (ЭГД-компрессор, ЭГД-насос) или, наоборот, внутренняя энергия сжатого рабочего тела преобразуется непосредственно в электрическую без механических посредников (ЭГД-генератор, ЭГД-детандер).

Принцип работы ЭГД-преобразователей энергии основан на силовом взаимодействии униполярно заряженного потока с сильным электрическим полем. Поток заряжается с помощью коронного разряда, возникающего при приложении напряжения между эмиттером и коллектором.

За счет вязкостного взаимодействия ионов с молекулами нейтральной рабочей среды последние приходят в движение с определенной скоростью \bar{W}_x , обеспечивая определенный расход и перепад давления.

Основное преимущество ЭГД-компрессора перед механическими аналогами — полное отсутствие движущихся механических частей и, как следствие, смазки, бесшумность работы, плавное регулирование производительности и перепада давлений.

Основные работы по созданию ЭГД-компрессоров в последнее время выполнялись в Омском государственном техническом университете, НТК «Криогенная техника» и НПФ «Экотерм» А.Е. Раханским и С.Г. Овчинниковым [2, 3].

В работе [3] основное внимание было уделено выбору оптимальной конструкции ступеней ЭГД-компрессора, выбору рабочего тела (хладагента) и его параметров, при которых ступень ЭГД-компрессора работает наиболее эффективно.

За основу ступени ЭГД-компрессора была принята ступень, которая при исследовании ЭГД-насоса показала лучшую работу [1]. Однако она была модернизирована

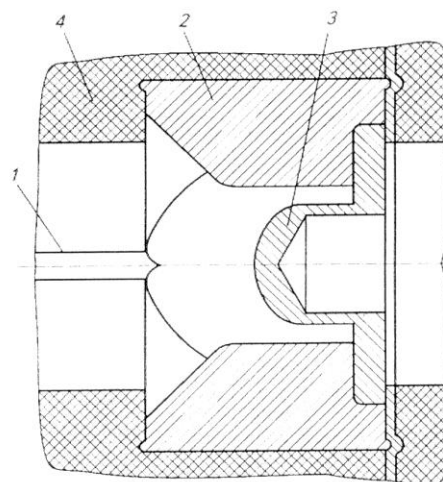


Рис. 1. Принципиальная схема ступени ЭГД-компрессора:
1 — эмиттер; 2 — коллектор; 3 — деионизатор;
4 — диэлектрическая стенка

(рис. 1). В этой ступени эмиттер 1 – тонкостенная никелевая трубка диаметром 0,8 – 1,0 мм; коллектор 2 – конус с центральным отверстием, в которое вставлен специальный деионизатор 3, позволяющий провести полную рекомбинацию потока.

На базе такой ступени был разработан экспериментальный образец многоступенчатого ЭГД-компрессора. Компрессор с источником высокого напряжения (ИВН) размещается в специальном металлическом кожухе, заполненном хладагентом.

Металлический кожух одновременно выполняет роль экрана от электрических полей, возникающих между электродами при работе ЭГД-компрессора. Такой многоступенчатый ЭГД-компрессор содержит 324 последовательно расположенные ступени, установленные в параллельных каналах, соединенных между собой коллекторами, находящимися в нижней и верхней частях ЭГД-компрессора. Экспериментальные расходно-напорные характеристики многоступенчатого ЭГД-компрессора при различных постоянных напряжениях питания, представленные на рис. 2, показывают, что при массовом расходе R22 от 0,8 до 2,4 г/с перепад давления в ЭГД-компрессоре составляет 600...1600 кПа.

Напряжение, подаваемое от источника высокого напряжения (ИВН), находится в пределах 15...25 кВ. С увеличением напряжения питания возрастают как расход, так и перепад давления. При таких расходах и перепадах давления холодопроизводительность цикла на температур-

ном уровне $t_0 = 0^\circ\text{C}$ может достигать 150...350 Вт при затратах мощности 200...300 Вт.

Эффективность работы ЭГД-компрессора (адиабатный КПД) составляет $\eta_a = 35 - 37\%$. При повышении давления эффективность работы ЭГД-компрессора существенно возрастает и при давлении свыше 10 бар адиабатный КПД может достигать 50 % и выше.

Анализ работы ЭГД-компрессора при питании постоянным напряжением показал [3], что основными потерями энергии в процессах ЭГД-преобразования являются потери от негативного влияния объемного заряда, постоянно находящегося в межэлектродном пространстве. Эти потери, составляющие свыше 50 % от суммы всех потерь, обусловлены тем, что напряженность электрического поля от объемного заряда возле коронирующей поверхности эмиттера направлена противоположно внешнему электрическому полю между электродами. Напряженность электрического поля возле коронирующего электрода от объемного заряда в этом случае максимальна. В результате суммарное электрическое поле возле поверхности эмиттера резко уменьшается, сокращается и выход объемного заряда из генерирующей части коронного разряда, что существенно уменьшает конвективный ток и мощность ЭГД-преобразования энергии в основной рабочей зоне.

Кроме потерь от объемного заряда имеют место также потери, связанные с неполной нейтрализацией потока на поверхности коллектора. Часть объемного заряда проскальзывает через отверстие в коллекторе в межступенчатое пространство, затормаживает поток, уменьшая мощность, развиваемую ступенью.

Для полной рекомбинации зарядов в потоке на выходе каждой ступени в центральном отверстии коллектора установлен специальный деионизатор, заставляющий униполярно заряженный поток дважды изменять свое направление на 90° , что приводит к полной нейтрализации потока.

Часть потерь от объемного заряда была устранена путем оптимизации конструкции ступеней ЭГД-компрессора.

При экспериментальном исследовании образца многоступенчатого ЭГД-компрессора было также замечено негативное взаимное влияние электрических полей в соседних параллельных каналах. Было предложено устанавливать параллельные ступени таким образом, чтобы потоки в соседних каналах многоступенчатого ЭГД-компрессора были противоположно направлены.

Как показали дальнейшие экспериментальные исследования, такая установка параллельно расположенных ступеней не только позволяет уменьшить негативное влияние электрических полей в соседних ступенях, но и при-

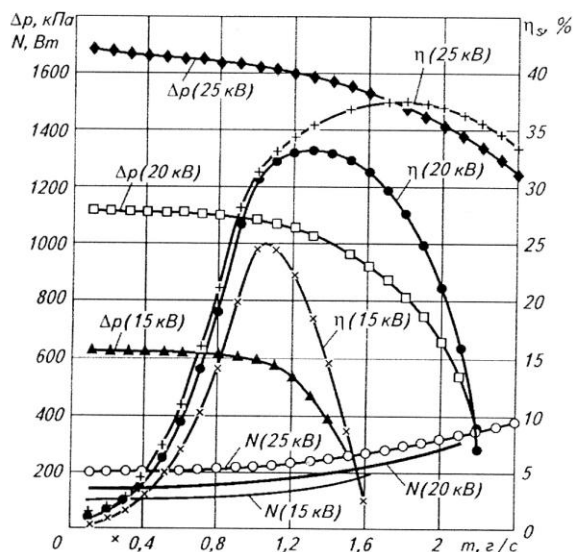


Рис. 2. Расходно-напорные характеристики многоступенчатого ЭГД-компрессора при различных значениях питающего напряжения

водит к улучшению работы параллельных ступеней по сравнению с работой отдельной ступени.

Все эти методы повышения эффективности работы ЭГД-компрессора привели к возрастанию адиабатного КПД с 10 – 15% до 30 – 35%.

Для снижения больших потерь от объемного заряда было предложено применить в качестве источника питания пульсирующее напряжение.

Особенность работы ступеней ЭГД-компрессора при пульсирующем напряжении заключается в том, что горение коронного разряда на острие коронирующего электрода происходит не непрерывно, а прерывисто. Коронный разряд загорается в момент, когда суммарная напряженность поля возле поверхности эмиттера становится равной начальной напряженности зажигания, а напряжение между электродами – больше или равно начальному. Угасает коронный разряд в момент, когда суммарная напряженность поля возле поверхности эмиттера становится меньше начальной. Корона не горит, пока суммарная напряженность поля меньше начальной. В результате образование объемного заряда и конвективного тока возле поверхности эмиттера происходит отдельными порциями – волнами, разделенными между собой пространством, свободным от зарядов.

Исследование отдельной ступени и многоступенчатого ЭГД-компрессора при пульсирующем напряжении, проведенное в [2], привело к существенному возрастанию его адиабатного КПД – с 30 – 35% до 40 – 45%, а при отдельных параметрах рабочего тела – до 60%. Особенно существенно улучшились характеристики ступени и многоступенчатого образца ЭГД-компрессора, когда выполнялось условие согласованности частоты пульсирующего напряжения f с длиной зоны ЭГД-преобразования L_p , равной длине волны объемного заряда, и средней скоростью движения объемного заряда \bar{W}_{qx} :

$$f = \frac{\bar{W}_{qx}}{2L_p}. \quad (1)$$

При исследовании ступени с различной частотой f пульсирующего напряжения (при эффективном значении напряжения $U_{эф} = 25$ кВ) наилучшая работа наблюдалась при частоте $f = 1000$ Гц, которая соответствует длине зоны ЭГД-преобразования $L_p = 5$ мм и средней скорости движения зарядов $\bar{W}_{qx} = 10$ м/с [2].

Расходно-напорные характеристики многоступенчатого ЭГД-компрессора при пульсирующем напряжении показывают, что при эффективном напряжении $U_{эф} = 30$ кВ многоступенчатый ЭГД-компрессор при оптимальном массовом расходе $m = 2,4$ г/с обеспечивает перепад давле-

ния $\Delta p_n \geq 2000$ кПа при адиабатном КПД $\eta_a = 43\%$ [2].

Возрастание адиабатного КПД многоступенчатого ЭГД-компрессора при пульсирующем напряжении обусловлено прежде всего уменьшением негативного влияния поля объемного заряда в зоне ЭГД-преобразования. Это связано с тем, что при пульсирующем напряжении объемный заряд в зону ЭГД-преобразования поступает порциями – волнами через определенные промежутки времени и напряженность поля объемного заряда меняется от 0 в момент загорания коронного разряда до максимума в момент его угасания. При питании же ЭГД-компрессора постоянным напряжением вся зона ЭГД-преобразования заполнена объемным зарядом постоянно и полностью, и напряженность электрического поля от объемного заряда всегда равна максимальной величине. Это негативно сказывается на выходе объемного заряда из внутренней зоны коронного разряда и на уменьшении возникающего конвективного тока и мощности ступени. При пульсирующем напряжении в связи с периодическим уменьшением напряженности поля объемного заряда и увеличением выхода объемного заряда и конвективного тока существенно сокращаются потери от объемного заряда и увеличивается мощность ступеней.

Многоступенчатый ЭГД-компрессор по своим массовым характеристикам уже превосходит механические аналоги, так как основной материал ЭГД-компрессора – это пластмассы типа капролона и фторопласта, однако по габаритным характеристикам он уступает аналогам. В разработанной конструкции ЭГД-компрессора имеется недостаток – между последовательно установленными ступенями имеются пустые, нерабочие, каналы, занимающие такое же пространство, что и ступени ЭГД-компрессора. Использовать эти пустые каналы – одна из задач дальнейшего совершенствования конструкции многоступенчатого ЭГД-компрессора.

Однако уже сегодня можно сказать, что многоступенчатый ЭГД-компрессор способен эффективно работать в малых холодильных установках и системах кондиционирования и жизнеобеспечения.

Список литературы

1. Бумагин Г.И., Раханский А.Е. Результаты экспериментального исследования ступеней ЭГД-компрессора // Криогенное оборудование и криогенные технологии: Сб. науч. трудов. – Омск: Сибкриотехника, Ч. 2, 1997.
2. Овчинников С.Г. Разработка и исследование электрогазодинамического (ЭГД) компрессора при пульсирующем напряжении для холодильной техники и систем кондиционирования. – Омск: ОмГТУ, канд. диссерт., 2005.
3. Раханский А.Е. Разработка электрогазодинамического компрессора для холодильной техники и систем кондиционирования воздуха. – Омск: ОмГТУ, канд. диссерт., 2001.