

**В. А. Максимов, В. К. Хайсанов, Е. А. Новиков,  
В. А. Дементьев, М. Н. Серазутдинов**

## **К ВОПРОСУ КЛАССИФИКАЦИИ «СУХИХ» ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ УПЛОТНЕНИЙ КОМПРЕССОРНЫХ МАШИН, ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУИРОВАНИЯ**

*Ключевые слова: сухое газодинамическое уплотнение, центробежный компрессор.*

*Представлена классификация сухих газодинамических уплотнений (СГУ) компрессорных машин. Изложены особенности конструирования СГУ. Отмечено, что для создания СГУ необходимо провести комплекс научно-исследовательских и конструкторских работ, которые может провести только крупная фирма, обладающая обширной исследовательской и производственной базой.*

*Key words: dry gasdynamic seal, centrifugal compressor.*

*Classification of dry gasdynamic seals (DGS) for compressor machines has been presented. Details of DGS engineering have been set forth. It has been noted that only a large company having extensive research and production facilities has the power to carry out a package of scientific-research and development work necessary for DGS engineering.*

Сухое газодинамическое уплотнение (СГУ) для компрессорных машин является узлом индивидуального исполнения [1]. Это обусловлено большим количеством различных компрессорных машин отличающихся по геометрическим размерам, свойствам перекачиваемой среды, режимам работы к которым относятся скорость вращения ротора, начальные и конечные давления и температуры, технологические особенности и возможности системы вспомогательного оборудования от которых зависит, например тип уплотнения отделяющего масляную полость подшипника от рабочих пар СГУ, недопустимости утилизации утечки в атмосферу или попадания буферного газа в перекачиваемый продукт. В зависимости от свойств перекачиваемой среды используются различные материалы пар трения и покрытия их рабочих поверхностей, в зависимости от уплотняемого давления применяются различные конструкции элементов обеспечивающих одновременно подвижность аксиально-подвижного кольца и его уплотнение в месте сопряжения с неподвижным корпусом. Кроме того в зависимости от свойств среды, её температуры и уплотняемого давления предъявляются различные требования к вторичным эластичным уплотнительным элементам.

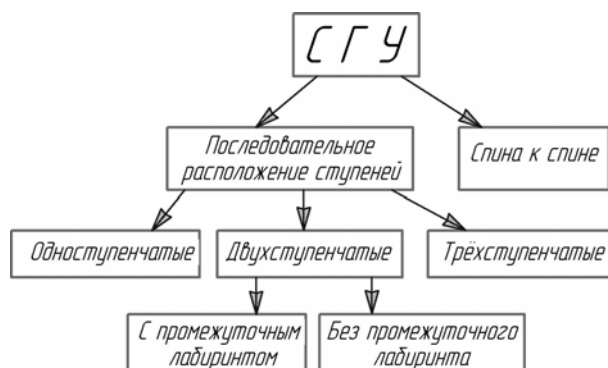
Большое количество указанных признаков затрудняет классификацию СГУ, однако все производители уплотнений в большинстве уже определились с основными конструктивными решениями, которыми возможно перекрыть существующее разнообразие поля параметров компрессорных машин, применяемых в различных технологических процессах.

По конструктивному исполнению СГУ по нашему мнению следует разделить на следующие группы (рис. 1):

1 – по расположению уплотнительных ступеней СГУ делятся на схемы с последовательным расположением ступеней и по типу «спина к спине»;

2 – СГУ с последовательным расположением ступеней подразделяются на –одно-, -двух-, -трёхступенчатые уплотнения;

3 – двухступенчатые уплотнения с последовательным расположением ступеней делятся на уплотнения с промежуточным лабиринтом и без промежуточного лабиринта.



**Рис. 1 – Классификация СГУ по конструктивному исполнению**

На рис. 1 представлена группировка уплотнений по конструктивному исполнению, определяющему область применения СГУ а именно:

- уплотнение с расположением пар трения по типу «спина к спине» применяется в компрессорах где недопустима попадание перекачиваемого газа в окружающую среду;

- одноступенчатое уплотнение применяется в компрессорах перекачивающих не опасные газы, в которых допускается их попадание в окружающую среду;

- двухступенчатое (тандемное) уплотнение наиболее часто применяется в компрессорах. ОАО «Газпром» в «Типовых технических требованиях...» определил данный тип уплотнений для установки в компрессора эксплуатируемые на линейных газопроводах. Двухступенчатые СГУ применяются в компрессорах с допустимой утечкой газа в

окружающую среду, при этом ступень со стороны проточной части работает как основная, ступень со стороны подшипника как резервная на случай прорыва газа через основную уплотнительную ступень;

- двухступенчатое уплотнение с промежуточным лабиринтом применяется в компрессорах в которых недопустима попадание перекачиваемого газа в окружающую среду и попадание буферного газа в перекачиваемый компрессором газ;

- трёхступенчатые уплотнения применяются в компрессорах высокого давления. Две ступени со стороны проточной части являются рабочими, на них «срабатывается» уплотняемое давление, ступень со стороны подшипника является резервной на случай разгерметизации рабочих ступеней уплотнения.

В качестве барьерного уплотнения разделяющего масляную полость подшипника и газодинамические рабочие пары СГУ, в зависимости от наличия достаточного количества азота, который в большинстве случаев используется в качестве барьерного газа применяют лабиринтные уплотнения, щелевые уплотнения с плавающими кольцами. В ряде случаев находят применение радиальные щелевые уплотнения или газодинамические пары установленные по схеме спина к спине.

По направлению вращения уплотнения подразделяются на одно и двунаправленные. У каждой фирмы производителя СГУ имеется собственный профиль газодинамической канавки который, судя по рекламным буклетам, наилучшим образом обеспечивает надёжную работу СГУ на всех режимах эксплуатации компрессора. Для классификации СГУ значение имеет только направление вращения.

Габаритные размеры СГУ определяются диаметром вала и расточкой в крышке или корпусе сжатия компрессора в месте установки уплотнения. Эти размеры, в конечном счёте и определяют размеры пары трения СГУ, а следовательно и диапазон работы уплотнений. У большинства фирм-производителей СГУ существуют типоразмерные ряды определяемые диаметром вала, корпуса и осевым размером. Применение стандартного решения из номенклатуры фирмы-производителя СГУ может существенно снизить стоимость системы уплотнений.

Отметим ещё одну группу параметров, не классифицирующих СГУ, но определяющих их работу – это режимные параметры – давление уплотняемого газа, его температура и скорость вращения ротора. Эти параметры совместно со свойствами газа характеризуют важное условие функционирования уплотнений – расход утечки газа, относящийся к безвозвратным потерям перекачиваемого продукта. Фирмы-производители СГУ, имеющие в своём распоряжении современные программные комплексы для расчёта СГУ, обширные экспериментальные исследования и значительный опыт внедрения, имея типоразмерные

ряды перекрывают большой спектр режимных параметров. При заказе уплотнения режимные параметры и свойства газа заполняются в опросных листах. С учётом этого и руководствуясь типоразмером уплотнения фирма-производитель СГУ определяет расход утечки газа через уплотнение.

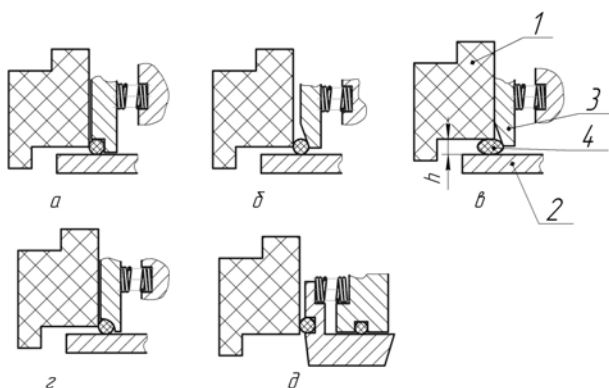
Приведём пример записи СГУ, согласно представленной классификации, для ГПА установленного на линейных газопроводах: двухступенчатое, двунаправленное уплотнение с концевым лабиринтом.

Из проведённого анализа конструктивных признаков СГУ можно сделать вывод, что руководствуясь только изложенной классификацией для потребителя уплотнений затруднительно заказать требующиеся СГУ и уплотнение является узлом индивидуального исполнения.

Конструирование СГУ связано с некоторыми особенностями, сталкиваясь с которыми приходится разработчикам СГУ. Эти особенности не прописаны имеющимися ГОСТами. В качестве примера рассмотрим место расположения резинового уплотнительного кольца с тыльной стороны аксиально-подвижного кольца пары трения. Назначение этого резинового кольца – разделение области высокого давления от области низкого давления. При этом резиновое кольцо не должно препятствовать подвижности аксиально-подвижного кольца. Рекомендаций по выбору формы канавки, диаметального натяга резинового кольца на корпус уплотнения или угла наклона стального кольца прижимающего резиновое кольцо к аксиально-подвижному не существует. Чтобы добиться работоспособности описанной конструкции фирмам-производителям приходится проводить множество дорогостоящих экспериментальных и расчётных исследований. Рекомендации к проектированию уплотнений составляют коммерческую тайну, а в рекламных буклетах содержатся лишь общие сведения. Из литературы известны формы канавок выполненные на прижимающем стальном кольце, представленные на рис. 2, это канавка с прямоугольным профилем (рис. 2а), канавка с наклоном прижимающей поверхности под некоторым углом (рис. 2б,в), канавка, повторяющая круглое сечение уплотнительного кольца (рис. 2г). Все эти формы доказали свою работоспособность в СГУ различных производителей и применение каждой формы обусловлено только проведёнными на начальных стадиях разработки СГУ исследованиями. С ростом уплотняемых давлений функцию разделения областей высокого и низкого давлений удаётся реализовать в конструкции представленной на рис. 2д.

Рассмотрим подробнее конструктивный элемент, состоящий из четырёх деталей (рис. 2,в). Предположим, что зазор  $h$  между аксиально-подвижным кольцом 1 и корпусом 2 выбран больше оптимального. В этом случае при высоком перепаде давлений возможно попадание резинового уплотнительного кольца в зазор  $h$ , что приведёт к потере подвижности аксиально-подвижного кольца.

В другом случае под собственным весом аксиально-подвижное кольцо после установки уплотнения в корпус сжатия компрессора (уплотнение из транспортного вертикального положения устанавливается в горизонтальное) соприкасается в верхней точке с корпусом 2, в нижней точке произойдёт двухкратное увеличение выбранного конструкторского зазора. Значительная неравномерность зазоров по окружности сопрягаемых поверхностей может привести к перекоосу аксиально-подвижного кольца в момент подачи газа в корпус компрессора и начала вращения ротора, что в свою очередь может привести к соприкосновению вращающегося и аксиально-подвижного колец, а принимая во внимание малость зазора между кольцами, порядка 1...5 мкм, может привести к выходу уплотнения из строя.



**Рис. 2 – Конструктивное исполнение формы канавки под резиновым уплотнительным кольцом**

С другой стороны если выбрать слишком маленький зазор, то в результате радиальных деформаций от сил давлений действующих на аксиально-подвижное кольцо возможно его заклинивание с корпусом и потеря осевой подвижности кольца, что также приведёт к выходу уплотнения из строя.

Повторимся ещё раз, что используемая терминология в отношении зазоров «большой» или «маленький» использована только с целью обозначить внимание при проектировании на ответственный элемент уплотнения. Реальные же числовые значения определяются термоупругогазодинамическим расчётом, экспериментальными исследованиями и опытом внедрения и соответственно представляют коммерческую тайну компаний.

В заключении необходимо отметить, что в настоящее время множество фирм предпринимают попытки разработать СГУ собственной конструкции. Однако разработать надёжную конструкцию, отвечающую всем требованиям эксплуатации компрессора под силу только организации имеющей значительные конструкторские и научные традиции, большой опыт эксплуатации компрессорных машин, современные испытательную и производственную базы. Одним из отечественных лидеров разработки, производства и внедрения компрессорных машин с сухими газодинамическими уплотнениями собственного производства совместно с ОАО «Казанькомпрессормаш» в настоящее время является ЗАО «НИИтурбокомпрессор им. В.Б. Шнеппа» г. Казань.

### Литература

1. Максимов, В.А. Компрессорное и холодильное машиностроение на современном этапе/ В.А. Максимов, А.А. Мифтахов, И.Г. Хисамеев //Вестник Казан.технол.ун-та. – Казань, 1998. – №1. – С. 104-113.
2. Сайфетдинов, А.Г. Методика экспериментального исследования процессов в рабочей камере роторного компрессора внутреннего сжатия / А.Г. Сайфетдинов, А.Ю. Кирсанов, М.С. Хамидуллин, И.Г. Хисамеев // Вестник Казан. технол. ун-та. – 2010. -№9. – С. 157-164.
3. Быков, А.В. Холодильные компрессоры/А.В. Быков, Э.М. Бежанишвили, И.М. Калнинь и др.; под ред. А.В. Быкова.-2-е изд., перераб. и доп.-М.: Колос, 1992. – С. 50-76.

© **В. А. Максимов** – д-р техн. наук, проф., зав. каф. компрессорных машин и установок КНИТУ; **В. К. Хайсанов** – канд. техн. наук, нач. отд. НИИ центробежных и роторных компрессоров им. В.Б. Шнеппа; **Е. А. Новиков** – канд. техн. наук, доц. каф. компрессорных машин и установок КНИТУ; **В. А. Дементьев** - инженер-конструктор 3 категории НИИ центробежных и роторных компрессоров им. В.Б. Шнеппа; **М. Н. Серазутдинов** – д-р техн. наук, проф., зав. каф. теоретической механики и сопротивления материалов КНИТУ, serazmn@mail.ru.