

# Расчёт уплотнительных колец сухого газодинамического уплотнения

Е.А. Новиков, А.Р. Батыршин, Р.А. Рахманкулов

(АО «НИИТурбокомпрессор им. В.Б. Шнеппа», Группа ГМС)

В работе рассматривается влияние формы зазора, образованного кольцами сухого газодинамического уплотнения (СГУ) на надёжность узла. Показано, что форма зазора определяется давлением и температурой газа, окружающего уплотнительные кольца. Представлен алгоритм проектирования формы зазора, который на всех режимах работы компрессора исключает контакт уплотнительных колец.

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

## Calculation of sealing rings for dry gas-dynamic seal

E.A. Novikov, A.R. Batyrshin, R.A. Rakhmankulov (JSC "NIITurbokompressor named after V.B. Shnepp", HMS Group)

The influence of the form of the gap formed by the rings of dry gas-dynamic seal (DGS) on the reliability of the unit is considered in this work. It is shown that the shape of the gap is determined by the pressure and temperature of the gas surrounding the sealing rings. An algorithm for calculation the gap shape is presented, which in all operating modes of the compressor eliminates the contact of the sealing rings.

**Keywords:** centrifugal compressor, dry gas-dynamic seal, reliability.

Надёжность центробежного компрессорного агрегата в целом определяется надёжностью наиболее ответственных узлов и деталей. К наиболее ответственным узлам относятся подшипники и уплотнения корпуса сжатия. В первую очередь, это определяется условиями функционирования узлов. Рабочие поверхности опорно-уплотнительных узлов, как правило, разделяются слоем масляной или газовой смазки, толщина которой составляет от нескольких сотен микрометров в масляных подшипниках до нескольких микрометров в сухих газодинамических уплотнениях (СГУ). Величина рабочего зазора между уплотнительными кольцами СГУ является наименьшим зазором между вращающейся и неподвижной деталями компрессора. При этом на уплотнительные кольца СГУ действуют силы от неравномерного поля температуры и давления в уплотнительном зазоре. Величина результирующей силы от давления, действующего на радиальные поверхности колец, составляет разницу от уплотняемого давления и давления за уплотнением (в линии утечек после первой ступени СГУ). В осевом направлении, величина силы от давления, действующего на тыльные (не

рабочие) поверхности может составлять несколько тонн. Например, у представителя типоразмерного ряда СГУ разработки АО НИИТурбокомпрессор им. В.Б. Шнеппа (АО НТК), входящего в группу ГМС, для центробежного компрессора (ЦК) ГПА 16 «Волга», при уплотняемом давлении 56 кг/см<sup>2</sup> сила действующая на тыльную поверхность аксиально-подвижного кольца составляет 8,8 тонн. Силы, действующие на тыльные стороны уплотнительных колец, направленные в сторону рабочего зазора, могут привести к контакту рабочих поверхностей колец и их разрушению. Для исключения разрушения уплотнительных колец необходимо исключить их контакт на всех режимах работы, включая режимы пуска и останова компрессорного агрегата при наличии давления газа в корпусе сжатия.

На рис. 1 представлены возможные формы уплотнительного зазора в момент пуска компрессорного агрегата при наличии давления в корпусе сжатия. На данном режиме форма зазора определяется силами давления газа, окружающего уплотнительные кольца. Уплотнительные кольца при формах зазоров, представленных на рис. 1 (а, в), контактируют по поверх-

ности соответствующей радиусу  $R_1$ . В случае деформации колец, представленной на рис. 1 (б) контакт происходит по всей рабочей поверхности уплотнительных колец. Формы зазоров, представленные на рис. 1 (г, д), под действием перепада между высоким уплотняемым давлением  $P_0$  и давлением за уплотнением  $P_2$ , позволяют проникать уплотняемому газу между рабочими поверхностями колец. Наличие газового слоя между рабочими поверхностями уплотнительных колец, обеспечивает отсутствие их контакта в момент начала вращения ротора.

На рис. 2 представлены возможные формы уплотнительного зазора в момент останова компрессорного агрегата при наличии давления в корпусе сжатия, когда скорость вращения ротора  $n$  уменьшается до нуля, а уплотняемое давление и температура  $P_0, T_0$  - расчётные значения. За время уменьшения скорости вращения ротора уплотнительные кольца не восстанавливают форму, деформированную от действия неравномерного поля температуры. Сила реакции газового слоя, создаваемая газодинамическими канавками при вращении ротора компрессора, уменьшается до нуля. Уплотнительные кольца при формах зазора, представленных на рис. 2 (а, б), контактируют по поверхностям соответствующим радиусам  $R_{вн}$  и  $R_1$ . Формы зазоров, представленные на рис. 2 (в, г), обеспечивают отсутствие контакта за счёт наличия газового слоя, образованного под действием перепада между уплотняемым давлением и давлением за уплотнением.

Представленный анализ режимов работы СГУ, позволяет определить, что с точки зрения обеспечения отсутствия контакта между рабочими поверхностями колец, предпочтительными формами зазоров являются формы, представленные на рис. 1 (г, д) и рис. 2 (в, г).

Для определения формы уплотнительного зазора в математической модели функционирования СГУ, наряду с уравнениями газовой динамики, характеризующими распределение давления и температуры газа в зазоре, необходимо использовать уравнения определяющие деформации уплотнительных колец [1]. Деформации колец СГУ определяются разогре-

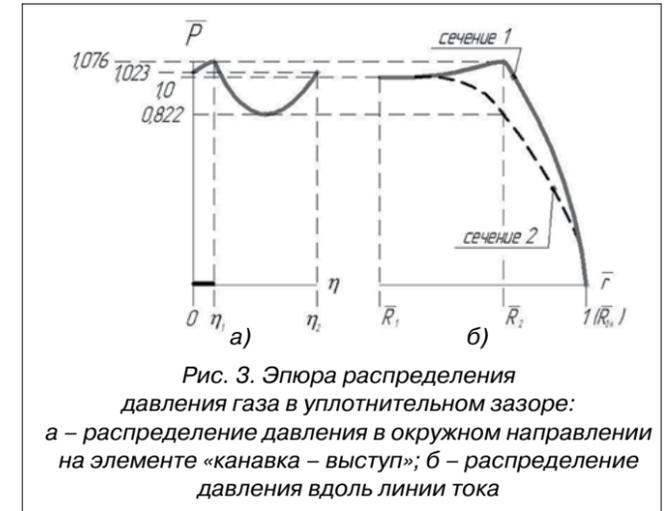


Рис. 3. Эпюра распределения давления газа в уплотнительном зазоре: а – распределение давления в окружном направлении на элементе «канавка – выступ»; б – распределение давления вдоль линии тока

вом газа в уплотнительном зазоре, действием сил от давления, окружающего уплотнительные кольца и поля давления в уплотнительном зазоре. Учёт термоупругих деформаций позволяет спроектировать форму уплотнительного зазора, исключающего контакт рабочих поверхностей колец на всех режимах работы СГУ.

На рис. 3-6 проиллюстрирован алгоритм проектирования формы уплотнительного зазора СГУ.

Первым этапом расчёта определяются распределения давления и температуры газа в уплотнительном зазоре, которые на элементе ограниченном сегментом «канавка-выступ» представлены на рис. 3 и 4.

На рис. 3 (а) представлено сечение эпюры распределения давления, в окружном направлении, соответствующее радиусу окончания газодинамических канавок  $R_2$ . Максимального значения безразмерного давления  $\bar{p} = 1,076$  достигает на выходе из газодинамической канавки, соответствующей углу  $\eta = \eta_1$ . На элементе «выступ» давление снижается от максимального значения  $\bar{p} = 1,076$  до минимального значения  $\bar{p} = 0,822$  (соответствует середине элемента «выступ»  $\eta = (\eta_1 + \eta_2)/2$ ). Далее безразмерное давление повышается до значения соответствующего входу в газодинамическую канавку  $\bar{p} = 1,023$  (на рис. 3 (а)  $\eta = \eta_2$ ).

На рис. 3 (б) представлено сечение эпюры распределения давления в радиальном направлении вдоль линии тока. Утолщённой линией показана эпюра давления вдоль образующей канавки, соответствующей углу  $\eta = \eta_1$  (сечение – 1), штриховой показана эпюра давления на элементе «выступ», соответствующей углу  $\eta = (\eta_1 + \eta_2)/2$  (сечение 2). В сечении 1 безразмерное давление повышается от радиуса  $R_1$  (соответствует входу газа в уплотнительный зазор) к радиусу  $R_2$  до значения  $\bar{p} = 1,076$ . Далее  $\bar{p}$  снижается к радиусу  $R_{вн}$  (соответствует выходу газа из уплотнительно-

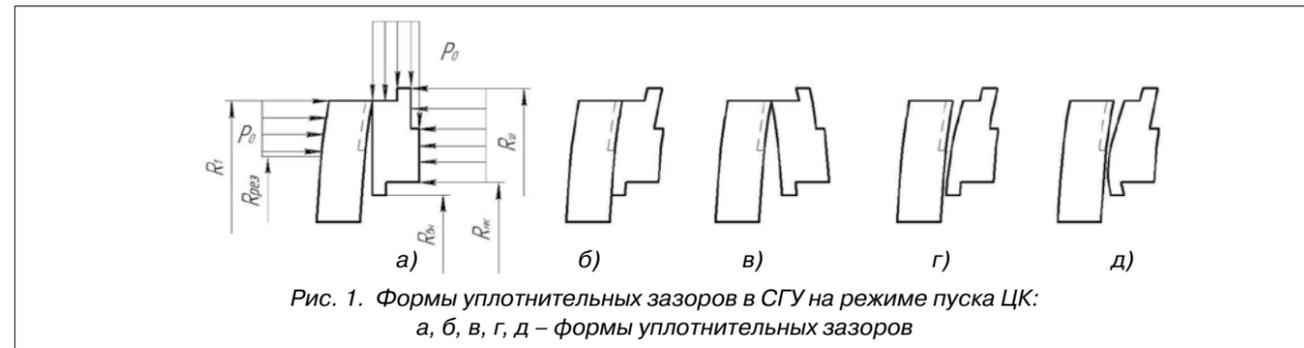


Рис. 1. Формы уплотнительных зазоров в СГУ на режиме пуска ЦК: а, б, в, г, д – формы уплотнительных зазоров

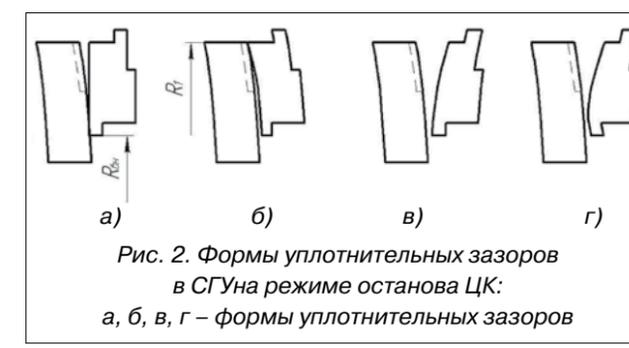


Рис. 2. Формы уплотнительных зазоров в СГУ на режиме останова ЦК: а, б, в, г – формы уплотнительных зазоров



го зазора) до давления за уплотнением. В сечении 2 безразмерное давление снижается от радиуса  $R_1$  к радиусу  $R_2$  до значения  $\bar{p} = 0,822$ , далее интенсивно снижаясь к радиусу  $R_{вн}$  до давления за уплотнением.

На рис. 4 (а) представлено сечение эпюры распределения температуры газа в окружном направлении соответствующего радиусу окончания канавок  $R_2$ . Максимального значения безразмерная температура  $\bar{T}_0 = 1,02078$  достигает на выходе из элемента «выступ», соответствующая углу  $\eta = \eta_2$ .

На рис. 4 (б) представлено сечение эпюры распределения температуры газа в радиальном направлении вдоль образующей канавки, соответствующей углу  $\eta=0$ . Безразмерная температура газа вдоль линии тока от радиуса  $R_1$  повышается, достигая максимума  $\bar{T}_0 = 1,02186$  в области между радиусами  $R_2 \div R_{вн}$ , далее снижаясь к выходу из уплотнительного зазора до значения  $\bar{T}_0 = 1,01708$  соответствующего радиусу  $R_{вн}$ .

Вторым этапом расчёта определяется напряженно-деформированное состояние уплотнительных колец, представленное на рис. 5 и форма уплотнительного зазора, представленная на рис. 6. Одновременно проверяется минимальный зазор между уплотнительными кольцами и величина расхода газа через СГУ.

Для оценки формы уплотнительного зазора при проектировании СГУ используется коэффициент конусности [2], который зависит от геометрических размеров и материала уплотнительных колец, режимных параметров работы компрессора.

Представленный алгоритм расчёта уплотнительных колец и проектирования формы уплотнительного зазора, выполненный на основе разработанной «квазирёхмерной» термоупругогазодинамической модели СГУ, и учитывающий деформации колец под действием неравномерного поля температуры, вы-

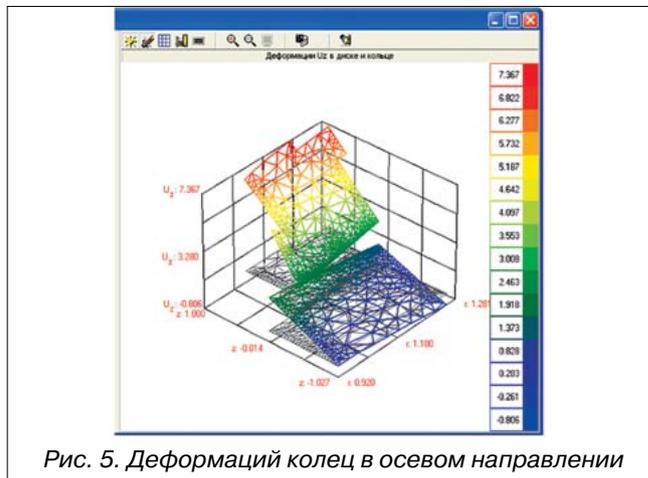


Рис. 5. Деформаций колец в осевом направлении

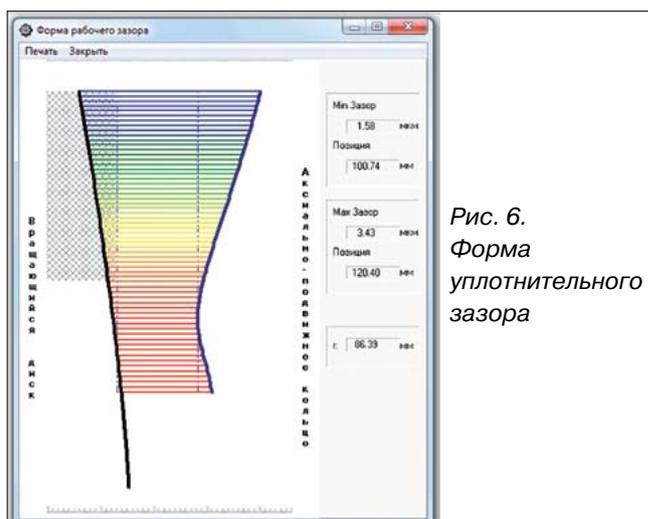


Рис. 6. Форма уплотнительного зазора

званного разогревом газа в уплотнительном зазоре и действием сил от давления газа, окружающего кольца, поля давления в уплотнительном зазоре, позволяет без длительных и дорогостоящих доводочных испытаний разрабатывать уплотнения для различных режимов работы центробежных компрессоров.

Научная школа в области создания опорно-уплотнительных узлов АО «НИИТурбокомпрессор им. В.Б. Шнеппа» (группа ГМС) является признанной в России и в странах ближнего зарубежья. Накопленный опыт в области разработки, поставки и обслуживания систем СГУ позволяет заместить системы зарубежных производителей в различных конструкциях центробежных компрессоров.

#### Список литературы

1. Новиков Е.А. Влияние термоупругих деформаций колец пары трения на форму зазора сухого газодинамического уплотнения / Е.А. Новиков// Компрессорная техника и пневматика. - 2010. №7. - С. 22 - 25.
2. Новиков Е.А. Форма уплотнительного зазора в «сухом» газодинамическом уплотнении / Е.А. Новиков// Вестник Казанского технологического университета. - 2013. №21. - С.254 - 257.

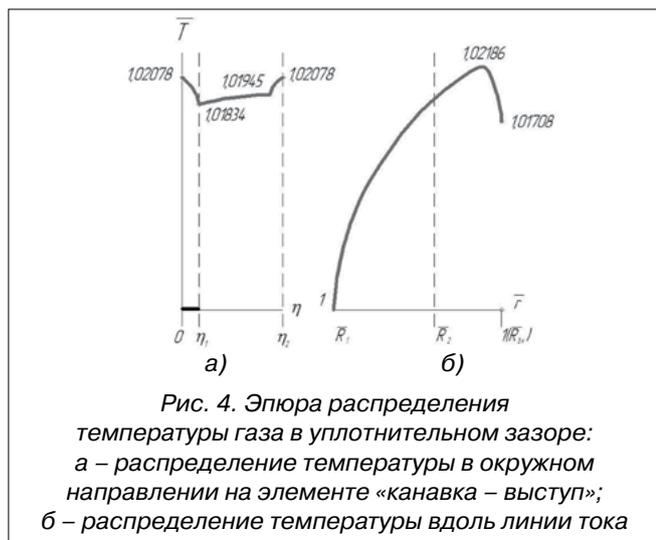


Рис. 4. Эпюра распределения температуры газа в уплотнительном зазоре: а – распределение температуры в окружном направлении на элементе «канавка – выступ»; б – распределение температуры вдоль линии тока

