

ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ СУХИХ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ УПЛОТНЕНИЙ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ КОМПРЕССОРОВ ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ АГРЕГАТОВ

В.Н. Капустин, ООО «Газпром трансгаз Ухта» (Ухта, РФ), vkapustin@sgp.gazprom.ru

Важнейшим условием, обеспечивающим надежную работу сухих газодинамических уплотнений компрессоров, является корректная подготовка рабочих сред, используемых для функционирования уплотнений – буферного газа и барьерного воздуха. Параметры этих сред должны выбираться исходя из условий работы уплотнений. Недостаточно полный учет условий эксплуатации обуславливает низкую надежность работы уплотнений, что подтверждается опытом эксплуатации. Предметом настоящей статьи является выбор корректных параметров буферного газа и барьерного воздуха.

Технология сухих газодинамических уплотнений (СГДУ) для герметизации роторов газовых компрессоров используется с 70-х гг. XX в. Эксплуатационные преимущества СГДУ предопределили их широкое применение в центробежных компрессорах (ЦБК) газоперекачивающих агрегатов ПАО «Газпром». Сегодня парк ЦБК с СГДУ составляет более 700 ед. В связи с этим актуальны вопросы обеспечения надежной работы уплотнений.

Наиболее распространены СГДУ двухступенчатой конструкции (рисунки), состоящие из двух последовательно расположенных уплотнительных пар (основной и страховочной). Каждая пара состоит из твердосплавного вращающегося седла (роторная часть) и подвижного в осевом направлении торца, изготовленного из материала на основе графита (статорная часть). Специальные канавки на поверхности седла при вращении захватывают газ и создают области повышенного давления в стыке «седло – торец». Этим давлением торец отжимается от седла на величину рабочего зазора примерно 3 мкм. В результате достигается бесконтактная работа уплотнительных пар с очень небольшим зазором, что позволяет, с одной стороны,

исключить интенсивный износ уплотнительных пар, а с другой – минимизировать величину протечек газа через уплотнение.

В связи с небольшими зазорами в уплотнительных парах они должны работать на очищенном от мехпримесей газе, так как любые частицы размером более 3 мкм вызовут повреждение поверхностей седла и торца с последующим отказом СГДУ. Поэтому в полость перед первой ступенью подается специально подготовленный буферный газ (БГ), имеющий необходимую степень чистоты. Для предотвращения попадания недостаточно чистого перекачиваемого газа в уплотнение БГ должен иметь давление, на 10...20 кПа превышающее давление газа в уплотняемой полости.

Протечки газа после обеих ступеней СГДУ отводятся на свечу. Для обеспечения взрывозащиты подшипника ЦБК в полость после второй ступени подается барьерный воздух (БВ), который за счет повышенного давления исключает попадание газа в подшипник. Так как БВ контактирует с деталями уплотнительной пары второй ступени, он также должен иметь необходимую степень очистки.

Помимо требований к чистоте от мехпримесей важно исключить

риск выпадения конденсата из БГ и БВ, так как сконденсировавшиеся углеводороды или влага вызывают нарушение работы уплотнительных пар (залипание торца, забивание канавок седла, вспучивание поверхности торца и пр.) и коррозию в расточке корпуса ЦБК. Риск выпадения конденсата из БГ и БВ определяется, с одной стороны, степенью их осушки, с другой – минимальной температурой БГ и БВ при работе.

Степень осушки сред зависит от применяемой технологии. Если при подготовке БГ и БВ не применяется дополнительная осушка, то содержание тяжелых углеводородов и влаги в БГ соответствует характеристикам перекачиваемого газа, а содержание влаги в БВ соответствует влажности атмосферного воздуха. Следует отметить, что осушка БГ и БВ может достигаться только путем использования специального оборудования. Это может быть либо охладительная установка с сепарацией конденсата, либо адсорбционная установка с регенерацией адсорбента. Обе технологии достаточно сложны и затратны, в связи с чем осушка БГ и БВ широко не применяется.

Минимальная температура БГ имеет место в камере между уплотнительными парами первой

и второй ступеней СГДУ. Это обусловлено тем, что температура газа интенсивно снижается при его дросселировании в рабочем зазоре первой ступени вследствие эффекта Джоуля – Томсона. Уровень температуры в этой полости зависит от начальной температуры БГ, подаваемого в СГДУ, и перепада давлений, срабатываемого на первой ступени. Минимальная температура БВ реализуется при его контакте с охлажденными деталями СГДУ, уровень температур зависит от начальной температуры БВ и температуры омываемых деталей СГДУ. Также необходимо учитывать теплообмен БГ и БВ с торцевыми крышками ЦБК, по каналам в которых среды подводятся к СГДУ (рисунок).

Таким образом, при выборе температуры БГ, подаваемой к ЦБК, необходимо учитывать:

- уровень входного давления перекачиваемого газа (так как от него зависят перепад БГ, срабатываемый на первой ступени СГДУ, и соответствующее падение температуры БГ);

- уровень входной температуры перекачиваемого газа (от нее зависят температуры торцевых крышек ЦБК и, соответственно, снижение температуры БГ в их каналах);

- температуру точки росы перекачиваемого газа по тяжелым углеводородам ($ТТР_{вб}$) и воде ($ТТР_{в}$) при давлении БГ в камере перед первой ступенью СГДУ (так как здесь газ контактирует с деталями, охлажденными сдросселированным в первой ступени газом).

Аналогично при выборе температуры БВ должны быть учтены:

- уровень входного давления перекачиваемого газа (так как от него зависит температура деталей второй ступени СГДУ, охлажденных сдросселированным в первой ступени газом);

- уровень входной температуры перекачиваемого газа (от нее зависит снижение температуры БВ в каналах торцевых крышек ЦБК);

- диапазон изменения влажности и температуры атмосферного воздуха (климатическая характеристика объекта).

Недостаточно полный учет перечисленных условий эксплуатации при выборе температур БГ и БВ обуславливает конденсатообразование в узлах СГДУ и их отказы. Подтверждением тому является освещенный ниже опыт эксплуатации ЦБК с СГДУ на компрессорных станциях (КС) магистрального газопровода (МГ) «Бованенково – Ухта».

Условия эксплуатации ЦБК на заполярном участке данного МГ характеризуются следующим:

- давление перекачиваемого газа на входе ЦБК: 8,0...9,0 МПа (изб);

- температура перекачиваемого газа на входе ЦБК: $-15...5\text{ }^{\circ}\text{C}$;

- $ТТР_{вб}$ перекачиваемого газа: $-4...-9\text{ }^{\circ}\text{C}$ (при 8,0...9,0 МПа);

- $ТТР_{в}$ перекачиваемого газа: $-6...-13\text{ }^{\circ}\text{C}$ (при 8,0...9,0 МПа);

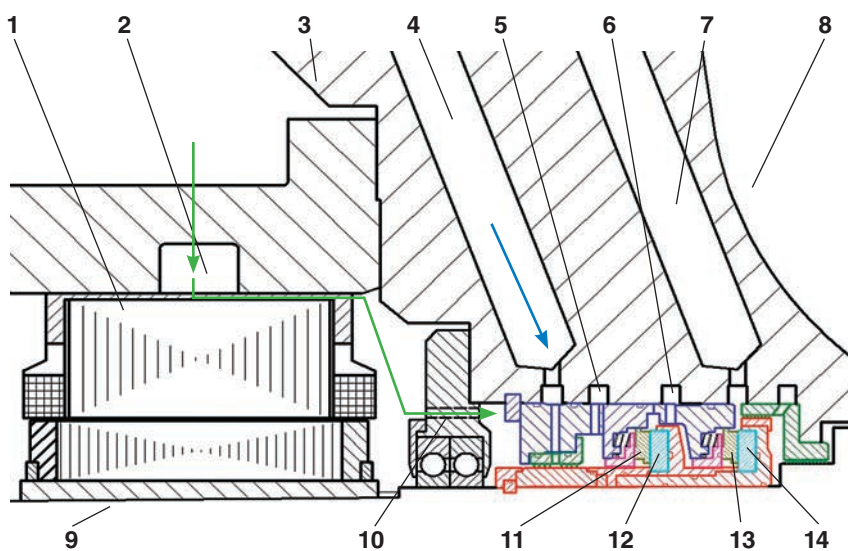
- относительная влажность атмосферного воздуха: от 80 % до

состояния насыщения при текущей температуре;

- температура атмосферного воздуха: $-40...20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

При данных условиях температура БГ при дросселировании в первой ступени СГДУ до давления около 20 кПа (изб) снижается на $40...50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Поэтому для исключения конденсатообразования необходимо иметь температуру БГ, подаваемого к СГДУ, не менее $45...50\text{ }^{\circ}\text{C}$, чтобы избежать появления отрицательных температур в уплотнении. С учетом охлаждения в крышках ЦБК это требует подавать БГ к фланцу ЦБК с температурой на уровне $50...55\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Что касается БВ, то для исключения конденсатообразования необходимо поддерживать такие условия, чтобы температура воздуха в уплотнении не понижалась ниже его текущей $ТТР_{в}$. Для этого проще всего обеспечить превышение температуры БВ над температурой уличного воздуха с необходимым запасом. Этот запас (с учетом охлаждения в каналах



Сухое газодинамическое уплотнение ротора центробежного компрессора:

1 – электромагнитный подшипник; 2 – полость подачи воздуха на охлаждение подшипника; 3 – торцевая крышка ЦБК; 4 – канал подвода барьерного воздуха; 5 – полость отвода утечки за вторую ступенью СГДУ; 6 – полость отвода утечки за первой ступенью СГДУ; 7 – канал подвода буферного газа; 8 – уплотняемая полость ЦБК; 9 – ротор ЦБК; 10 – сверление в обойме страховочного подшипника; 11 – торец страховочной уплотнительной пары; 12 – седло страховочной уплотнительной пары; 13 – торец основной уплотнительной пары; 14 – седло основной уплотнительной пары

→ Штатный подвод барьерного воздуха через канал в крышке ЦБК
→ Доработанный подвод барьерного воздуха через подшипник ЦБК

крышек ЦБК) целесообразно предусматривать на уровне не менее 30 °С.

Данные требования к температурам рабочих сред СГДУ не были учтены при разработке систем подготовки БГ и БВ в составе оборудования ГПА, эксплуатирующихся на ряде КС МГ «Бованенково – Ухта». Температуры БГ, подаваемого к фланцам ЦБК, составляли 15...30 °С, температуры БВ – около 20 °С при температуре уличного воздуха 10 °С (в осенний период).

В результате произошло множество отказов СГДУ по причине разгерметизации первой и второй ступеней. На четырех КС, оснащенных одинаковыми ГПА, в течение года произошло 17 отказов. Отказы преимущественно происходили в периоды, когда температура газа на входе ЦБК опускалась ниже –5 °С. Большая часть отказов, связанных с разгерметизацией второй ступени, произошла в наиболее влажный летне-осенний период года.

При ревизиях отказавших СГДУ обнаружены углеводородные отложения и влага на деталях, повреждение уплотнительных пар, залипание подвижных торцов. Таким образом, все отказы произошли по причине выпадения конденсата из БГ и БВ непосредственно в узлах СГДУ.

В результате обследований систем подготовки БГ и БВ были выявлены следующие недостатки их работы:

- недостаточная температура БГ, подаваемого к ЦБК;
- завышенный расход БГ относительно расчетных величин;
- недостаточная пропускная способность фильтров БГ;
- недостаточный подогрев БВ при работе системы подготовки воздуха в «летнем» режиме.

Недостаточная температура БГ в значительной мере обусловлена теплопотерями во внешнюю среду. Часть тепла теряется при прохождении газа через протяженный цеховой коллектор, а ос-

новные теплопотери происходят в укрытии ГПА из-за теплоотдачи от оборудования системы БГ, не имеющего теплоизоляции.

С другой стороны, недостаточная температура БГ обусловливается низкой эффективностью подогрева в электроподогревателе, штатная конфигурация которого не позволяла поднять температуру БГ на выходе выше 35...44 °С. Дополнительное снижение эффективности подогрева возникает из-за завышенных расходов БГ.

С учетом снижения температуры БГ при его последующем дросселировании в регулирующем клапане «газ-газ» (на 9...10 °С) вышеперечисленные факторы не позволяли подать БГ с температурой выше 15...30 °С.

Недостаточный подогрев БВ возникает при работе системы его подготовки в «летнем» режиме, с охлаждением воздуха в специальном теплообменнике. Необходимость охлаждения БВ обусловлена тем, что этот же воздух используется для охлаждения электромагнитных подшипников (ЭМП) ротора ЦБК. Поэтому в летне-осенний период превышение температуры БВ над температурой уличного воздуха составляет около 10 °С.

Недостаточная пропускная способность штатных фильтров БГ, имеющих тонкость очистки 1 мкм, вызывала повышенный перепад давления на фильтрах, что приводило к необходимости работать на обоих фильтрах одновременно (т. е. без резерва).

В результате совместной работы с разработчиком ГПА был определен комплекс доработок, позволивших устранить указанные недостатки исходной конфигурации систем БГ и БВ.

Для повышения температуры БГ выполнено следующее:

- смонтирована линия агрегатного отбора БГ из выходного патрубка ЦБК (т. е. отбор из точки с максимальной температурой газа);

- терморегуляторы электроподогревателей заменены на имеющие расширенный диапазон настройки по температуре (т. е. увеличена степень подогрева);

- расход БГ снижен за счет установки дроссельных шайб;

- предусмотрена теплоизоляция оборудования системы БГ.

Для повышения температуры БВ изменена схема подачи воздуха в узлы СГДУ. В результате доработки БВ подается к уплотнениям не через штатные каналы в крышках ЦБК, а через специально просверленные отверстия в обойме страховочного подшипника (рисунок). Тем самым исключается охлаждение БВ в каналах крышек, и воздух перед подачей к СГДУ дополнительно подогревается в результате теплосъема с катушек ЭМП.

Пропускная способность фильтров повышена путем замены фильтроэлементов на имеющие степень очистки 3 мкм, за счет этого обеспечена нормальная работа на одном фильтре (с резервом).

В результате доработок температура БГ, подаваемого к ЦБК, повышена до 44...52 °С. Температура БВ, подаваемого в узлы СГДУ, при типичной летне-осенней температуре уличного воздуха 10...15 °С составляет не менее 35...40 °С.

За истекший трехмесячный период эксплуатации ГПА с доработанными системами БГ и БВ отказов с разгерметизацией СГДУ не зафиксировано, что свидетельствует об эффективности доработок. Окончательные выводы будут сделаны по результатам эксплуатации доработанных ГПА в 2017 г.

Вышеописанный опыт эксплуатации наглядно подтверждает необходимость всестороннего учета и анализа условий эксплуатации оборудования. Технические решения, казалось бы, уже испытанные на ранее реализованных объектах, при применении в новых условиях должны пересматриваться и при необходимости модифицироваться. ■