

УДК 621.8

А.Б. Сverdlov

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ АГРЕГАТОВ ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ЭПИЛАМИРОВАНИЯ

A.B. Sverdlov

RELIABILITY OF GAS PUMPING MACHINERY AND APPLICATION OF FLUORINE-CONTAINING FILM COATINGS

В статье представлены основные результаты исследования надежности газоперекачивающих агрегатов, эксплуатируемых на газотранспортных предприятиях России. Приведены статистические данные по отказам (повреждения, дефекты механической части газоперекачивающих агрегатов, связанные с износом, усталостным разрушением поверхностей трения подшипников скольжения, зубчатых передач и муфт). Рассмотрена технология модификации поверхностей трения элементов газоперекачивающих агрегатов фторорганическими поверхностно-активными веществами (эпиламирование). Проанализированы результаты натурных испытаний технологии эпиламирания на газоперекачивающих агрегатах СТД-4000.

НАДЕЖНОСТЬ; ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИЕ АГРЕГАТЫ; ФТОРСОДЕРЖАЩИЕ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫЕ ВЕЩЕСТВА; ТРЕНИЕ; ИЗНОС; ПОДШИПНИКИ СКОЛЬЖЕНИЯ; ЗУБЧАТЫЕ ПЕРЕДАЧИ; КОМПЕНСИРУЮЩИЕ МУФТЫ.

The article presents main results of the research on reliability of gas pumping machinery operated by Russian gas transport companies. Mechanical defects of journal bearings, gears and couplings of gas pumping units, caused by wear and fatigue, are examined. In order to improve the operational reliability of gas pumping units, a new technology of friction surfaces modification by applying fluorine-containing film coatings is introduced. The article analyzes the main results of testing the technology on gas pumping units.

RELIABILITY; GAS PUMPING MACHINERY; FLUORINE-CONTAINING SURFACTANTS; FRICTION; WEAR; JOURNAL BEARINGS; GEARS; COUPLINGS.

Газоперекачивающий агрегат (ГПА) — основное технологическое оборудование компрессорных станций (КС), он обеспечивает необходимый режим транспортировки газа по магистральному газопроводу. Газоперекачивающий агрегат компрессорных станций состоит из центробежного нагнетателя и привода. В качестве привода обычно используют газовые турбины (стационарные, авиационные и судовые) и электродвигатели. Соединение газовой турбины или электродвигателя с центробежным нагнетателем осуществляют либо через повышающий редуктор (обязательно для электропривода и, как исключение, для некоторых типов газовых турбин), либо непосредственно через муфты. На рис. 1 схематично изображен ГПА с электроприводом.

Одна из важнейших эксплуатационных характеристик газоперекачивающего агрегата —

его надежность [1]. Проблема повышения эксплуатационной надежности ГПА компрессорных станций газотранспортных предприятий России весьма актуальна, так как основная часть парка энергетического оборудования КС была введена в эксплуатацию в 1980—1990 годы, и значительная его доля работает сверх установленного производителями нормативного срока. Число нарушений, связанных с износом оборудования, достигает 30 % от общего количества нарушений в работе энергохозяйства [2]. Большая часть ГПА ООО «Газпром трансгаз Санкт-Петербург» находится в эксплуатации свыше 30 лет и имеет наработку более 50000 часов (рис. 2).

Одно из основных требований к ГПА — это способность безотказной работы при всех режимах в течение установленного ресурса [3]. Рабо-

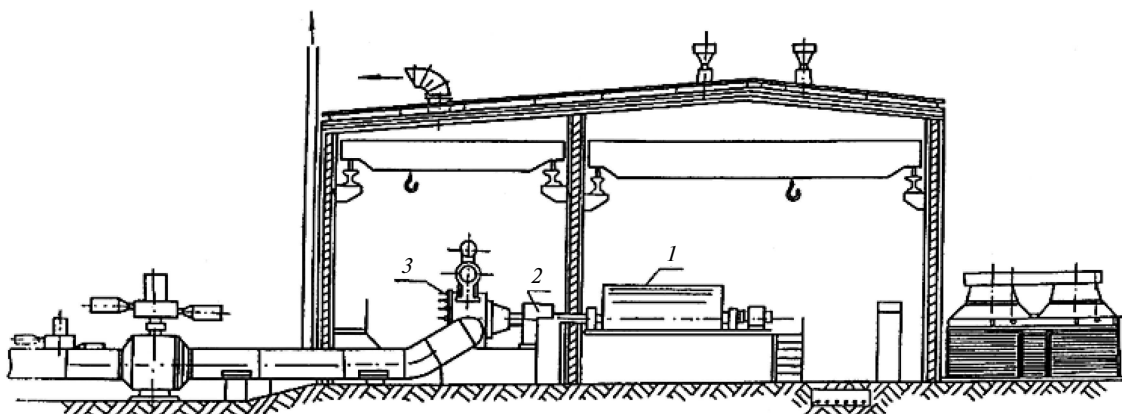


Рис. 1. Принципиальная компоновка ЭГПА с СТД-12500–2 в здании компрессорного цеха:
1 — электродвигатель; 2 — редуктор; 3 — центробежный нагнетатель

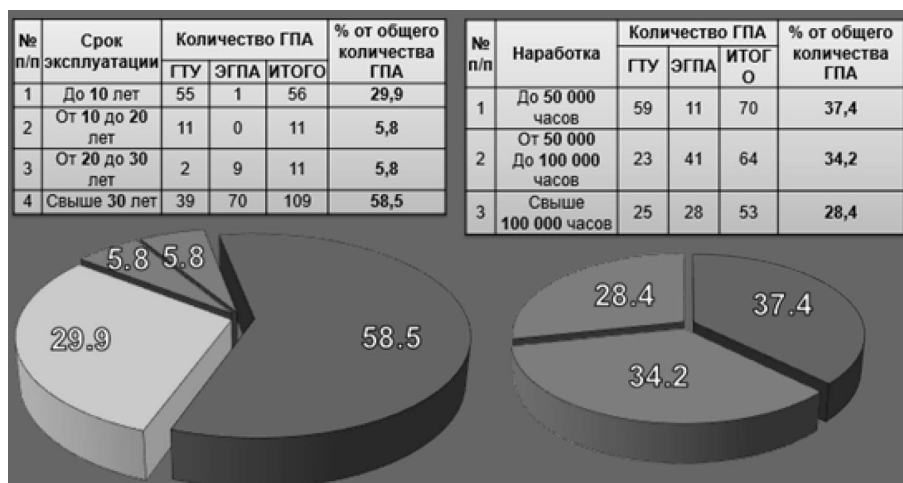


Рис. 2. Срок эксплуатации и наработка парка ГПА ООО «Газпром трансгаз Санкт-Петербург» на 01.10.2013

тоспособность деталей и узлов агрегата характеризуется их исправностью, т. е. состоянием, которое удовлетворяет требованиям нормативно-технической документации. Любое отклонение от технических условий рассматривается как неисправность и определяется термином «отказ». На газотранспортных предприятиях ОАО «Газпром» различают следующие источники и места возникновения отказов основного оборудования КС:

мех. часть (механическая часть и маслосистема);

САУ (система автоматического управления);

ЭВС (система электроснабжения);

ПТЭ (действие персонала).

Основная доля отказов ГПА приходится на подшипниковые узлы, уплотнение [4]. Согласно статистическим данным за 2008–2012 годы большая часть отказов ГПА на КС ООО «Газпром трансгаз Санкт-Петербург» приходится на механическую часть и маслосистему — от 24 до 48 % всех отказов за отчетный период (календарный год) (см. табл. 1). Отказы механической части и маслосистемы ГПА в большинстве случаев происходят из-за дефектов (повреждения, неисправности) опорных узлов, а также редукторов, муфт, насосов — деталей и узлов ГПА, омываемых маслом. Так, согласно статистическим данным по отказам ГПА на КС ООО «Газпром трансгаз Санкт-Петербург» за 2008–2012 годы,

характерные причины отказов механической части агрегатов следующие:

снижение перепада давления «масло — газ» из-за разрушения баббитового слоя;

недостаточная откачка масла от задней опоры СТ по причине засорения фильтра линии откачки масла из опоры СТ продуктами коксования масла;

стружка в маслосистеме;

разрушение в вертикальной плоскости вала-шестерни насоса вследствие разрушения подшипника скольжения вала-шестерни и последующего его заклинивания;

разрушение подшипника СТ;

разрушение лабиринтного уплотнения в торцевой крышке камеры переднего подшипника ЦБН;

частичное разрушение баббитовой заливки вкладыша опорного (уплотнительного) подшипника ЦБН и др.

Таблица 1

Отказы ГПА ООО «Газпром трансгаз Санкт-Петербург»

Год	Общее количество отказов	Количество отказов различного вида			
		Мех. часть	САУ	ЭВС	ПТЭ
2012	74	18	33	16	4
2011	35	14	7	11	3
2010	58	26	18	12	2
2009	67	32	17	11	7
2008	66	29	26	8	3

Как видно из табл. 1, основную долю отказов ГПА составляют отказы механической части и САУ. В связи с тем, что отказы механической части зачастую неустраняемы и ведут к проведению дорогостоящих ремонтных работ на ГПА, можно утверждать, что решение проблемы повышения надежности механической части ГПА важно для повышения эксплуатационной надежности ГПА в целом.

Далее представлены основные результаты анализа причин отказов механической части ГПА (повреждения, дефекты, неисправности подшипников скольжения, зубчатых передач и компенсирующих муфт).

К наиболее характерным повреждениям подшипников ГПА следует отнести возникновение

на поверхности рисок, натиров, царапин, задиров, трещин и выкрашиваний, подплавления и выплавки баббита [5, 6].

На рис. 3 — фотография вкладыша опорного подшипника центробежного нагнетателя ГПА №3 Валдайского ЛПУМГ с выемкой от отколовшегося куска баббита вследствие усталостного разрушения баббитового слоя. Отколовшиеся куски попадают в зазор и маслосистему, нарушая нормальную работу агрегата. В подшипнике скольжения с поврежденным вкладышем не может образоваться нормальный масляный слой, в результате чего происходит контакт шейки с вкладышем.

Неисправности подшипников скольжения могут быть зафиксированы и выявлены различными методами, используемыми в технической диагностике; в большинстве случаев достаточно вибродиагностики и визуального контроля [7].

Основной причиной отказов зубчатых передач, как правило, является усталость поверхностных слоев, приводящая к локальным повреждениям поверхности в виде выкрашивания или отслаивания отдельных частиц материала [8–11].

Питтинг — повреждение усталостного характера, возникающее на контактирующих поверхностях в виде ямок и раковин в результате повторных действий высоких контактных напряжений. Выкрашиванию предшествует возникновение микротрещин, зарождающихся на поверхностных дефектах. Питтинг зубьев колес редукторов ГПА в первую очередь возникает в полюсной зоне и на головке зуба. Это свидетельствует о перекосе и смещении валов редуктора, повышенных динамических нагрузках в зацеплении. При выкрашивании происходит засорение масла частицами износа.

Заедание — процесс возникновения повреждений на поверхности трения при местном разрыве смазочной пленки. Поверхность, подверженная заеданию, покрыта бороздами и углублениями, от едва различимых до весьма глубоких в зависимости от интенсивности заедания. Борозды при заедании зубьев не возникают в зоне полюсной линии, т.к. там отсутствует относительное скольжение поверхностей зубьев [6]. При заедании от поверхности зубьев отделяются частички металла, засоряющие масло.

Пластическое деформирование — искажение профиля зубьев вследствие пластического перемещения поверхностных слоев металла под действием сил трения в условиях высоких контактных напряжений. При пластическом деформировании направление действия сил трения таково, что на поверхности ведущего колеса в полюсной зоне образуется впадина, а на ведомом — выступ.

Отслаивание — отделение слоев металла с рабочих поверхностей зубьев, подвергнутых поверхностному упрочнению. Такому виду повреждения наиболее подвержены азотированные колеса вследствие относительно малой толщины азотированного слоя и твердости, значительно превосходящей твердость нижних слоев [6]. Как правило, отслаиванию подвержены зубья азотированных колес редукторов ГПА у торца и у проточки между полушевронами — в зонах перенасыщения азотом.

Поломка зубьев — следствие возникновения и развития поверхностных усталостных трещин под действием переменных напряжений растяжения. Трещины обычно начинаются у корня зуба, в местах максимальных напряжений, и распространяются вглубь и вдоль зуба до тех пор, пока не произойдет окончательная поломка. Затем отламывающиеся куски металла попадают в зацепление и вызывают силовой излом других зубьев.

Основные дефекты зубчатых зацеплений определяют с помощью параметрической диагностики, вибродиагностики и анализа смазочного масла [7].

Наиболее характерные повреждения зубчатых муфт — неравномерные по длине зуба абразивные износы, выбоины и уступы на рабочих поверхностях, а также поломка зубьев.

Типичные дефекты зубчатой муфты определяют методами вибродиагностики и анализа смазочного масла [7].

Исходя из анализа, представленного выше, большинство дефектов (неисправности, повреждения) механической части ГПА характеризуются неудовлетворительным состоянием рабочих поверхностей трибосопряжений и связаны прежде всего с износными, усталостными и другими процессами, сопровождающимися внешнее трение металлических поверхностей.

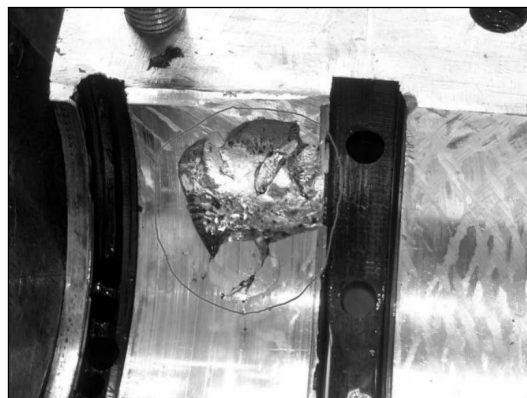


Рис. 3. Разрушение баббитового слоя опорного подшипника центробежного нагнетателя ГПА №3 Валдайского ЛПУМГ

Взаимодействие твердых тел (металлы) в присутствии граничного слоя при контакте и трении — это совокупность тесно связанных между собой явлений, протекающих в молекулярной структуре граничного слоя, на фазовых поверхностях металла и в самом металле — в поверхностных его слоях [12]. Таким образом, следует ожидать, что улучшение триботехнических характеристик узлов и пар трения элементов ГПА за счет влияния на физико-химические свойства контактных поверхностей должно способствовать повышению качества функционирования механической части ГПА и, соответственно, эксплуатационной надежности энергомеханического оборудования КС газотранспортных предприятий в целом.

Существует большой резерв влияния на триботехнические характеристики поверхностей металлов за счет модифицирования структуры приповерхностного микрообъема. Важны оптимизация структуры, в частности снижение размеров зерен до наноуровня, регулирование кинетики структурообразования с целью обеспечения заданных триботехнических показателей. В этом отношении особое место отводится технологии эпиламирования, использующей многокомпонентные фторорганические поверхностно-активные вещества (ФПАВ) в различных растворителях и функциональных добавках [13].

Фторсодержащие поверхностно-активные вещества представляют собой обычные поверхностно-активные вещества углеводородного

типа, у которых атомы водорода олеофильных групп частично или полностью замещены атомами фтора, в связи с чем они проявляют ряд специфических особенностей:

имеют высокую устойчивость к химическим агентам — кислотам, щелочам и др., а также термостойкость;

очень эффективны в снижении поверхностного натяжения;

эффективны при крайне низких концентрациях, что позволяет значительно уменьшить количество используемого вещества, что, кроме экономических выгод, дает также большие преимущества с точки зрения охраны окружающей среды;

снижают поверхностную энергию различных материалов и придают антифрикционные, антиадгезионные, грязеотталкивающие и прочие свойства.

Производство фторсодержащих поверхностно-активных веществ освоено промышленностью лишь в самое последнее время, и цены на них еще сравнительно высоки, что препятствует их широкому применению. Однако можно ожидать, что отмеченные выше специфические особенности поверхностно-активных веществ этого типа в сочетании со свойствами традиционных поверхностно-активных веществ откроют перед ФПАВ новые области применения [14].

Свойства ФПАВ по многим параметрам существенно отличаются от свойств нефторированных ПАВ, что обусловлено особенностями природы фторуглеродного радикала. Атомы фтора образуют вокруг углеродной цепи более плотную и одновременно более объемную оболочку, чем атомы водорода. Высокая энергия связи $C-F$ (448 кДж/моль), а также защитный «экран» из атомов F, «изолирующий» углеродную цепь от внешних химических воздействий, определяют высокую термическую и химическую стойкость и очень низкую когезию ФПАВ.

В лаборатории кафедры Е-1 Балтийского государственного технического университета «Военмех» имени Д.Ф. Устинова проведен ряд исследований ФПАВ «Валкон» на предмет использования в тяжело нагруженных узлах трения высокоэнергетических агрегатов, проведены натурные испытания на ГПА КС ООО

«Газпром трансгаз Санкт-Петербург». «Валкон» представляет собой многокомпонентную композицию на основе фторсодержащих поверхностно-активных веществ (фтортензидов). Композиция относится к составам для получения фторорганических покрытий, которые наносятся на твердые поверхности металлов (за исключением чистого титана) с целью снижения коэффициента трения и износа контактных поверхностей тяжело нагруженных пар трения [13]. Состав представляет собой бесцветные жидкости плотностью 2200–2230 кг/м³ и вязкостью 1,0–1,2 сСт.

С 2007 года проводились натурные испытания технологии эпиламирования фторорганической композицией марки «Валкон» на ГПА КС ООО «Газпром трансгаз Санкт-Петербург». Исследовались выходные параметры в зависимости от наработки ГПА до обработки ФПАВ и после, влияние технологии эпиламирования на эксплуатационную параметрическую надежность агрегатов, а также сопоставление полученных результатов. В процессе эксплуатации ГПА осуществлялись регулярные замеры рабочих параметров в восьми контрольных точках (КТ) агрегатов. По результатам измерений, вычислений и плановых обследований ГПА составлены отчеты о влиянии технологии на эксплуатационные показатели агрегатов.

На рис. 4 схематично изображен газоперекачивающий агрегат, включающий электродвигатель, редуктор (мультипликатор) и центробежный компрессор природного газа с подшипниками скольжения, а также условное расположение датчиков замера выходных параметров в восьми контрольных точках ГПА.

Далее представлены данные стационарного ГПА №3 СТД-4000 КС «Валдай» после обработки поверхностей фтортензитными материалами «Валкон». Дата обработки — 06.01.2007. Общая наработка после обработки на 27.02.2012 составила 9861 час. Обработанные детали:

элементы зубчатого зацепления редукторной пары;

посадочные шейки валов колеса шестерен редукторной пары;

ответные посадочные поверхности баббитовых вкладышей подшипников скольжения редукторной пары;

посадочные шейки вала ротора СТД;

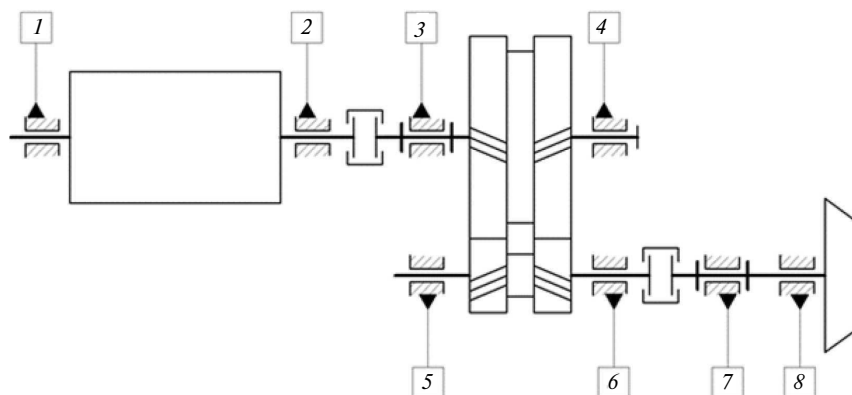


Рис. 4. Схема расположения контрольных точек для измерения вибрации ЭГПА СТД-4000

ответные посадочные поверхности баббитовых вкладышей подшипников скольжения СТД; посадочные шейки вала ротора нагнетателя; ответные посадочные поверхности баббитовых вкладышей опорно-упорного подшипников нагнетателя;

плавающие кольца уплотнительной полости нагнетателя (масло — газ);

посадочные «выборки» под плавающие кольца обоймы уплотнения;

зубчатые зацепления винтового насоса системы уплотнения ЭГПА;

зубчатые зацепления пускового насоса системы смазки ЭГПА;

зубчатые зацепления главного масляного насоса смазки ЭГПА;

зубчатые зацепления большой и малой передающих муфт кинематической цепи «ротор СТД — редуктор — ротор нагнетателя».

В процессе эксплуатации ЭГПА осуществлялись регулярные замеры рабочих параметров — среднеквадратичных значений виброскорости и температуры масла в восьми контрольных точках СТД-4000.

Виброскорость — комплексный показатель, достаточно полно характеризующий рабочее состояние агрегата. Замеры вибрации, снятые с ГПА в различных контрольных точках, и их анализ позволяют диагностировать многие дефекты и процессы, происходящие в машине, а именно: дисбаланс роторов, перекос подшипников, износ подшипников, наличие увеличенного зазора в подшипниках, общее состояние зубчатого зацепления, износ

зубчатой пары, перекос осей валов, расцентровку валов, общее состояние зубчатых муфт, потерю зубчатыми муфтами компенсирующей способности и др. Виброскорость — наиболее удачный критерий интенсивности вибрации для ГПА.

За период наблюдения 3500 часов произошло снижение температуры в подшипниках скольжения на 8 %, снижение шумового фона как агрегата в целом, так и редуктора, а также падение пиковых значений вибраций в контрольных точках.

За период наблюдений 8500 часов после осуществления обработки общий уровень виброскорости в контрольных точках ГПА №3 Валдайского ЛПУМГ оказался ниже, чем в самом начале испытаний.

Значения виброскорости в КТ редуктора снизились в наибольшей степени. В первом опорном подшипнике шестерни мультипликатора (КТ-3) произошло снижение уровня виброскорости на 20 %. Во втором опорном подшипнике шестерни мультипликатора (КТ-4) произошло снижение уровня виброскорости на 22 %. В первом опорном подшипнике колеса мультипликатора (КТ-5) произошло снижение уровня виброскорости на 25 %. Во втором опорном подшипнике колеса мультипликатора (КТ-6) произошло снижение уровня виброскорости на 27 %. На рис. 5 в качестве примера приведены результаты замера среднеквадратического значения виброскорости в КТ-3 в вертикальном (а) и боковом (б) направлении с линиями регрессии логистической функции.

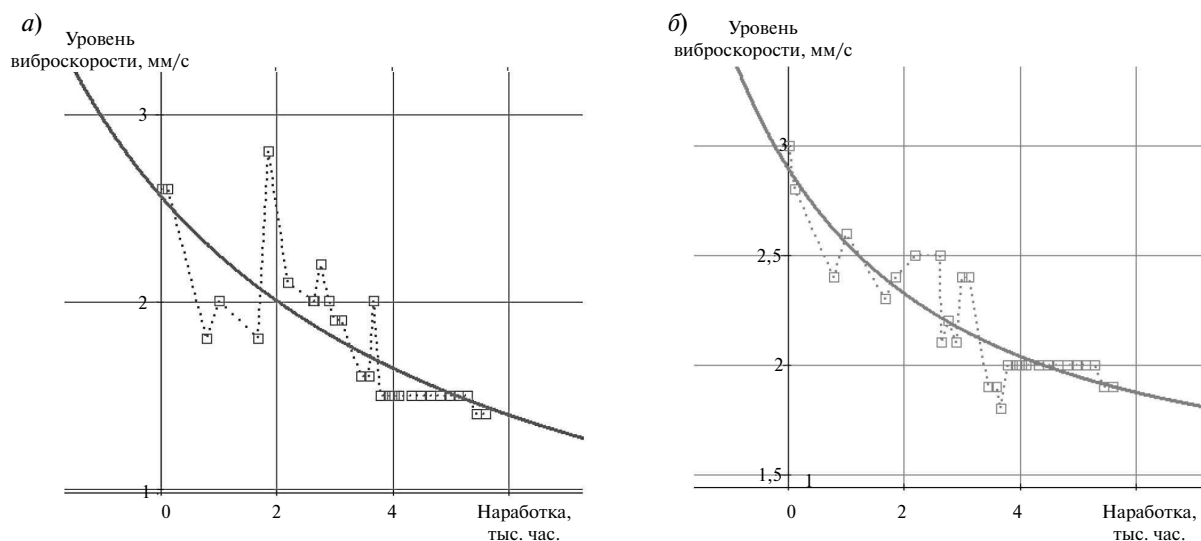


Рис. 5. Вибрация на редукторе КТ-3 в вертикальном (а) и боковом направлении (б)

По результатам анализа результатов натуральных испытаний ФПАВ «Валкон» на ЭГПА СТД-4000 сделаны следующие выводы:

наиболее проблемными узлами, определяющими работоспособность ГПА, являются зубчатая муфта, зубчатое зацепление и подшипники скольжения;

применение фтортензидных композиций «Валкон» способствует удержанию смазочной среды в зоне трения, исключая сухое трение в период пуска и останова агрегатов;

композиция «Валкон» повышает стабильность функционирования ГПА, снижая уровень вибрации не менее чем на 20 %;

значительно повышается эффективность работы зубчатых муфт, а взаимное вибрационное влияние узлов снижается от 1,5 до 5 раз;

безвозвратные потери масла снижаются на 18 % и составляют 0,23 кг/час;

максимальная температура на подшипниках скольжения при одинаковой температуре наружного воздуха снижается минимум на 3 °С;

коэффициент механических потерь уменьшается на 5,3 % по сравнению с состоянием до обработки ФПАВ.

По состоянию на 27.02.2012 наработка (время безотказной работы) ГПА №1 Валдайской КС после обработки составила 9284 час, ГПА №3—9861 час (при среднегодовой наработке на отказ $T_{нo}$ ЭГПА СТД-4000 КС ООО «Газпром трансгаз Санкт-Петербург» за 2008 год — 5170 час., за 2009 год — 5253 час., за 2010 год — 3970 час., за 2011 год — 2976 час.), что свидетельствует о значительном увеличении $T_{нo}$ ЭГПА СТД-4000 и, соответственно, повышении эксплуатационной надежности агрегатов, прошедших обработку ФПАВ «Валкон».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Козаченко А.Н. Эксплуатация компрессорных станций магистральных газопроводов: Справочник / А.Н. Козаченко. М.: Нефть и газ, 1999. 463 с.
2. Шварц Г.Р., Великий С.Н., Михель А.А. [и др.]. Долгосрочное прогнозирование технического состояния парка энергетического оборудования ОАО «Газпром» // Газовая промышленность. 2009. № 628. С. 26–31.
3. Терентьев А.Н., Седых З.С., Дубинский В.Г. Надежность газоперекачивающих агрегатов с газотурбинным приводом. М.: Недра, 1979. 207 с.

4. Яковлев Е.И., Фетисенкова Н.И., Рябченко А.С. Техническая диагностика газоперекачивающих агрегатов. М.: Изд-во МИНГ, 1988. 240 с.
5. Кашеев В.Н. Процессы в зоне фрикционного контакта металлов. М.: Машиностроение, 1978. 213 с.
6. Крагельский И.В., Алисина В.В. Трение, изнашивание и смазка: Справочник в 2 кн. Кн. 1. М.: Машиностроение, 1978. 400 с.
7. Кунина П.С., Павленко П.П., Величко Е.И. Диагностика энергетического оборудования трубо-

проводного транспорта нефти и газа: Монография. Краснодар: Издательский дом «Юг», 2010. 552 с.

8. **Гришко В.А.** Повышение износостойкости зубчатых передач. М.: Машиностроение, 1977. 232 с.

9. **Кораблев А.И., Решетов Д.Н.** Повышение несущей способности и долговечности зубчатых передач. М.: Машиностроение, 1968. 288 с.

10. **Хрущов М.М.** Лабораторные методы испытания на изнашивание материалов зубчатых колес. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 240 с.

11. **Гаркунов Д.Н.** Триботехника (конструирована-

ние, изготовление и эксплуатация машин): Учебник. М.: Изд-во МСХА, 2002. 632 с.

12. **Ахматов А.С.** Молекулярная физика граничного трения. М.: Физматгиз, 1963. 472 с.

13. **Белов А.В.** Эффективность применения нанозащитных фтортензидных композиций в задачах повышения износостойкости и технического ресурса тяжело нагруженных пар и узлов трения высокоэнергетических агрегатов: Монография. Санкт-Петербург: Изд-во Балт. гос. техн. у-нта, 2011. 92 с.

14. **Исикава Н.** Новое в технологии соединений фтора: Пер. с японск. М.: Мир, 1984. 592 с.

REFERENCES

1. **Kozachenko A.N., Velikiy S.N., Mikhel A.A. [i dr.].** Eksploatatsiya kompressornykh stantsiy magistralnykh gazoprovodov: Spravochnik. M.: Neft i gaz, 1999. 463 s. (rus.)

2. Shvarts G.R., Dolgosrochnoye prognozirovaniye tekhnicheskogo sostoyaniya parka energeticheskogo oborudovaniya OAO «Gazprom». *Gazovaya promyshlennost*. 2009. № 628. S. 26–31. (rus.)

3. **Terentyev A.N., Sedykh Z.S., Dubinskiy V.G.** Nadezhnost gazoperekachivayushchikh agregatov s gazoturbinnym privodom. M.: Nedra, 1979. 207 s. (rus.)

4. **Yakovlev Ye.I., Fetisenkova N.I., Ryabchenko A.S.** Tekhnicheskaya diagnostika gazoperekachivayushchikh agregatov. M.: Izd-vo MING, 1988. 240 s. (rus.)

5. **Kashcheyev V.N.** Protsessy v zone friktsionnogo kontakta metallov. M.: Mashinostroyeniye, 1978. 213 s. (rus.)

6. **Kragelskiy I.V., Alisina V.V.** Treniye, iznashivaniye i smazka: Spravochnik v 2 kn. Kn. 1. M.: Mashinostroyeniye, 1978. 400 s. (rus.)

7. **Kunina P.S., Pavlenko P.P., Velichko Ye.I.** Diagnostika energeticheskogo oborudovaniya truboprovodnogo transporta nefi i gaza: Monografiya. Krasnodar:

Izdatelskiy dom «Yug», 2010. 552 s. (rus.)

8. **Grishko V.A.** Povysheniye iznosostoykosti zubchatykh peredach. M.: Mashinostroyeniye, 1977. 232 s. (rus.)

9. **Korablev A.I., Reshetov D.N.** Povysheniye nesushchey sposobnosti i dolgovechnosti zubchatykh peredach. M.: Mashinostroyeniye, 1968. 288 s. (rus.)

10. **Khrushchov M.M.** Laboratornyye metody ispytaniya na iznashivaniye materialov zubchatykh koles. M.: Izd-vo AN SSSR, 1962. 240 s. (rus.)

11. **Garkunov D.N.** Tribotekhnika (konstruirovaniye, izgotovleniye i eksploatatsiya mashin): Uchebник. M.: Izd-vo MSKhA, 2002. 632 s. (rus.)

12. **Akhmatov A.S.** Molekulyarnaya fizika granichnogo treniya. M.: Fizmatgiz, 1963. 472 s. (rus.)

13. **Belov A.V.** Effektivnost primeneniya nanozashchitnykh ffortenzidnykh kompozitsiy v zadachakh povysheniya iznosostoykosti i tekhnicheskogo resursa tyazhelonagruzhennykh par i uzlov treniya vysokoenergeticheskikh agregatov: Monografiya. Sankt-Peterburg: Izd-vo Balt. gos. tekhn. u-nt., 2011. 92 s. (rus.)

14. **Isikava N.** Novoye v tekhnologii soyedineniy ffora: Per. s yaponsk. M.: Mir, 1984. 592 s. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

СВЕРДЛОВ Александр Борисович — аспирант Балтийского государственного технического университета «Военмех» им. Д.Ф. Устинова, 190005, Санкт-Петербург, 1-ая Красноармейская ул., д. 1. E-mail: a.b.sverdlov@gmail.com

AUTHORS

SVERDLOV Aleksandr B. — Baltic State Technical University «Voennmeh» named after D.F. Ustinov. 1 1st Krasnoarmeyskaya St., St.Petersburg, 190005, Russia. E-mail: a.b.sverdlov@gmail.com