

УДК 622.691.4.052.012.

**КОРРЕКТИРОВКА ХАРАКТЕРИСТИК
ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ АГРЕГАТОВ (ГПА) ДОЖИМНЫХ
КОМПРЕССОРНЫХ СТАНЦИЙ (ДКС) В ПРОЦЕССЕ
ЭКСПЛУАТАЦИИ**

**PERFORMANCE ADJUSTMENTS PUMPING UNITS (GPU)
WITH A BOOSTER COMPRESSOR STATION (BCS) DURING
THE OPERATION**

Глазунов В.Ю., Хафизов А.Р., Давлетов К.М.

ИТЦ ООО «Газпром добыча Надым»,

г. Надым, Российская Федерация

ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный нефтяной технический
университет», г. Уфа, Российская Федерация

V.Y. Glazunov, A.R. Hafizov, K.M. Davletov

ITC LLC “Gazprom mining Nadym”, Nadym, the Russian Federation

FSBEI of NPE “Ufa State Petroleum Technological University”,

Ufa, the Russian Federation

e-mail: hafizov57@mail.ru

Аннотация. Конструкция ГПА должна обеспечивать восстановление при капитальных ремонтах номинальных показателей мощности и КПД. Степень ухудшения зависит, главным образом, от совершенства конструкции (стабильности геометрии узлов и деталей при длительной наработке), ее приспособленности к восстановлению характеристик, как в процессе эксплуатации, так и в процессе техобслуживания и ремонта.

Однако реальные величины снижения показателей могут быть значительно больше. Регламент диагностического обслуживания газоперекачивающих агрегатов ОАО «Газпром» имеет расширенные допуски в зависимости от принадлежности к одному из четырех классов технического состояния ГТУ и ЦБК: исправное, удовлетворительное, неудовлетворительное и эксплуатация нежелательна.

Для решения задач по диагностированию, моделированию и оптимизации режимов ГПА ДКС рекомендуется использовать усовершенствованные алгоритмы, учитывать индивидуальные характеристики ГПА нового поколения, эффект рассогласования работы ступеней и характер сдвига газодинамических характеристик многоступенчатых ЦБК.

При составлении программы промывок ГВТ разработчику ГТУ необходимо учитывать климатические условия эксплуатации ГТУ. Применение антифриза при отрицательной температуре наружного воздуха не дает ожидаемого эффекта. Требуется разработка технических мероприятий по поддержанию технического состояния ГТУ.

Для непрерывного мониторинга за техническим состоянием парка ГПА рекомендуется оснащение ГПА техническими и программными средствами диагностики его элементов в комплексе автоматизированных систем технической диагностики.

Авторами статьи разработана модель непрямого сдвига ГДХ на основе теплотехнических испытаний в процессе наработки ГПА, а применение экспериментального поправочного коэффициента на непрямо́й сдвиг ГДХ значительно повышает точность расчета и оценки технического состояния.

Abstract. Design GPA must provide recovery with major overhauls of nominal power and efficiency indicators. The degree of deterioration depends mainly on the design perfection (stablesion geometry of parts and components in the long running time), its suitability for recovery characteristics as during the operation and during maintenance and repair.

However, the real value reduction indicators can be much larger. Regulation predictive maintenance pumping units OAO "Gazprom" has advanced tolerances depending on belonging to one of the four classes of the technical state of gas turbines and PPM: in good, satisfactory, unsatisfactory and undesirable operation.

To meet the challenges of diagnosis, modeling and optimization of GPA ABAC recommended to use advanced algorithms that take into account the individual characteristics of a new generation of GPU, the effect of the error levels and shifting nature of gasdynamic characteristics of multi mill.

In programming washes GW developer STU must consider the climatic conditions of operation GTU. Application of anti-freeze at temperatures below freezing outside air does not give the desired effect. Requires the development of technical measures to maintain the technical state of the GTU.

For continuous monitoring of the technical state of the park equipment GPA recommended hardware and software diagnostic tools of its elements in a complex automated systems of technical diagnostics.

The authors developed a model of indirect shift HDC based on thermal testing in the process of use GPA, and the experimental application of the correction factor for indirect shift HDC significantly improves the accuracy of the calculation and assessment of technical condition.

Ключевые слова: центробежный компрессор, газотурбинная установка, газоперекачивающий агрегат, дожимные компрессорные станции, техническое состояние, диагностика, топливный газ, коэффициент полезного действия.

Key words: centrifugal compressor, a gas turbine plant, pumping unit, booster compressor stations, technical condition, diagnostics, fuel gas efficiency.

Основным назначением дожимных компрессорных станций (ДКС) является поддержание необходимого давления газа в технологической цепочке комплекса «газовый промысел - газотранспортная система» со снижением пластового давления газа по мере разработки месторождения. ДКС имеют ряд технико-технологических особенностей по сравнению с линейными компрессорными станциями:

- существенная изменчивость режимов по параметрам потока во времени;
- компримирование газанекондиционного качества;
- повышенные требования к надежности оборудования и схемных решений ДКС, обеспечивающих надежное функционирование газового промысла;
- эксплуатация ГПА в северных условиях при значительной удаленности от сервисных центров;
- непрерывное технологическое развитие оборудования ДКС по годам разработки месторождения: ввод новых компрессорных цехов, замена типоразмера газотурбинных установок (ГТУ) и сменных

проточных частей (СПЧ) центробежных компрессоров (ЦБК), модернизация и реконструкция объектов добычи.

Таким образом, для ГПА ДКС характерны переменные режимы в широком диапазоне загрузки ГТУ и расходно-напорной характеристики ЦБК и переоснащение СПЧ по мере развития дожимного комплекса. Это определяет особый подход к анализу характеристик, построения диагностических и математических моделей ГПА. Поддержание характеристик в исправном состоянии определяется не только важным требованием по энергоэффективности режимов, но и требованием по обеспечению максимально возможной пропускной способности ДКС в период пиковых нагрузок.

В соответствии с ГОСТ 28775-90 снижение мощности и КПД ГТУ за межремонтный период не должно превышать соответственно 4% и 2% (относительных) от номинальной, а КПД ЦБК - 2% (относительных). Конструкция ГПА должна обеспечивать восстановление при капитальных ремонтах номинальных показателей мощности и КПД. Степень ухудшения зависит, главным образом, от совершенства конструкции (стабильности геометрии узлов и деталей при длительной наработке), ее приспособленности к восстановлению характеристик как в процессе эксплуатации, так и в процессе техобслуживания и ремонта. Однако реальные величины снижения показателей могут быть значительно больше. Регламент диагностического обслуживания газоперекачивающих агрегатов ОАО «Газпром»[1] имеет расширенные допуски в зависимости от принадлежности к одному из четырех классов технического состояния ГТУ и ЦБК: исправное, удовлетворительное, неудовлетворительное и эксплуатация нежелательна.

При известном техническом состоянии на основе обобщенных или индивидуальных характеристик ГТУ возможно определить располагаемую мощность ГТУ в зависимости от климатической характеристики, а также расход топливного газа и эффективный КПД ГТУ на переменных режимах (таблица 1).

Таблица 1. Обобщенные и индивидуальные характеристики ГТУ

Обобщенные характеристики ГТУ	Индивидуальные характеристики ГТУ
<p>Располагаемая мощность:</p> $N_e^p = N_{e0} \cdot K_N \cdot K_t \cdot K_y \cdot K_{\bar{n}} \cdot K_{Pa}$	$N_e^p = N_e^{TY} \cdot K_N \cdot K_{OT} \cdot K_y \cdot K_{\bar{n}} \cdot K_{Pa},$ $N_e^{TY} = f_1(T_a), K_{OT} = f_2(T_a),$ $K_{\bar{n}} = f_3(n_{CT}, N_e, T_a)$
<p>Расход топливного газа:</p> $q_{TG} = q_{TG0} \left(0,75 \cdot \frac{N_e}{N_{e0}} + 0,25 \cdot K_{Pa} \cdot \sqrt{\frac{T_a}{288}} \right) \cdot K_{TG} \cdot K_{\bar{n}}$	$q_{TG} = q_{TG0} \left(K_q \frac{N_e}{N_{e0}} + (1 - K_q) \cdot K_{Pa} \cdot \sqrt{\frac{T_a}{288}} \right) \cdot K_{TG} \cdot K_{\bar{n}}$
<p>Эффективный КПД:</p> $\eta_e = \frac{3,6 \cdot 10^3 \cdot N_e}{q_{TG} \cdot Q_{TC}}$	$\eta_e = \frac{3,6 \cdot 10^3 \cdot N_e}{q_{TG} \cdot Q_{TC}}$

Примечание: обозначения и индексы параметров общепринятые в п. 18.7 СТО Газпром 2-3.5-051-2006, кроме N_e^{TY} -климатическая характеристика ГТУ с учетом программы ограничения режимов по ТУ, K_{OT} -коэффициент влияния отборов воздуха от осевого компрессора на противообледенительную систему и станционные нужды, K_q -коэффициент аппроксимации характеристики расхода топливного газа, для ГПА нового поколения условно равен 0,85 вместо 0,75 из-за пологости характеристик.

Обобщение характеристик ГТУ проведено институтом «ВНИИГАЗ» для парка ГПА 70-80 гг. [2] и для ГПА нового поколения они могут значительно отличаться от индивидуальных, особенно на

режимах частичной загрузки (для расхода топливного газа более 10 % относительных). Это может объясняться требованиями в СТО Газпром 2-3.5-138-2007 по экономичности и пологости нагрузочных характеристик ГТУ для современных ГПА. Для повышения точности расчетов при моделировании и оптимизации режимов работы ДКС рекомендуется использовать индивидуальные характеристики ГПА: газодинамические характеристики (ГДХ) ЦБК, дроссельные и климатические характеристики ГТУ, а также учитывать снижение располагаемой мощности при отборах воздуха от компрессора газогенератора на противообледенительную систему и стационарные нужды.

Для оценки технического состояния ГПА на практике применяют предложенные ВНИИГАЗ два основных показателя интегрально оценивающие техническое состояние проточной части: коэффициент технического состояния ГТУ по мощности и коэффициент технического состояния ЦБК по политропному КПД. Для однопараметрической диагностической модели принято, что эквидистантный (прямой) сдвиг характеристик осуществляется при условии постоянства одного параметра: для ГТУ это приведенная температура продуктов сгорания по тракту или обороты газогенератора, соответствующие неконтролируемому параметру температуре продуктов сгорания перед турбиной высокого давления; а для ЦБК это приведенный объемный расход на входе. Физический смысл коэффициентов технического состояния для ГТУ заключается в их способности характеризовать уменьшение эффективной мощности и КПД, увеличение расхода топливного газа; для ЦБК - повышение необратимых превращений работы в тепло, увеличения затрат на

компримирование, что в итоге приводит к уменьшению производительности ГПА.

Особое внимание следует уделить к ГДХ многоступенчатых ЦБК. Для типоразмера СПЧ на отношение давлений более 2,2 на переменных режимах ЦБК возможно несовпадение приведенных характеристик в области ГДХ из-за эффекта рассогласования режимов работы ступеней. Под рассогласованием режимов работы ступеней многоступенчатого ЦБК понимают изменение начальных условий на входе в последующие ступени при изменении начальных условий на входе в предыдущие. Для повышения достоверности пересчета ГДХ многоступенчатых ЦБК на переменных режимах необходимо применить поступенчатый метод разложения ГДХ компрессора на характеристики «условных» ступеней с последующим их пересчетом и синтезом [3, 4]. Другое практическое решение является более точным и предполагает получение ГДХ для трех и более изодром при испытаниях с последующей их аппроксимацией для всей области ГДХ. В эксплуатационных условиях ДКС это достаточно трудоемкая и часто нереализуемая задача.

Результаты испытаний парка ГПА ДКС показали, что при ухудшении технического состояния многоступенчатых ЦБК происходит не эквидистантный сдвиг ГДХ: характеристики политропного напора и КПД смещаются вниз с разворотом по часовой стрелке относительно оптимальной области или номинального режима, наклон увеличивается, сокращается диапазон расходно-напорной характеристики. Эквидистантный сдвиг сохраняется в узком диапазоне относительно оптимальной области. По результатам стендовых испытаний данный эффект сдвига [5].

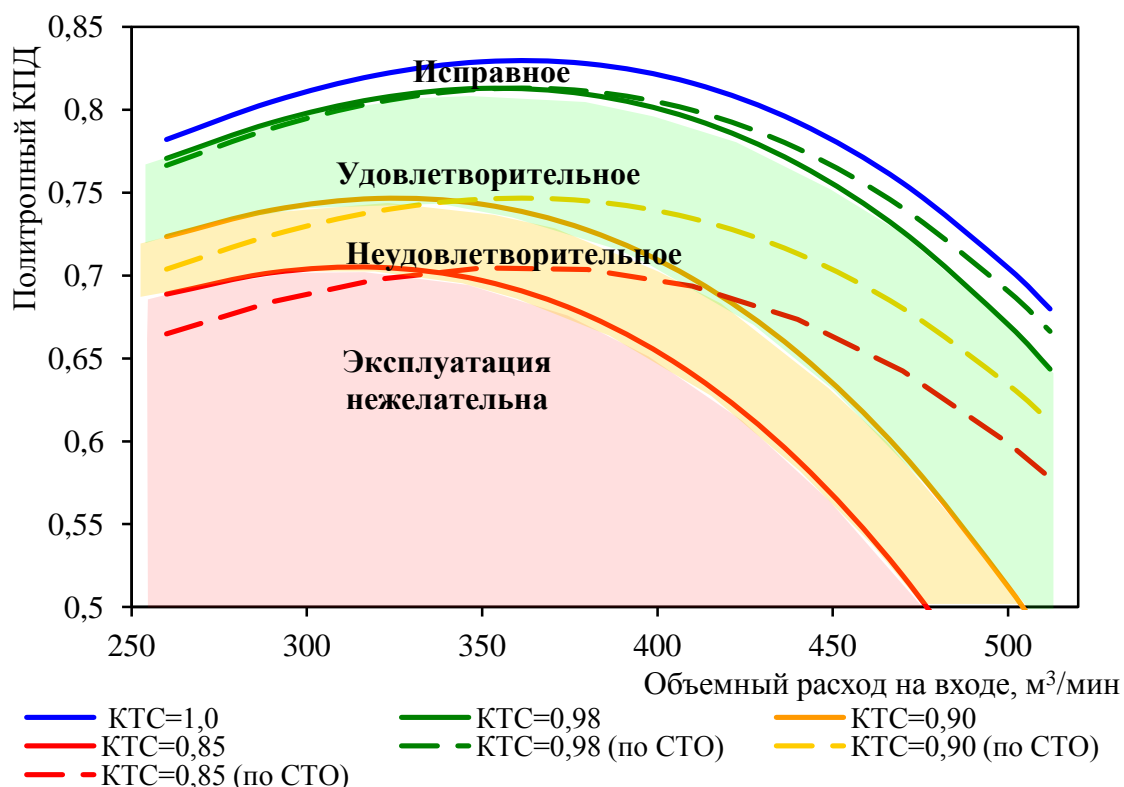


Рисунок 1. Сопоставление моделей сдвига ГДХ при ухудшении технического состояния многоступенчатых ЦБК

На рисунке 1 показано сравнение моделей сдвига ГДХ многоступенчатого ЦБК 498-21-1Л с СПЧ 498-1,7-76 производства «Компрессорный комплекс» для четырех классов технического состояния. Допущение прямого сдвига характеристик приводит к некорректной оценке технического состояния в диапазоне производительности. Коэффициент технического состояния не сохраняется в диапазоне производительности. Поэтому рекомендуется оценивать техническое состояние в оптимальной области относительно номинального режима. При коэффициенте технического состояния (КТС) равным 0,85 в оптимальной области ГДХ для модели эквидистантного сдвига возможна оценка из трех классов

технического состояния в диапазоне производительности, что создает трудности при диагностировании ЦБК

Для возможности оценивать и корректировать ГДХ многоступенчатых ЦБК в рабочем диапазоне производительности, авторами статьи разработана модель непрямого сдвига ГДХ на основе теплотехнических испытаний в процессе наработки ГПА (таблица 2). Применение экспериментального поправочного коэффициента на непрямо́й сдвиг ГДХ значительно повышает точность расчета и оценки технического состояния.

Таблица 2. Модели сдвига ГДХ многоступенчатых ЦБК

Базовая ГДХ, полученная в начальный период наработки	Фактические ГДХ при эквидистантном сдвиге	Фактические ГДХ при непрямом сдвиге
<p>политропный КПД:</p> $\eta_{пол} = f_1(Q_{1H_{np}}),$ <p>полный напор:</p> $H_{i_{np}} = f_2(Q_{1H_{np}}),$ <p>политропный напор:</p> $H_{пол_{np}} = f_3(Q_{1H_{np}})$ <p>расчетные соотношения:</p> $\eta_{пол} = \frac{H_{пол_{np}}}{H_{i_{np}}},$ $\frac{N_i}{\rho_{1H}} = \frac{H_i \cdot Q_{1H}}{60}$	$\eta_{пол}^{\phi} = K_{\eta_n} \cdot \eta_{пол},$ $H_{i_{np}}^{\phi} = K_{Hi} \cdot H_{i_{np}},$ $H_{пол_{np}}^{\phi} = H_{i_{np}}^{\phi} \cdot \eta_{пол}^{\phi},$ <p>Допущение в СТО Газпром:</p> $K_{Hi} = 1,0,$ $K_H = K_{\eta_n} = K_{H_n}.$	$\eta_{пол}^{\phi} = K_{\eta_n} \cdot f_7(Q_{1H_{np}} \cdot f_Q)$ $H_{i_{np}}^{\phi} = K_{Hi} \cdot H_{i_{np}},$ $H_{пол_{np}}^{\phi} = H_{i_{np}}^{\phi} \cdot \eta_{пол}^{\phi},$ <p>где $f_Q = (1 + K_Q \cdot (1 - K_{\eta_n}))$, при отсутствии диагностической информации $K_{Hi} = 1,0, K_Q = 1,0.$</p>

Примечание: обозначения и индексы параметров общепринятые в СТО Газпром.

Опыт эксплуатации ГПА ДКС показывает, что в процессе наработки СПЧ происходит интенсивное ухудшение технического состояния по экспоненте первые 500 ч., затем этот процесс стабилизируется (рисунок 2). Ухудшение технического состояния ЦБК сопровождается понижением политропного напора и КПД, повышением частоты вращения и потребляемой мощности в гарантийной точке по техническому заданию (ТЗ). В результате уменьшается диапазон режимов и производительность ГПА, возрастает неравномерность нагрузки между ГПА в КЦ. Процесс приработки может объясняться следующими причинами: увеличением зазоров в уплотнениях и не герметичностью уплотнительных элементов, разрушением защитного покрытия и повышении шероховатости проточной части при отложениях солей и т.д. Возможна ситуация, когда с увеличением наработки ЦБК продолжается ухудшение технического состояния до оценки «неудовлетворительно».

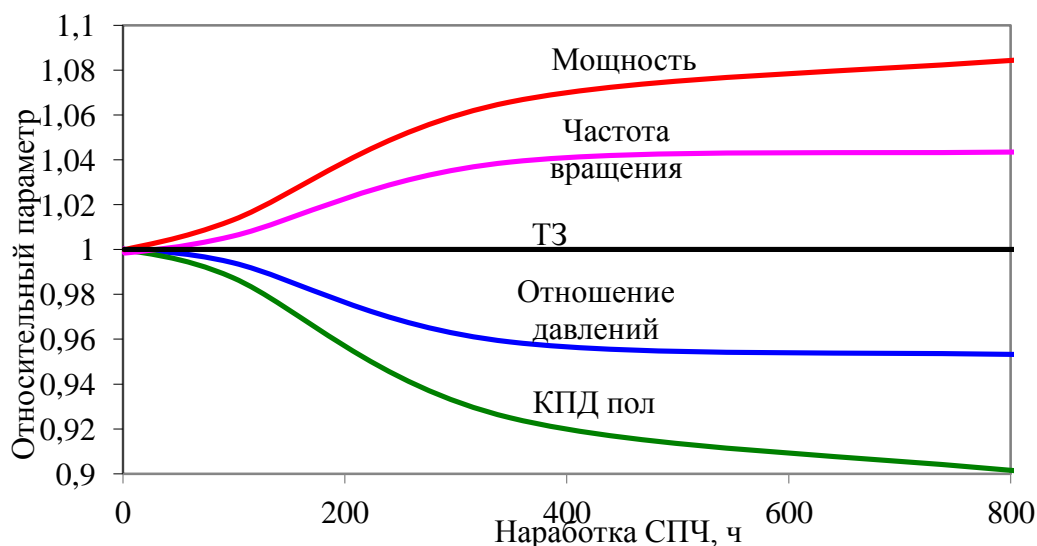


Рисунок 2 - Мониторинг технического состояния многоступенчатых ЦБК

Большинство СПЧ для ЦБК ДКС разрабатываются впервые для специфических условий работы газового промысла и не имеют достаточного опыта для надежной и эффективной эксплуатации. В некоторых случаях требуется восстановительные ремонты с доводкой оборудования по обеспечению стабильности геометрии конструкции и повышению виброустойчивости ГПА. Особенность конструкции высоконапорных ЦБК: многоступенчатость, увеличенная площадь поверхности СПЧ и протяженность каналов, зауженные рабочие колеса - повышает чувствительность к загрязнению и отложению солей. Согласно требованию СТО Газпром 2-2.1-588-2011 концентрация жидкости в выходящем из сепаратора газовом потоке (унос относительный) не должна превышать 5 г/тыс. м³. При залповом поступлении жидкости в первичные сепараторы существенно снижается их эффективность, о чем свидетельствует наличие жидкости во всасывающих коллекторах ДКС, резкое ухудшение технического состояния ЦБК до оценки «эксплуатация нежелательна», увеличение количества и трудоемкости ремонтов ЦБК. Требуется своевременное проведение модернизации сепарационного оборудования. Для последовательных многоцеховых ДКС необходимо поддерживать температурный режим в промежуточных АВО газа для исключения конденсации жидкости и попадания ее на вход ГПА.

Во избежание снижения эффективного КПД и располагаемой мощности ГТУ в соответствии с требованиями ГОСТ 28775 и СТО Газпром 2-3.5-138 ГПА с газотурбинным приводом должны быть оснащены устройством (системой) периодической очистки (промывки) проточной части компрессора ГТУ. Система должна обеспечивать промывку не только при выключенном из работы

агрегате, но и во время его работы. В северных условиях при отрицательной температуре наружного воздуха достаточно проблематично выдержать оптимальную программу промывок газовоздушного тракта (ГВТ) ГТУ. Это вызвано требованием по температурному режиму проведения промывок ГВТ не ниже плюс 5 °С. При температуре наружного воздуха от минус 10 °С и выше возможно использовать антифриз вместо дистиллированной воды для приготовления раствора моющей жидкости. Однако при такой процедуре снижается качество промывок. Таким образом, не выполняется рекомендуемый интервал между промывками, цикл промывок становится асинхронным и смещается на теплое время года (3 квартал).

Следует понимать, что промывки устраняют только загрязнения ГВТ, из-за накопления необратимых дефектов техническое состояние полностью не восстанавливается. Загрязнение ГВТ приводит к снижению располагаемой мощности и эффективного КПД, к повышению расхода топливного газа, частоты вращения и температуры продуктов сгорания для подобного режима. Возрастает нагрузка на элементы конструкции и снижается ресурс, что приводит к более интенсивному снижению технического состояния в процессе наработки. При выводе ГТУ в ремонт техническое состояние как правило соответствует оценкам «удовлетворительное» или «эксплуатация не желательна». Не выполняется требование ГОСТ 28775-90 о допустимом снижении мощности и КПД ГТУ за межремонтный период.

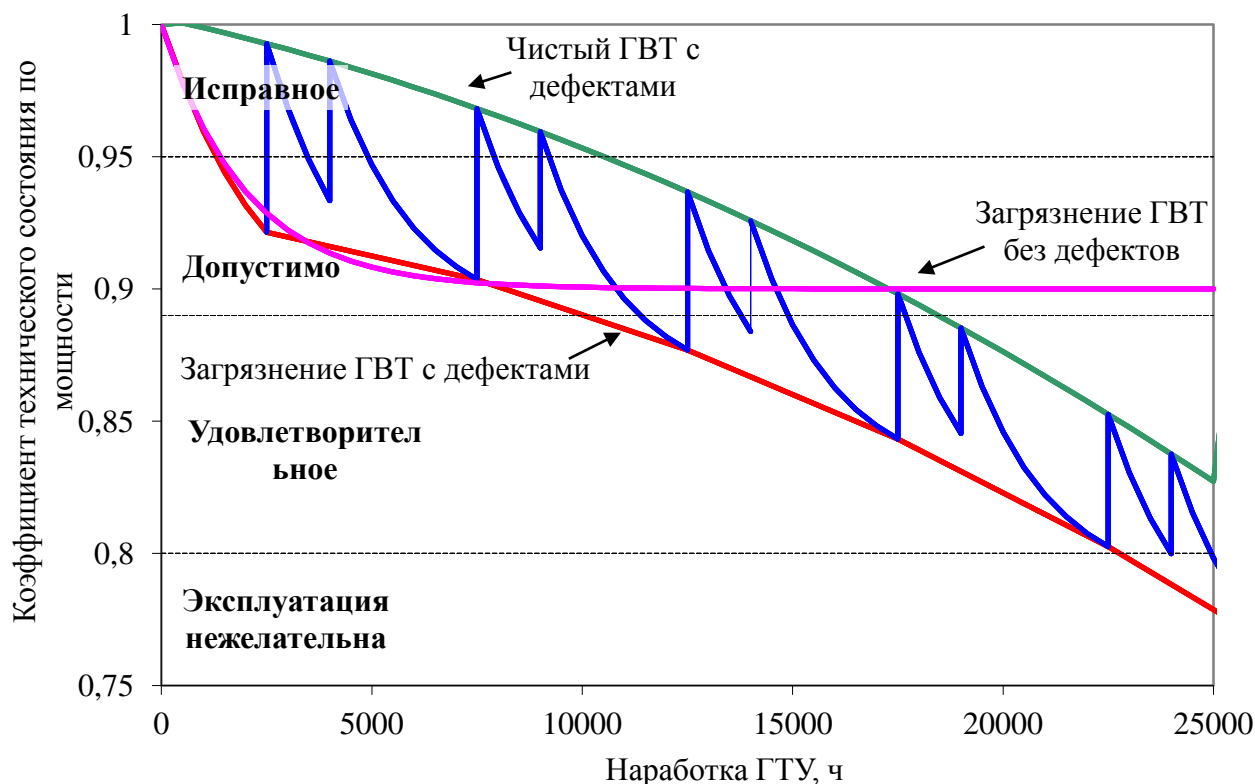


Рисунок 3. Мониторинг технического состояния ГТУ при неоптимальной программе промывок ГВТ

Принципиально на рисунке 3 представлены результаты мониторинга технического состояния ГТУ-16П в процессе наработки: техническое состояние ГТУ для ГВТ без дефектов снижается впервые 2000 ч и затем стабилизируется, но при накоплении дефектов это процесс продолжается, причем более интенсивно для загрязненного ГВТ. Завод - изготовитель ГТУ постоянно разрабатывает технические мероприятия по повышению показателей надежности и совершенствованию конструкции ГТУ. Для последних партий двигателей характерно более стабильное техническое состояние.

Выводы

Для решения задач по диагностированию, моделированию и оптимизации режимов ГПА ДКС рекомендуется использовать усовершенствованные алгоритмы и модели, учитывать индивидуальные характеристики ГПА нового поколения, эффект рассогласования работы ступеней и отсутствие прямого сдвига ГДХ многоступенчатых ЦБК.

Уровень интенсивности ухудшения технического состояния ГПА ДКС связан с особенностью конструкции многоступенчатых ЦБК при компримировании «сырого» газа и невозможностью проведения качественных промывок ГВТ ГТУ при отрицательной температуре наружного воздуха.

Рекомендуется особый контроль за характеристиками многоступенчатых ЦБК, особенно в первые 500 ч наработки. Актуальны требования по качеству компримированного газа ДКС, особенно при осложнениях эксплуатации ГП на завершающем этапе разработки месторождений. Для защиты ГПА требуется своевременная модернизация сепарационного оборудования и мониторинг уноса.

При составлении программы промывок ГВТ разработчику ГТУ необходимо учитывать климатические условия эксплуатации ГТУ. Применение антифриза при отрицательной температуре наружного воздуха не дает ожидаемого эффекта. Требуется разработка технических мероприятий по поддержанию технического состояния ГТУ.

Для непрерывного мониторинга за техническим состоянием парка ГПА рекомендуется оснащение ГПА техническими и

программными средствами диагностики его элементов в комплексе автоматизированных систем технической диагностики.

Список используемых источников

1. Регламент диагностического обслуживания газоперекачивающих агрегатов ОАО «Газпром». 2-я ред. М., 2004. 5с.

2. Инструкция по определению показателей и обобщенных характеристик газотурбинных установок для привода нагнетателей. М.: ВНИИГАЗ, 1982. 29 с.

3. Ден Г. Н. Проектирование проточной части центробежных компрессоров: Термогазодинамические расчеты. Л.: Машиностроение, 1980. 232 с.

4. Примак А. Н. Пересчет газодинамических характеристик ступеней и многоступенчатых секций центробежных компрессоров// Механизация строительства. 2012. №7. С.44-48.

5. Быков Г.А., Быкова О.Г. Системный анализ и обобщение результатов стендовых испытаний газовых центробежных компрессоров// Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2006. №9. С. 26–31.

References

1. Reglament diagnosticheskogo obsluzhivaniya gazoperekachivajushhih agregatov ОАО «Gazprom». 2-ja red. M., 2004. 5s. [in russian].

2. Instrukcija po opredeleniju pokazatelej i obobshhennyh harakteristik gazoturbinnih ustanovok dlja privoda nagnetatelej. M.: VNIIGAZ, 1982. 29 s. [in russian].

3. Den G. N. Proektirovanie protochnoj chasti centrobeznyh kompressorov: Termogazodinamicheskie raschety. L.: Mashinostroenie, 1980. 232 s. [in russian].

4. Primak A. N. Pereschet gazodinamicheskikh harakteristik stupenej i mnogostupenchatyh sekcij centrobeznyh kompressorov// Mehanizacija stroitel'stva. 2012. №7. S.44-48. [in russian].

5. Bykov G.A., Bykova O.G. Sistemnyj analiz i obobshhenie rezul'tatov stendovyh ispytanij gazovyh centrobeznyh kompressorov// Himicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie. 2006. №9. S. 26–31. [in russian].

Сведения об авторах

Information about authors

Глазунов В. Ю., руководитель группы специалистов по моделированию и оптимизации режимов работы систем подготовки газа к транспорту, ИТЦ ООО «Газпром добыча Надым», г. Надым, Российская Федерация

V. Yu. Glazunov, head of the specialist group on modeling and optimization of production systems to transport gas, ITC LLC. "Gazprom mining Nadym" Nadym, the Russian Federation

Хафизов А. Р., д-р техн. наук, декан ГНФ, ФГБОУ ВПО УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

A. R. Hafizov, Doctor of Technical Sciences, dean of the mountain - petroleum faculty, FSBEI of HPE "Ufa State Petroleum Technological University", Ufa, the Russian Federation

e-mail: hafizov57@mail.ru

Давлетов К.М., д-р техн. наук, начальник служб ИТЦ ООО
«Газпром добыча Надым», г. Надым, Российская Федерация

K.M. Davletov, Doctor of Technical Sciences, Head of production
process monitoring collection and preparation of gas "Gazprom mining
Nadym" Nadym, the Russian Federation