

УДК 621.644.029

**ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ НАДЕЖНОСТИ  
АГРЕГАТОВ ПЕРЕКАЧКИ МАГИСТРАЛЬНОГО ГАЗА**

**THE PIPELINE GAS TURBINE SET  
RELIABILITY PARAMETERS ESTIMATION**

**Байков И. Р., Смородова О. В., Китаев С. В.**

**Уфимский государственный нефтяной технический университет,  
г. Уфа, Российская Федерация**

**I. R. Baikov, O.V. Smorodova, S.V. Kitaev**

**Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, the Russian Federation**

**e-mail: [olga\\_smorodova@mail.ru](mailto:olga_smorodova@mail.ru)**

**Аннотация.** Рассмотрены вопросы оценки показателей надежности газоперекачивающих агрегатов системы магистрального транспорта газа России на примере ГТК-10. Представлена структура парка ГПА по типам оборудования. Показано, что агрегаты этого типа составляют самую обширную группу газоперекачивающего оборудования страны.

Установлено, что значительная часть газоперекачивающих агрегатов изношена. Около 8% ГПА отработали более 100 тыс. ч., 45% - 50÷100 тыс. ч. На примере одного из дочерних обществ ПАО «Газпром» проведен анализ количественных показателей наработки на отказ агрегатов ГТК-10. Построена эмпирическая функция надежности агрегатов, плотность распределения наработки агрегатов на отказ после капитального ремонта, интенсивность отказов.

По параметру «плотность распределения на отказ» ГПА после капитального ремонта установлен вид закона распределения наработки на отказ. Показано, что им является закон распределения Вейбулла.

Анализ статистических данных об эксплуатации агрегатов показал, что весь жизненный цикл работы агрегатов может быть разбит на 3 характерных участка – обкатка, период нормальной эксплуатации, период износа и старения. Для каждого временного периода определены параметры распределения Вейбулла и представлены в табличной форме.

В заключении работы сделаны выводы о том, что этапы обкатки оборудования и его старения обладают повышенной интенсивностью отказов ГПА. Выявленную закономерность рекомендуется учитывать при планировании ремонтов, вибрационных обследований и выводов газоперекачивающих агрегатов в резерв.

**Abstract.** The article deals with reliability assessment of gas pumping units of the gas pumping system of Russia by the GTC-10 as example. The park structure of gas pumping unit types is presented. It is shown that the aggregates of this type are of the very large group of gas pumping equipment.

It has been established that a significant part of gas pumping units is worn-out. About 8% of GPA worked more than 100 thousand hours, 45% - 50÷100 thousand hours. By the example of one of the subsidiaries of PJSC "Gazprom" the analysis of quantitative indicators MTBF GTC-10 are done. The empirical reliability function, the density of developments units to failure after major repairs distribution, the failure rate are built.

According to the renovated GPA parameter "the failures distribution density" the kind of the distribution law is determined. It is shown that it is the law of the Weibull distribution.

Analysis of statistical data on the operation of gas pumping units showed that the entire life cycle of work can be divided into three characteristic regions - running, normal operation, the period of wear and aging. For each time period, the Weibull distribution parameters are defined and presented in tabular form.

In the end of the article the conclusions about an increased failure rate of GPA at the equipment running and aging steps are done. The identification of

patterns is recommended to be taken into account when planning repairs, vibration surveys and findings of gas pumping units in reserve.

**Ключевые слова:** газоперекачивающий агрегат, газопровод, распределение Вейбулла, надежность, отказ.

**Key words:** gas turbine set, gas pipeline, the Weibull distribution, reliability, failure.

Компримирование природного газа с целью перекачки от месторождений к потребителям осуществляется с помощью нагнетателей магистрального газа [1]. Приводом нагнетателей служит, как правило, газовая турбина. В системе трубопроводного транспорта ПАО «Газпром» используются стационарные, авиационные и судовые газовые турбины (рисунок 1). Общее количество эксплуатируемых ГПА составляет более 3000 единиц [2].

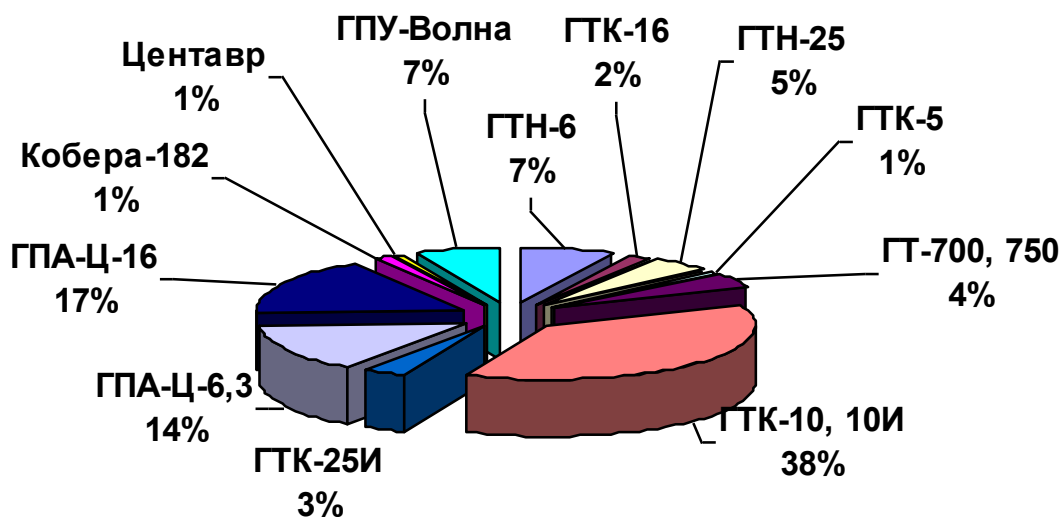


Рисунок 1. Структура парка газоперекачивающих агрегатов

Значительная часть газоперекачивающих агрегатов приближается к предельному сроку эксплуатации и даже превысила его - в эксплуатации находятся газовые турбины выпуска начала 70-х годов [3]. Около 8% ГПА

на настоящий момент эксплуатируются более 100 тыс. ч., 45% - 50÷100 тыс. ч. Как правило, интенсивная выработка ресурса происходит из-за отклонения работы ГПА от расчетного режима, низкого качества монтажных и ремонтных работ, неудовлетворительной подготовки газа, масла, воды и пр. [4].

Следует отметить, что использование различных параметров работы ГПА - уровня вибрации, виброскорости, температуры, давления, коэффициента полезного действия и прочие - при диагностировании позволило адекватно оценить пониженную надежность ГПА не более, чем в 30% случаев [5]. Зачастую названные параметры достоверно идентифицируют предаварийное состояние ГПА на этапе перехода дефектов в разрушения узлов агрегата, тогда как оценка уровня надежности при наличии зарождающегося дефекта, когда еще можно предотвратить разрушение узлов ГПА, является критически необходимой [6].

В рамках промышленного эксперимента вибрационному обследованию были подвергнуты турбины ГТК-10 одной из дочерних компаний ПАО «Газпром», Этот тип турбин представляет собой наибольшую группу среди других газотурбинных машин в системе трубопроводного транспорта природного газа России. Общее количество агрегатов ГТК-10, установленных в стране, составляет более 1000 единиц, что составляет около 35% всего количества стационарных ГПА отечественного производства. Нормативный эксплуатационный цикл между двумя последовательными капитальными ремонтами для ГТК-10 составляет не более 38000 ч.

Для определения основных закономерностей динамики параметров надежности агрегатов был проведен статистический анализ количественных характеристик аварийных отказов агрегатов [7]. Информационной базой проведения анализа явились данные промышленной эксплуатации агрегатов за пятилетний период.

Сравнительный анализ параметров агрегатов при наступлении аварийной ситуации показал, что по мере прохождения агрегатами различных периодов эксплуатации жизненного цикла интенсивность их аварийных отказов существенно меняется (таблица 1) [8].

Таблица 1. Промышленные экспериментальные данные по аварийным отказам ГПА типа ГТК-10

Номер отказа	Номер агрегата в технологической схеме компрессорного цеха	Наработка на отказ, час
1	ГПА №24	228
2	ГПА № 12	669
3	ГПА №25	927
4	ГПА №28	1261
5	ГПА №23	2661
6	ГПА № 18	2880
7	ГПА №21	4056
8	ГПА №28	4374
9	ГПА № 15	6606
10	ГПА № 15	10311
11	ГПА №32	22324
12	ГПА № 26	23022
13	ГПА №25	26438
14	ГПА № 11	27854
15	ГПА №26	29673
16	ГПА № 13	38000

Для идентификации временной динамики параметров надежности ГПА были использованы такие показатели, как функция надежности  $P(t)$  (рисунок 1), функция плотности распределения наработки ГПА на отказ  $q(t)$  (рисунок 2) и интенсивность отказов  $\lambda(t)$  (рисунок 3).

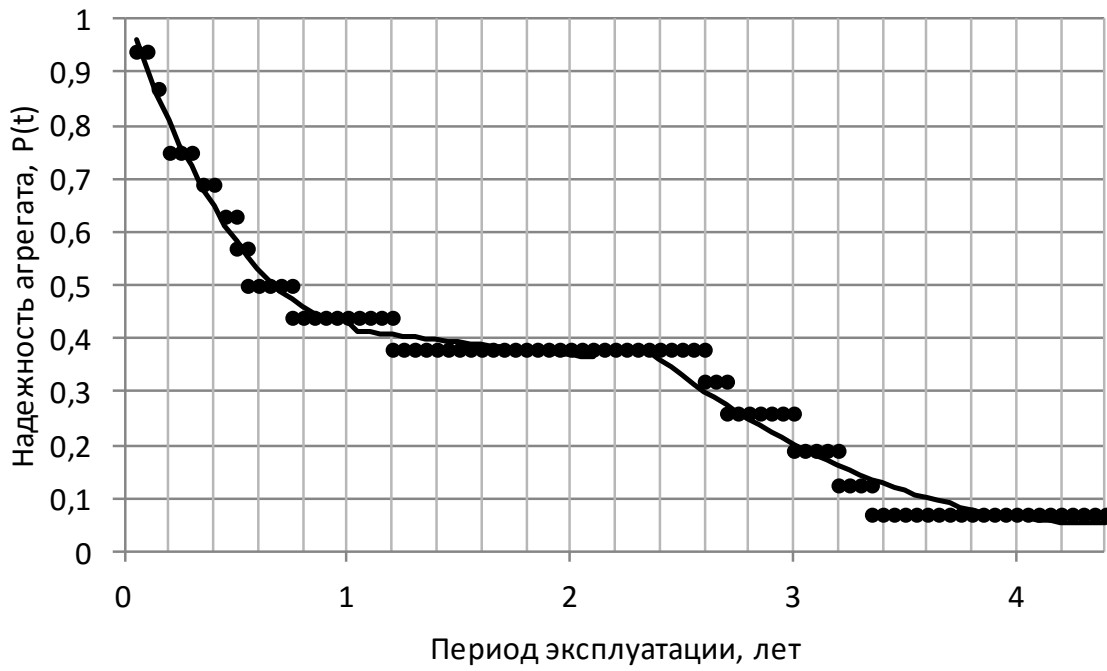


Рисунок 1. Сравнение эмпирической функции надежности ГПА с теоретическим аналогом

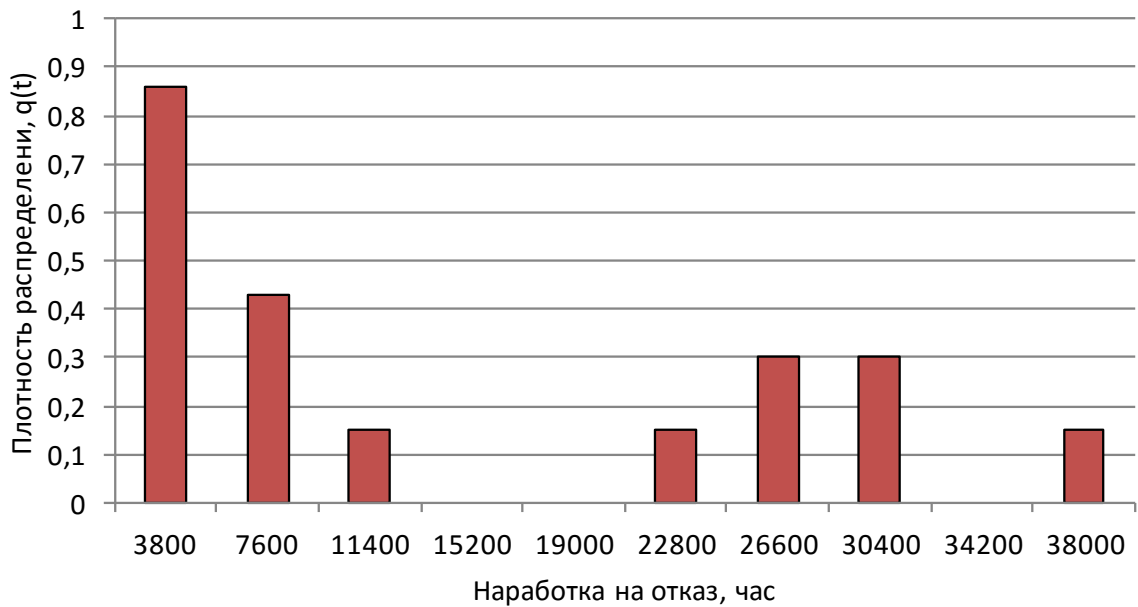


Рисунок 2. Плотность распределения наработки ГПА после капитального ремонта на отказ

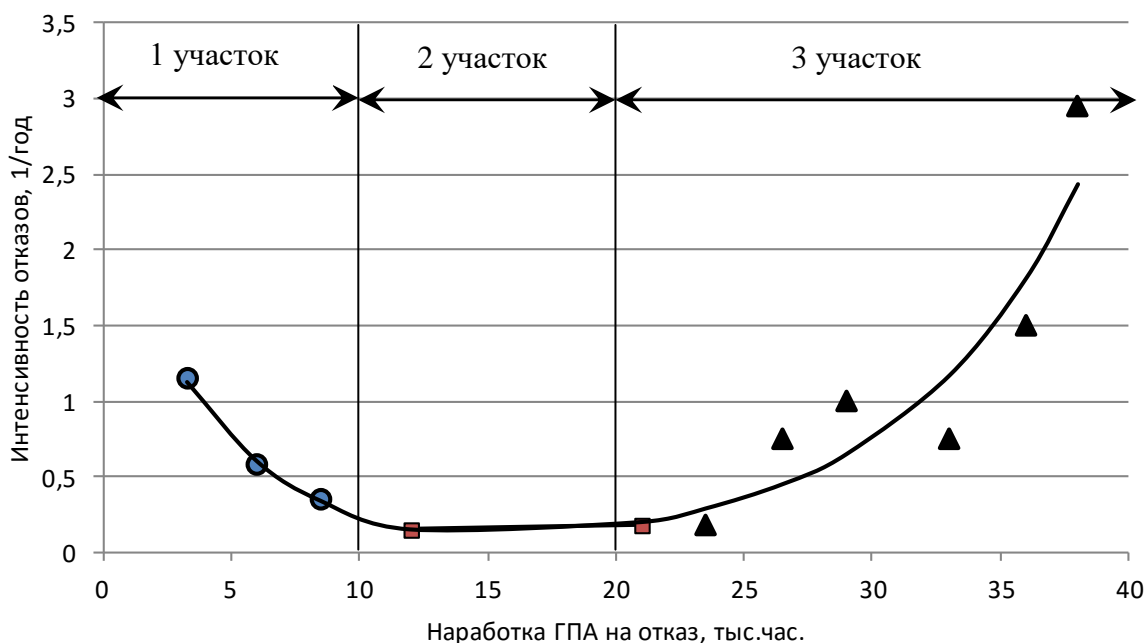


Рисунок 3. Эмпирическая и расчетная лямбда-характеристика ГПА,  $\lambda(t)$

Расчеты показали (рисунок 3), что функция интенсивности отказов  $\lambda(t)$  имеет характерный вид, свойственный распределению Вейбулла. Такой закон распределения случайной величины широко применяется при исследовании надежности машин и их элементов, работающих до отказа. Согласно закону Вейбулла, весь цикл эксплуатации оборудования может быть разделен на три характерных участка.

Начальный период эксплуатации (в нашем случае от 0 до 9000 ч.) является достаточно коротким по сравнению с продолжительностью всего жизненного цикла агрегата. На этом отрезке времени относительная частота отказов велика, аварийные отказы оборудования наступают по следующим причинам:

- скрытый заводской брак узлов и механизмов агрегата (если ГПА пускается впервые после сборки),
- дефект ремонта,
- нарушения нормативной технологии пуска агрегата после ремонта или резерва.

Этот этап эксплуатации носит название периода приработки или обкатки оборудования (на рисунке 3участок 1).

Далее наступает период нормальной эксплуатации газоперекачивающих агрегатов (на рисунке 3 - участок 2). В это время аварийные отказы наступают значительно реже. Как правило, выход из строя ГПА с наработкой более 9000 ч. происходит по случайным причинам, не имеющими непосредственного отношения к развитию дефектов основных узлов и деталей агрегата. Такими причинами может быть падение жаровой трубы или обрушивание сводов камеры сгорания, обрыв трубки подачи масла в систему маслоснабжения ГПА и других. Согласно анализу аварийности газоперекачивающих агрегатов типа ГТК-10, период нормальной эксплуатации длится не далее 20000 ч. жизненного цикла агрегатов.

При эксплуатации турбин ГТК-10 более 20000 ч. наступает период старения (на рисунке 3 - участок 3). На этом этапе интенсивность отказов постепенно увеличивается.

Кривая  $\lambda(t)$  на рисунке 3 имеет некоторую асимметрию. Такая форма лямбда-характеристики объясняется неравномерным темпом приработки и старения газоперекачивающих агрегатов.

Основным показателем надежности работы технологического оборудования является вероятность безотказной работы агрегатов. В самом общем случае функция надежности для распределения Вейбулла описывается соотношением вида

$$P_i(t) = \exp(-\lambda_0 \times (t-a)^\alpha) - P_{i-1},$$

где  $P_i$ ,  $\lambda_0$ ,  $a$  и  $\alpha$  - параметры распределения, определяемые на основе обработки эмпирических сведений о наработке агрегатов на отказ в послеремонтный период.

На трех характерных участках времени эксплуатации ГПА значения параметров распределения Вейбулла  $\lambda_0$  и  $\alpha$  являются различными. На участке приработки - участок 1 - параметр  $\alpha < 1$  и интенсивность отказов монотонно убывает.



На участке нормальной эксплуатации – участок 2 – параметр  $\alpha = 1$  и распределение Вейбулла преобразуется в экспоненциальный закон распределения времени наработки на отказ с функцией надежности

$$P_2(t) = \exp(-\lambda_0 \times (t-a)) - P_1,$$

где  $\lambda_0$  определяется средним значением интенсивности отказов на участке нормальной эксплуатации.

На участке старения – участок 3 -  $\alpha > 1$ , и интенсивность отказа монотонно увеличивается.

Проверка гипотезы о виде закона распределения наработки газоперекачивающих агрегатов на отказ показала, что доверительная вероятность соответствия закона распределения закономерности Вейбулла практически не отличается от единицы.

Параметры распределения Вейбулла  $P_i$ ,  $\lambda_{oi}$ ,  $\alpha_i$  и временные границы  $a_i$  для каждого характерного этапа цикла эксплуатации агрегата были определены методом квантилей. Реализация метода позволила идентифицировать количественно все параметры распределения Вейбулла наработки ГПА на отказ (таблица 2).

Таблица 2. Параметры распределения Вейбулла наработки ГПА на отказ

Номер участка	Тип участка	$\alpha$	$\lambda$ , отк/год	a, год	$P_i$
1	2	3	4	5	6
1	приработка	0,862	0,950	0,00	0,000
2	нормальная эксплуатация	1,000	0,026	1,04	0,628
3	старение	1,876	0,154	2,10	0,629

Согласно результатам расчетов, функция надежности ГПА при их эксплуатации на различных этапах жизненного цикла может быть определена по соотношениям:

$$P(t) = \exp(-0,95t^{0,862}); \quad t \in (0;1,041) \text{ год};$$

$$P(t) = \exp(-0,0255(t - 1,041)) - 0,628; \quad t \in (1,041;2,1) \text{ год};$$

$$P(t) = \exp(-0,154(t - 2,1)^{1,876}) - 0,629; \quad t \in (2,1;4,4) \text{ год};$$

Результаты сравнения эмпирической функции надежности ГПА и ее восстановленного теоретического аналога показали, что их отличие составляет в среднем не более 4% на всей протяженности периода эксплуатации агрегатов.

### **Выводы**

1. Проведенный статистический анализ позволил установить вид закона распределения и определить его характерные параметры.

2. Установлено, что выявленные три этапа жизненного цикла ГПА типа ГТК-10 обладают различной степенью опасности с точки зрения наступления аварийного отказа. Этапы обкатки оборудования и его старения обладают повышенной интенсивностью отказов ГПА.

3. Выявленную закономерность необходимо учитывать при планировании ремонтов, вибрационных обследований и выводов газоперекачивающих агрегатов в резерв.

### **Список используемых источников**

1 Костарева С.Н. Совершенствование методов диагностирования технического состояния газоперекачивающих агрегатов на основе данных производственного мониторинга: дис...канд. техн. наук. Уфа: УГНТУ, 2002. 163 с.

2 Байков И.Р., Китаев С.В., Шаммазов И.А. Перспективы энергоресурсосбережения в условиях длительно эксплуатируемой газотранспортной системы//Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 2012. №4. С.9-13.

3 Байков И.Р., Китаев С.В., Талхин С.Р. Эксплуатация энергомеханического оборудования в современных условиях//Нефтегазовое дело. 2007. Т.5, №1. С.159-162.

4 Иванов Э.С. Особенности моделирования режимов работы газоперекачивающих агрегатов компрессорных станций магистрального транспорта газа в современных условиях эксплуатации//Нефтегазовое дело: электрон. науч. журн./УГНТУ. 2012. № 5. С. 99-123. URL: [http://ogbus.ru/authors/IvanovES/IvanovES\\_2.pdf](http://ogbus.ru/authors/IvanovES/IvanovES_2.pdf)

5 Байков И.Р., Смородова О.В., Костарева С.Н. Оценка технического состояния ГКУ с помощью вибродиагностики//Газовая промышленность. 2001. № 4. С. 39 - 41.

6 Уточнение методики определения технического состояния газоперекачивающих агрегатов /И.Р. Байков, С.В. Китаев, Е.А. Смородов, А.И. Гольянов //Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2001. №3-4. С.3-7.

7 Байков И.Р., Смородова О.В., Костарева С.Н. Прогностическая модель эмиссии вредных веществ в выхлопных газах ГТУ//Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2004. № 1-2. С. 122-128.

8 Байков И.Р., Китаев С.В., Фарухшина Р.Р. Определение показателей энергоэффективности газоперекачивающих агрегатов с применением нейронных сетей//Нефтегазовое дело: электрон. науч. журн./УГНТУ. 2015. №1. С.141-152. URL: [http://ogbus.ru/issues/1\\_2015/ogbus\\_1\\_2015\\_p141-152\\_BaikovIR\\_ru.pdf](http://ogbus.ru/issues/1_2015/ogbus_1_2015_p141-152_BaikovIR_ru.pdf)

## References

1 Kostareva S.N. Sovershenstvovanie metodov diagnostirovaniya tehničeskogo sostoyaniya gazoperekachivayushih agregatov na osnove dannih proizvodstvennogo monitoringa:diss...kand.tehn.nauk:25.00.19:Ufimskii gosudarstvennii neftyanoi tehničeskii universitet. Ufa, 2002. 163 s. [in Russian].

2 Baikov I.R., Kitaev S.V., Shammazov I.A. Perspektivi energoresursosberejeniya v usloviyah dlitelno ekspluatiruemoi gazotransportnoi sistemi//Transport i hranenie nefteproductov i uglevodorodnogo sirya. 2012. №2. S.9-13. [in Russian].

3 Baikov I.R., Kitaev S.V., Talhin S.R. Eksplyuatsiya energomechanicheskogo oborudovaniya v sovremennih usloviyah//Neftegazovoe delo. 2007. T.5. №1. S.159-162 [in Russian].

4 Ivanov E.S. Osobennosti modelirovaniya rejimov raboti gazoperekachivaushih agregatov kompressornih stancii magistralnogo transporta gaza v sovremennih usloviyah ekspluatsii//Neftegazovoe delo:electron.nauch.jurn./UGNTU. 2012. № 5. S. 99-123. URL: [http://ogbus.ru/authors/IvanovES/IvanovES\\_2.pdf](http://ogbus.ru/authors/IvanovES/IvanovES_2.pdf) [in Russian].

5 Baikov I.R., Smorodova O.V., Kostareva S.N. Ocenka tehniceskogo sostoyaniya GKU s pomoshyu vibrodiagnostiki//Gazovaya promishlennost. 2001. №4. S.39-41. [in Russian].

6 Baikov I.R., Kitaev S.V., Smorodov E.A., Goliyanov A.I. Utochnenie metodiki opredeleniya tehniceskogo sostoyaniya gazoperekachivaushih agregatov//Izvestiya vishih uchebnyh zavedenii. Problemi energetiki. 2001. №3-4. S.3-7. [in Russian].

7 Baikov I.R., Smorodova O.V., Kostareva S.N. Prognosticheskaya model emissii vrednih veshestv v vihlopnih gazah GTU// Izvestiya vishih uchebnyh zavedenii. Problemi energetiki. 2004. №1-2. S.122-128. [in Russian].

8 Baikov I.R., Kitaev S.V., Faruhshina R.R. Opredelenie pokazatelei energoeffektivnosti gazoperekachivaushih agregatov s primeneniem neironnih setei// Neftegazovoe delo:electron.nauch.jurn./UGNTU. 2015.№1. S.141-152. URL: [http://ogbus.ru/issues/1\\_2015/ogbus\\_1\\_2015\\_p141-152\\_BaikovIR\\_ru.pdf](http://ogbus.ru/issues/1_2015/ogbus_1_2015_p141-152_BaikovIR_ru.pdf) [in Russian].

## Сведения об авторах

### About the authors

Байков И. Р., д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Промышленная теплоэнергетика», ФГБОУ ВО УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

I. R. Baikov, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Chair «Industrial Heat Powering», FSBEI HE USPTU, Ufa, the Russian Federation

Смородова О.В., канд. техн. наук, доцент кафедры «Промышленная теплоэнергетика», ФГБОУ ВО УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

O.V. Smorodova, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the Chair «Industrial Heat Powering», FSBEI HE USPTU, Ufa, the Russian Federation

e-mail: [olga\\_smorodova@mail.ru](mailto:olga_smorodova@mail.ru)

Китаев С.В., д-р техн. наук, профессор кафедры «Транспорт и хранение нефти и газа», ФГБОУ ВО УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

S.V. Kitaev, Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Chair «Transport and Storage of Oil and Gas», FSBEI HE USPTU, Ufa, the Russian Federation