

Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы

УДК 681.391:543/545

АПРОКСИМАЦИЯ СПЕКТРОВ ОТРАЖЕНИЯ ИСКУССТВЕННО ОКРАШЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ МЕТОДОМ ГЛАВНЫХ КОМПОНЕНТ

С.Ю. Арапов, С.П. Арапова, И.С. Дубинин

Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина,
Институт радиоэлектроники и информационных технологий – РИФ
Россия, 620078, Екатеринбург, ул. Мира, 32

***Аннотация.** Спектр отражения поверхности – необходимая информация для расчета цветовых координат в колориметрических системах Международной комиссии по освещению (МКО), например Lab или XYZ. Эти значения определяют цветовые ощущения стандартного наблюдателя. На их основе оценивается точность цветовоспроизведения, которая регламентируется международными стандартами для различных отраслей промышленности. Простые и точные методы аппроксимации спектров востребованы при разработке эффективных измерительных систем для технологических процессов получения искусственно окрашенных поверхностей. Заданный цвет поверхности можно получить заранее подготовленной красочной смесью либо полиграфическим автотипным способом – управляя площадью периодических микроэлементов-точек, печатающихся четырьмя основными красками. Варианты линейной аппроксимации спектров для смесевых красочных систем на сегодняшний день достаточно хорошо изучены. Метод главных компонент (МГК) обеспечивает хорошую точность аппроксимации уже при использовании 4–6 базисных функций. В литературных источниках не удалось обнаружить данных об аналогичных исследованиях для автотипных систем. Таким образом, сравнительный анализ точности аппроксимации с помощью МГК спектральных кривых для смесевых и автотипных систем представляет несомненный интерес. В работе рассмотрены различные варианты наилучшей квадратичной аппроксимации 24 спектров стандартной цветовой шкалы ColorChecker (X-Rite) и 1944 спектров отражения полей автотипной тестовой шкалы, отпечатанной на цифровой печатной машине. Сравнение производится по трем видам отклонений: цветовому, среднеквадратичному и максимальному. Установлено, что системы спектров смесевых красок существенно отличаются от спектров автотипных систем, причем последние структурно проще и лучше моделируются. Для наиболее точной аппроксимации*

Арапов Сергей Юрьевич, старший преподаватель, департамент информационных технологий и автоматики.

Арапова Светлана Павловна, старший преподаватель, департамент информационных технологий и автоматики.

Дубинин Иван Сергеевич, старший преподаватель, департамент информационных технологий и автоматики.

спектров отражения требуется индивидуальный подход к каждой технологической системе. В автотипных системах репрезентативной набор может состоять из нескольких десятков спектров. По-видимому, нельзя предложить универсальный набор базисных векторов для аппроксимации спектров отражения широкого круга систем промышленного получения заданного цвета поверхностей.

Ключевые слова: спектр отражения, аппроксимация, базис, метод главных компонент, цвет, автотипия.

Введение

Точность аппроксимации обычно рассматривается в зависимости от физической системы, порождающей множество спектров, и выбранного способа, при этом часто используется метод главных компонент (МГК) [1], обеспечивающий высокую точность. Также линейная аппроксимация искомым зависимостей – это один из самых распространенных приемов в прикладной математике, позволяющий свести линейные операторные задачи к алгебраическим уравнениям относительно неизвестных коэффициентов [2]. В этом случае удачность выбора аппроксимации оценивается косвенно, по точности полученного решения [3].

Если требуется получить заданный цвет на всей поверхности в целом, то задача окрашивания может быть решена с помощью заранее подготовленной красочной смеси. В противном случае формирование необходимого цвета локальных фрагментов возможно полиграфическим автотипным способом, т. е. за счет управления площадью периодических микроэлементов-точек, печатающихся последовательно четырьмя основными красками. Системы спектров, которые могут быть получены перечисленными технологическими путями, могут иметь различия, но при этом спектры достаточно гладкие и могут быть аппроксимированы в базисе из небольшого числа функций с помощью МГК.

В [4] проанализированы спектры большого набора образцов атласа Манселла и показано, что хорошая аппроксимация может быть получена в базисе всего из четырех функций. Аналогичные выводы делались и в более поздних работах [5–7], и поэтому предположение о том, что естественные спектры хорошо описываются линейными моделями малой размерности, вполне разумно.

В свою очередь, это послужило причиной повышенного интереса к МГК со стороны исследователей, работающих в области репродуцирования, и привело к появлению большого количества различных модификаций на его основе. В [8–12] модификация идет по пути зонирования цветовых пространств с различными вариантами соответствующей вариации системы базисных векторов. Это позволяет либо повышать точность аппроксимации, либо понижать размерность базиса. К сожалению, подобные модифицированные аппроксимации часто не могут быть представлены в виде линейных, а иногда даже просто аналитических зависимостей.

Кроме перечисленных методов аппроксимации спектров можно выделить еще одну, к которой относятся методы, сочетающие использование стандартных базисных функций с оптимизацией их параметров под исследуемую систему спектров. Примеры таких решений рассмотрены в работах [13, 14]. Так, в [13] для эксперимента были измерены спектры 24 цветовых образцов шкалы *ColorChecker* (CCh), всех цветов атласа Манселла, 120 полей таблицы цветов *Dupont* и 1000 цветовых образцов шелковых тканей. Спектры отражения были представлены как взвешенные суммы наборов базовых функций Гаусса, Фурье, также для аппроксимации применялся метод главных компонент. Функции Фурье и Гаусса рассматривались фиксированные, то есть с постоянными пара-

метрами, и варьируемые, то есть с изменяемыми частотами и фазами. Для сравнения также проводилась аппроксимация МГК. Фиксированный базис Фурье состоял из пяти базовых функций, а варьируемый – из трех, с семью изменяемыми параметрами. Фиксированный базис Гаусса состоял из пятнадцати базовых функций, а варьируемый – из четырех, с десятью изменяемыми параметрами. Для восстановления спектров отражения применялись генетические алгоритмы. Значения параметров подбирались таким образом, чтобы функция квадрата цветового различия с учетом погрешностей была минимальной. Расчеты показали, что наиболее точную аппроксимацию обеспечивает метод главных компонент, следующий по точности результат получен с помощью функций Гаусса.

В целом практическая ценность использования варьируемых базисов не совсем очевидна. Точность такой аппроксимации за редким исключением ниже, чем у МГК. В отличие от аппроксимации с фиксированными базисами требуется наличие образцов спектров и оптимизация параметров базисных функций под них. Эта оптимизация гораздо более трудоемка, чем определение базиса МГК.

Во всех перечисленных работах исследования проводились на наборах спектров, полученных в смесевых системах. В процессе анализа научной периодики аналогичных данных по автотипным системам обнаружить не удалось. Наиболее актуальным вариантом моделирования спектров отражения в автотипных системах является спектральная модель Юла – Нильсена – Нейгебауэра (YNSN – *Yule – Nielsen spectral Neugebauer*). Модель YNSN – это пример аппроксимации спектра путем физического моделирования, представляющий наибольший интерес в контексте данного исследования. Эта модель позволяет рассчитать спектр отражения для многокрасочной автотипной печатной системы. В качестве исходных данных для моделирования требуются спектры отпечатанных образцов сплошных слоев всех основных красок, задействованных в печатном процессе, и всех возможных их наложений. В модели учитывается явление усиления тона (или иначе – растискивания растровых точек), поэтому кроме перечисленных требуется определенное количество образцов спектров, полученных при промежуточных значениях тона. С математической точки зрения YNSN является нелинейной параметрической моделью, по которой спектр в точке оттиска определяется значениями нескольких параметров – набором тоновых значений для каждой присутствующей в печатной системе краски. Модель YNSN имеет несколько модификаций и позволяет рассчитывать спектры в различных автотипных системах [15–18].

Автотипный способ получения заданного цвета в настоящее время является доминирующим в полиграфии, и отсутствие заметного количества работ, посвященных линейному моделированию спектров отражения в таких системах, может показаться странным. Однако реальная потребность в таких моделях появилась только в самое последнее время. Это связано с началом внедрения мультиспектральных информационно-измерительных систем, которые не обладают высоким спектральным разрешением [19, 20].

Таким образом, несомненный интерес представляет сравнительный анализ точности аппроксимации с помощью МГК кривых спектра отражения для смесевых и автотипных систем. При этом основные задачи исследования можно сформулировать следующим образом:

1. Установить, насколько сильны различия спектральных кривых смесевых и автотипных систем.
2. Установить, какие системы точнее аппроксимируются.

3. Установить, насколько точно можно аппроксимировать спектры одной системы с помощью главных компонент (ГК) другой системы.
4. Установить, можно ли для рассматриваемых систем построить универсальный базис с помощью МГК.

Системы спектров и критерии оценки качества аппроксимации

Как образец смесевой системы спектров в данной работе была взята стандартная шкала CCh из 24 полей, которая часто используется при решении репродукционных задач. В качестве образца автотипной системы использовались оттиски тестовой шкалы профилирования (ТШ). Файлы изображений ТШ генерировались в системе *Argyll CMS* [21] и состояли из 1944 полей с различными тоновыми значениями основных колорантов СМУК. Печать производилась на мелованной глянцевой бумаге цифровой машиной *Konica Minolta Bizhub pro 6000*. Линиатура ортогонального раstra в процессе печати всех экземпляров ТШ была неизменной и составляла 80 линий на сантиметр. Спектры полей ТШ и CCh были получены спектрофотометром *i1Pro (X-Rite)*, в комплект поставки которого входит шкала CCh.

Для решения поставленных задач сравнительного анализа использовался МГК, которым находились базисы, адаптированные к исследуемым системам. Также был рассмотрен базис для аппроксимации спектров отражения из работы [4], полученный на основе спектров образцов цветового атласа Манселла.

Аппроксимируемые спектры и базисные функции CCh и ТШ были представлены в виде векторов столбцов, значения компонентов которых соответствовали спектральным зонам шириной 10 нм в интервале 400–680 нм по аналогии с работами [19, 20], где описаны эксперименты по мультиспектральной съемке этих шкал. Наилучшее среднеквадратичное приближение \mathbf{r}^{app} определялось как ортогональная проекция вектора спектра отражения \mathbf{r} на подпространство, образованное выбранным базисом:

$$\mathbf{r}^{app} = (\mathbf{A}\mathbf{A}^+) \mathbf{r}, \quad (1)$$

где \mathbf{A} – матрица, столбцы которой образованы векторами тестируемого базиса; $(\dots)^+$ – операция псевдообращения (Мура – Пенроуза).

Оценка точности для аппроксимации в каждом базисе производилась по трем критериям – цветовому отличию ΔE_{ab} (МКО 1976, D50), среднеквадратичному отклонению RMS (*root mean square*) и равномерной норме отклонения. Для расчета ΔE_{ab} по \mathbf{r} и \mathbf{r}^{app} определяются значения цветовых координат в колориметрической системе *Lab* (МКО 1976) для стандартного осветителя D50, после чего оно находится как евклидово расстояние между цветами, соответствующими исходному спектру и его аппроксимации:

$$\Delta E_{ab}(\mathbf{r}, \mathbf{r}^{app}) = \sqrt{(L - L_{app})^2 + (a - a_{app})^2 + (b - b_{app})^2}. \quad (2)$$

Использование этого варианта расчета цветового отличия обусловлено тем, что именно он является основным критерием оценки параметров продукции в основных промышленных полиграфических стандартах.

В то же время цветовые координаты *Lab* связаны со спектрами нелинейными интегральными выражениями и являются вторичными результатами по отноше-

нию к аппроксимациям спектров, которые составляют основной предмет исследования. В этой связи точность аппроксимации параллельно оценивалась более традиционными функционалами, например RMS:

$$\text{RMS}(\mathbf{r}, \mathbf{r}^{app}) = \sqrt{\frac{(\mathbf{r} - \mathbf{r}^{app})^T (\mathbf{r} - \mathbf{r}^{app})}{I}}, \quad (3)$$

где I – количество спектральных зон в рассматриваемых векторах спектра отражения \mathbf{r} и \mathbf{r}^{app} , а также дискретный аналог равномерной нормы (нормы Чебышёва), определенной на множестве векторов $\{\mathbf{r}\}$ размерности I , компоненты которых могут принимать непрерывный ряд значений в интервале $r_i \in [0, 1], i = \overline{1, I}$:

$$\|\delta_r\|_\infty = \|\mathbf{r} - \mathbf{r}^{app}\|_R = \max_{i=1, N} |r_i - r_i^{app}|. \quad (4)$$

Для каждого варианта базиса находились среднее и максимальное значения указанных критериев по рассматриваемому набору спектров (СШ и автотипной тестовой шкалы).

Сравнительный анализ структуры главных компонент

Набор данных шкалы СШ содержит всего 24 спектра, полученных смешиванием определенных пигментов. Этот набор данных можно считать репрезентативным при построении базиса ГК, если системой считается исключительно сама шкала СШ. В то же время это вряд ли справедливо для системы всех спектров, которые можно получить смешиванием аналогичных пигментов, и тем более для систем спектров, полученных другим технологическим путем. В отношении ТШ ситуация несколько иная, поскольку в распоряжении имеется 1944 спектра, полученных автотипным способом из четырех колорантов. Описание такой системы спектров должно быть проще, чем для прямой смеси пигментов, и набор данных существенно шире. С целью уравнивания условий сравнения вариантов аппроксимации кроме всего набора спектров для построения базисов ГК также использовался набор из 24 спектров ТШ, отобранных по принципу ближайшего цветового соответствия полям СШ. Спектры СШ и отобранных полей ТШ приведены на рис. 1.

По графикам на рис. 1 видно, что системы спектров СШ и ТШ заметно отличаются. Например, на спектрах полей ТШ в зоне около 440 нм заметен выступ, обусловленный наличием в составе бумаги флуоресцентного отбеливателя. Кроме того, система спектров ТШ выглядит более простой, поскольку характерные элементы спектральных кривых сосредоточены в основном в нескольких зонах: максимумы – в зонах 440–460 и 500–520 нм, а «плоские» участки – в зоне 620–680 нм. В системе спектров СШ аналогичные элементы распределены по спектральным зонам гораздо равномернее.

Построенные ГК традиционно сортировались в порядке убывания соответствующих собственных значений ковариационной матрицы набора спектров. Затем информативность отдельных ГК оценивалась по доле объясненной дисперсии в зависимости от порядкового номера (рис. 2). Эффективность представления спектров через ГК, очевидно, тем выше, чем быстрее убывает информативность компонент.

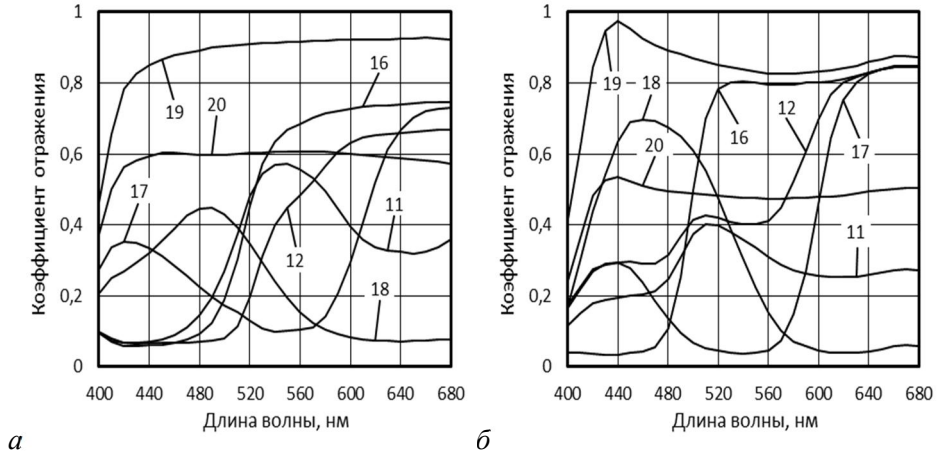


Рис. 1. Спектры полей:
 а - полей ССh, номера кривых соответствуют номерам полей; б - полей ТШ, близких по цвету к ССh, номера кривых соответствуют номерам полей ССh

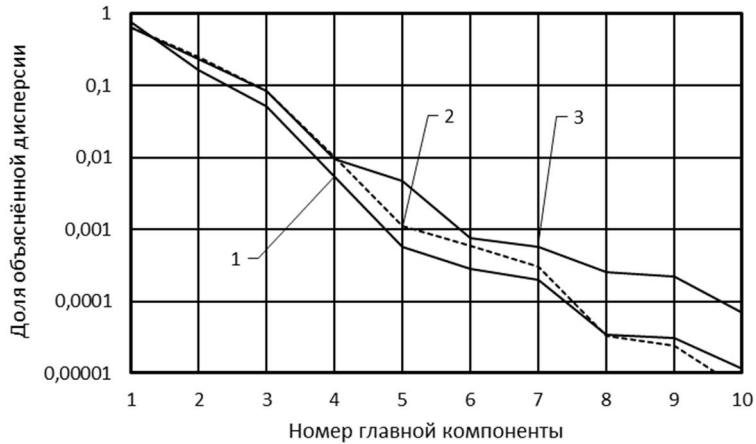


Рис. 2. Зависимость объясняемой доли дисперсии от номера ГК:
 1 – для 1944 спектров ТШ; 2 – для 24 спектров ТШ; 3 – для 24 спектров ССh

Из графиков на рис. 2 следует, что спектры ССh и ТШ с точностью, приемлемой для большинства практических репродукционных задач ($\sim 0,001$), могут быть аппроксимированы на основе первых 5–6 ГК. Для более подробного рассмотрения в данной работе были взяты первые 8 ГК, поскольку шумы в наборах спектров незначительны. По данным [22], у спектрофотометра *iPro* для высоких значений коэффициента отражения ($\sim 0,9$) доверительный интервал локальных вариаций составляет $3\sigma_r = 0,00039$. Если считать, что вариация спектра отражения для каждой спектральной зоны лежит в пределах от нуля до единицы, то из

рис. 2 следует, что пятая и шестая ГК еще значимы, а седьмая и восьмая уже находятся на границе уровня шумов.

На рис. 3 приведены графики ГК, полученные на полном наборе из 1944 спектров ТШ (*a–в*), на ограниченном наборе из 24 спектров ТШ (*г–е*) и на основе 24 спектров полей ССh (*ж–и*). Номера на графиках соответствуют номерам ГК.

Если под структурой кривой понимать совокупность характерных элементов (максимумов, минимумов, пологих участков), соотношение их величин и порядок следования, то по графикам на рис. 3 видно, что структура первых шести ГК сходна для всех рассмотренных спектральных наборов. Наиболее похожи ГК автотипных наборов спектров – (*a*) и (*г*), (*б*) и (*д*). Заметное различие седьмых и восьмых ГК на графиках (*в*) и (*е*) подтверждает приведенную выше оценку уровня шумов. Структурные особенности первых шести ГК говорят о существенных различиях автотипных (*a*), (*б*), (*г*), (*д*) и смесевых (*ж*), (*з*) систем спектров. Заметные различия ГК в автотипных наборах спектров (*a*) и (*г*), (*б*) и (*д*), полученных для одной системы, говорят о том, что в рассматриваемом случае ГК ограниченного набора лишь отчасти могут характеризовать всю систему.

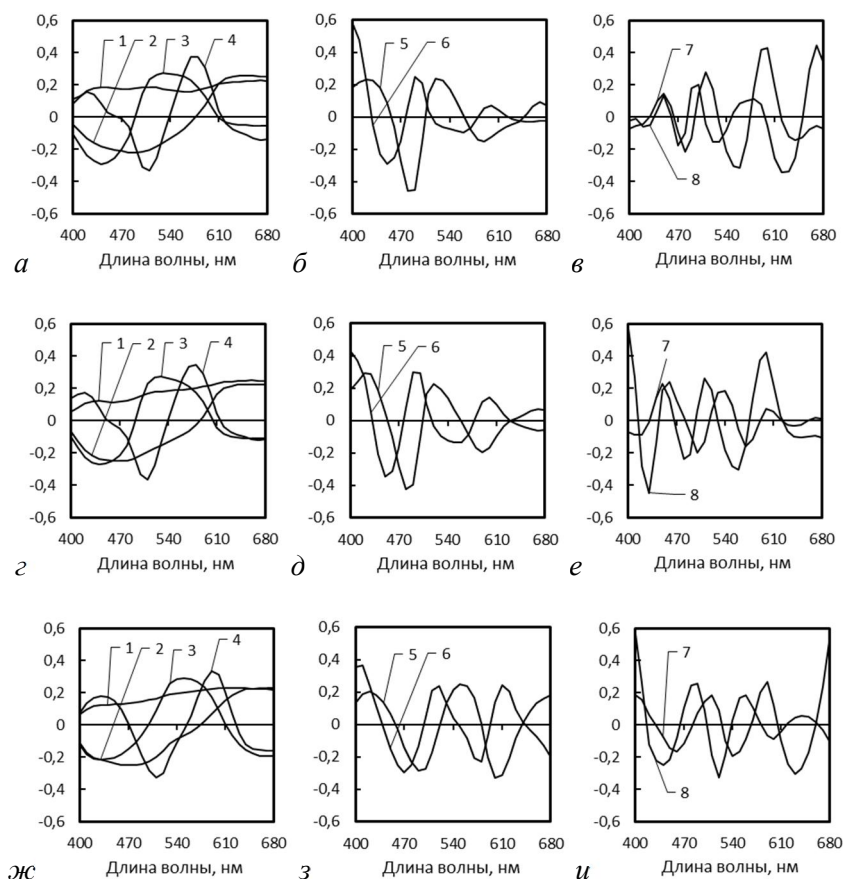


Рис. 3. ГК использованных спектральных наборов:
a–в – 1944 спектра ТШ; *г–е* – 24 спектра ТШ; *ж–и* – 24 спектра полей ССh

Полученные результаты хорошо согласуются с данными из работы [4], где проанализированы спектры отражения большого набора образцов цветного ат-

ласа Манселла, который относится к смесевым системам. Базисные векторы этой линейной модели представлены на рис. 4.

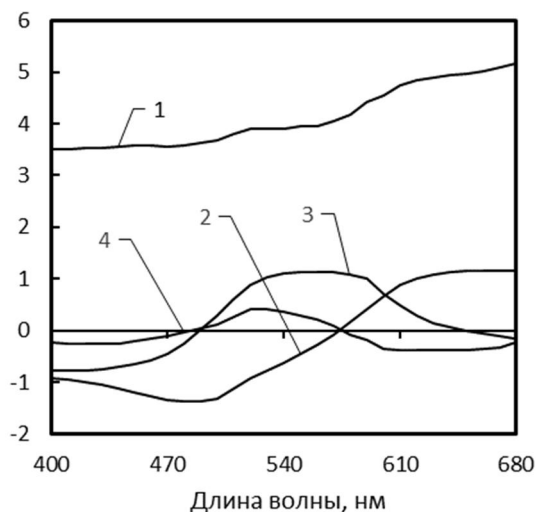


Рис. 4. Набор базисных векторов из работы [4]

Хорошее приближение ко всему набору данных было получено линейной моделью с четырьмя ГК. Очевидно, что структура этих ГК близка к представленным на рис. 3, а, г, ж, особенно для первой, второй и третьей ГК.

Сравнительный анализ точности аппроксимации спектров

Оценка точности аппроксимации перечисленных наборов спектров отражения по выбранным критериям приведена в таблице. Во второй колонке указан набор спектров, для которого строилась аппроксимация, в третьей – набор спектров, использованный для построения ГК.

В первых трех строках таблицы приведены результаты аппроксимации спектральных наборов, по которым, собственно, и строились ГК. Значения отклонений в этом случае можно взять за основу для оценки других вариантов аппроксимации. Следует отметить, что отклонения для шкалы ССh, полученной с помощью смесевых красок (строка 3), в 3–4 раза превышают аналогичные для автотипной системы. Это подтверждает предположение о том, что автотипный спектральный набор структурно проще и поэтому лучше аппроксимируется.

Далее в таблице приводятся отклонения, полученные при аппроксимации одних спектральных наборов на основе ГК других наборов. Строка 4 характеризует аппроксимацию полного набора 1944 спектров ТШ с помощью ГК его подмножества из 24 элементов. Это соответствует ситуации практического использования аппроксимации, при которой производится подстройка под контролируемый поток продукции по ограниченному количеству измерений. Результат можно признать удачным, поскольку отклонение по ключевому критерию ΔE_{ab} превосходит аналогичный показатель для собственного базиса ГК (строка 1) не более чем в 1,5 раза. Остальные виды отклонений имеют практически такие же или даже меньшие значения. Другой интересной ситуацией является аппроксимация полного набора 1944 спектров ТШ с помощью ГК, полученных на основе 24 полей шкалы ССh. Шкала ССh в репродукционных задачах является самым

распространенным спектрально-колориметрическим эталоном. CCh часто используется для калибровки различных устройств, и поэтому использование соответствующих ГК выглядит вполне естественным. Отклонения для этого случая приведены в строке 5, где результат аппроксимации очевидно хуже, чем при использовании ГК, построенных по такому же количеству полей ТШ близких цветов. Следует отметить, что при этом точность аппроксимации выше, чем при аппроксимации даже самой шкалы CCh (строка 3).

Точность аппроксимации использованных спектральных наборов с помощью МГК

№ стр.	Аппроксимируемый набор спектров	Набор ГК	ΔE_{ab}		RMS		$\ \delta_r\ _\infty$	
			Средн.	Макс.	Средн.	Макс.	Средн.	Макс.
1	ТШ (1944 поля)	ТШ (1944 поля)	0,0974	0,5384	0,0013	0,0080	0,0033	0,0207
2	ТШ (24 поля)	ТШ (24 поля)	0,1178	0,4260	0,0018	0,0040	0,0040	0,0084
3	CCh (24 поля)	CCh (24 поля)	0,5245	1,2209	0,0077	0,0147	0,0179	0,0334
4	ТШ (1944 поля)	ТШ (24 поля)	0,1442	0,7894	0,0015	0,0066	0,0033	0,0146
5	ТШ (1944 поля)	CCh (24 поля)	0,2952	1,8805	0,0042	0,0204	0,0097	0,0504
6	CCh (24 поля)	ТШ (24 поля)	0,6340	3,4592	0,0111	0,0356	0,0283	0,0976

Данные в строке 6 относятся к варианту аппроксимации, не связанному с каким-либо вариантом предполагаемого практического применения аппроксимации МГК, однако большие значения отклонений лишней раз подтверждают предположение о разнородности рассмотренных систем спектров.

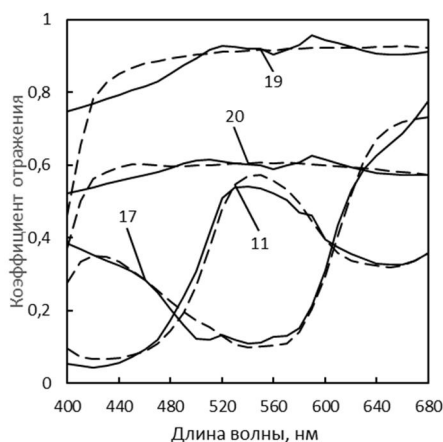


Рис. 5. Аппроксимация некоторых спектров CCh с помощью базисных векторов из работы [4] (номера кривых соответствуют номерам полей CCh, сплошная линия — аппроксимация, пунктир — оригинальный спектр)

На рис. 5 приведены результаты аппроксимации спектров CCh в базисе ГК для другой смеси системы из работы [4]. Значения отклонений составили:

среднее $\Delta E_{ab} = 2,34$; максимальное $\Delta E_{ab} = 9,33$. Эти показатели значительно хуже, чем худшие из таблицы.

В противовес этому примеру на рис. 6 приведены аппроксимации для случаев, представляющих наибольший практический интерес.

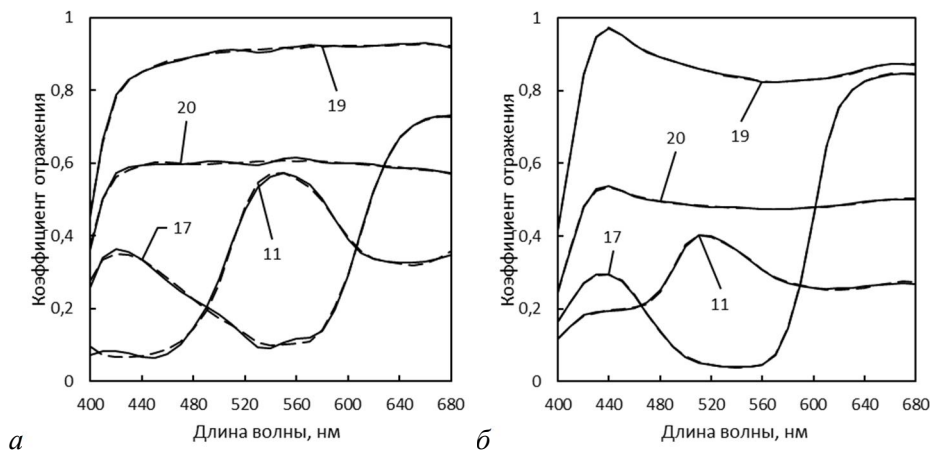


Рис. 6. Примеры аппроксимации некоторых спектров:
 а - полей шкалы ССс с помощью собственных ГК; б - полей ТШ с помощью ГК ограниченного набора из 24 полей ТШ (номера кривых соответствуют номерам полей ССс, сплошная линия — аппроксимация, пунктир — оригинальный спектр)

Выводы

Таким образом, для наиболее точной аппроксимации спектров отражения искусственно окрашенных поверхностей требуется индивидуальный подход к каждой технологической системе. В соответствии с поставленными задачами по результатам работы можно сформулировать следующие утверждения:

1. Системы спектров смесевых красок существенно отличаются от спектров автотипных систем.
2. Автотипные системы структурно проще и лучше моделируются.
3. В общем случае нельзя точно аппроксимировать спектры одной системы с помощью главных компонент другой системы.
4. По-видимому, нельзя предложить универсальный набор базисных векторов для аппроксимации спектров отражения широкого круга систем промышленного получения заданного цвета поверхностей.

К этому следует добавить, что в автотипных системах репрезентативный набор для построения базиса главных компонент может состоять всего из нескольких десятков спектров.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сайфуллин Р.Т., Александров С.С. Этапы реализации метода главных компонент при обработке сигналов аналитических приборов // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2018. – № 2 (58). – С. 60–66.
2. Батищев В.И. и др. Аппроксимационный подход к решению обратных задач анализа и интерпретации экспериментальных данных // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2006. – № 40. – С. 57–65.

3. *Burns P.D., Berns R.S.* Analysis multispectral image capture // 4th Color and Imaging Conference Final Program and Proceedings. 1996. Vol. 1996. P. 19–22.
4. *Cohen J.B.* Dependency of the spectral reflectance curves of the Munsell color chips // *Psychonomic Science*. 1964. Vol. 1, № 1–12. P. 369–370.
5. *Maloney L.T.* Evaluation of linear models of surface spectral reflectance with small numbers of parameters // *Journal of the Optical Society of America A*. 1986. Vol. 3, № 10. P. 1673–1683.
6. *Jaaskelainen T., Parkkinen J.P.S., Toyooka S.* A vector-subspace model for color representation // *Journal of the Optical Society of America A*. 1990. Vol. 7, № 4. P. 725–730.
7. *Parkkinen J.P.S., Hallikainen J., Jaaskelainen T.* Characteristic spectra of Munsell colors // *Journal of the Optical Society of America A*. 1989. Vol. 6, № 2. P. 318–322.
8. *Кранич Б. и др.* Реконструкция спектра по координатам цвета методами анализа главных компонент и генетической оптимизации // *Светотехника*. – 2016. – № 3. – С. 35–42.
9. *García-Beltrán A. et al.* Linear bases for spectral reflectance functions of acrylic paints // *Color Research & Application*. 1998. Vol. 23, № 1. P. 39–45.
10. *Romney A.K., Indow T.* Munsell reflectance spectra represented in three-dimensional Euclidean space // *Color Research & Application*. 2003. Vol. 28, № 3. P. 182–196.
11. *Wu G. et al.* Reconstruction of spectral color information using weighted principal component analysis // *Optik – International Journal for Light and Electron Optics*. 2015. Vol. 126, № 11–12. P. 1249–1253.
12. *Praefcke W.* Transform coding of reflectance spectra using smooth basis vectors // *Journal of Imaging Science and Technology*. 1996. Vol. 40, № 6. P. 543–548.
13. *Schettini R., Zuffi S.* A computational strategy exploiting genetic algorithms to recover color surface reflectance functions // *Neural Computing and Applications*. 2007. Vol. 16, № 1. P. 69–79.
14. *Zuffi S., Schettini R.* Reflectance function estimation from tristimulus values // *SPIE Proceedings of the Color Imaging IX: Processing, Hardcopy, and Applications* / ed. Eschbach R., Marcu G.G. San Jose, California, United States: SPIE, 2004. Vol. 5293. P. 222–231.
15. *Hébert M., Hersch R.D.* Yule–Nielsen based recto–verso color halftone transmittance prediction model // *Applied Optics*. 2011. Vol. 50, № 4. P. 519–525.
16. *Hébert M., Hersch R.D.* Yule–Nielsen approach for predicting the spectral transmittance of halftone prints // 17th Color and Imaging Conference Final Program and Proceedings. 2009. Vol. 2009. P. 155–158.
17. *Chen Y., Berns R.S., Taplin L.A.* Six color printer characterization using an optimized cellular Yule–Nielsen spectral Neugebauer model // *Journal of Imaging Science and Technology*. 2004. Vol. 48, № 6. P. 519–528.
18. *Garg N.P., Singla A.K., Hersch R.D.* Calibrating the Yule–Nielsen modified spectral Neugebauer model with ink spreading curves derived from digitized RGB calibration patch images // *Journal of Imaging Science and Technology*. 2008. Vol. 52, № 4. P. 40908–1–40908–5.
19. *Аранов С.Ю., Аранова С.П., Тягунов А.Г.* Экспериментальный комплекс мультиспектральной фотосъемки на основе стандартной цифровой камеры // *Известия высших учебных заведений. Проблемы полиграфии и издательского дела*. – 2014. – № 5. – С. 45–54.
20. *Аранов С.Ю. и др.* Считывание шкал цветового профилирования процесса печати мультиспектральной фотосъемкой // *Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Сер. 1: Естественные и технические науки*. – 2017. – № 1. – С. 79–85.
21. *Gill G.* Introducing the ArgyllPRO ColorMeter V1.5 [Electronic resource] // *Argyll Color Management System Home Page (Including icclib, cgatslib and DPS)*. 2019. URL: <http://www.argyllcms.com/> (accessed: 23.05.2019).
22. *Тарасов Д.А.* Зависимость белизны бумаги для печати от содержания в ней минеральных компонентов: дисс. ... канд. техн. наук: 05.21.03. – Екатеринбург: ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», 2018. 149 с.

Статья поступила в редакцию 10 июня 2019 года

LINEAR APPROXIMATION OF ARTIFICIALLY COLORED SURFACES REFLECTION SPECTRA BY THE PRINCIPAL COMPONENT ANALYSIS

S.Yu. Arapov, S.P. Arapova, I.S. Dubinin

Ural Federal University,
Institute of radio electronics and information technology-RTF
32, Mira str., Ekaterinburg, 620078, Russia

Abstract. *The surface reflection spectrum is the necessary information for calculating color coordinates in the colorimetric systems of the International Commission on Illumination (CIE), such as Lab or XYZ. These values determine the color sensations of the standard observer. Based on them, the accuracy of color reproduction is estimated, which is regulated by international standards for various industries. Simple and accurate methods of approximation of the spectra are required in the development of effective measuring and control systems for technological processes for obtaining artificially colored surfaces. The specified color of the surface can be obtained with a previously prepared ink mixture or by an autotypical printing method, i.e., by controlling the area of periodic micro-dots of four primary colors. At present, the methods of linear approximation of spectra for mixed ink systems are well studied. The principal component analysis (PCA) provides good accuracy of approximation using only 4–6 basis functions. Information about similar studies for autotyping systems was not found in the literature. Therefore, a comparative analysis of the approximation accuracy of spectral curves using the PCA for mixed and autotype systems is of great interest. The paper discusses the variants of the least-squares function approximation of the 24 spectra of the standard ColorChecker scale (X-Rite) and the 1944-field autotype test scale printed on a digital printing machine. Comparison is made by three criteria: to color, mean square and maximum deviations. For the most accurate approximation of the reflection spectra, an individual approach to each technological system is required. The spectra of mixed inks systems differ significantly from the spectra of autotype systems, and the last are structurally more simply and better modelled. In autotype systems, a representative set can consist of several dozen spectra. Apparently, it is impossible to create a universal set of basis vectors for approximating the reflection spectra of a wide range of industrial systems for obtaining a given color of surfaces.*

Keywords: *reflection spectrum, approximation, basis, principal component method, color, autotype.*

REFERENCES

1. *Saifullin R.T., Aleksandrov S.S.* Stages of realization of the principal component method in processing of signals from analytical instruments // Bulletin of the Samara State Technical University. Series: technical sciences. 2018. № 2 (58). P. 60–66.
2. *Batishchev V.I. et al.* Approximation approach to solving inverse problems of analysis and interpretation of experimental data // Bulletin of the Samara State Technical University. Series: technical sciences. 2006. № 40. P. 57–65.
3. *Burns P.D., Berns R.S.* Analysis multispectral image capture // 4th Color and Imaging Conference Final Program and Proceedings. 1996. Vol. 1996. P. 19–22.
4. *Cohen J.B.* Dependency of the spectral reflectance curves of the Munsell color chips // Psychonomic Science. 1964. Vol. 1, № 1–12. P. 369–370.
5. *Maloney L.T.* Evaluation of linear models of surface spectral reflectance with small numbers of parameters // Journal of the Optical Society of America A. 1986. Vol. 3, № 10. P. 1673–1683.

*Sergey Yu. Arapov, Senior Lecturer.
Svetlana P. Arapova, Senior Lecturer.
Ivan S. Dubinin, Senior Lecturer.*

6. *Jaaskelainen T., Parkkinen J.P.S., Toyooka S.* A vector-subspace model for color representation // Journal of the Optical Society of America A. 1990. Vol. 7, № 4. P. 725–730.
7. *Parkkinen J.P.S., Hallikainen J., Jaaskelainen T.* Characteristic spectra of Munsell colors // Journal of the Optical Society of America A. 1989. Vol. 6, № 2. P. 318–322.
8. *Kranich B. et al.* Spectrum reconstruction by color coordinates using principal component analysis and genetic optimization // Light & Engineering. 2016. № 3. P. 35–42.
9. *García-Beltrán A. et al.* Linear bases for spectral reflectance functions of acrylic paints // Color Research & Application. 1998. Vol. 23, № 1. P. 39–45.
10. *Romney A.K., Indow T.* Munsell reflectance spectra represented in three-dimensional Euclidean space // Color Research & Application. 2003. Vol. 28, № 3. P. 182–196.
11. *Wu G. et al.* Reconstruction of spectral color information using weighted principal component analysis // Optik – International Journal for Light and Electron Optics. 2015. Vol. 126, № 11–12. P. 1249–1253.
12. *Praefcke W.* Transform coding of reflectance spectra using smooth basis vectors // Journal of Imaging Science and Technology. 1996. Vol. 40, № 6. P. 543–548.
13. *Schettini R., Zuffi S.* A computational strategy exploiting genetic algorithms to recover color surface reflectance functions // Neural Computing and Applications. 2007. Vol. 16, № 1. P. 69–79.
14. *Zuffi S., Schettini R.* Reflectance function estimation from tristimulus values // SPIE Proceedings of the Color Imaging IX: Processing, Hardcopy, and Applications / ed. Eschbach R., Marcu G.G. San Jose, California, United States: SPIE, 2004. Vol. 5293. P. 222–231.
15. *Hébert M., Hersch R.D.* Yule–Nielsen based recto-verso color halftone transmittance prediction model // Applied Optics. 2011. Vol. 50, № 4. P. 519–525.
16. *Hébert M., Hersch R.D.* Yule–Nielsen approach for predicting the spectral transmittance of halftone prints // 17th Color and Imaging Conference Final Program and Proceedings. 2009. Vol. 2009. P. 155–158.
17. *Chen Y., Berns R.S., Taplin L.A.* Six color printer characterization using an optimized cellular Yule–Nielsen spectral Neugebauer model // Journal of Imaging Science and Technology. 2004. Vol. 48, № 6. P. 519–528.
18. *Garg N.P., Singla A.K., Hersch R.D.* Calibrating the Yule–Nielsen modified spectral Neugebauer model with ink spreading curves derived from digitized RGB calibration patch images // Journal of Imaging Science and Technology. 2008. Vol. 52, № 4. P. 40908–1–40908–5.
19. *Arapov S.Yu., Arapova S.P., Tyagunov A.G.* Experimental complex of multispectral photography based on a standard digital camera // Bulletin of higher educational institutions. Problems of printing and publishing. 2014. № 5. P. 45–54.
20. *Arapov S.Yu. et al.* Reading the color profiling scales of the printing process by multispectral photography // Bulletin of St. Petersburg State University of Technology and Design. Series 1: Natural and technical sciences. 2017. № 1. P. 79–85.
21. *Gill G.* Introducing the ArgyllPRO ColorMeter V1.5 [Electronic resource] // Argyll Color Management System Home Page (Including iclib, cgatslib and DPS). 2019. URL: <http://www.argyllcms.com/> (accessed: 23.05.2019).
22. *Tarasov D.A.* The dependence of the printing paper whiteness on the content of mineral components: thesis research of candidate of technical sciences : 05.21.03. Yekaterinburg: «Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin», 2018. 149 p.

УДК 62-631.2:665.65

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ МОЩНОСТИ ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ АГРЕГАТОВ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ

*С.А. Гулина¹, Л.П. Шелудько¹, В.М. Авдеев¹, Г.М. Орлова¹, А.И. Ершов¹,
И.Ю. Горюнова²*

¹Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

²Уральский федеральный технический университет
Россия, 620000, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19

Аннотация. При эксплуатации газоперекачивающего агрегата (ГПА) наличие достоверных данных мощности газотурбинного привода необходимо для управления режимом работы газотранспортной системы и своевременного определения технического состояния газоперекачивающего оборудования. В работе проведена оценка точности определения эксплуатационных значений мощности ГПА по методикам, утвержденным нормативно-технической документацией ООО «Газпром» в условиях конкретной компрессорной станции. С учетом принятых допущений – распределение составляющих погрешностей соответствует нормальному закону распределения Гаусса и составляющие погрешностей не имеют корреляционной связи, считаются независимыми друг от друга – выведены основные зависимости влияния погрешностей измерения параметров ГПА (температуры, давления, частоты вращения роторов) на погрешность определения мощности ГПА. Так как погрешность определения мощности зависит от метода и условий измерения, качества измерительных приборов и других факторов, определение мощности с погрешностью 1,5–2 % позволит использовать ее значения в диагностических моделях ГПА и регулировании режима работы газопровода.

Ключевые слова: газоперекачивающий агрегат, газотурбинный двигатель, центробежный нагнетатель, мощность, относительная среднеквадратичная погрешность измерения, измеряемый параметр.

Для трубопроводного транспорта газа актуально применение ресурсосберегающей системы эксплуатации оборудования компрессорных цехов (КЦ). Для этого необходимо на всем сроке эксплуатации оборудования КЦ решить комплекс задач, связанных с достоверным определением его технического состояния. Необходимость наличия данных о текущей мощности ГПА в процессе эксплуатации, определяется тем, что мощность выступает параметром, от которого зави-

Гулина Светлана Анатольевна (к.т.н.), доцент кафедры «Трубопроводный транспорт».

Шелудько Леонид Павлович (к.т.н.), доцент кафедры «Управление и системный анализ в теплоэнергетике».

Авдеев Виктор Митрофанович, доцент кафедры «Трубопроводный транспорт».

Орлова Гульсина Махмутовна (к.п.н.), доцент кафедры «Трубопроводный транспорт».

Ершов Анатолий Игоревич, магистрант.

Горюнова Ирина Юрьевна (к.т.н.), доцент кафедры «Турбины и двигатели».

сят такие показатели эффективности, как расход топлива, производительность центробежного нагнетателя (ЦН) природного газа (ПГ), его КПД и коэффициенты технического состояния ГПА. При эксплуатации ГПА мощность не определяется, она является расчетным параметром, погрешность определения которого зависит от многих факторов и может достигать неприемлемых величин. По мнению авторов статьи [1], для компрессорных станций МГ очень остро стоит необходимость в постоянном мониторинге технического состояния ГПА. Для этого на основании действующих отраслевых стандартов ООО «Газпром» разработаны современные методы и диагностические модели с использованием штатных измерений термодинамических параметров ГПА. Целью всех существующих методов диагностики технического состояния является определение мощности, необходимой для обеспечения заданной производительности газотранспортной системы [2]. В работе [3] предлагается метод определения технического состояния ГПА по измеренным штатным термогазодинамическим параметрам, основанный на анализе тенденций изменения отклонений вычисляемых параметров (диагностических признаков) от эталонных (базовых) значений в процессе эксплуатации по результатам измерений контрольных параметров ГПА и изменений их отклонений. Сложность данной модели заключается в ее индивидуальности. В качестве характеристик исправного состояния принимаются эталонные осредненные характеристики для данного типа ГПА или индивидуальные для конкретного ГТД и ЦН. Целью определения неисправностей является снижение мощности и КПД ГПА. В статье [4] описаны основные методологические проблемы определения мощности газоперекачивающих агрегатов по штатным интегральным показателям. Вынесены предложения по их решению и представлены результаты расчетов с использованием данных, полученных при проведении комплексных обследований, а также приведены новые возможности применения результатов теплотехнических расчетов ГПА. Во всех предлагаемых моделях эффективная мощность N и КПД ГПА в зависимости от загрузки газотранспортной системы и климатических условий получаются при использовании предварительно рассчитанных коэффициентов взаимного влияния термодинамических параметров ГПА для конкретных законов регулирования режимов его работы.

В работе [2] рассматривается определение оптимальной методики расчёта мощностных параметров ГПА-25И. По результатам теплотехнических испытаний центробежного нагнетателя PCL28-804-2 определяется оптимальная методика получения достоверных расчетных данных мощности ГТД. Полученные в ходе теплотехнических испытаний данные сопоставляются и уточняются с результатами мощности ГПА, полученными с помощью альтернативного бесконтактного измерителя крутящего момента. И далее составляется методика оценки технического состояния ГПА с использованием его заводских характеристик и штатных эксплуатационных замеров. В данной статье значение мощности ГПА-25И, полученное с помощью бесконтактного измерителя крутящего момента является эталонным показателем, по которому происходит определение и уточнение вводимых в методику коэффициентов.

Цель настоящей работы является проведение анализа точности определения мощности, рассчитанной по методикам, утвержденным ПАО «Газпром» с использованием экспериментальных теплотехнических измерений. Рассмотрим следующие методы определения мощности в процессе эксплуатации, рекомендованные нормативно-технической документацией ПАО «Газпром»:

1. СТО Газпром ПР 51-31323949-43-99 «ГТУ - нагнетатель»;

2. СТО Газпром 2-3.5-253-2008 по внутренней мощности ЦН;
3. СТО Газпром 2-3.5-253-2008 с помощью измерителя крутящего момента.

Оценка достоверности полученных эксплуатационных значений мощности, определенной данными методами осуществляется на базе газоперекачивающего агрегата ГПА – Ц – 16. Газоперекачивающий агрегат состоит из трехвального газотурбинного двигателя (ГТД) НК16-СТ и центробежного нагнетателя природного газа НЦ-16/76-1,44. Необходимые для расчета мощности ГПА параметры определяются с использованием данных эксплуатационных замеров по штатным датчикам и измерительным приборам с классом точности по рекомендациям [5]. Для сравнения показаний штатных датчиков, в соответствии с конструктивными возможностями ГПА, к эксплуатационным точкам замеров по тракту были установлены дополнительные датчики измерения температуры и давления. Все измерительные приборы подвергаются проверке по образцовым приборам до и после проведения теплотехнических замеров [6]. Производится стабилизационная выдержка режима не менее 2 часов. Между режимами стабилизационная выдержка составляет не менее 1,5 часов.

Для анализа точности измерения принимаются следующие допущения: составляющие погрешности не имеют корреляционной связи и считаются независимыми друг от друга; распределение составляющих погрешностей соответствует нормальному закону распределения (закону Гаусса); предельная относительная погрешность результата измерения δ_{np} равна максимальной погрешности одного измерения при доверительной вероятности 0,95. При этом $\delta_{np} = 2 \cdot \sigma$, где σ – средняя квадратичная погрешность (СКП) результата измерения. При математической оценке погрешностей в качестве абсолютной погрешности ε принимается разность между показанием прибора A_i и действительным значением A измеряемой величины, и рассчитывается:

$$\varepsilon = \frac{k \cdot A_{max}}{100\%},$$

где k – класс точности прибора,
 A_{max} – максимальное показание прибора.

Относительная погрешность: $\delta = \frac{\varepsilon}{A_{max}} 100\%$.

В контрольных сечениях измерение полной температуры проводится штатными (по которым ведутся эксплуатационные замеры) и специально установленными термопарами. Правильный выбор и способ установки датчиков, в которых размещены экранированные хромель-алюмелевые (ХА) термопары позволил сделать погрешности из-за теплопроводности и излучения значительно меньше основной погрешности измерения. Учитывая рекомендации [8] для сведения погрешности связанной с оттоком тепла по электроду термопары до пренебрежительно малой величины термопары в тракт погружены на глубине соответствующей среднему диаметру проточной части т.е $l \geq 100$ мм. В контрольных сечениях для получения достоверных значений средней температуры потока устанавливается не менее 3 термопар. Погрешность, связанная с неомогенностью и нестабильностью материала термопары для хромели, алюмели с учетом допуска в соответствии с рекомендациями [9] на неомогенность материала и траверсирование составляет $0,5^\circ\text{C}$. Погрешность тарировки термопар составила 1°C . Средняя квадратичная погрешность осреднения температуры T по сечению с использованием n однотипных датчиков определяется:

$$\sigma_T = \pm \sqrt{\frac{\sum (T - T_{cp})^2}{n(n-1)}}.$$

При этом делается допущение, что показания датчиков являются равно представительными. Расчеты показали, при существующей в измерительных сечениях неравномерности потока $T_{max} - T_{min} = 20\text{--}50^\circ\text{C}$ погрешность осреднения температуры составила $\delta T = \pm 1^\circ\text{C}$.

Средняя квадратичная погрешность измерения давления оценивается по формуле:

$$\sigma_{P_i} = 0,5 \cdot \delta_{np(P)} = 0,5 \frac{A_{P_{max}}}{A_P} k_M,$$

где k_M – класс точности манометра ($k=1,5$ в соответствии с [5]);

$A_{P_{max}}, A_P$ – максимальное и измеренное показание манометра.

Средняя квадратичная относительная погрешность частоты вращения σ_n определяется с учетом показаний штатного тахометра и оценивается:

$$\sigma_n = 0,5 \cdot \delta_{np(n)} = 0,5 \frac{A_{n_{max}}}{A_n} k,$$

где k – класс точности прибора ($k=1$ в соответствии с [5]);

$A_{n_{max}}, A_n$ – максимальное и измеренное показание тахометра.

С учетом того, что искомая функция y зависит от x аргументов, причем измерение каждого аргумента производится m раз $y = f(x_1, x_2, \dots, x_m)$. СКП косвенного измерения связана со средними квадратичными относительными погрешностями прямых измерений зависимостью:

$$\sigma_y = \sqrt{\left(\frac{\partial \sigma_y}{\partial x_1}\right)^2 \partial x_1^2 + \left(\frac{\partial \sigma_y}{\partial x_2}\right)^2 \partial x_2^2 + \dots + \left(\frac{\partial \sigma_y}{\partial x_m}\right)^2 \partial x_m^2}.$$

Степень влияния ошибок измерения параметров (T, P, n и др.) по тракту ГТД на погрешности итоговой величины (мощности N) определяем значениями частной производной по измеряемому параметру. Погрешность эффективной мощности при измерении давления и температуры в конкретных сечениях ГТД в относительных изменениях итоговой величины $\delta y = \frac{\Delta y}{y}$, и измеряемого параметра

$\delta x = \frac{\Delta x}{x}$ запишется в виде:

$$\sigma_{N_n} = \frac{\partial \sigma_N}{\partial n} \sigma_n, \quad \sigma_{N_T} = \frac{\partial \sigma_N}{\partial T_i} \sigma_{T_i} \quad \text{и} \quad \sigma_{N_P} = \frac{\partial \sigma_N}{\partial P_i} \sigma_{P_i}.$$

Суммарная СКП мощности определяется:

$$\sigma_N = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^n \sigma_{N_i}^2}.$$

Для оценки величины погрешности определения мощности необходимо учитывать, что режим работы ГПА характеризуется расходом воздуха, температурой и давлением по тракту ГТД, расходом топлива, частотой вращения валов и производительностью ЦН. При проведении теплотехнических измерений параметров ГПА были проведены мероприятия по исключению или учету объективных, случайных и субъективных погрешностей. Объективные погрешности определя-

ются методом измерений, качеством измерительных приборов и условиями измерения. Оценим величину средней квадратичной относительной погрешности мощности определенной по СТО Газпром ПР 51-31323949-43-99 «ГТУ - нагнетатель» [13] (метод 1).

1. Мощность N , определяемая по характеристикам ЦН ПГ [10], представленными в приведенной форме в виде зависимости степени повышения давления

в ЦН – π , относительной мощности ЦН $\left(\frac{N}{\rho}\right)_{np}$ и коэффициента полезного действия ЦН – η от объемной приведенной производительности Q_{Vnp} и частоты

вращения ЦН – n_{np} : $\pi, \eta = f\left[Q_{Vnp}, n_{np}\right]$ (рис. 1) и на эксплуатационном

режиме мощность и частота вращения ротора ЦН рассчитывается по формулам:

$$N = N_{np} \cdot \frac{\sqrt{RzT_B}}{\sqrt{R_{np} z_{np} T_{Bnp}}}, \quad n = n_{np} \cdot \frac{\sqrt{RzT_B}}{\sqrt{R_{np} z_{np} T_{Bnp}}},$$

где T_B – температура на входе в нагнетатель;

N_{np} - приведенная мощность ЦН, рассчитывается с использованием характеристик ЦН для приведенного состава газа и приведенной частоты вращения ротора n_{np} ;

z - коэффициент сжимаемости;

R - газовая постоянная.

Для определения СКП мощности N выше представленные уравнения преобразуем:

$$N = N_{np} \cdot \frac{\sqrt{RzT_B}}{\sqrt{R_{np} z_{np} T_{Bnp}}} = N_{np} \frac{n}{n_{np}},$$

СКП частоты вращения определяется σ_n - определяется с учетом показаний штатного тахометра и оценивается:

$$\sigma_n = 0,5 \frac{A_{n_{\max}}}{A_n} k.$$

Средняя квадратичная относительная погрешность мощности N зависит от следующих величин:

$$\sigma_N^2 = \left(\frac{\partial \sigma_N}{\partial N_{np}}\right)^2 \sigma_{N_{np}}^2 + \left(\frac{\partial \sigma_N}{\partial n_{np}}\right)^2 \sigma_{n_{np}}^2 + \left(\frac{\partial \sigma_N}{\partial n}\right)^2 \sigma_n^2,$$

и определяется следующим образом:

$$\sigma_N = \sqrt{\sigma_{N_{np}}^2 + \sigma_{n_{np}}^2 + \sigma_n^2}.$$

Определим входящие в данное уравнение среднеквадратичные относительные погрешности приведенной мощности ЦН и приведенной частоты вращения ротора нагнетателя ПГ для указанного на характеристике состава газа. Для измерения частоты вращения используются тахометрические преобразователи, погрешность измерения которых не превышает 1%. Приведенная частота вращения ротора:

$$n_{np} = n \cdot \frac{\sqrt{k_{(RzT_B)_{np}}}}{\sqrt{k_{(Rz)T_B}}}$$

где $k_{(RzT)_{np}}$ - коэффициент, зависящий от теплофизических свойств приведенного состава природного газа и заданных условий (температуры и давления на входе в ЦН) для используемой в расчетах характеристики ЦН,

k_{Rz} - коэффициент, зависящий от теплофизических свойств транспортируемого природного газа, их погрешность ничтожно мала и ими можно пренебречь по рекомендациям [11].

СКП приведенной частоты вращения определяется:

$$\sigma_{n_{np}} = \sqrt{0,25\sigma_{T_B}^2 + \sigma_n^2}$$

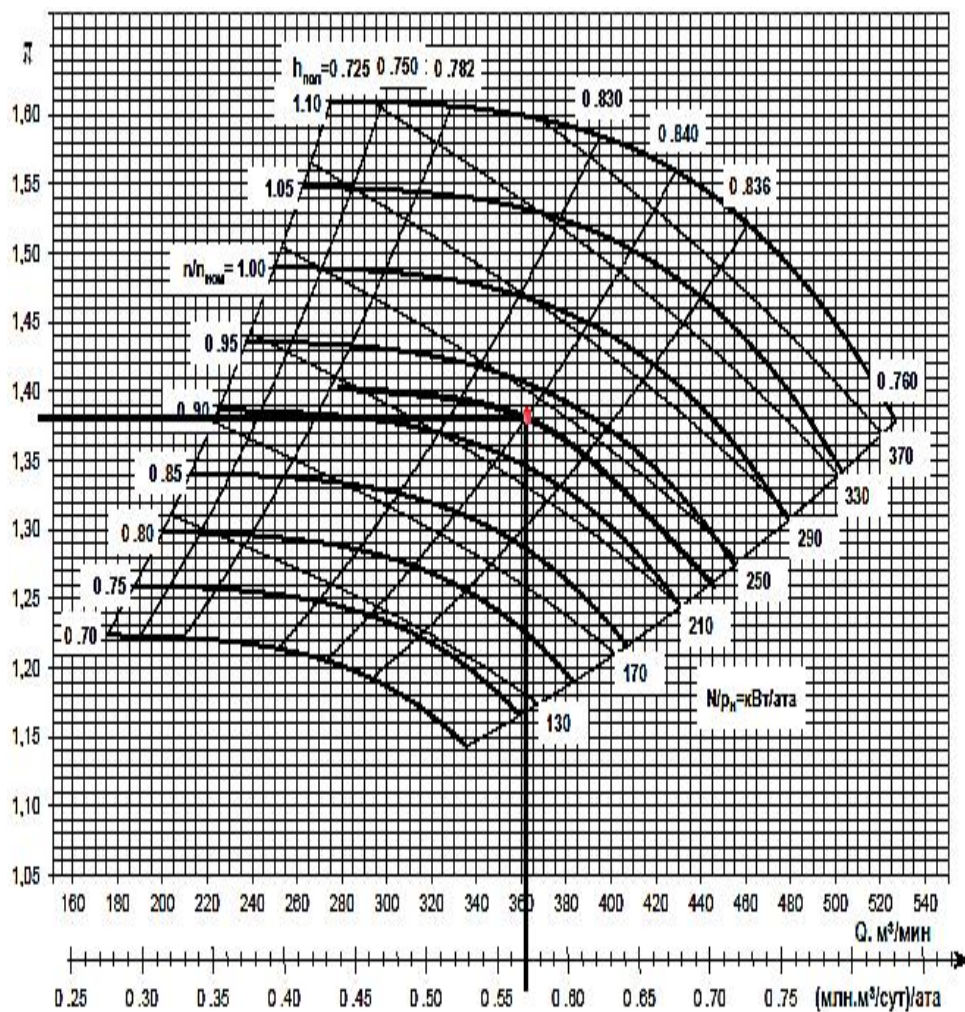


Рис. 1. Приведенные характеристики нагнетателя НЦ-16/76-1,44:
 ($T_{Bnp} = 288 \text{ K}$, $R_{np} = 507,5 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$, $z_{np} = 0,9$)

С учетом сделанных допущений СКП измерения температуры оценивается по формуле:

$$\sigma_{T_B} = 0,5 \frac{A_{T_{cp}}}{A_T} k ,$$

где: k – класс точности прибора для температуры $k = 1$ в соответствии [5].

Приведенная мощность нагнетателя N_{np} определяется графическим методом по рис. 1 по координатам степени повышения давления π и приведенной частоты вращения. Средняя квадратичная относительная погрешность приведенной мощности нагнетателя:

$$\sigma_{N_{np}}^2 = \left(\frac{\partial \sigma_{N_{np}}}{\partial n_{np}} \right)^2 \sigma_{n_{np}}^2 + \left(\frac{\partial \sigma_{N_{np}}}{\partial \pi} \right)^2 \sigma_{\pi}^2 ,$$

тогда: $\sigma_{N_{np}} = \sqrt{\sigma_{n_{np}}^2 + \sigma_{\pi}^2} = \sqrt{0,25\sigma_{T_B}^2 + \sigma_n^2 + \sigma_{\pi}^2} .$

По эксплуатационным замерам давления на входе P_B и выходе P_H из нагнетателя определяют степень повышения давления в нагнетателе $\pi = \frac{P_H}{P_B}$ и

среднеквадратичная относительная погрешность степени повышения давления определяется в соответствии с погрешностью штатного измерения давления на входе и выходе ЦН:

$$\sigma_{\pi} = \sqrt{\sigma_{P_B}^2 + \sigma_{P_H}^2} .$$

СКП измерения давления оценивается по формуле:

$$\sigma_{P_i} = 0,5 \frac{A_{P_{max}}}{A_P} k_M ,$$

где k_M – класс точности прибора для манометра $k=1,5$ в соответствии [5] .

И итоговая СКП метода определения мощности с использованием характеристик ЦНПГ составит:

$$\sigma_N = \sqrt{0,5\sigma_{T_B}^2 + \sigma_{P_B}^2 + 3\sigma_n^2 + \sigma_{P_H}^2} .$$

Необходимо учитывать, что данный метод позволяет определить мощность, потребляемую центробежным нагнетателем. Эффективная мощность газотурбинного двигателя по условию баланса соответствует мощности, потребляемой нагнетателем, но с учетом механических потерь, технического состояния нагнетателя и технического состояния самого двигателя, которые в данном случае нельзя разделить.

2. Оценим величину СКП мощности определенной по СТО Газпром 2-3.5-253-2008 по внутренней мощности ЦН (метод 2). Эффективная мощность ГТД по внутренней мощности ЦН [11] определяется:

$$N = \frac{N}{\eta_M} = \frac{H \cdot G}{\eta_M} ,$$

где N – внутренняя мощность ЦН;

η_M – механический КПД ЦН, по результатам приемочных испытаний;

G – массовый расход природного газа через ЦН;

H – политропический напор (полный напор) определяется через разность энтальпий на входе и выходе центробежного нагнетателя.

Средняя квадратичная относительная погрешность метода определения мощности:

$$\sigma_N^2 = \left(\frac{\partial \sigma_N}{\partial H} \right)^2 \sigma_H^2 + \left(\frac{\partial \sigma_N}{\partial G} \right)^2 \sigma_G^2,$$

тогда: $\sigma_N = \sqrt{\sigma_H^2 + \sigma_G^2}$.

Массовый расход компримируемого газа G , определяют по измеренному перепаду давлений газа на входном сужающем устройстве (конфузоре) ЦН, кг/с:

$$G = \mu \frac{\pi}{4} D_K^2 \sqrt{\rho_K \cdot \Delta P_K} = k_K \sqrt{\rho_K \cdot \Delta P_K},$$

где μ – размерный коэффициент расхода, ($m^{2.5}/\text{мин}$);

ΔP_K – перепад давлений на входном конфузоре нагнетателя, кПа;

ρ_K – плотность газа на входе в конфузор ЦН:

$$\rho_K = \frac{P_K}{R \cdot z \cdot T_B} = \frac{(\Delta P_K + P_B)}{R \cdot z \cdot T_B}.$$

Коэффициент расхода μ принимают по результатам приемочных испытаний ЦН или определяют по результатам индивидуальной тарировки конфузора. С учетом сделанных допущений, средняя квадратичная относительная погрешность измерения расхода ПГ вычисляется по формуле:

$$\sigma_G = \sqrt{0,25(\sigma_{\rho_K}^2 + \sigma_{P_K}^2) + \sigma_{k_K}^2}.$$

У коэффициента расхода через конфузор ЦН значение СКП принимаем равной $\sigma_{k_K} = 0,5\%$, так как линейный размер в пределах от 10 мм до 200 мм можно измерить с точностью до 0,2%. Определим относительную СКП для плотности ПГ на конфузоре ЦН:

$$\sigma_{\rho_K}^2 = \left(\frac{\partial \sigma_{\rho_K}}{\partial P_K} \right)^2 \sigma_{P_K}^2 + \left(\frac{\partial \sigma_{\rho_K}}{\partial T_B} \right)^2 \sigma_{T_B}^2 \text{ и далее } \sigma_{\rho_K} = \sqrt{\sigma_{P_K}^2 + \sigma_{T_B}^2}.$$

СКП измеренного давления на конфузоре:

$$\sigma_{P_K}^2 = \frac{\Delta P_K^2}{(\Delta P_K + P_B)^2} \sigma_{\Delta P_K}^2 + \frac{P_B^2}{(\Delta P_K + P_B)^2} \sigma_{P_B}^2,$$

и тогда

$$\sigma_{P_K}^2 = 0,11\sigma_{\Delta P_K}^2 + 0,44\sigma_{P_B}^2.$$

С учетом сделанных допущений СКП измерения температуры оценивается также как приведено в методе 1. Политропический напор в нагнетателе определяется по формуле:

$$H = \frac{n}{n-1} R z (T_H - T_B),$$

где n – показатель изоэнтропного процесса.

Тогда, СКП определения внутренней работы центробежного нагнетателя зависит от погрешностей измеренных температур на входе и выходе нагнетателя и с учетом допущений:

$$\sigma_H = \sqrt{\sigma_{(T_H - T_B)}^2 + \sigma_{nRz}^2},$$

где σ_{nRz} зависит от определенного состава природного газа, принимается по рекомендациям [9] $\sigma_{nRz} = 0,5\%$.

СКП перепада температур на конфузоре:

$$\sigma_{(T_H - T_B)}^2 = \left(\frac{\partial \sigma_{(T_H - T_B)}}{\partial T_H} \right)^2 \sigma_{T_H}^2 + \left(\frac{\partial \sigma_{(T_H - T_B)}}{\partial T_B} \right)^2 \sigma_{T_B}^2,$$

и далее

$$\sigma_{(T_H - T_B)}^2 = \frac{T_H^2}{(T_H + T_B)^2} \sigma_{T_H}^2 + \frac{T_B^2}{(T_H + T_B)^2} \sigma_{T_B}^2.$$

И итоговая СКП метода определения мощности с использованием характеристик ЦНПГ составит:

$$\sigma_N = \sqrt{0,25(\sigma_{P_K}^2 + \sigma_{T_B}^2 + \sigma_{P_B}^2) + 0,28\sigma_{\Delta P_K}^2 + \sigma_{k_K}^2 + \sigma_{(T_H - T_B)}^2 + \sigma_{nRz}^2}.$$

3. Оценим величину средней квадратичной относительной погрешности мощности определенной по СТО Газпром 2-3.5-253-2008 с помощью измерителя крутящего момента (метод 3). Мощность, определенная прямым измерением крутящего момента, пропорциональному углу скручивания торсионного вала [11]. Торсионный вал, заводского изготовления, используется вместо промежуточного вала между ЦН и силовой турбиной двигателя и мощность на валу рассчитывается:

$$N = M_{CT} \cdot \omega_{CT} = \frac{\pi \cdot M_{CT} \cdot n_{CT}}{30} = k_3 \cdot M_{CT} \cdot n_{CT},$$

где M_{CT} – крутящий момент на валу силовой турбины;
 n_{CT} – обороты силовой турбины.

СКП мощности, определенная измерением крутящего момента на силовом валу:

$$\sigma_N = \sqrt{\sigma_{n_{CT}}^2 + \sigma_{M_{CT}}^2 + \sigma_{k_3}^2}.$$

У коэффициента k_3 средняя квадратичная относительная погрешность по рекомендациям [5] равна 0,2%, $\sigma_{M_{CT}}$ - определяется с учетом показаний торсионного индукционного динамометра.

На основании имеющихся данных, воспользовавшись принципом равных влияний, выведены зависимости СКП мощности ГПА от измеряемых параметров. При допустимой погрешности итоговой величины (менее 5%) погрешности измеряемых величин параметров ГПА-Ц-16 сведены в таблицу 1.

Оценка погрешности трех рассмотренных способов определения мощности ГПА показала, что наименьшая погрешность обеспечивается методом №3 - прямого измерения крутящего момента. Остальные имеют приемлемую для технических инженерных измерений погрешность, но это только в том случае, если используются измерительные приборы с классом точности не более $\kappa \leq 1.5$ и при наличии характеристик узлов ГПА. В первых двух методиках определения мощности участвует большое количество взаимозависимых измеряемых параметров, следовательно, погрешность определенной мощности может достигать недопустимых значений. Чтобы на основе вышеуказанных методов провести теплотехнические расчеты мощности ГПА погрешности результатов измерений взаимозависимых измеряемых параметров должны составлять не более $\pm 2,5\%$ от измеряемой величины.

Необходимая точность измерения при испытаниях ГТУ

№	Погрешность измер. параметра	N по характеристике ЦН	N по внутр. мощности ЦН	N торс. вал
1	σ_n	1,0		1,0
2	σ_{Ti}	1,6	1,51	
3	σ_{Pi}	1,7		
4	$\sigma_{\Delta P}$		1,51	
5	σ_{P_k}		1,78	
6	σ_{k_k}		0,5	
7	σ_{kD}		0,2	0,2
8	σ_{nR_z}		0,5	
9	$\sigma_{(T_H-T_B)}$		2,11	
10	σ_{MCT}			1,1
$\sigma_{y, \%}$		2,93	3,10	1,5

Обработка данных теплотехнических измерений приведена для трех эксплуатационных режимов ГПА-Ц-16СТ ($n_{CT} = 4550, 4800, 5100$ об/мин). Состав природного газа, его теплофизические свойства определены специализированной лабораторией (протокол № 09-105-08 от 24 сентября 2018г). На рисунке 2 приведены результаты расчета мощности по трем методикам: 1- «ГТУ - нагнетатель»; 2- по внутренней мощности ЦН; 3- с помощью торсионного вала.

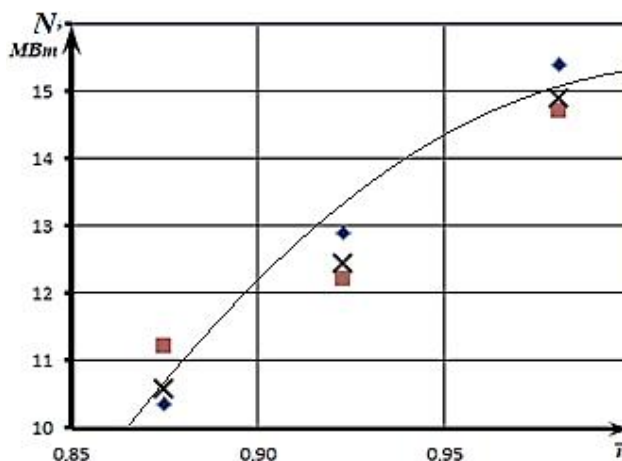


Рис. 2. Мощности ГПА-Ц-16СТ по режимам работы:

(\blacklozenge - метод 1, \blacksquare - метод 2, \times - метод 3 — расчетное значение N)

Наименьшее расхождение между рассчитанными величинами мощности наблюдается на частоте вращения близкой к номинальному режиму работы ГПА $n_{CT} = 5100$ об/мин ($\bar{n} = 1$). Для этого режима результаты мощности, получаемые

методами 1,2: «ГТУ - нагнетатель» и по внутренней мощности согласуются между собой в пределах 5%. Тем не менее на режиме частичной нагрузки $n_{СТ} = 4550, 4800$ об/мин ($\bar{n} < 1$) разность между рассчитанными величинами мощности для этих методов достигает более 8%. Объясняется это тем, что вышеуказанные методы являются косвенными, и не один из этих двух методов расчета мощности не может дать достоверной оценки технического состояния ГПА.

Метод определения мощности с помощью измерителя крутящего момента и частоте вращения СТ предпочтителен, так как имеет высокую точность, надежность полученных результатов и минимального числа измеренных параметров. Но данный способ применим только на заводах изготовителях ГТУ, при сдаточных испытаниях. Измерения мощности ГТД в процессе эксплуатации данным способом не проводились. Наличие достоверных данных мощности привода ГПА в режиме эксплуатации необходимо для управления и оптимизации загрузки ГПА и своевременного технического обслуживания по состоянию. Определение мощности с погрешностью, не превышающей 1,5%- 2%, позволит использовать достоверные значения мощности в диагностических моделях ГПА, для оценки его технического состояния.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сальников С.Ю., Щуровский В.А. Проблемы поддержания работоспособности газокompresсорного парка в современных условиях // Газотурбинные технологии. – 2018. – № 1. – С. 22–28.
2. Смирнов Е.А., Толстихин Ю.Ю., Блинов Ф.В., Шишов А.В. Решение актуальных задач параметрической диагностики газоперекачивающих агрегатов ГТК-25ИР // Газовая промышленность. – 2018 – № 2(764). – С. 63–65.
3. Стельмах М.В., Кривошеев И.А., Горюнов И.М. Совершенствование методов технической диагностики газоперекачивающих агрегатов с авиационным газотурбинным приводом АЛ-31СТ(Н) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=19028>
4. Избаш В.И., Жиленко В.Д., Родин С.Г., Хритин А.Г. Совершенствование методов расчета теплотехнических показателей газотурбинных двигателей при комплексных обследованиях ГПА // Газовая промышленность. – 2018. – № 6. – С. 43–46.
5. СТО Газпром 5.0-2008. Обеспечение единства измерений. Метрологическое обеспечение в ОАО «Газпром». Основные положения. – М.: ОАО «Газпром», 2009 (М.: Полиграф Дизайн). – 58 с.
6. Порядок проведения поверки средств измерений, требования к знаку поверки и содержанию свидетельства о поверке, утв. Приказом Министерства промышленности и торговли РФ от 02.07.2015 № 1815 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/420287558>
7. ГОСТ 20440-75. Установки газотурбинные. Методы испытаний. – М.: Изд-во стандартов, 1975. – 23 с.
8. Щуровский В.А., Синицын Ю.Н., Корнеев В.И., Черемин А.В., Степанова Г.С. Методические указания по проведению теплотехнических и газодинамических расчетов при испытаниях газотурбинных газоперекачивающих агрегатов. – М.: ВНИИГАЗ, 1999. – 50 с.
9. Пешехонов Н.Ф. Приборы для измерения давления, температуры и направления потока в компрессорах. – М.: Оборонгиз, 1962. – 184 с.
10. Каталог характеристик центробежных нагнетателей природного газа. – М.: Мингазпром, Союзоргэнерго, ВНИИГаз, 2008. – 98 с.
11. ГОСТ 30319.2-96. Газ природный. Методы расчета физических свойств. Определение коэффициента сжимаемости.
12. ГОСТ 30319.3-96. Газ природный. Методы расчета физических свойств. Определение физических свойств по уравнению состояния.
13. Методы определения эффективной мощности ГТД по внутренней мощности ЦН. СТО Газпром 2-3.5-253-2008. – 54 с.
14. Методические указания по проведению теплотехнических и газодинамических расчетов при испытаниях газотурбинных и газоперекачивающих агрегатов. ПР 51-31323949-43-99. ВНИ-

- ИГАЗ, 1999.
15. Шевцов А.П., Гонтарев В.И., Деревенец О.В., Сушков В.Н. Опыт эксплуатации бесконтактных измерителей крутящего момента БИКМ М-106М в составе ГПА на КС ОАО «Газпром» // Газотурбинные технологии. – 2011. – № 2. – С. 18–21.
 16. Ольховский Г.Г. Тепловые испытания стационарных газотурбинных установок. – М.: Энергия, 1971. – 408 с.
 17. Хворов Г.А., Юмашев М.В., Кузнецов О.А., Житомирский Б.Л. Методология проведения энергетических обследований технологических объектов // Газовая промышленность. – 2009. – № 5. – С. 68–72.
 18. Ефанов В.И. Вопросы реконструкции российской газотранспортной системы // Наука и техника в газовой промышленности. – 2015. – № 2. – С. 10–14.
 19. Микаэлян Э.А. Методика оценки режимов работы газотранспортных систем по критериям ресурсосберегающей технологии // Технологии нефти и газа. – 2005. – № 2. – С. 37–41.
 20. Газотурбинные технологии. Научно-техническая политика ОАО «Газпром» в области газоперекачивающей техники: аналитический обзор // Газотурбинные технологии. – 2010. – № 3. – С. 2–6.

Статья поступила в редакцию 1 сентября 2019 года

ERROR ESTIMATION OF MEASUREMENT OF POWER THE OPERATED GAS-DISTRIBUTING UNITS MAIN GAS PIPELINES

S.A. Gulina¹, L.P. Sheludko¹, V.M. Avdeev¹, G.M. Orlova¹, A.I. Ershov¹,
I.Y. Gorunova²

¹ Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya str., Samara, 443100, Russia

²Ural Federal State Technical University
19, Mira str., Yekaterinburg, 620000, Russia

Abstract. *At operation of the gas-distributing unit (GDU) existence of a reliable data of power of the gas-turbine drive is necessary for management of a duty of the gas transmission system and timely determination of technical condition of a gas-distributing inventory. In work the assessment of accuracy of determination of operational values of power of GDU by the techniques approved by the specifications and technical documentation of Gazprom in the conditions of the concrete compressor station is carried out. Taking into account the accepted assumptions: distribution of the making errors corresponds to the normal distribution law of Gauss and components of errors have no correlation communication, are considered as independent from each other, the main dependences of influence of biases of the GDU parameters (temperatures, pressure, rotation frequencies of rotors) are brought to an error of power rating of GDU. As the error of power rating depends on a method and conditions of measurement, quality of measuring apparatuses and other factors, power rating with a margin error 1.5%-2%, will allow to use its values in the GDU diagnostic models and regulation of a duty of the gas pipeline.*

Keywords: *gas-distributing unit, gas-turbine engine, centrifugal supercharger, power, relative mean square bias, gaged parameter.*

Svetlana A. Gulina (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.
Leonid P. Sheludko (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.
Vocotr M. Avdeev (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.
Gulllllysina M. Orlova (Ph.D. (Pedag.)), Associate Professor.
Anatoly I. Ershov, Postgraduate Student.
Irina Y. Goryunova (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.

REFERENCES

1. *Salnikov S.Yu., Shchurovsky V.A.* Problems of maintaining of operability of the gas-compressor park in the modern conditions // *Gas-turbine technologies.* – 2018. – No. 1. – P. 22–28.
2. *Smirnov E.A., Tolstikhin Yu.Yu., Pancakes F.V., Shishov A.V.* Solution of relevant problems of parametrical diagnostics of gas-distributing GTK-25IR units // *Gas industry.* – 2018. – No. 2 (764). – P. 63–65.
3. *Stelmakh M.V., Krivosheyev I.A., Goryunov I.M.* Perfecting of methods of technical diagnostics of gas-distributing units with the aviation gas-turbine AL-31ST (H) drive / (<https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=19028>).
4. *Izbash V.I., Zhilenko V.D., Rhodin S.G., Hritin A.G.* Perfecting of computational methods of heattechnical indexes of gas-turbine engines at comprehensive examinations of GPA // *Gas industry.* – 2018. – No. 6. – P. 43–46.
5. CTO Gazprom 5.0 2008. Ensuring unity of measurements. Metrological support in JSC Gazprom. Original positions. M.: JSC Gazprom, 2009 (M.: Polygraph Design). 58 p.
6. Order of carrying out checking of measuring instruments, requirements to the sign of checking and contents of the certificate on checking, Order of the Ministry of Industry and Trade of the Russian Federation of 02.07.2015 No. 1815 [Electronic resource]. Access mode: <http://docs.cntd.ru/document/420287558>
7. GOST 20440-75. Gas-turbine installations. Test methods. – M.: Publishing house of standards, 1975. – 23 p.
8. *Shchurovsky V.A., Sinitsyn Yu.N., Korneev V.I., Cheremin A.V., Stepanova G.S.* A study guide on carrying out heattechnical and gasdynamic calculations at tests of gas-turbine gas-distributing units. – M.: VNIIGAZ, 1999. – 50 p.
9. *Peshekhonov N.F.* Devices for tonometry, temperatures and flow directions in compressors. – M.: Oborongiz, 1962. – 184 p.
10. Catalog of characteristics of centrifugal superchargers of natural gas. – M.: Mingazprom, Soyuzorgenergaz, VNIIGAZ, 2008. – 98 p.
11. GOST 30319.2-96. Natural gas. Computational methods of physical properties. Definition of a compressibility coefficient.
12. GOST 30319.3-96. Natural gas. Computational methods of physical properties. Determination of physical properties on an equation of state.
13. Methods of determination of effective power of GTE on the internal power of TsN. HUNDRED Gazprom of 2-3.5-253-2008. – 54 p.
14. A study guide on carrying out heattechnical and gasdynamic calculations at tests of gas-turbine and gas-distributing units. PR 51-31323949-43-99. VNIIGAZ, 1999.
15. *Shevtsov A.P., Goptarev V.I., Derevenets O.V., Sushkov V.N.* Operating experience of contactless torque meters of BIKM M-106M as a part of GPA on KS JSC Gazprom // *Gas-turbine technologies.* – 2011. – No. 2. – P. 18–21.
16. *Olkhovsky G.G.* Heat tests of stationary gas-turbine installations. – Moscow: Energy, 1971. – 408 p.
17. *Hvorov G.A., Yumashev M.V., Kuznetsov O.A., Zhitomirsky B.L.* Methodology of carrying out power inspections of technological objects // *Gas industry.* – 2009. – No. 5. – P. 68–72.
18. *Efanov V.I.* Issues of reconstruction of the Russian gas transmission system // *Science and technology in a gas industry.* – 2015. – No. 2. – P. 10–14.
19. *Mikaelyan E.A.* A technique of assessment of duties of gas transmission systems by criteria of resource-saving technology // *Petroleum engineering and gas.* – 2005. – No. 2. – P. 37–41.
20. *Gas-turbine technologies. The scientific and technical policy of JSC Gazprom in the field of gas-distributing technique: the State-of-the-art review // Gas-turbine technologies.* – 2010. – No. 3. – P. 2–6.